

FUNDAMENTOS CONCEPTUALES Y DIDÁCTICOS

COMPLEJIDAD Y DUALIDAD EN EL SISTEMA TIERRA

Complexity and duality in the Earth System

José Luis San Miguel de Pablos (*)

RESUMEN

La expresión “Sistema Tierra” ha llegado a ser casi un lugar común, estos últimos años. Hay que tener en cuenta que por sistema se puede entender una ordenación creada por nosotros mismos y útil para organizar las ideas, o bien concederle al término un contenido ontológico tal como sugiere la Teoría General de Sistemas (TGS). El autor se decanta por la segunda opción, señalando de paso que la TGS sólo adquiere plena credibilidad al apoyarse en una concepción científica, más concretamente en la Termodinámica de procesos lejos del equilibrio. Partiendo de este enfoque, observa que el “objeto Tierra” presenta un curioso semblante dual, por el hecho de hallarse inmerso en dos flujos independientes de energía libre, el geotérmico y el solar, origen de dos estructuras disipativas globales distintas: la geotectónica y la que representa la biosfera, especialmente cuando se la contempla como una realidad que interactúa con el sustrato geológico. Esta observación conduce a apoyar un programa de investigación orientado a explorar los vínculos unificadores existentes entre estas dos megaestructuras disipativas planetarias.

ABSTRACT

Today, the term “Earth System” is used more and more. In fact, one can understand the word “system” either as an artificial arrangement set by ourselves in order to organise our concepts, or as a reflection of an underlying ontological reality, such as the General System Theory suggests to us. The author is inclined to this last viewpoint, although the TGS, in his opinion, only becomes fully deserving of trust if it rests on a scientific conception, such as the non-equilibrium Thermodynamics. This approach lead him to observe that the Earth displays, in fact, a dual appearance because of its immersion in two energetic fluxes, the geothermic one and the solar one, which yield respectively two global dissipative structures, geotectonics and biosphere (specially if its geological feedbacks are assumed). A research program pointing to explore the links between these two structures would be suitable in order to get knowing the real face of the natural Earth System.

Palabras clave: *Sistemas, estructuras disipativas, flujos energéticos, Geotectónica, Biosfera.*

Keywords: *Systems, dissipative structures, energetic fluxes, Geotectonics, Biosphere.*

Hace ya unos cuantos años, en un artículo aparecido en estas mismas páginas¹, expuse algunas de las ideas recogidas luego en una tesis doctoral defendida recientemente en la Facultad de Filosofía de la UCM, que lleva por título *La Tierra, objeto paradigmático*. Mi objetivo, hoy, es destacar la propuesta central (aunque no única) de la tesis. Se trata simplemente de otro punto de vista a aportar al debate en curso sobre el “sistema Tierra”, noción esta que se maneja cada vez más.

Una pregunta ineludible al tratar del *Sistema Tierra* es si nuestro planeta puede considerarse un

objeto autoorganizado. Planteada en otros términos: ¿responde la Tierra a los criterios que definen lo que, en las últimas décadas, se entiende por autoorganización?

Es obvio que para poder contestar esta pregunta hay que tener clara la definición de lo autoorganizado. Leyendo a autores como Ilya Prigogine, Edgar Morin, Ervin Laszlo y Francisco Varela, entre otros, uno tiene la impresión de que “objeto autoorganizado” es todo aquello que cuenta con mecanismos complejos de autorreparación y autorregeneración, que *se automantiene*, en una palabra, pero no

(*) Geólogo, Doctor en Filosofía por la UC de Madrid. Colaborador (Asistente honorífico) de Filosofía de la Naturaleza. Facultad de Filosofía de la Universidad de Sevilla. Pza. del Mirabrá, 1, 3º Izda. 41007 Sevilla. E-mail.: sanmigueldepab@andaluciajunta.es

(1) San Miguel de Pablos, J.L., “La perspectiva de la unificación de las Ciencias de la Tierra”, *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 1997 (5.3), pp. 190-194.

gratuitamente sino utilizando necesariamente a tal efecto algún *flujo de energía libre* (“exergía” la denominan Schneider y Kay en un interesante ensayo²), contando con un *gradiente*, que es lo que, al obligar al sistema inicial a “bifurcar” en busca de una optimización de las condiciones que permiten su disipación, hace que el sistema “explore” finalmente un camino disipativo estructural que implica una disminución local -incluso muy importante- de la entropía. Es así como el orden interno (lo que se conoce como la *neguentropía* del sistema) se incrementa de una forma que puede resultar espectacular, en el proceso de intercambios que “lo autoorganizado” (necesariamente *un sistema abierto*) mantiene con el medio.

Muchas son las acepciones que la fórmula “Sistema Tierra” conoce, en un momento como este, en el que ha hecho fortuna, si bien no todas nos interesan aquí por igual. Hay que tener en cuenta que el omnipresente término *sistema* no deja de ser bastante equívoco. Y que ha venido siendo así desde que su uso se generalizó a partir de la Ilustración. La palabra griega *zistema* significa simplemente “conjunto organizado”, y la definición que el enciclopedista Condillac aporta en su *Traité des systèmes* (1749-1754) no acaba de aclarar las cosas. “Sistema -dice- es lo que permite al espíritu humano captar el encadenamiento de los fenómenos”.³

Es evidente el intuicionismo implícito en esta definición; intuicionismo del que probablemente el ilustrado Condillac no era consciente del todo. Personalmente, no encuentro que esto constituya un grave inconveniente (más bien creo que habrá que reconocer finalmente el papel epistemológico ineludible que juegan los momentos intuitivos o de *insight*). El verdadero problema estriba, a mi modo de ver, en que por “sistema” se pueden entender dos cosas muy distintas: o bien un conjunto cuya organización no pasa de ser una apreciación convencional (“los sistemas no están en la naturaleza, sino en la mente de los hombres”, decía Claude Bernard), o bien una *realidad entitativa* cuya organización interna (necesariamente dinámica) la dota intrínsecamente de una dimensión ontológica. También hay interpretaciones ambiguas, búsquedas -a veces interesadas- de la indefinición, pero pienso que el anterior dilema siempre acaba por plantearse.

Y es que si por “sistema” entendemos un constructo intersubjetivo puramente convencional, entonces “sistema” puede ser cualquier cosa: basta con ponerse de acuerdo en llamarlo así. Pero si entendemos por tal un conjunto organizado en el que emergen propiedades e incluso cualidades que no estaban presentes en los objetos “simples” en él reunidos, entonces dicho sistema deja de ser fruto

de un convenio y pasa a constituir una entidad, a contar con una dimensión ontológica... Diremos entonces que “el todo es más que la suma de las partes” (el célebre *dictum* aristotélico que se convirtió en la frase predilecta de von Bertalanffy) y nos estaremos adentrando en la *sistémica*, el campo de estudio de la Teoría General de Sistemas (TGS) bertalanffiana.

Que la TGS encierra la ambiciosa pretensión de fundar una *ontología racional de niveles múltiples*, antirreduccionista por tanto, resulta obvio para cualquiera que conozca esta concepción. Ahora bien, la TGS sólo adquiere plena credibilidad al basarse en una teorización física. La “nueva termodinámica” de la escuela de Bruselas (Prigogine *et al.*) parece susceptible de aportar esa fundamentación.

Aunque Prigogine evita referirse explícitamente a la Teoría General de Sistemas, lo cierto es que el esquema que propone, según el cual cuando un conjunto de elementos, un “sistema” en sentido convencional, es llevado lejos de su estado de equilibrio inicial por efecto de la incidencia de un flujo de energía libre, el resultado es la aparición de un *abanico bifurcativo* de posibilidades de reestructuración, del que acaba realizándose una sola posibilidad que con frecuencia supone el nacimiento de un *todo integrado*, de una realidad entitativa con funcionamiento y semblante holístico, dotada de propiedades completamente nuevas, “emergentes”..., este esquema, digo, no deja de evocar el famoso *dictum* aristotélico.

Dice Prigogine:

...en rigor no se debería hablar de un sistema como “escenario de una actividad disipativa”, pues es la actividad disipativa lejos del equilibrio, y las correlaciones de largo alcance que suscita, lo que convierte una población de moléculas con interacciones ocasionales en un verdadero sistema en el seno del cual las moléculas mantienen interacciones. El sistema, en tanto que portador de sentido, en tanto que su estudio pone en juego instrumentos formales bien definidos, no es algo que preexista a su propio régimen de funcionamiento, puesto que es la intensidad de su actividad disipativa lo que le confiere ese mismo sentido.⁴

Parece, por tanto, evidente que estamos ante una teoría física, la “termodinámica de procesos lejos del equilibrio”, capaz de sustentar una *ontogénesis no reduccionista*. Ahora bien, para que esa ontogénesis pueda progresar, aparece como condición necesaria la presencia de gradientes de energía que alejen los “pre-sistemas” iniciales del equilibrio y hagan nacer abanicos bifurcativos.

(2) Schneider, E.D. & Kay, J.J., “Orden a partir del desorden: la termodinámica de la complejidad en biología” en M.P. Murphy & L.A.J. O’Neil (eds.), *La biología del futuro. “¿Qué es la vida?” cincuenta años después*, Tusquets, Metatemas, Barcelona, 1999.

(3) cit. por Le Moigne, J.L., en D. Lecourt (dir.), *Dictionnaire d’histoire et philosophie des sciences*, P.U.F., París, 1998, p. 901.

(4) Prigogine, I. & Stengers, I., *La nouvelle alliance*, Gallimard, París, 1986, p. 427. Trad. esp. : Alianza, Madrid, 1990.

TIERRA, TEORÍA DE SISTEMAS Y “NUEVA TERMODINÁMICA”

Cuando nos enfocamos en el estudio del “objeto Tierra”, reconocemos en él, de entrada, una forma autoorganizativa relativamente sencilla: la correspondiente a una estructuración dinámica geotectónica que no sólo organiza activamente las capas –o geosferas– sólidas exteriores, sino el globo en su conjunto.⁵

Es probable que el “termostato Tierra” haya funcionado manteniendo un régimen dinámico similar al actual, casi desde la formación del planeta. Existen, en efecto, sólidos argumentos que permiten suponer que una tectónica de placas ha existido de forma continuada en nuestro globo desde poco después de la etapa acrecional⁶, lo mismo que también ha habido “siempre” una cobertera oceánica, y que todo ello ha marchado en paralelo con la antigüedad cuasi originaria de la vida orgánica.

Ahora bien, el termostato geotectónico no es sino una megaestructura disipativa de estabilidad notabilísima, surgida en la Tierra en respuesta a la necesidad de evacuar de la manera más eficaz posible el flujo térmico interno, la energía calórica acumulada en el interior de la Tierra por diferentes causas, fundamentalmente dos: como remanente de la acreción primitiva (“calor residual”) y como subproducto de la desintegración de elementos radiactivos, si bien se han señalado otras causas concomitantes, como la cristalización o recristalización del núcleo interno. El hecho de que dicho termostato presente asimetrías dinámicas⁷ no influye decisivamente en su caracterización como una megaestructura disipativa planetaria que responde a un flujo geotérmico que, aunque seguramente es decreciente a muy largo plazo, no sigue un régimen lineal de decrecimiento, y sobre todo no disminuye rápidamente como creían los geofísicos de finales del siglo XIX y principios del XX.

Ahora bien, este gradiente energético no es el único en que la Tierra se encuentra inmersa. Existe también el flujo continuo de energía que llega a nuestro planeta procedente de la estrella única del sistema, el Sol. Dicho flujo, que afecta directamente a las geosferas, sólidas y fluidas, exteriores (la atmósfera, la hidrosfera, los suelos y la corteza), no ha mantenido, al parecer, la misma intensidad a todo lo largo de toda la historia de la Tierra, sino que ha experimentado un incremento que se suele acotar entre un 25 y un 30%. ¿Ha condicionado este

importante y persistente flujo de energía libre la aparición de estructuras disipativas directamente relacionadas con él, en las geosferas a las que baña? ¿Participa de algún modo en la configuración de la megaestructura disipativa “geotérmica”, la tectónica global? Son dos preguntas diferenciadas, aunque quizá no desconectadas. Me ocuparé, de entrada, de la primera.

La concepción del fenómeno de la vida, presente en casi todos los medios terrestres, *como una estructura disipativa global nacida en respuesta al flujo energético solar*, tiene defensores. El argumento principal que manejan es que, incluso si es probable que el gradiente energético que hizo surgir la vida no fuese el solar (ya que el “escenario primigenio” pudo ser, entre otros posibles, el del vulcanismo submarino), resulta incontrovertible, de todos modos, que la extensión global del fenómeno biológico ha sido posibilitada por la radiación que la Tierra recibe del Sol, y también que el máximo éxito evolutivo –en cuanto a expansión se refiere– lo han tenido aquellos *fila*, como las bacterias, las algas y las plantas vasculares, que utilizan la energía solar para realizar la función clorofílica, trófica y ecológicamente fundamental. Son básicamente estos grupos los que, además, promueven en mayor medida las “funciones geofisiológicas gaianas”; así, la regulación del albedo por la nubosidad, y las variaciones en la concentración de CO₂, ello sin contar con la evolución óxica de la atmósfera, que constituye una importantísima causa – seguramente la principal – de la retención del hidrógeno y, por tanto, del agua y de los océanos⁸, una de las claves de la eficacia del tercer planeta del sistema solar de cara a disipar la radiación solar que incide sobre él, y a mantener consiguientemente una temperatura superficial considerablemente más baja que la que le correspondería por su posición orbital.

En una comunicación personal reciente, Peter Westbroek, geofisiólogo de la Universidad de Leiden (Holanda), me hace notar que la energía solar es la principal fuerza motora del ciclo geodinámico externo (erosión, transporte y sedimentación, ya que el levantamiento está condicionado endógenamente). Y añade que dicho ciclo está solamente *influenciado* por la presencia y la acción de los organismos. Es así, indiscutiblemente, si bien cabe observar que el tramo externo del ciclo requiere del concurso de grandes cantidades de agua en estado líquido, que no habría estado presente por mucho tiempo (tenemos el ejemplo de Venus) si la vida, en

(5) Ver p. ej., Anguita, F., *Procesos geológicos internos*, Rueda, Madrid, 1991.

(6) Ver Anguita, F. & Sequeiros, L., “Nuevos saberes y nuevos paradigmas en Geología: Historia de las nuevas propuestas en las Ciencias de la Tierra en España entre 1978 y 2003”, en *Llull*, 2003, 26, pp. 279-307.

(7) *ibid.*, p. 295. Ver también San Miguel de Pablos, J. L., *La Tierra, objeto paradigmático (tesis doctoral)*, Facultad de Filosofía / UCM, 2004, pp. 368-370.

(8) *Ya que cuando se libera hidrógeno en la descomposición de las moléculas -agua y metano principalmente- que lo contienen (a causa de la radiación ultravioleta o de otros factores), una atmósfera rica en oxígeno molecular, tiende a “no dejarlo escapar”, al combinarse enseguida con él para formar moléculas de agua. Lo que no sucede si la atmósfera es pobre en oxígeno o no lo contiene en absoluto.*

su proceso de evolución, no hubiese fabricado una auténtica trampa hídrica en el -por eso mismo- llamado “planeta azul”.⁹

Vayamos ahora con la segunda pregunta: ¿juega algún papel la energía solar en la tectónica de placas? Ya sabemos que el gradiente energético impuesto por el Sol no es la *driving force* de la geotectónica, pero ¿la condiciona o la influencia de algún modo? Viene a ser lo mismo que interrogarse sobre la interacción entre una biosfera básicamente alimentada por el flujo solar, y una geodinámica interna cuyo motor esencial es el flujo geotérmico.

La mera formulación de este interrogante tiene, a mi modo de ver, su importancia en orden a superar el convencionalismo a la hora de tratar el “Sistema Tierra”. Si éste refleja algo más que una manera de hablar o una moda pasajera, si da cuenta de una cierta ontología¹⁰, entonces habrá que tomar buena nota del dato de que en nuestro planeta *dos* flujos de “exergía” (o de “energía libre”) distintos, el geotérmico y el solar, sustentan *dos* megaestructuras disipativas paralelas, cada una de las cuales responde a un flujo distinto, y que no son sino, por un lado, la organización dinámica de las geosferas sólidas que, hasta el momento, seguimos llamando “tectónica de placas”, y por el otro, la extensión global del fenómeno de la vida orgánica (la *biosfera*) junto con sus *feedbacks* geológicos que justifican el que cada vez se tome más en serio la noción de una “Gaia débil”¹¹, de un sistema (auto)regulador geobiológico.

Así pues ¿existe un “Sistema Tierra” o hay *dos* en realidad? ¿No es acaso más dual que unitario el semblante de nuestro planeta? Es este “dualismo sistémico” terrestre, esta impresión de dualidad que transmite la Tierra por el hecho de contar con dos megaestructuras disipativas distintas surgidas en respuesta a dos gradientes diferenciados¹², lo que me ha llevado a proponer el nombre mitológico de *Tártaro* para designar la dinámica integrada que despliegan las geosferas sólidas. A fin de cuentas, si se acepta (y de hecho, ello está sucediendo en la práctica) el término “Gaia” para designar la realidad entitativa planetaria global de algún modo controlada por la biosfera y que responde al flujo solar, entonces -por mor de coherencia- se debería aplicar el nombre propio (“Tártaro”) del extraño *hermano oscuro* de la Madre Primordial de la *Teogonía* hesiódica, que mora en sus entrañas, diferenciándose no

obstante de ella¹³, a la otra megaestructura disipativa del planeta, la geotectónica, que responde a “la energía de las profundidades”.

Los bucles de retroalimentación que conectan la biosfera con el sustrato geológico activo (o a Gaia con Tártaro) son, en todo caso significativos. Una regulación térmica finalmente favorecedora de la persistencia de la vida en su conjunto (es decir, una regulación “gaiana”), en la que un papel importante lo juega el porcentaje del CO₂ atmosférico, es uno de los elementos de ese vínculo, desde el momento que el ciclo del CO₂ posee un tramo endógeno ligado a la subducción. En este sentido, la escuela geofisiológica holandesa insiste en el papel de las algas unicelulares productoras de carbonato cálcico (las cocolitóforas) como biorreguladores climáticos a gran escala, ya que la expansión espectacular de estos organismos a mediados del mesozoico provocó una intensa “lluvia” de CO₃ Ca en los fondos marinos que hizo que ingentes cantidades de dicha sustancia fuesen subducidas, lo que originó a su vez emisiones volcánicas masivas de CO₂ en el Jurásico y en el Cretácico, cuando el clima viró a cálido, desaparecieron los casquetes polares y subió el nivel del mar.¹⁴

Pero ¿son suficientes estos bucles para realizar una unificación completa del *sistema natural Tierra*? Pienso que un resto de dualidad permanece de todos modos, desde el monto que están presentes dos flujos de energía libre, dos gradientes, cada uno de los cuales se encuentra en la base de una estructura disipativa global distinta. Cabe, por otra parte, preguntarse (y se trata, por supuesto, de una pregunta más “filosófica” que “científica”) si la unidad perfecta es realmente una condición necesaria para que exista un *sistema verdadero*, en el sentido de la TGS. Un “sistema verdadero” es una realidad holística de contenido entitativo, y conviene en este punto recordar una frase de Leibniz: “Lo que no es verdaderamente *un ser*, tampoco es verdaderamente *un ser*”.¹⁵ Personalmente alimento dudas sobre el fondo de esta afirmación del gran filósofo germano del XVII, que encuentro demasiado tajante. Porque la incompletitud, los contrapuntos y los desgarros se nos presentan por doquier en toda la escala ontológica, hasta el punto que se diría que son parte constitutiva de ella. Es por eso que propongo en la tesis una afirmación más matizada: yo diría que lo que no tiende a la unidad funcional, lo que no se orienta a la unificación ontológica (necesariamente “holis-

(9) Ver nota anterior.

(10) Lo cual, dicho sea de paso, podría justificar la afirmación definitiva de una geo-logía, de una ciencia natural enfocada sobre el nivel sistémico correspondiente a la Tierra.

(11) Es decir, de una “Gaia cibernética” (o mejor, sistémica), en contraposición a la “Gaia fuerte”, la diosa Gaia recuperada de las tradiciones paganas por el movimiento parareligioso New Age.

(12) En la superficie terrestre encontramos otro factor de dualidad sumamente llamativo: la bimodalidad de las cotas topográficas de los océanos y de los continentes, explicable a partir del modelo geotectónico. A esta bimodalidad se superpone (aproximadamente) la presencia / ausencia de agua líquida.

(13) Ver Hesíodo, *Teogonía*, especialm. 116 y 820.

(14) Ver Westbroek, P., *Life as a Geological Force*, Norton, Nueva York, 1992, pp. 84-88.

(15) Carta de Leibniz a Arnauld, 30 de abril de 1687, *Die Philosophischen Schriften*, II.

tizante”), no es verdaderamente un ser. Ahora bien, dicha unidad no viene dada, y me parece que tanto la naturaleza como la vida humana suministran ejemplos numerosos que avalan este punto de vista. Para no entrar en evocaciones antropomórficas, valga hacer referencia a la tendencia de los orbitales atómicos exteriores a completarse por captación, donación o compartición de electrones, una tendencia -explicable a partir de los principios de la física cuántica- que se halla en la base del “nivel químico” de la evolución de la materia.

La investigación sistemática del papel que juegan factores ligados a la biosfera en el ritmo y las características de algunos de los procesos de la geodinámica interna, y a la inversa, el de los fenómenos y ciclos geológicos endógenos de cara a la evolución de la vida, así como el de sus eventuales bucles de retroacción y mutua regulación, abre un programa de investigación apasionante, que no sólo es susceptible de proporcionar la necesaria perspectiva para poder percibir la consistencia de un *sistema Tierra* no convencional sino enraizado en la naturaleza (y por ende, definitorio de un nivel natural de organización), sino que además encuentra una aplicación privilegiada en la elaboración de modelos de evolución del clima.

BIBLIOGRAFÍA

- C.C. Albritton (ed.), (1970). *Filosofía de la Geología*, Cía. Editorial Continental, México.
- Anguita, F. & Moreno, F., (1991). *Procesos Geológicos Internos*, Rueda, Madrid.
- Anguita, F., (2002). *Biografía de la Tierra*, Santillana / Aguilar, Madrid.
- Anguita, F. & Sequeiros, L., “Nuevos saberes y nuevos paradigmas en Geología: Historia de las nuevas propuestas en las Ciencias de la Tierra en España entre 1978 y 2003”, *Llull*, 26, 2003, 279-307.
- von Bertalanffy, L., (1992). *Perspectivas en la teoría general de sistemas*, Alianza, Madrid.
- Deparis, V. & Legros, H., (2000). *Voyage à l'intérieur de la Terre*, CNRS Éditions, París.
- von Engelhardt, W. & Zimmermann, J., (1988). *Theory of Earth Science*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Freeman J. Dyson, (1999). *Los orígenes de la vida*, Cambridge Univ. Press, Madrid.
- Hallam, A., (1985). *Grandes controversias geológicas*, Labor, Barcelona.
- Hallam, A., (1989). *De la deriva continental a la tectónica de placas*, Labor, Barcelona.
- G.J. Klir (dir.), (1978). *Tendencias de la teoría general de sistemas*, Alianza, Madrid.
- Laszlo, E., (1988). *Evolución. La gran síntesis*, Espasa Calpe, Madrid.
- Lovelock, J., *Gaia*. (1983). *Una nueva visión de la vida sobre la Tierra*, Hermann Blume, Madrid.
- Lovelock, J., (1992). *Gaia. Una ciencia para curar el planeta*, Integral, Barcelona.
- Lovelock, J., (1993). *Las edades de Gaia*, Tusquets, Barcelona.
- Morin, E., (1977 y 1980). *La méthode*, vols. 1 (*La nature de la Nature*) y 2 (*La vie de la Vie*), Seuil, París.
- Prigogine, I. & Stengers, I., (1986). *La novelle alliance*, Gallimard, París.
- San Miguel de Pablos, J.L., (1997). “La perspectiva de la unificación de las Ciencias de la Tierra”, *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, (5.3), pp. 190-194.
- San Miguel de Pablos, J. L., (2004). *La Tierra, objeto paradigmático* (tesis doctoral), Facultad de Filosofía / UCM.
- Schneider, E.D. & Kay, J.J., (1999). “Orden a partir del desorden: la termodinámica de la complejidad en biología” en M.P. Murphy & L.A.J. O'Neill (eds.), *La biología del futuro. “Qué es la vida” cincuenta años después*, Tusquets, Barcelona.
- Schrödinger, E., (1984). *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona.
- Sequeiros, L., (2002). “Las cosmovisiones científicas o macroparadigmas: su impacto en la enseñanza de las ciencias de la Tierra”, *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, (10.1), pp. 17-25.
- Sequeiros, L. & Pedrinaci, E., (1999). “De los volcanes de Kircher a la Gaia de Lovelock”, *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, (7.3), pp. 187-193.
- Tyler Volk, (2000). *Gaia toma cuerpo. Fundamentos para una fisiología de la Tierra*, Cátedra, Madrid.
- Wagensberg, J., (1985). *Ideas sobre la complejidad del mundo*, Tusquets, Barcelona.
- Wegener, A., (1983). *El origen de los continentes y océanos*, Pirámide, Madrid.
- Westbroek, P., (1992). *Life as a Geological Force*, Norton, Londres/Nueva York.
- T. Wilson (ed.), (1974). *Deriva continental y tectónica de placas*, Hermann Blume, Madrid. ■