

NUEVOS SABERES Y NUEVOS PARADIGMAS EN GEOLOGÍA: HISTORIA DE LAS NUEVAS PROPUESTAS EN LAS CIENCIAS DE LA TIERRA EN ESPAÑA ENTRE 1978 Y 2003

LEANDRO SEQUEIROS
FRANCISCO ANGUITA

RESUMEN

En los últimos 25 años (desde 1978 a 2003) los cambios en las grandes concepciones científicas de las ciencias de la Tierra han sido profundas. Estas ideas han llegado a la comunidad científica española con gran rapidez, lo que denota una gran homogeneidad de este grupo de investigadores en geología así como la permeabilidad de éstos a la innovación científica. Este trabajo pretende indagar en los cambios de las concepciones geológicas en España, los nuevos saberes y nuevos paradigmas, tal como se desprende de las investigaciones didácticas sobre las ciencias de la Tierra y las propuestas educativas para las generaciones jóvenes.

En una primera parte, resumimos la historia de la construcción de los grandes paradigmas geológicos hasta los años setenta del siglo XX. Y en la segunda parte, sistematizamos los nuevos saberes y nuevos paradigmas en la geología y su introducción en España al final del siglo

ABSTRACT

In the last 25 years (from 1978 to 2003), deep changes have taken place within the big scientific conceptions of the Earth Sciences. These ideas have very quickly reached the Spanish scientific community, which denotes both the great homogeneity of this team of researchers in the geological field and their permeability in scientific innovation. This paper intends to look into the changes in the geological conceptions in Spain and the new knowledge and paradigms, as follows from the didactic research on the Earth Sciences and the educational proposals for the young generations.

The first part is a summary of the history of the construction of the great geological paradigms up to the seventies, and in the second part we systematize the new knowledge and paradigms in geology and their introduction in Spain at the end of the 20th century. We have selected the advancement in Plate Tectonics,

XX. Hemos elegido los avances en tectónica de placas, las ciencias de la Tierra, la geoplanetología, la geología y el medio ambiente y las aportaciones de la paleontología a las nuevas ciencias.

geoplanetology, environmental geology and the contributions of palaeontology in the new sciences.

Palabras clave: Historia, Geología, Didáctica, España, Paradigmas, Tectónica de Placas, Sistemas, Siglo XX, Siglo XXI.

0. Introducción

En los 25 años que discurren desde la publicación del primer tomo de la revista *Llull* hasta hoy, han sido muchas las convulsiones que han agitado las aguas de una disciplina científica poco dada a los cambios rápidos como es la geología. La convergencia de disciplinas agrupadas bajo el arco de las ciencias de la Tierra (geofísica, paleobiología, geoplanetología, geoquímica, bioquímica, geoinformática, genética de poblaciones, y otras) ha dado lugar a la emergencia de nuevos saberes geológicos y consecuentemente a nuevas formas de interpretar los complejos procesos del planeta Tierra en el contexto de la geología planetaria. Es más: el desarrollo de nuevos instrumentos de observación y medida de los fenómenos naturales (como la microelectrónica) han propiciado un avance en algunas disciplinas hasta límites no sospechados hace unas décadas [UDÍAS, 2002].

No es una tarea fácil elaborar una síntesis de lo que ha supuesto la emergencia de nuevos métodos y saberes en el campo de la geología. Más aún, no es fácil describir la evolución de la historia de las ideas geológicas y de la historia de la geología en España en los últimos 25 años. Los índices de la revista *Llull* correspondientes a los años 1977-2003 arrojan una escasa proporción de trabajos de índole geológica. Sólo hemos contabilizado una docena. Normalmente son trabajos monográficos sobre un autor sin que haya habido, hasta el momento, un intento de síntesis globalizadora de la evolución de la modernidad en geología en España. Resultados similares se han obtenido acudiendo a otras fuentes, como el *Newsletter* de INHIGEO (Comisión Internacional de la UNESCO para la Historia de la Geología) o los índices de las comunicaciones del XIX Congreso Internacional de Historia de la Ciencia promovido por la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas celebrado en

Zaragoza en agosto de 1993 o los índices de las revistas geológicas como *Estudios Geológicos*, el *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica)*, la *Revista de la Sociedad Geológica de España*, *Geogaceta*, etc.

En este trabajo, conmemorativo de los 25 años de la revista *Llull*, hemos acudido a otra fuente: nos proponemos indagar las líneas de evolución de la nueva problemática de la geología en España en el último cuarto de siglo tal como se refleja de modo indirecto en una revista de reciente aparición que, sin ser de carácter histórico sino didáctico, parece que ha recogido muchos de los nuevos conceptos y paradigmas de la Geología. Nos referimos a *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (ECT, en adelante) editada por la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (AEPECT). El primer número de la misma vio la luz hace diez años, en febrero de 1993. Desde entonces hasta el momento se ha publicado regularmente a razón de tres volúmenes al año al que se han de añadir algunos números extraordinarios con ocasión de los Simposios bianuales. La edición de estos tomos, así como los volúmenes de Actas de los Simposios, ha corrido a cargo de un grupo entusiasta de profesores de educación secundaria y universitaria que desde 1990 se constituyeron como la AEPECT.

La hipótesis de que la historia de las ciencias (y en concreto de la historia de la geología) puede ser una «herramienta» poderosa para la enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias de la Tierra está presente desde los primeros años en los trabajos publicados [SEQUEIROS, 1994; 1995; 2002a]. A ello han contribuido especialmente los profesores Francisco Anguita [1983; 1995], Cándido Manuel García Cruz [1998a; 2001a; 2001b], Emilio Pedrinaci [1992; 1998; 2001] y Leandro Sequeiros [1984; 1995a; 2002a y 2002b]. La pretensión didáctica prioritaria que se ha mantenido desde la AEPECT es que los estudiantes (y especialmente los de educación secundaria) tengan acceso a los saberes y paradigmas más novedosos en geología dentro del marco más amplio de las ciencias de la Tierra y se expresa en las orientaciones de los editores de la revista ECT. De alguna manera, ésta recorre los grandes saberes que en estos últimos 25 años han ido haciendo de las ciencias de la Tierra un sólido armazón conceptual y metodológico dotado de su propia racionalidad [SEQUEIROS, 2002d]. A estos grandes saberes y paradigmas difundidos desde las páginas de ECT nos referimos en nuestro trabajo.

1. La historia de la construcción de los grandes paradigmas geológicos hasta los años setenta del siglo XX

No será posible entender lo que ha sido el avance histórico y científico de la geología en España en los últimos 25 años si se elude la referencia a lo que ha sido la construcción de los grandes paradigmas de las ciencias de la Tierra en los siglos anteriores. A ello hemos aludido con anterioridad en otros trabajos [ANGUITA, 1988, 1990, 1996; ANGUITA y ARSUAGA, 2000; SEQUEIROS, 2002a, 2002b, 2002c, 2003] muchos de ellos publicados en ECT.

Las ciencias de la Tierra, como todo conocimiento organizado, no son obra de una sola persona sino de muchas a lo largo de mucho tiempo generando múltiples controversias [HALLAM, 1985; CAPEL, 1980, 1985; SEQUEIROS, 2000; PEDRINACI, 2001, 49-66]. Tal vez, las más interesantes para el desarrollo de las ideas sobre el conocimiento de los procesos que han dado lugar a las ideas actuales sobre la configuración de la Tierra sean las referentes a los debates entre neptunistas, vulcanistas y plutonistas, las mantenidas entre catastrofistas y uniformitaristas y las que se centraron en la edad de la Tierra [PELAYO, 1984; GARCÍA CRUZ, 2000, 2001a, 2001b].

A lo largo del pensamiento científico sobre la Tierra como planeta del Sistema Solar, los geólogos, los filósofos y los teólogos han tenido muchos puntos de conflicto y desencuentro. Pero también estos debates han cooperado a llegar a consensos fecundos que han hecho avanzar el conocimiento. Durante los siglos XVII y XVIII, los primitivos geólogos propusieron los que se denominan *modelos de la Tierra* [ELLENBERGER, 1994]. Pero hasta finales del siglo XVIII (sobre todo con Hutton), y hasta el siglo XIX (sobre todo con Lyell y Darwin), no se encontraron los argumentos científicos que permitieron contrastar las hipótesis más relevantes [CABEZAS OLMO, 2002].

Una de las preguntas más radicales es: si como dijo Newton hay leyes en la naturaleza que tienen vigencia en todos los puntos del universo actual, ¿puede decirse que esas mismas leyes han existido también hacia atrás, en el abismo del tiempo pasado? ¿Seguirán vigentes en el futuro?

A comienzos del siglo XVIII la hipótesis diluvista era defendida firmemente por muchos autores, tal como hemos mostrado en otro lugar [SEQUEIROS, 2000, 2002c]. Entre ellos cabe destacar, por la difusión de sus ideas en España, a Johann Jakob Scheuchzer (1672-1733) y al franciscano José Torrubia

(1698-1761) [SEQUEIROS, 2001, 2002c], autor del *Aparato para la historia natural española* de 1754, primer tratado de paleontología diluvista en castellano.

El siglo XVIII fue testigo de dos tipos de debate igualmente apasionados en el campo de las ciencias de la naturaleza: el sostenido por Carl von Linneo y Jean Louis Leclerc, conde de Buffon, en torno al creacionismo teológico estricto frente al progresionismo materialista; y el debate entre las ideas transformistas de Lamarck frente al catastrofismo de Cuvier [PELAYO, 1991; PEDRINACI, 1992, 1998; CABEZAS OLMO, 2002]. La «Teoría de la Tierra» de Buffon [BUFFON, 1779, 1997; SEQUEIROS, 2000, 2002c] sigue los planteamientos clásicos del fuego interior ocasionado por la permanencia de fuego interior, de modo que para este autor, el calor del sol es despreciable en comparación del calor emanado por el centro de la Tierra [PEDRINACI, 1992, 1998].

Una explicación coherente con ésta de la dinámica terrestre fue expuesta por el escocés James Hutton (1726-1797) en su *Theory of the Earth* (1795). La postura de Hutton es totalmente diferente. Partidario de la existencia de un foco ígneo central en la Tierra, herencia del antiguo astro incandescente que se apaga, según las teorías de Laplace (1749-1827), Hutton pensaba que es el *calor central* la fuente de energía que suministra fuerza a la Tierra [HALLAM, 1885; GARCÍA CRUZ, 2001b; GOULD, 1992; CABEZAS OLMO, 2002]. El calor interno consolida los sedimentos y los eleva hasta la superficie, y las rocas plutónicas y volcánicas proceden de los focos ígneos del centro de la Tierra. De ahí que su sistema sea denominado *Plutonismo*. El gran valor de Hutton está en descartar para los procesos de la Tierra (y en particular para los energéticos) un origen extranatural o sobrenatural. Todo se explica en términos newtonianos, por la *vera causa*, las causas naturales [CABEZAS OLMO, 2002].

La *Teoría de la Tierra* que había propuesto Hutton postulaba tres elementos que serán objeto de críticas por unos y de desarrollo por otros: primero, la existencia de un foco de calor interno en la Tierra que consolidaba los estratos; segundo, la existencia real de continuos ciclos geológicos, y en consecuencia de una uniformidad en la actividad de los agentes físicos; y tercero, la necesidad de atribuir a la Tierra una edad indefinida, sin que se pueda demostrar que existe un principio y un final [GOULD, 1992; SEQUEIROS, PEDRINACI, ÁLVAREZ y VALDIVIA, 1997]

Los últimos años del siglo XVIII y primera mitad del siglo XIX marcan el inicio de la geología moderna con el establecimiento de sus principios básicos.

Esta visión de conjunto está presente en los cuatro capítulos históricos con que Charles Lyell prologa el primer volumen de los *Principles of Geology* (1830) y en las respuestas a este volumen del filósofo natural William Whewell (1794-1866) [SEQUEIROS, 1999b; CABEZAS OLMO, 2002; VIRGILI, 2003]. Lyell introduce un concepto científico y filosófico que es a la vez principio metodológico y proyecto de investigación traducido al castellano como *Uniformitarismo*. Este principio se presenta con varios significados: como *uniformidad de ley* (la invarianza histórica de las leyes de la naturaleza), *uniformidad de procesos* (el principio metodológico de la simplicidad); como *uniformidad de intensidad* (referido a la tasa media de velocidad de los procesos, el gradualismo); y el cuarto significado, el más problemático, el de *la uniformidad de estado o estado estacionario* (el cambio en la Tierra se da de manera lenta, gradual y continua a lo largo del tiempo geológico, pero no existe en estos procesos ninguna *direccionalidad*). Durante muchos años, Lyell se opuso a cualquier tipo de direccionalidad en los procesos naturales y, sobre todo, de los procesos biológicos [GARCÍA CRUZ, 1999, 2001a].

Por largo tiempo se mantuvo la idea de que la Tierra había sido creada por Dios tal como la vemos y que sólo había acontecido un proceso de *degeneración* [CAPEL, 1980, 1985; SEQUEIROS, 2002c]. Las auténticas teorías orogénicas, que implicaban la intervención de una energía «constructiva» de la Tierra, no aparecen en el pensamiento geológico hasta bien avanzado el siglo XIX. Cuando a la interpretación de las causas de los terremotos y de los volcanes se añade la pregunta sobre el origen de las cadenas montañosas, empieza a plantearse la posibilidad de la existencia de procesos constructivos en la corteza terrestre. En lo que respecta a la formación de las montañas, Charles Lyell no pareció nunca demasiado preocupado por dar una explicación, con tal de que no se acudiese a explicaciones «catastrofistas». Todo dependía de la continuidad de acumulación de pequeños esfuerzos dilatados durante millones de años. Desde este punto de vista, comparó la formación de las cadenas montañosas con el levantamiento isostático de la península escandinava [SEQUEIROS, PEDRINACI, BERJILLOS, GARCÍA DE LA TORRE, 1997b].

1.1. Nuevos tiempos: nuevos paradigmas

En España, las ideas de modernidad geológica de Charles Lyell fueron introducidas tempranamente merced a la traducción que Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859) publicara en 1846 de los *Elementos de Geología* [VERNET, 1975:248 ss.; PELAYO, 1984, 1991, 1996]. Pero en esos tiempos aparecen otros

paradigmas científicos que merecieron la atención de los geólogos españoles, como son los catastrofistas [SEQUEIROS, 1984; PEDRINACI, 1992; GARCÍA CRUZ, 2000]. No es posible entender lo que en las postrimerías del siglo XX supuso la geología en España sin acudir, aunque sea someramente, a una descripción de los avatares de las ciencias de la Tierra durante el siglo XIX y el siglo XX. Para mayor claridad se ha sistematizado esta información en tres grandes capítulos que agrupan a los partidarios de tres paradigmas explicativos del funcionamiento dinámico de la Tierra [PELAYO, 1984, 1991, 1996; HALLAM, 1985; GOHAU, 1987; ELLENBERGER, 1994; GARCÍA CRUZ, 1998b, 1998c, 1999, 2000, 2001a, 2001b; PEDRINACI, 1992, 1998, 2001]. Estas sistematizaciones tienen el peligro de mutilar la visión global pero introducen una mayor claridad expositiva.

1.2. Los geólogos y las teorías sobre degeneración y la contracción de la Tierra

Un amplio grupo de debates geológicos desarrollados en los siglos XIX y XX, y que inciden en la geología española de finales del siglo XX, pretenden dar respuestas al problema del origen y la naturaleza de las fuerzas que dan lugar a la formación de las montañas. Una de las hipótesis más influyente por su coherencia interna fue la de la *contracción* de la corteza de la Tierra. El ingeniero de minas francés Leonce Elie de Beaumont (1798-1874) propuso en 1829 la *teoría de la contracción*, que desarrollaría con más profusión en un trabajo publicado 25 años después [PEDRINACI, 2001]. Su propuesta se basaba en las ideas defendidas por Buffon y luego por Laplace según la cual la Tierra estaría originalmente fundida, y posteriormente, lenta pero inexorablemente, iba perdiendo calor. El enfriamiento provocaría una pérdida de volumen de modo que el exterior se arruga. Buffon había calculado una edad de 75.000 años (una cantidad escandalosa para su época). Pero Darwin [HALLAM, 1985] lo alargó hasta 300 millones de años (cantidad de tiempo necesaria para explicar los complejos procesos evolutivos).

A partir del gradiente de temperatura observado en la superficie, William Thomson (1824-1907), más conocido como Lord Kelvin, calculó en 1890 el tiempo que tardaría en enfriarse la Tierra, originalmente en estado de fusión hasta su situación actual. El resultado fue de sólo entre 20 y 200 millones de años, cifras que chocaban con los datos geológicos. Los cálculos más científicos de la edad de la Tierra fueron presentados por Lord Kelvin, que promovió un gran debate científico y dio a la Tierra una edad de 98 millones de años, basado en el agotamiento de los recursos energéticos del planeta y del Sol.

El descubrimiento de la radiactividad por Becquerel en 1896 y de su transformación en calor por Pierre y Marie Curie resolvieron la controversia. Gran parte del calor emitido por la Tierra se debe a fenómenos de desintegración atómica y sólo una parte a restos del calor originario de su formación. Este último obedece al enfriamiento paulatino de la Tierra originalmente caliente o que ha pasado por una fase en la que gran parte de su volumen se hallaba en estado de fusión o semifusión.

También a mediados del siglo XIX el profesor de la Universidad de Yale James D. Dana (1813-1895) defendió la *teoría contraccionista*. Consideraba que los continentes correspondían a las zonas de la corteza que primero se enfriaron. Las contracciones posteriores provocarían hundimientos de la corteza que ocupa los océanos. Al reducirse el volumen del interior terrestre, los continentes sufrirían enormes presiones. Y como consecuencia de ello, se formarían las cordilleras «como las arrugas que se originan en la piel de una manzana al secarse». Los entusiastas de la teoría de la contracción calcularon que, al enfriarse hasta la temperatura actual a partir de un estado de fusión, habría tardado unos cien millones de años y que la circunferencia de la Tierra se habría contraído unos cuantos cientos de kilómetros.

La teoría de la contracción recibió un gran impulso con la obra del prestigioso geólogo austriaco Eduard Suess (1831-1914) que publicó entre 1885 y 1909 su obra *La faz de la Tierra*. Para Suess, la Tierra estaba estratificada en tres capas concéntricas: la corteza superior, el manto intermedio y el núcleo central. Grandes bloques de la corteza original se iban hundiendo a medida que se enfriaba el interior terrestre, dando lugar a las cuencas oceánicas. Para Suess «asistimos al hundimiento del globo terrestre». La concepción gravitatoria como origen de las deformaciones estaba muy presente.

Suess pensaba que en el pasado había habido dos supercontinentes: *Gondwana* y *Atlantis* que luego se fragmentaron y cuyos bordes se hundieron. Estos grandes supercontinentes habían estado allí desde siempre, pero que las semejanzas de fauna y flora exigían la presencia pretérita de unos supuestos *puentes intercontinentales* que posteriormente se habrían hundido en las cuencas oceánicas [SEQUEIROS, GARCÍA DE LA TORRE y PEDRINACI, 1995; GARCÍA CRUZ, 1998b].

Un geólogo del siglo XIX que tuvo influencia en la geología española fue Gabriel-Auguste Daubrée (1814-1896) [SEQUEIROS, 2002f]. Sus estudios de

geología experimental, en los que relaciona el calor de la Tierra con el cambio en las rocas y las estructuras influyó sobre José Macpherson (1939-1902) y sobre la geología española de finales del siglo XIX [ORDÓÑEZ, 2002].

1.3. *Hacia una teoría orogénica constructiva: la isostasia*

Pero en los últimos años del siglo XIX aparece un paradigma alternativo que aborda el problema desde otra perspectiva: ¿Cómo se puede explicar la *elevación* topográfica de inmensas moles de roca, la formación de enormes pliegues, e incluso el *desplazamiento* de ellas durante kilómetros de cordilleras? Diversos geólogos habían estudiado la deformación de la corteza terrestre y se preguntaban sobre el origen de las inmensas fuerzas necesarias para ello [GARCÍA CRUZ, 1998b].

Parece que fue Bailey Willis, geólogo del U. S. Geological Survey, el primero que en la década de 1890 intentó reproducir en el laboratorio el plegamiento de los Apalaches. En los primeros años del siglo XX, Willis llegó a la atrevida hipótesis de que la formación de las cordilleras estaba ligada al calor generado en el interior de la Tierra por la desintegración radiactiva. En 1938 sugirió que las grandes bolsas de magma que ascendían del interior de la Tierra producían una expansión de las rocas de la corteza que daban lugar a presión lateral lo bastante fuerte como para producir cordilleras. Aparecían las teorías de tipo constructivo que atribuían a la energía interna de la Tierra la capacidad de generar grandes fuerzas formadoras de cordilleras.

Pero no nos adelantemos a los acontecimientos. En el curso de una expedición a los Andes, a mediados del siglo XVIII [PEDRINACI, 2001], el geógrafo Pierre Bouguer observó que al pie de la gran cordillera la plomada se desviaba de la vertical menos de lo que cabía esperar. Los cartógrafos sabían que el hilo de la plomada, que normalmente apunta hacia el centro de gravedad de la Tierra, en la proximidad de masas rocosas importantes experimenta una desviación debido a la atracción gravitatoria que éstas ejercen.

Esta anomalía exigía una explicación: y Bouguer tuvo la osadía de proponer la idea de que las montañas estudiadas debían estar casi huecas, lo que le hizo víctima de no pocas burlas. Un siglo más tarde, el matemático inglés y arcediano en Calcutta, John Henry Pratt (1809-1871), comprobó un fenómeno similar en la gran cordillera del Himalaya. Con estos datos, Pratt presentó en la Royal Society de Londres una comunicación científica que fue muy discutida. Para explicar que la atracción gravitatoria fuese menor de la esperada en el Himalaya,

propuso una interesante teoría sobre la génesis de las montañas. En su opinión, la existencia en determinados lugares del interior terrestre de temperaturas anormalmente altas, provocaría la dilatación de los materiales allí situados, lo que daría lugar a la elevación de las montañas. Es más: la dilatación de las rocas determinaría la disminución de su densidad, por lo que la masa de las montañas era menor de lo que cabía esperar debido a la existencia en determinados lugares del interior terrestre de temperaturas anormalmente altas, y que provocaría la dilatación de los materiales allí situados y esto originaría las montañas.

Estas ideas despertaron el interés del astrónomo George Airy (1801-1892), quien en 1855 publicó su propuesta: la corteza se encontraría flotando sobre unos materiales poco resistentes, aunque no necesariamente líquidos, pero sí muy densos. Comparó la corteza con unos troncos de árbol flotando en el agua. Sólo emerge una parte de ellos. «Las montañas tendrían raíces» y eso explicaba las anomalías gravimétricas.

Las propuestas de Pratt y Airy tenían elementos comunes [PEDRINACI, 2001]: en ambos casos, las montañas no son excesos de carga situados sobre la superficie, sino que se continúan hacia el interior y sólo percibimos una parte del volumen total, de modo que el exceso de masa en superficie se compensa con un defecto de masa en profundidad. Pero para Pratt, la profundidad de compensación era la misma en todas partes; mientras que para Airy, el nivel de compensación era más profundo en las zonas de las Tierra más elevadas.

En 1892, el geólogo estructural Clarence Dutton (1841-1912) dio a esta teoría el nombre de *isostasia*: el equilibrio dinámico existente entre una zona externa poco densa situada sobre un manto más denso, de modo que todo incremento de masa sería compensado con un hundimiento. La teoría de Dutton no contentaba a los científicos que creían en la existencia de continentes hundidos por el enfriamiento y por la contracción de la Tierra. Si se demostraba la isostasia, los continentes no podían hundirse del todo y desaparecer.

1.4. Las ideas movi listas, el paradigma de la teoría del geosinclinal y la tectónica de placas

En los inicios del siglo XX emerge otro paradigma más que pretendía explicar la dinámica global del planeta Tierra y que va a dar lugar al desarrollo de la geología moderna. La historia de las llamadas *ideas movi listas* está ligada a la obra *El origen de los continentes y océanos* publicada por vez primera en 1915 [SEQUEIROS, 1995]. Su autor, Alfred Wegener (1880-1930) era un

meteorólogo alemán que tres años había presentado sus ideas en una conferencia y en dos artículos. Sostenía que los continentes se movían sobre el manto y que incluso en la antigüedad habían estado unidos formando un supercontinente, la *Pangea* [WEGENER, 1929; ANGUITA, 1983; FRANKEL, 1996].

Tras la trágica e imprevista muerte de Wegener en 1930, la teoría de los desplazamientos continentales fue perdiendo credibilidad. También las hipótesis sobre la *contracción por enfriamiento* de la Tierra fueron entrando en crisis [GARCÍA CRUZ, 1998a; SEQUEIROS, 1995a, 1995b]. El descubrimiento de la radiactividad mostraba que la Tierra no perdía calor al ritmo previsto puesto que aparecían nuevas fuentes de calor. ¿Qué pasa con la energía de la Tierra? ¿Es sostenible el modelo de Wegener? ¿Cómo se forman las montañas y los volcanes y se producen los terremotos?

El origen de las modernas ideas geológicas hay que buscarlo en el inicio de los estudios de los fondos oceánicos y de las grandes masas de sedimentos en algunas cuencas del mundo. Estas investigaciones indujeron a James Dana (al que ya se ha citado más arriba) a elaborar una teoría fecunda: la teoría del *geosinclinal*. La idea inicial de este modelo parte del geólogo Émile Argand (1879-1940) [HALLAM, 1985, 129], fundador del Instituto Geológico de Neuchâtel (Suiza), el cual empezó a interesarse por la geología de los Alpes en 1905, con 26 años. Al principio, aceptó la explicación clásica contraccionista que postulaba que la formación de las cordilleras montañosas se debían al enfriamiento y a la contracción de la Tierra. Pero al leer Argand la obra de Wegener en 1915, cambió de opinión y supuso que el movimiento de los continentes había generado los Alpes. Estudios posteriores ligaron los fenómenos volcánicos, sísmicos y orogénicos a la evolución histórica de los geosinclinales. Pero esta teoría se fue complicando cada vez más dando lugar a una barroca terminología geológica cada vez más frágil de justificar [ANGUITA, 1990].

Durante años, esta teoría coexistió con otra igualmente sugestiva: la de la *deriva continental* [WEGENER, 1983]. Wegener sostuvo su teoría frente a los ataques públicos con la firmeza de un visionario. Posiblemente, se le atacó más fuerte porque no era geólogo, ni paleontólogo, ni geofísico [GARCÍA CRUZ, 1998a]. En 1930 partió de nuevo a Groenlandia donde fue encontrado muerto, habiendo fallecido no de frío y hambre sino, al parecer, de un infarto.

Desgraciadamente, con Wegener terminó prácticamente la teoría movi- lista. No volverá a ver la luz hasta 30 años más tarde, desde otras categorías diferentes. El apoyo más decidido y entusiasta a las ideas de Wegener llegó del geólogo sudafricano Alexander Du Toit. Éste tenía la seguridad de haber encontrado las «pruebas» concluyentes de que los continentes habían estado unidos en el pasado. Pero tenía sus divergencias. En lugar de un único super- continente, Du Toit reconstruía los continentes australes en el polo sur y agrupaba los continentes septentrionales cerca del ecuador.

Pero Du Toit, al igual que Wegener, apenas dedicó su tiempo al proble- ma de la energía necesaria para mover los continentes. Suponía que la fuerza centrífuga de rotación de la Tierra era suficiente para explicarlo. Tal vez, ahí está uno de los puntos débiles de su teoría: de dónde sacar la energía para desplazar las masas continentales.

Durante la década de los cincuenta, la oceanografía adquiere un impor- tante desarrollo. Se elaboran mediante procedimientos geofísicos «mapas» muy incipientes todavía de los fondos oceánicos, descubriendo con sorpresa que éstos son mucho más accidentados que los relieves terrestres. El estudio minu- cioso de las *dorsales oceánicas* suscitó vivos debates sobre su origen y evolu- ción. La casi ausencia de sedimentos antiguos en las *dorsales* dio origen a la interpretación novedosa de Harry Hess (1960) sobre la *expansión* y la *subduc- ción* de los fondos oceánicos y de las masas continentales. Y todo esto lo relacionó con las ideas de *convección* del manto de Arthur Holmes.

En 1963, Vine y Matthews estudian las bandas de anomalías magnéticas del fondo oceánico interpretándolas como resultado de la extensión originada a partir de la cresta central. De manera que el basalto inyectado en la dorsal queda marcado por el campo magnético terrestre. Incluso pudieron medir el ritmo de expansión del fondo oceánico [ELENA, 1986].

Un año más tarde, Edward Bullard, con ayuda de un ordenador, realizó un ensamblaje de los continentes incluyendo sus plataformas. Y en 1965, el geólogo canadiense John Tuzo Wilson, al estudiar las fallas transformantes, habló ya de la existencia de grandes «placas rígidas» en movimiento, con crecimiento (por unos bordes) y destrucción (*acreción*) (por otros).

Los historiadores de la ciencia suelen considerar a los geólogos y geofísi- cos Jason Morgan y Xavier Le Pichon como los primeros que publican en 1968 un desarrollo completo de las placas litosféricas. Pero una visión sistémica de la

Tierra, en la que la energía tiene un papel impulsor, fue ya intuida por Tuzo Wilson. Este publicó un artículo ese mismo año de 1968 (hace 34 años): *Revoluciones en las ciencias de la Tierra*, con el que se considera que se inicia una nueva época [DOMINGO, 1993a, 1993b; ANGUIA, 1993]. Desde entonces, la geología es una ciencia diferente en su estatuto epistemológico de lo que había sido hasta entonces [MOFFAT, 1982; SEQUEIROS, 2003]. De los avances en tectónica de placas, la revista ECT ha publicado desde su primer número bastantes trabajos en los que se dan a conocer al profesorado los avances científicos de esta teoría de la Tierra [ANGUITA, 1990, 1996; GARCÍA CRUZ, 1998b, 1998c, 1999, 2000, 2001b].

2. La construcción de nuevos saberes y nuevos paradigmas en la Geología y la introducción de las nuevas propuestas en España en la segunda mitad del siglo XX

Los nuevos saberes sobre las ciencias de la Tierra fueron asumidos por la incipiente comunidad científica de geólogos europeos, americanos y españoles y han sido elementos determinantes en la construcción de nuevos saberes y nuevos paradigmas [VERNET, 1975; SÁNCHEZ RON, 2000]. Han sido sobre todo, los Departamentos de Geología y de Didáctica de las Ciencias de las Universidades españolas y los centro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, junto a los Museos y Parques de las Ciencias los que en España han asumido, difundido y desarrollado la nueva geología del último cuarto del siglo XX. La Real Sociedad Española de Historia Natural y sus «hijas», el Ilustre Colegio de Geólogos, la Asociación de Geólogos Española (continuada en la Sociedad Geológica de España), la Sociedad Española de Arcillas, la Sociedad Española de Paleontología y otras Sociedades Científicas han cooperado decisivamente en la introducción de las modernas ideas geológicas en la comunidad científica española. El *Grupo de Trabajo de Historia de la Geología en España* (dentro de la Sociedad Geológica), nacido en 1990 y vinculado a INHIGEO (la Comisión de la UNESCO para la Historia de la Geología), ha propiciado el estudio histórico de la llegada de las nuevas ideas a España en estos últimos 25 años [SEQUEIROS, 1984].

2.1. Nuevos saberes, nuevos métodos para la nueva geología

La tectónica de placas, que ha supuesto una auténtica «revolución kuhniana» [KUHN, 1962] en la historia del pensamiento geológico, no es el punto

de llegada de nuestro trabajo. Uno de los problemas pendientes de la nueva geología es el de la *energía* del planeta Tierra en todos sus aspectos [LLARENA, CATTAPAN, DE LUCA, 2001]. Pero hoy no sólo nos fijamos en los aspectos litológicos (estrictamente *geológicos*) del planeta. Los geofísicos y los geoplanetólogos han dado una gran importancia a la consideración global de los juegos de energía del planeta. Es más: desde un punto de vista sistémico (ver más adelante), los procesos terrestres no pueden separarse de los procesos del Sistema Solar y del conjunto de la Galaxia, ya que nuestro planeta no es sino un elemento del cortejo solar y, por ello, sometido a interacciones que han marcado su historia, según veremos en el apartado 2.5.

Como ha escrito uno de nosotros [ANGUITA, 1996]: «las nuevas hipótesis, que apuntan a una convección generalizada en el conjunto del planeta, han sido también propiciadas por avances epistemológicos generales (como la física del caos) o en la epistemología de las ciencias de la Tierra (como en el neocatastrofismo)».

Dos elementos han contribuido a que en estos últimos años, en el quicio entre dos milenios, esté emergiendo en el mundo científico en general (y en el de las ciencias de la Tierra, en particular) una nueva forma de entender la realidad natural. Por una parte, asistimos a una revolución en el campo de la difusión de la información que contribuye a la llamada «sociedad del conocimiento». La tupida red de satélites que pueblan el espacio, que en geología ha contribuido al desarrollo de la *teledetección*, permite hoy recoger, almacenar, ordenar, distribuir y analizar millones de datos por segundo de múltiples variables del sistema Tierra en relación con el conjunto del universo [UDÍAS, 2002].

El establecimiento entre 1973 y 1992 del sistema de localización global GPS (*Global Positioning System*), aunque al principio fue creado para uso militar, ha abierto el campo a numerosas aplicaciones científicas en el campo de la geodesia y de la geofísica [UDÍAS, 2002]. En sismología se ha producido también una verdadera revolución con el desarrollo de los sismógrafos digitales de banda ancha en los años ochenta.

Por otra parte, en estos años emerge una auténtica revolución epistemológica que se expresa en el modo de entender lo que es el conocimiento científico, su difusión y su construcción y que está presente en el modo de hacer geología en España. Así, la cosmología, con Copérnico y Galileo, recuperó la intuición de los filósofos presocráticos, que habían afirmado que la Tierra era

«como un tambor» que se movía y que no ocupaba el centro del universo. Posteriormente, la Biología nos mostró con Darwin la cadena sin fin de la vida y más tarde concibió la unidad fundamental de su código genético. La Neurología comenzó a crear, junto con la Biología molecular y otras especialidades, una ciencia del conocimiento y de la consciencia [SAN MIGUEL DE PABLOS, 1997; RODRÍGUEZ DELGADO, 1997].

En los últimos años, todos los conocimientos humanos están atravesados por una nueva concepción del mundo: la concepción *sistémica*. Basada en la *Teoría de los Sistemas* (que tan magistralmente describe Ludwig von Bertalanffy [BERTALANFFY, 1968]), la concepción sistémica de la realidad apunta al interés de los conceptos de *complejidad*, *interacción*, *propiedades emergentes*, *autoorganización*, *autopoiesis*, etc. La llamada concepción sistémica [RODRÍGUEZ DELGADO, 1997] atraviesa todas las disciplinas y ha sido asumida por los geólogos y los profesores de ciencias de la Tierra en España [SEQUEIROS, 1994, 2003]. El mismo Edgar Morin [MORIN, 1988]. dice que no es suficiente el concepto de complejidad y que hay que acudir al de *hipercomplejidad*.

No es este el momento de recordar los conceptos básicos de esta visión de la realidad. Baste con decir que un *sistema* es un modo de interpretar el funcionamiento multifactorial de cualquier elemento dinámico de la realidad, en el que se dan propiedades emergentes. Un elemento básico de un sistema es su capacidad de perpetuación mediante mecanismos de autocontrol (*feed back*) que estabilizan el conjunto, haciéndolo conservador. Siempre hay *bucles de retroalimentación* [ANGUITA, 1993a; MELÉNDEZ HEVIA, 1998]

2.2. Los avances en estos 25 años en el conocimiento de la convección del manto y su penetración en España

Durante la primera mitad del siglo XX se establecieron las líneas generales de nuestro conocimiento sobre el interior de la Tierra [ANGUITA, 1996]. En 1906, Richard Oldham estableció la existencia del núcleo y su naturaleza fluida, y en 1912 Beno Gutenberg midió su profundidad desde la superficie en 2.900 Km., medida que ha cambiado muy poco desde entonces. En 1932, Inge Lehmann mostró la existencia del núcleo interno sólido, siendo solo fluido el externo. La discontinuidad entre la corteza y el manto fue demostrada en 1919 por Andrija Mohorovicic [UDÍAS, 2002].

Desde los años sesenta se supone que en el manto terrestre se suceden trenes de ondas de convección debidos a cambios térmicos. Pero en esos años,

la medida era muy difícil. Se sabía que hay un crecimiento rápido de la temperatura con la profundidad, que en los primeros 100 Km. llega a los 1.500°C. A mayores profundidades se especulaba que el aumento de la temperatura es más lento y gradual hasta llegar a unos 7.000°C en su centro. Supuesto el carácter peculiar del estado de la materia en el manto y núcleo, se suponía que debían existir corrientes de convección tal como se produce en un puchero de sopa cuando se calienta por debajo. El agua caliente tiene menor densidad y asciende hacia la superficie. Allí, el agua tiende a enfriarse y al aumentar su densidad tiende a hundirse hacia el fondo. Se establecen así unas *células de convección* con corrientes ascendentes calientes y corrientes descendentes más frías.

Las medidas geofísicas han permitido establecer simulaciones por ordenador de estas zonas de convección, en las que las diferencias de temperatura desde la parte más profunda a las más superficial se estima en unos dos mil grados centígrados. En el caso del manto terrestre, cuyo material es sólido aunque con cierta plasticidad, la velocidad de desplazamiento de los materiales calientes se ha evaluado en unos centímetros por año. Sin embargo, en el núcleo externo fluido, las velocidades son mayores, estimándose en algunos centímetros por minuto.

Pero en los últimos 25 años, la introducción de una nueva técnica de análisis de las ondas sísmicas y los nuevos desarrollos de instrumentos han abierto un nuevo campo a nuestro conocimiento del interior de la Tierra. La técnica en cuestión, que abarca diferentes métodos, se denomina *tomografía sísmica* y es similar a la utilizada para los TAC en medicina. Las primeras aplicaciones de las técnicas de tomografía a las ciencias de la Tierra se deben a K. Aki, A. Christoffenson y E. S. Husebye en 1976 y son usados por los geólogos y geofísicos españoles [ANGUITA, 1996; UDÍAS, 2002].

La metodología, simple en teoría, tiene luego complicaciones cuando se aplica a casos reales. Consiste en observar, en un número grande de estaciones, ondas sísmicas generadas por muchos terremotos, de modo que los rayos crucen, en múltiples direcciones, la parte de la Tierra que se desea estudiar [UDÍAS, 2002]. La metodología de la *tomografía sísmica* permite obtener modelos en tres dimensiones del interior de la Tierra.

Las imágenes tomográficas nos proporcionan un cuadro de la distribución de las corrientes de convección en el interior de la Tierra. De ellas se puede obtener su relación con los continentes y océanos y con la situación de

las grandes cadenas montañosas. También la Teoría de Sistemas está presente en el modo de interpretar hoy los procesos geológicos y por ello, la interpretación de la Tierra como *sistema energético*. En una primera instancia fue la tectónica de placas quien más ha incorporado estas conceptualizaciones epistemológicas [FRANKEL, 1996].

Desde los años de John Tuzo Wilson (1908-1993) hasta la fecha, muchos aspectos del paradigma de la tectónica de placas han sido retocados por los geólogos, geofísicos, paleontólogos y otros muchos científicos. El paradigma se ha ido precisando cada vez más manteniendo su poder explicativo [ANGUITA, 1996]. Nuevos conceptos, como los de estratificación dinámica, cascadas subductivas, puntos calientes, advección, plumas y superplumas, litoferoclastos o terrenos, relieves intraplaca, etcétera, cobran protagonismo, mientras que otros, como las dorsales oceánicas y la astenosfera, son destronados o pierden importancia. Probablemente, el cambio principal entre la formulación clásica de la teoría y su definición actual sea que la tomografía sísmica ha demostrado que la convección se produce a través de todo el manto, pero que no lo hace en forma de células organizadas, sino como corrientes caóticas de geometría compleja: basta con pensar en que las zonas de descenso (o subducción) son lineales, mientras que los ascensos se producen en forma de columnas (los penachos térmicos que explican los llamados *puntos calientes* o zonas volcánicas en superficie).

Es esta circulación general del manto la que ha hecho innecesario un concepto (la astenosfera, o nivel plástico de despegue situado en el manto superior) que fue central en la fase clásica de la teoría. La capa superficial rígida de la Tierra (litosfera) no necesita ese nivel de despegue respecto al manto profundo, porque éste también se está moviendo. En cuanto a las dorsales oceánicas, los relieves submarinos cuyo descubrimiento fue uno de los desencadenantes de la revolución movilista, la tomografía sísmica ha demostrado que su vulcanismo no tiene raíces térmicas profundas en el manto, por lo que no deben ser consideradas los lugares por donde sube el calor de aquél, serían tan sólo grandes grietas que, al despresurizar el manto superior, facilitarían su fusión, no participando sin embargo de los grandes ciclos convectivos, reservados, como ya se ha dicho, a los puntos calientes y las zonas de subducción.

Una última alteración del modelo clásico ha tenido lugar, como las anteriores. En la década de los 90: se trata de la respuesta a una pregunta clásica tras la aceptación de la tectónica de placas como modelo real de la dinámica terrestre: ¿desde cuándo funciona la máquina de reciclar litosfera? En los años 70 y

80, la respuesta más frecuente a esta cuestión era que la tectónica de placas era una característica de la Tierra moderna, que sólo comenzaría, como muy pronto, al principio del Proterozoico (hace unos 2.500 millones de años, Ma.), o sea durante la mitad más reciente de su historia. El razonamiento parecía impecable: la Tierra del Arcaico (más de 2.500 Ma.) estaba demasiado caliente para albergar una litosfera rígida; sin rigidez las fracturas son imposibles, y sin rotura no hay subducción. Sin embargo, los avances en los métodos de datación y en la reconstrucción de regiones altamente metamorfozadas han llevado a la conclusión, más bien sorprendente, de que las rocas más antiguas de la Tierra (unos 3.850 Ma., en el Suroeste de Groenlandia), llevan ya la huella de la subducción, o sea de la tectónica de placas, que por lo tanto parece haber sido el régimen dinámico permanente de este planeta.

2.3. La medida de la expansión en tiempo real de las placas continentales

Otro de los avances en la Geología y que ha sido asumido por los geólogos españoles y que ha pasado a la planificación docente de los estudiantes desde épocas anteriores a la universidad, se refiere al estudio y conocimiento de la expansión en tiempo real de las placas continentales. Hasta muy recientemente, el movimiento de las placas sólo podía determinarse a partir de otras observaciones, pero no de una forma directa. El movimiento de las placas se infería sólo del estudio de los vestigios del magnetismo en las rocas, lo que se denomina el paleomagnetismo. En los años sesenta e inicio de los setenta, la velocidad de expansión de las placas se había podido medir de forma aproximada suponiendo cómo era la geografía terrestre de hace millones de años según la posición de los continentes y su distancia actual. De este modo se supuso que el desplazamiento debía ser de unos 6 cm. por año.

Pero después de las investigaciones realizadas en los últimos 25 años, los geólogos están en disposición de medir la velocidad actual del desplazamiento de las placas continentales. Para ello, se acude al estudio de los terremotos acaecidos en el borde de las placas. Con ese fin, se suman los desplazamientos que se producen en cada terremoto y para todos los terremotos, durante un número de años suficientemente grande [UDÍAS, 2002]. Dividiendo por el número de años, se obtiene el desplazamiento anual y por ello su velocidad. Este método supone que el movimiento de las placas se da solo en forma brusca produciendo terremotos, lo que se conoce como movimiento *cosísmico*.

Pero, ¿cómo se puede medir el posible movimiento lento y gradual de las placas? Para ello, las investigaciones se han dirigido hacia el desarrollo de técnicas de medidas reales de desplazamientos de las placas. Pero para medir esos desplazamientos con exactitud de menos de un centímetro no era, hasta hace muy poco, posible. Las medidas geodésicas por triangulación son muy laboriosas y poco precisas. Las medidas modernas de *geodesia espacial* permiten determinar prácticamente en tiempo real, la velocidad de las placas.

Desde los años ochenta del siglo XX se dispone de la técnica de medidas de interferometría de grandes bases (VLBI, *Very Long Baseline Interferometry*) [UDÍAS, 2002]. Requiere el despliegue de grandes antenas parabólicas, que registran señales procedentes del espacio, de los cuásares, por ejemplo. Gracias a esa técnica nos es posible medir con mucha exactitud la distancia entre dos antenas. Repitiendo las medidas a lo largo de varios años, puede determinarse el movimiento relativo entre ellas, y consiguientemente, la velocidad de desplazamiento relativo de las placas continentales.

El estudio de los parámetros de la Tierra para la *Geología Global* ha sido facilitada en estos últimos años con el uso cada vez más generalizado de los sistemas GPS. Los detectores GPS son aparatos pequeños, de fácil transporte y preparados para realizar campañas de medidas en muchos puntos. Las medidas dan la posición de cada punto sobre el mapa de la Tierra con una exactitud de milímetros referida a un sistema convencional fijo de referencia. La repetición de estas medidas permite en pocos años determinar, a través de un análisis muy riguroso aunque bastante complicado, el campo de velocidades relativas de una cierta región que dan la magnitud de desplazamiento anual y su dirección.

Con la precisión creciente de las medidas del sistema GPS, aumenta también la precisión de la medida de la velocidad del movimiento de las placas tectónicas. Por ejemplo, de acuerdo con los cálculos efectuados hasta la fecha, las deformaciones en el interior de Europa medidas directamente por estos métodos varían entre 2 y 5 mm. por año. Y en el sur de España, sumando los desplazamientos producidos por los terremotos del siglo XX, se obtienen velocidades de desplazamiento respecto a África de entre 0,6 y 5,5 mm. por año.

2.4. La construcción de un paradigma interdisciplinar: las ciencias de la Tierra

La consideración *sistémica* [LLARENA, CATTAPAN, DE LUCA, 2001] ha hecho a los geólogos establecer puentes con otras disciplinas para constituir lo que hemos dado en llamar *ciencias de la Tierra*, una nueva

disciplina omnicomprensiva construida desde el paradigma sistémico, dinámico, y no necesariamente gradualista. Esto no es tan novedoso, puesto que ya estaba presente en el trabajo citado de Tuzo Wilson de 1968. La tectónica de placas revolucionó todo el paradigma de la geología y ha permitido, entre otras cosas, elaborar síntesis globales de la evolución biológica junto a la geológica conocidas en España [MOFFAT, 1982; SEQUEIROS, GARCÍA DE LA TORRE, PEDRINACI, E., 1995; SEQUEIROS, 1995] y presentes en los currículos educativos [SEQUEIROS, GOZALVO, BIEDMA, ESPINA, 1986; TIZÓN (coord.), 1998; PASCUAL, 2000; ANGUITA y ARSUAGA, 2000].

La integración conceptual y metodológica de muchas ciencias (desde la física a la meteorología pasando por las ciencias de la computación) ha dado lugar a la emergencia de una disciplina a la que algunos denominan *Geología Global* [SEQUEIROS y PEDRINACI, 1999; PÉREZ MERCADER, 2000; BLASCO LLOPIS, 2001; SEQUEIROS, 2003]. El intento es la consideración del planeta Tierra como sistema energético en el contexto del universo. Sobre ello, AEPECT ha publicado un número monográfico de su revista [VVAA., 1995]

2.5. La geoplanetología, disciplina emergente en las ciencias de la Tierra en España

En estos veinticinco años (1978-2003), una nueva disciplina de las ciencias de la Tierra ha cobrado pujanza científica y está siendo incorporada a la docencia universitaria y no universitaria en España: nos referimos a las geoplanetología [ANGUITA, 1993b, 1993c, 1995]. Los astrofísicos indagan los secretos recónditos del universo [PÉREZ MERCADER, 2000] y sus implicaciones para el futuro de la humanidad [RODRÍGUEZ DELGADO, 1997]. Sin embargo, no podemos olvidar aquí la posible impregnación ideológica de determinadas concepciones *globalizantes* de la realidad natural que podrían desvirtuar los contenidos científicos y sobre los que hemos llamado la atención en varias ocasiones [ANGUITA y ARSUAGA, 2000; VOLK, 2000; BLASCO LLOPIS, 2001; SEQUEIROS, 2001]. La tentación organicista ha estado muy presente en la geología [CAPEL, 1980]

Desde el punto de vista de las ciencias de la Tierra, la historia moderna de la geología muestra que los principales aportes de las ciencias planetarias han sido los siguientes:

- Por una parte, subrayar la unicidad del sistema de reciclaje litosférico (tectónica de placas) que exhibe nuestro planeta. Ni Venus ni Marte muestran ningún rasgo explicable según el esquema familiar de

creación-destrucción de litosfera, aunque han podido presentarlos en su pasado geológico.

- La segunda aportación ha sido ponderar la influencia de los acontecimientos colisivos en el origen y evolución de la vida en la Tierra. Surgida durante una etapa de probable bombardeo asteroidal, la vida se ha aferrado al planeta contra toda probabilidad, y al parecer ha sido moldeada de forma aleatoria por factores externos, entre los cuales las colisiones de asteroides y cometas han podido jugar un papel crucial. De estas consideraciones ha surgido una nueva disciplina científica, la Astrobiología.
- La tercera aportación se refiere a la respuesta a una pregunta intrigante, que surge de relacionar las dos anteriores: ¿Es casual que el único planeta conocido donde ha surgido la vida sea también el único que recicla su litosfera? En otras palabras, ¿es la tectónica de placas un factor decisivo para la vida planetaria?

Desarrollar cada uno de ellos nos llevaría lejos y pueden consultarse trabajos anteriores [ANGUITA, 1993b, 1995; ANGUITA y ARSUAGA, 2000].

2.6. Nuevas perspectivas para tiempos nuevos: la geología y el medio ambiente

En el año 1972 tuvo lugar en Estocolmo la que fue llamada la *Primera cumbre de la Tierra* convocada por la ONU [SEQUEIROS, 1997] con el título de «Una sola Tierra». En ella se reflexionó por vez primera sobre la internacionalización y la globalización de los problemas ambientales, económicos y sociales del planeta [AYALA-CARCEDO, 1988]. Las referencias a las dimensiones geológicas de los problemas son frecuentes. Desde entonces, los científicos y los políticos son conscientes de que el impacto humano sobre el planeta cobra tonos dramáticos. Una visión ponderada y objetiva de estos problemas puede encontrarse en la editorial de la Revista de Fomento Social del mes de septiembre [ANÓNIMO, 2002].

Pero hay más: las reuniones internacionales de geólogos insisten en que las dimensiones puramente científicas del ambiente no pueden separarse de las educativas. Esta es la convicción que late en la nueva disciplina de carácter interdisciplinar incluida en el discutido nuevo bachillerato en España: las Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente [GARCÍA DE LA TORRE,

SEQUEIROS y otros, 1996; SEQUEIROS y GARCÍA DE LA TORRE, 1996; VVAA., 2000]

Las consideraciones geológicas sobre los problemas de ciencias de la Tierra, tecnología y sociedad (la llamada CTS) están desarrolladas en diversas fuentes [AYALA-CARCEDO, 2001]. Este proceso ha llevado entre los científicos (y los geólogos en particular) a interesarse cada vez más por los problemas éticos de la ciencia [MARCOS, 2001]

2.7. *La paleontología revoluciona las ciencias de la vida: el equilibrio intermitente en España*

Los paleontólogos, tanto en España como en la comunidad internacional, suelen defender que la paleontología hoy ha adquirido su *status* de paradigma autónomo respecto a las ciencias de la Tierra y las ciencias de la Vida [GOULD, 1977; VV. AA., 1988; SEQUEIROS, 2001]. Ello no impide que los avances de la paleontología tengan su lugar en la consideración histórica del planeta Tierra [SEQUEIROS, 1996a; 2001a]. En particular, la paleontología ha sido determinante en la introducción de los paradigmas evolucionistas en las ciencias de la Tierra. De todos es conocido que la paleontología nace con Georges Cuvier y se consolida como ciencia histórica con Darwin. El llamado «debate darwinista» llenó con sus polémicas una buena parte de los últimos 40 años del siglo XIX [PELAYO, 1991; 1996; SEQUEIROS, 2000; 2002a; 2002c; SEQUEIROS, GARCÍA DE LA TORRE Y PEDRINACI, 1995] que cooperó a la construcción de lo que hemos denominado el *paradigma evolucionista gradualista* [SEQUEIROS, 2002c]

Por los años 30 se introduce la genética de poblaciones en el pensamiento científico y aparece la llamada «Nueva Síntesis» o «Teoría Sintética de la Evolución». Se suele considerar a Theodosius Dobzhanski (1900-1975) como el «padre» de la nueva síntesis, junto con el ornitólogo Erns Mayr, el botánico Stebbins y el paleontólogo George Gaylord Simpson, entre otros [SEQUEIROS, 1999, 2002c].

No quedaría completo este trabajo si no se dirige la mirada hacia las ideas sobre los ritmos de la evolución con posterioridad a Simpson. Su ensayo *El Sentido de la Evolución* fue publicado hace ya más de medio siglo. Hoy, las ciencias de la vida, y en especial la paleontología, han propuesto nuevos modelos explicativos. Tal vez, el más sugerente ha ido tomando cuerpo desde hace unos 25 años, un debate abierto y enconado que enfrenta posturas excluyentes.

La publicación del trabajo que postula un nuevo modelo evolutivo: el equilibrio intermitente (*punctuated equilibria*) se difundió pronto entre la comunidad científica española estimulando un nuevo modo de hacer paleontología [ELDREDGE y GOULD, 1972; GOULD, 1980].

Parte del debate internacional sobre la nueva paleontología tuvo lugar en España, en donde tuvo lugar el I Simposio Internacional sobre el concepto y el método de la Paleontología (Barcelona, 1980). Sus aportaciones han sido señaladas por muchos paleontólogos, pues entre otras conclusiones, en él se reelaboran nuevos conceptos paleobiológicos [ELDREDGE, 1982, para la macroevolución y GOULD y ELDREDGE, 1983, para la adaptación biológica]. El debate sobre el nuevo modelo evolutivo se prolonga y mantiene en España [SEQUEIROS y GONZÁLEZ-DONOSO, 1989]. La tesis fundamental de este modelo es la propuesta de que las pautas y patrones de la evolución no son «graduales», sino que se trata de cambios intermitentes de ritmo evolutivo. Para estos autores (y muchos paleobiólogos hoy) el proceso de la evolución no posee un ritmo lento, gradual y continuo de cambio como postulaban Darwin y los partidarios de la Nueva Síntesis. Para el nuevo modelo, las especies muestran (tal como se contrasta en el registro fósil) largos períodos de «parón morfológico» en el que no hay apenas cambios significativos, seguidos de breves períodos de cambio morfológico súbito en el seno de la población, de modo que la especiación es un proceso relativamente rápido.

Este debate está muy relacionado con otro de los modernos problemas geológicos y paleontológicos, como es el de la extinción catastrófica y episódica de especies biológicas [SEQUEIROS, 1996b, 2002c]. Para el darwinismo clásico y la Nueva Síntesis, la extinción de las especies a lo largo del dilatado tiempo geológico es un hecho. Pero es una extinción «de fondo», gradual y lenta, sin «catástrofes» ni «crisis biológicas» generalizadas. Datos de astrofísica muestran hoy que los ritmos de extinción de fauna y flora muestran ritmos catastróficos con una cierta periodicidad (unos 28 millones de años) que podría coincidir con el paso del Sistema Solar por la proximidades de la nube de Oort y el impacto de asteroides sobre la piel de los planetas. El debate se establece entre los partidarios de la llamada extinción gradual frente a los que defienden un modelo de extinción episódica.

Estos planteamientos han dado lugar a la emergencia de una nueva hipótesis explicativa de los procesos evolutivos y, en nuestro caso, de

extinción biológica: lo que denominamos [SEQUEIROS, 2002c] *paradigma evolucionista «neocatastrofista»*.

3. Conclusiones

Nos proponíamos al inicio de este trabajo conmemorativo de los 25 años de la publicación de la revista *Llull* transitar por los nuevos saberes y los nuevos paradigmas que se han sucedido en la geología en el último cuarto de siglo, entre 1978 y 2003. Nos parecía necesario situar esos saberes dentro del contexto de lo que ha sido el devenir de las ciencias de la Tierra en el siglo XIX, con el advenimiento de los grandes principios con los que Hutton y Lyell han constituido los pilares metodológicos de la geología.

Nos hemos fijado de modo especial para nuestra investigación en las propuestas que desde la Asociación Española para la Enseñanza de las ciencias de la Tierra (AEPECT) se hacen a los profesores y profesoras de secundaria y universidad. De ella se desprende que en el pasado la incipiente comunidad científica de los geólogos españoles, situados por lo general al margen de las instituciones universitarias, asimiló con rapidez las innovaciones que venían de Europa aunque sin aportar grandes novedades científicas. La aceptación de estas propuestas científicas se prolongó sin dificultad hasta los años setenta en los que nuevas instituciones científicas recogieron la herencia de los nuevos saberes y paradigmas llegados de más allá de las fronteras.

Nos hemos detenido especialmente en algunos núcleos de saberes geológicos que más mutaciones han sufrido en estos años y que aún tienen muchos problemas abiertos. Tales son los avances en el conocimiento de los procesos internos de la Tierra y el diseño de la tectónica de placas, los avances en Geología Global y en las relaciones entre las ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente, la geoplanetología y la nueva paleontología emergente en estos años.

De alguna manera, al intentar hacer historia del pasado reciente, observamos con satisfacción lo que en estos campos la comunidad científica española aporta a la ciencia internacional en el campo de la geología.

BIBLIOGRAFÍA

- ANGUITA, F. (1983) «La teoría de Alfred Wegener y la nueva geología». En: A. Wegener, *El origen de los continentes y océanos*. Madrid, Pirámide
- ANGUITA, F. (1988) *Origen e historia de la Tierra*. Madrid, Rueda, 525 pp.
- ANGUITA, F. (1990) «El concepto de geosinclinal tras la revolución movilista: otro desajuste entre la ciencia actual y la ciencia en el aula». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 8(3), 287-290.
- ANGUITA, F. (1993a) «La Teoría General de los Sistemas y las ciencias de la Tierra». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, AEPECT*, 1(2), 87-89.
- ANGUITA, F. (1993b) *Geología planetaria*. Madrid, Editorial Mare Nostrum.
- ANGUITA, F. (coord.) (1993d) «Catástrofes en la historia del Sistema Solar: un debate abierto». En: *Cursos de verano*. Madrid, Universidad Complutense, 2-6 agosto. (Inédito)
- ANGUITA, F. (1995) «Las ciencias del espacio en la víspera de 2001: didáctica de una frontera científica». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 3(2), 66-72.
- ANGUITA, F. (1996) «La evolución de la tectónica de placas: el nuevo interior de la Tierra». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, AEPECT*, 3(3), 137-148.
- ANGUITA, F. y ARSUAGA, J. L. (2000) «¿Es Gaia una teoría adelantada a su tiempo o una broma vitalista? Reflexiones para las ciencias de la Tierra y del medio ambiente». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 8(3), 197-201.
- ANÓNIMO (2002) «De Río (1992) a Johannesburgo (2002): ¿éxito o fracaso de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo sostenible?». Editorial del Consejo de Redacción. *Revista de Fomento Social, ETEA*, 227, vol. 57, 403-433. Córdoba.
- AYALA-CARCEDO, F. J. (1988) *Riesgos geológicos*. Madrid, ITGME, 187 pp.
- AYALA-CARCEDO, F. J. (coord.) (2001). *Historia de la tecnología en España*. Barcelona, Valatenea SL, dos volúmenes, 832 pp.
- BERTALANFFY, L. von (1968) *General System Theory*. New York, G. Braziller, (edición española: *Teoría General de Sistemas*. Fondo de Cultura Económica, México, 1974)
- BLASCO LLOPIS, J. (2001) *El ordenador universal*. Madrid, Edición personal, 282 pp.
- CABEZAS OLMO, E. (2002) *La Tierra, un debate interminable. Una historia de las ideas sobre el origen de la Tierra y el principio de Uniformidad*. Zaragoza, Pressas Universitarias de Zaragoza, Colección Aleph, número 2, 204 pp.
- CAPEL, H. (1980) «Organicismo, fuego interior y terremotos en la ciencia española del siglo XVIII». *Cuadernos GeoCrítica*, 27-28, 1-94, Barcelona.
- CAPEL, H. (1985) *La Física Sagrada. Creencias religiosas y teorías científicas en los orígenes de la geomorfología española*. Barcelona, Ediciones del Serbal, 223 pp.
- DOMINGO, M. (1993a) «Necrológica de John Tuzo Wilson». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, AEPECT*, 1(2), 67-68.

- DOMINGO, M. (1993b) «Homenaje a J. Tuzo Wilson: «Revolución en las ciencias de la Tierra» y la última propuesta de Wilson». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, AEPECT*, 1(2), 71-86.
- ELENA, A. (1986) «¿Revoluciones en Geología? De Lyell a la Tectónica de Placas». *Arbor*, 486(124), 9-45.
- ELLENBERGER, F. (1994) *Histoire de la Géologie. Vol. II: la grande éclosion et ses prémices (1660-1818)*. París, Tecn & Doc., 381 pp.
- ELDREDGE, N. Y GOULD, S. J. (1972) «Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism». En: T.J.M. Schopf (ed.), *Models in Paleobiology*. San Francisco, Freeman, 82-115.
- ELDREDGE, N. (1982) «La macroevolución». *Mundo Científico*, 16(2), 214-223. (1982)
- FRANKEL, H. (1996) «De la deriva de los continentes a la tectónica de placas». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 3(3), 130-136.
- GARCÍA CRUZ, C.M. (coord.) (1998a) *La teoría de la Deriva continental. Simposio sobre el origen y movimiento de las masas terrestres intercontinentales, tal como propone Alfred Wegener*. Consejería de Educación, Cultura y Deportes del Gobierno de Canarias, 240 pp.
- GARCÍA CRUZ, C.M. (1998b) «Puentes continentales e isostasia: aspectos históricos y didácticos». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 6(3), 211-216.
- GARCÍA CRUZ, C.M. (1998c) «El principio de uniformidad (I): Orígenes». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 6(3), 234-238.
- GARCÍA CRUZ, C.M. (1999) «El principio de uniformidad (II): un obstáculo epistemológico entre el pasado y el presente». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 7(1), 16-20.
- GARCÍA CRUZ, C.M. (2000) «El principio de uniformidad (III): el presente: una aproximación al neocatastrofismo». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 8(2), 99-107.
- GARCÍA CRUZ, C.M. (2001a) «El actualismo-uniformitarismo como obstáculo epistemológico». *Cuadernos IG/UNICAMP, Campinas (SP)*, 9(1), 22-32.
- GARCÍA CRUZ, C.M. (2001b) «Origen y desarrollo histórico del concepto de ciclo geológico». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 9(3), 222-234.
- GARCÍA DE LA TORRE, E.; SEQUEIROS, L. y otros (1996) «Aspectos didácticos de las ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente». Universidad de Zaragoza, colección Educación Abierta, número 124, 181 pp.
- GOHAU, G. (1987) *Histoire de la Géologie*. París, La Découverte, 260 pp.
- GOULD, S.J. (1977) «Eternal Metaphors of Palaeontology». En: A. Hallam (ed.), *Patterns of Evolution*. Nueva York, Elsevier, 1-25.
- GOULD, S.J. (1980) «Is a new and general theory of evolution emerging?». *Paleobiology*, 6(1980), 119-130
- GOULD, S.J. (1992) *La flecha del Tiempo*. Madrid, Alianza Universidad, 232 pp.
- GOULD, S. J. y ELDREDGE, N. (1983) «La adaptación biológica». *Mundo Científico*, 22(3), 134-145.

- HALLAM, A. (1985) *Grandes controversias geológicas*. Barcelona, Editorial Labor, 180 pp.
- KUHN, T. S. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*. University Chicago Press.
Traducción española: (1975) *La estructura de las revoluciones científicas*. México. Fondo de Cultura Económica.
- LLARENA, M., CATTAPAN, A., DE LUCA, A. (2001) «Las ondas sísmicas y la estructura interna de la Tierra: una aproximación desde la historia de la ciencia». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, AEPECT, 9(1)*, 13-20.
- MARCOS, A. (2001) *Ética ambiental*. Universidad de Valladolid, 160 pp.
- MELÉNDEZ HEVIA, I. (1998). «La Teoría de Sistemas en las ciencias de la Tierra». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, 6(1)*, 64-73.
- MOFFAT, I. (1982) «Paradigmas en Geología: del catastrofismo a la tectónica de placas». *Cuadernos GeoCrítica, 42*. Barcelona, 38 pp.
- PASCUAL, J.A. (2000) «Una teoría de la Tierra y una Teoría del medio ambiente». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, AEPECT, 8(3)*, 184-188.
- ORDÓÑEZ, S. (2002) «La geología española en la época de José Macpherson». En: VV. AA. *Homenaje a Jose Macpherson. Boletín de la Institución Libre de Enseñanza, 1*, 45-45, 29-45. Madrid, Julio 2002.
- PEDRINACI, E. (1992) «Catastrofismo versus actualismo. Implicaciones didácticas». *Enseñanza de las Ciencias, 10(2)*, 216-222. Barcelona.
- PEDRINACI, E. (1998) «Procesos geológicos internos: entre el fijismo y la Tierra como sistema». *Alambique, 18*, 6-17. Barcelona, Editorial Graó,
- PEDRINACI, E. (2001) *Los procesos geológicos internos*. Madrid, Síntesis Educación, DCE, 222 pp.
- PELAYO, F. (1984) «El catastrofismo y actualismo en España». *Llull, 7(12)*, 47-68.
- PELAYO, F. (1991) *Las teorías geológicas y paleontológicas durante el siglo XIX*. Madrid, AKAL, Historia de la Ciencia y de la técnica, número 40, 55 pp.
- PELAYO, F. (1996). *Del Diluvio al Megaterio. Los orígenes de la Paleontología en España*. Madrid, CSIC, Cuadernos Galileo de Historia de la Ciencia, 16, 310 pp.
- PÉREZ MERCADER, J. (2000) *¿Qué sabemos del universo?* Barcelona, Temas de debate, 207pp.
- RODRÍGUEZ DELGADO, R. (1997) *Del Universo al ser humano. Hacia una concepción planetaria para el siglo XXI*. Madrid, McGraw Hill, 297pp.
- SÁNCHEZ RON, J. M. (2000) *El siglo de la ciencia*. Madrid, Taurus, 324 pp.
- SAN MIGUEL DE PABLOS, J. L. (1997) «La perspectiva de la unificación en las ciencias de la Tierra». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, 5(3)*, 190-194.
- SEQUEIROS, L. (1984) «Un reto: la historia y la epistemología de la Geología». Ponencia sesión 20, *Actas del I Congreso Español de Geología*, Segovia, abril 1984, pp. 523-533.
- SEQUEIROS, L. (1994) «La formación del profesorado de Geología: nuevos saberes y nuevas tareas». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, 2(2-3)*. VIII Simposio Enseñanza de la Geología, 318-323.

- SEQUEIROS, L. (1995) «La Historia de la Ciencia en la formación de profesores de ciencias de la Tierra: implicaciones para la Tectónica de Placas». V *Simposio de historia de las Ciencias y Enseñanza de las Ciencias*. Vigo, sept. 1995.
- SEQUEIROS, L. (1995) «Tectónica de Placas y Evolución Biológica. Construcción de un paradigma e implicaciones didácticas». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 3(1), 14-22.
- SEQUEIROS, L. (1996a) «Darwin como geólogo: sugerencias para la enseñanza de las ciencias de la Tierra». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 4 (1), 21-29.
- SEQUEIROS, L. (1996b) «La extinción de las especies biológicas. Implicaciones didácticas» *Alambique*, 10, 47-58. Barcelona, Graó.
- SEQUEIROS, L. (1997) *Educar para la Solidaridad. Proyecto didáctico para una nueva cultura de relaciones entre los pueblos*. Barcelona, Octaedro, 170 pp.
- SEQUEIROS, L. (1999a) «El sentido de la Evolución de George G. Simpson (1949). Cincuenta años de debates entre biología, filosofía y teología». *Proyección*, 193 (Junio), 137-154. Granada.
- SEQUEIROS, L. (1999b) «La epistemología oculta de los paleontólogos. Los fósiles bajo el crisol de Bacon». *Temas Geológico-Mineros ITGE*, 26, 36-43.
- SEQUEIROS, L. (2000) «Teología y Ciencias Naturales. Las ideas sobre el diluvio universal y la extinción de las especies biológicas hasta el siglo XVIII». *Archivo Teológico Granadino*, 63, 91-160. Granada.
- SEQUEIROS, L. (2001a) «El Aparato para la Historia Natural Española (1754) del franciscano granadino fray José Torrubia (1698-1761): aportaciones postridentinas a la Teología de la Naturaleza». *Archivo Teológico Granadino* 64, 59-127.
- SEQUEIROS, L. (2001b) «Paleontología». En: *Enciclopedia de España, tomo 16*, 7.578-7.579. Barcelona, Editorial Enciclopedia de España.
- SEQUEIROS, L. (2002a) «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), 17-25.
- SEQUEIROS, L. (2002b) «De la ira de los dioses a la Tectónica de Placas. Un enfoque histórico de las energías de la Tierra». Ponencia. *Curso UIMP*, Santander, septiembre de 2002, 20 pp.
- SEQUEIROS, L. (2002c) «La extinción de las especies biológicas. Construcción de un paradigma científico». *Memorias de la Academia de Ciencias Exactas, Físico-químicas y Naturales de Zaragoza*, 1(20), 1-85.
- SEQUEIROS, L. (2002d) «Karl R. Popper (1902-1994): un siglo de «búsqueda sin término» de la verdad». *Proyección*, Granada, XLIX, 204, 33-59.
- SEQUEIROS, L. (2002e) «¿Tiene fundamentación científica la Nueva Era?». En: A. Blanch (ed.) *El pensamiento alternativo. Nueva visión sobre el hombre y la naturaleza*. UPCO, 73-106.
- SEQUEIROS, L. (2002f) «José Macpherson en el contexto de la geología europea en la segunda mitad del siglo XIX». En: VV. AA. *Homenaje a Jose Macpherson. Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, Julio 2002, 1(45-45), 15-28. Madrid.

- SEQUEIROS, L. (2003) «De la ira de los dioses a la Geología Global. Un enfoque histórico de las imágenes científicas sobre las energías de la Tierra». *Alfa, Revista de la Sociedad Andaluza de Filosofía* (en prensa)
- SEQUEIROS, L.; GOZALVO, M. S.; BIEDMA, R. M. y ESPINA, A. (1986) «Programación integrada interdisciplinar de la evolución geobiológica. Objetivos y metodología.» *Actas del IV Simposio sobre la Enseñanza de la Geología*, Vitoria, pp. 275-285.
- SEQUEIROS, L. y GONZÁLEZ-DONOSO, J.M. (1989). Los ritmos evolutivos y su problemática biocronológica: En: E. Aguirre (coord.) *Paleontología. Nuevas Tendencias*: Madrid, CSIC, 109-120;
- SEQUEIROS, L.; GARCÍA DE LA TORRE, E.; PEDRINACI, E. (1995) «Tectónica de placas y evolución biológica: construcción de un paradigma e implicaciones didácticas». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 3(1), 14-22.
- SEQUEIROS, L. y GARCÍA DE LA TORRE, E. (1996). *ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Orientaciones didácticas*. Córdoba, Edición privada, 45 pp.
- SEQUEIROS, L.; PEDRINACI, E.; ÁLVAREZ, R.M. y VALDIVIA, J. (1997) «James Hutton y su Teoría de la Tierra (1795): consideraciones didácticas para Secundaria». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 5(1), 11-20.
- SEQUEIROS, L.; PEDRINACI, E.; BERJILLOS, P. y GARCÍA DE LA TORRE, E. (1997b) «El bicentenario de Charles Lyell (1797-1875): consideraciones didácticas para Educación Secundaria». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 5.1, 21-31.
- SEQUEIROS, L. y PEDRINACI, E. (1999) «De los volcanes de Kircher a la GAIA de Lovelock». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 7(3), 187-193.
- TIZÓN, M.C. (coord.) (1998) «El concepto de placa litosférica. Propuesta de secuencia de actividades para la enseñanza-aprendizaje de la Tectónica de Placas». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 6(2), 154-159.
- TUZO WILSON, J. (1993) «Revolución en las ciencias de la Tierra». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 1(2), 72-86.
- UDÍAS, A. (2002) «Las ciencias de la Tierra en el último cuarto de siglo». *Investigación y Ciencia*, 304 (enero), 74-80.
- VERNET, J. (1975) *Historia de la Ciencia Española*. Madrid, Instituto de España, 312 pp.
- VIRGILI, C. (2003) *Charles Lyell*. Madrid, Editorial Nivola, Colección Científicos para la historia, n.º 13, 318 pp.
- VOLK, T. (2000) *Gaia toma cuerpo. Fundamentos para una fisiología de la Tierra*. Madrid, Cátedra, 270 pp.
- VV. AA. (1988) *Historia de la Paleontología*. Madrid, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España., 215 pp.
- VV. AA. (1995) «Monográfico: la Geología y las Ciencias del Espacio». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, AEPECT*, 3(2), 66-110.
- VV. AA. (2000) «Monográfico: Las ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente». *Enseñanza de las ciencias de la Tierra, AEPECT*, 8(3), 181-269.
- WEGENER, A. (1929 [1983]) *El origen de los continentes y océanos*. Madrid, Ediciones Pirámide, 230 pp.