

Concepciones acerca del origen de las rocas: una perspectiva histórica

Emilio Pedrinaci (*)

Instituto Andaluz de Formación del Profesorado(**)



RESUMEN

En este trabajo se analiza la evolución histórica de las interpretaciones sobre el origen de las rocas y se señalan posibles obstáculos epistemológicos que conviene considerar para el tratamiento en el aula de este campo conceptual.

“El historiador de la ciencia debe tomar las ideas como hechos. El epistemólogo debe tomar los hechos como ideas, insertándolas en un sistema de pensamientos. Un hecho mal interpretado por una época, sigue siendo un hecho para el historiador. Según el epistemólogo es un obstáculo, un contrapensamiento.”

(BACHELARD, “La formation de l'esprit scientifique”)

En los libros de texto de Educación Secundaria e incluso de Primaria, habitualmente se parte de la “evidencia” de que todas las rocas tienen un origen. En consecuencia, el objetivo de la enseñanza en este campo conceptual, no sería mostrar que las rocas se destruyen, se construyen y cambian, sino asignarles “a priori” en cada

caso un origen determinado. De esta manera se “reparten” entre las casillas preestablecidas (sedimentarias, ígneas y metamórficas) las diferentes rocas.

Analizar cuáles han sido las ideas sobre el origen de las rocas, su historia, sus obstáculos, qué tipo de conceptos o procedimientos han favorecido su construcción y cuáles los han inhibido, puede ayudarnos, de una parte, a mostrar que la noción de que todas las rocas tienen un origen, dista de ser evidente; y, de otra, a detectar las dificultades de comprensión que dicha noción presenta.

El sentido del presente trabajo no es hacer un relato minucioso de la historia del conocimiento sobre la génesis de las rocas sino, más bien, utilizar la historia de la ciencia en la medida en que, como se-

(*) Domicilio particular:
c/ mirador, Loma verde 11.
41120. Gelves. Sevilla.
Teléfono: 5600651

(**) Avda. República Argentina 24, 11.
41011. Sevilla.

ñalan Saltiel y Viennot (1985), puede aportarnos informaciones relevantes sobre el problema de la construcción del conocimiento. Constituyendo, por ello, un instrumento importante para determinar los contenidos fundamentales de la enseñanza (Gagliardi y Giordan, 1986) y los obstáculos que pueden aparecer en su aprendizaje, así como para orientar sobre posibles modos de tratamiento.

Bachelard (1938) considera que "Cuando se investigan las condiciones psicológicas del progreso de la ciencia, se llega muy pronto a la convicción de que hay que plantear el problema del conocimiento científico en términos de obstáculos", para apuntar más adelante que "(...) es ahí donde mostraremos causas de estancamiento y hasta de retroceso, es ahí donde discerniremos causas de inercia que llamaremos obstáculos epistemológicos."

Se ha señalado con frecuencia (Cailleux 1961, Taton 1964, Toulmin 1965, Albritton 1984, Sequeiros 1986 y 1988 ...) el papel crucial que el descubrimiento y, sobre todo, la interpretación de los fósiles ha desempeñado en el reconocimiento de la enorme antigüedad de la Tierra y en el desarrollo de las teorías evolutivas. Queremos, sin embargo, resaltar aquí la relación existente entre las interpretaciones que sobre el origen de los fósiles se han formulado y las teorías acerca de la génesis de las rocas que subyacen en dichas interpretaciones. Aprovecharemos de esta manera la mayor curiosidad, atención y necesidad de explicación que las llamativas formas de los fósiles han ejercido sobre los científicos, en relación con las rocas.

Referiremos el estudio, fundamentalmente, a los siglos XVI, XVII y XVIII. Su selección no es casual. En efecto, son unos siglos de gran riqueza y profusión de teorías sobre el tema que nos ocupa y en las que, además de sentarse las bases de

los modelos interpretativos actuales, se recogen, especialmente durante el Renacimiento, las concepciones vigentes en la antigüedad clásica, ofreciéndonos, en consecuencia, una perspectiva mucho mayor de la que cabría esperar de un periodo de tiempo de esta duración.

La relación que pretendemos establecer entre las teorías sobre el origen de las rocas y las más específicas acerca del origen de los fósiles, es tanto más pertinente cuanto que hasta principios del siglo XVIII el término fósil era referido a "cualquier objeto o material notable excavado de la tierra o encontrado en su superficie" (Rudwick 1976). El término incluía, además de lo que hoy consideramos fósiles, los cristales naturales, las menas minerales y las rocas útiles al hombre o más o menos curiosas.

Neoplatonismo y "virtus lapidifica"

En su obra "De Natura Fossilium" Agrícola (1494-1555) pretende superar las recopilaciones de "objetos excavados" que habitualmente se venían haciendo por orden alfabético, e intenta clasificarlos atendiendo a sus propiedades físicas. Entre ellas señala: el aspecto (color, brillo, transparencia), el olor (inmediato o después de choque o trituración), el sabor (acidez, sabor con el agua), sensación al tacto, porosidad, dureza, compresibilidad y forma, entre otras. Así distingue diversos grupos: "tierras" como la arcilla, "gemas" entre las que incluía las perlas y los cálculos biliares, "rocas" como el mármol, "metales" como las menas minerales, "fluidos solidificados" como la sal, el ambar y los corales, y "piedras", entre las que junto a minerales como el yeso incluía elementos que hoy consideramos fósiles.

Desde una perspectiva actual, se trata de una recopilación enormemente variopinta de objetos que poco tienen en co-

mún. Sin embargo, para las concepciones dominantes en la época, estos objetos "fósiles" tenían en común su carácter pétreo y, consecuentemente era previsible que tuvieran un origen común.

En los trabajos de Agrícola, sorprende que a pesar de hacer una excelente descripción de los procesos erosivos, nada dice sobre la sedimentación. Ello podría apoyar la idea, relevante para el aprendizaje de estos conceptos, de que no es evidente la relación causa/efecto entre erosión y sedimentación.

En el Renacimiento es frecuente atribuir a todos los fósiles u "objetos pétreos" explícita o implícitamente un origen relacionado con la intervención de un fluido o "agente petrificador" (que recibirá diversas denominaciones: "succus lapidificatus", "virtus lapidifica", etc.) que parecía existir no sólo en el interior de la tierra, favoreciendo la formación de cristales, o en las aguas, causando el desarrollo de estalactitas, sino también en algunas plantas como las algas calcáreas o los corales (todavía eran considerados vegetales), o en los animales, lo que justificaría la formación de perlas o cálculos biliares. Tampoco la atmósfera estaba exenta del "agente petrificador" como parecían mostrar los meteoritos.

Conrand Gesner (1516-1565) considerado como uno de los mayores naturalistas del siglo XVI, publicó un breve pero interesantísimo libro "De Rerum fossilium, Lapidum et Gemmarum maxime, figuris et similitudinibus liber" profusamente ilustrado en el que hacía la descripción de un buen número de "fósiles". El criterio de clasificación que utilizó fué su grado de semejanza con otros objetos, estableciendo 15 grupos. Así comenzaba con piedras que tenían formas geométricas, otras relacionadas con la actividad del hombre, "cuerpos celestes" y finalizaba con aquellas similares a plantas, frutos o animales.

En esta clasificación no aludía a la "naturalidad" de los fósiles, aunque probablemente pensase que al menos algunos de los que tenían formas similares a plantas o animales, eran restos de plantas o animales. Esta hipótesis vendría avalada, entre otras razones, por la inclusión junto con los tiburones, en su amplio tratado sobre los animales, de los objetos denominados "glosopetrae" (piedras en forma de lengua), cuya similitud con los dientes de tiburón había apreciado.

Hoy puede sorprendernos que se hiciera un tratado sobre los fósiles eludiendo, lo que desde una perspectiva actual, era el "tema central" que tenían por resolver: si los fósiles eran o no restos de seres vivos. Sin embargo, para Gesner, como para Agrícola, la cuestión no radicaba ahí. Era mucho más importante hacer descripciones detalladas que permitieran la identificación de los "objetos excavados" y su categorización según criterios morfológicos. Por otra parte, de acuerdo con la filosofía clásica dominante en la época, cualquier elemento podía ser analizado independientemente en términos de forma y materia. De tal manera que resultaba perfectamente pertinente hacer un tratado acerca de la forma de determinados objetos sin referirse a su naturaleza, o viceversa. Desde esa perspectiva, los fósiles podían ser considerados como imágenes, más o menos imperfectas, de animales, plantas o cuerpos astrales.

Gesner se identificaba con el pensamiento neo-platónico hermético (Rudwick 1976) y, por ello, ninguna de esas similitudes percibidas por Gesner debía ser considerada casual. Sin embargo, las piedras semejantes a animales o plantas podían deber esa semejanza a sus lazos de afinidad con diversos organismos, y no necesariamente a su origen como restos de dichos organismos. En efecto, si en el cosmos existía una amplia red de afinidades ocul-

tas, era explicable que muchos fósiles imitaran las formas de otras entidades y su origen podía ser atribuido a la "vis plástica" o fuerza moldeadora que determinaba el crecimiento de los seres vivos aunque, en este caso, actuaría en el interior de la Tierra.

El pensamiento aristotélico disponía de una interpretación coherente. Defendía que era posible la generación espontánea de seres vivos poco complejos a partir de materia no viviente por generación espontánea. Este proceso podía ocurrir no solo en la superficie terrestre, sino también en el interior de la tierra, de tal manera que el crecimiento se haría a partir de los materiales pétreos circundantes.

En consecuencia, aristotelismo y neoplatonismo ofrecían una cobertura filosófica a lo que podríamos denominar la "generación espontánea mineral de los fósiles", por ello no debe extrañarnos que esta explicación del origen de los fósiles sea tan frecuente en el Renacimiento.

Capel (1980) cita a Alonso Barba quien, en el "Arte de los metales" (1640) considera que "no puede ponerse en duda el que haya alguna virtud activa que engendre y haga las piedras", esta virtud, de naturaleza líquida, convierte en piedra cualquier objeto poroso que atraviese y por ello "se han visto en varias partes árboles enteros, partes y huesos de animales convertidos en durísimo pedernal".

Analogismo y vitalismo

Por otra parte, también se consideraba posible la formación de organismos más complejos en el interior de una masa rocosa si, arrastrada por filtraciones de agua, su "semilla" característica, conteniendo en potencia su forma (podemos observar aquí la idea de preformismo que, de acuerdo con Giordan 1987, era frecuente en la época), penetraba en el interior de la tie-

rra. Una vez allí, la "semilla", a través de un proceso de crecimiento comparable al de un ser vivo, y utilizando los materiales pétreos disponibles, podía originar un fósil con la forma característica del ser vivo cuya "semilla" se había filtrado. No se trataría, en consecuencia, de un resto orgánico de un ser que en su momento estuvo vivo, dado que la materia que constituía el fósil nunca fué orgánica.

El modelo explicativo era tanto más potente cuanto que desde la Grecia clásica hasta finales del siglo XVII era dominante la creencia de que existían unos conductos que recogían el agua marina conduciéndola hasta las cumbres de las montañas, donde originaban las fuentes. Este modelo era más coherente de lo que nos puede parecer en la actualidad de tal manera que incluso científicos del XVII como Kircher, u otros tan relevantes como Descartes o el mismo Steno compartían dicha tesis.

La existencia de estas filtraciones marinas permitía explicar además, la presencia de fósiles con formas semejantes a animales marinos en las cumbres de las montañas. Se ofrecía, así, una solución que resultaba más plausible que el recurso a cambios en la distribución de tierras y mares de una envergadura muy superior a la que parecía verosímil de acuerdo con los procesos geológicos que eran conocidos.

También en el siglo XVII gozaba de aceptación la concepción del origen de las rocas relacionada con la "fuerza seminal". Por ej. un prestigioso físico, contemporáneo de Descartes, Pierre Gassendi (1592-1655), defiende que para que se formen las piedras es necesario, además de que se reúnan muchos elementos, una "fuerza lapidificante" o fuerza seminal, que será la encargada de organizar internamente la sustancia de las piedras (Ellenberger 1988), dicha fuerza seminal "no sería esencialmente diferente de la que engendra las espigas, los huevos y los embriones".

Una explicación semejante era la ofrecida por Athanasius Kircher (1602-1680), para quién la forma de los fósiles era debida a un "spiritus plasticus" similar al que controla el desarrollo de un organismo, y su materia pétreo a una "virtud lapidificadora difusa en todo el cuerpo del geocosmos". Para Kircher, "Mundus subterraneus" (1665), la Tierra es considerada como un enorme organismo en el que las montañas representan su estructura ósea, el núcleo central sería ígneo y estaría comunicado con un conjunto de cavidades llenas de fuego, los "pirofilacios", o de agua, los "hidrofilacios", o de aire, los "aerofilacios" (Sierra 1981). El agua circularía por una serie de canales subterráneos a modo de conductos sanguíneos. Del mismo modo lo haría el aire, que quedaría conectado con el exterior. Este enorme organismo, la Tierra, sería movilizado por el fuego interior. En este modelo terrestre, kircher recoge numerosas ideas platónicas (especialmente del "Fedón") pero también concepciones comunes en su tiempo (Capel 1980), de ahí la importancia de que se resalten. Su obra "Mundus subterraneus" tendrá, además, gran influencia en la ciencia española del siglo XVIII.

Puede verse la influencia que, sobre los procesos geológicos en general y sobre el origen de las rocas en particular, ejerce el "analogismo" o el "vitalismo", como obstáculo para el desarrollo conceptual, durante estos siglos. Así, resultaba frecuente entre los mineros la idea de que los minerales extraídos eran permanentemente repuestos (Rudwick 1976). La percepción del crecimiento de minerales secundarios en las paredes de las minas apoyaría dicha interpretación.

Para Cardano (1501-1576) el "crecimiento" de los cristales o de las estalactitas muestra que las piedras participan, aunque de un modo especial, de la cualidad de la vida. La descomposición de los minerales

permitía su analogía con la enfermedad. Incluso la presencia en el interior de ciertos nódulos (los polémicos "aetites") de pequeñas piedras, parecía recordar la reproducción.

Bachelard (1938) presenta el caso, aún más tardío, de "fecundidad mineral" de Jules-Henri Pott quien, en su ensayo "Des Elements" publicado el 1782, dice: "Todos estos hechos, prueban la sucesiva reproducción de los metales, de manera que los filones que han sido explotados antiguamente pueden, al cabo de cierto tiempo, encontrarse nuevamente llenos de materias metálicas".

A mediados del siglo XVIII un pensador español tan influyente como el padre Jerónimo Feijó, en su obra "Teatro Crítico Universal", aunque ridiculiza el recurso al "espíritu lapidífico" (al que por cierto recurre en otras ocasiones) para explicar el crecimiento de las rocas: "eso es como decir que los pinos se producen por un espíritu pinífero o las berzas por un espíritu berzífero" (Capel 1985), considera que las rocas crecen nutriéndose "per intus sumpcionem" de un jugo de la tierra de la misma manera que los árboles lo toman por sus raíces. Esta analogía vitalista no sólo la utiliza para explicar la formación de las rocas, sino que, a mayor escala, es el mecanismo por el que se originarían las montañas.

Torres Villarroel, heredero de la concepción kircheriana del mundo, considera la Tierra un macrocosmos que reproduce a escala el funcionamiento del cuerpo humano (microcosmos). Capel (1980) cita el siguiente pasaje de su tratado sobre los terremotos (1748): "...las mismas indisposiciones y enfermedades que padece nuestro cuerpo son visibles en el mundo subterráneo (...) en desordenándose las exhalaciones, espíritus, vientos, aguas, azufres, nitros y otras materias inflamables de las que contienen en sus vientres y cavernas

hace temblar y titubear todo el cuerpo y arroja terribles arqueadas de cólera y fuego por los boquerones de los vesubios y los montes ignívomos”.

Bachelard (1938) cita algunos ejemplos similares en la Francia del siglo XVIII. De ellos, uno de los más llamativos es el de J.B. Robinet, quien en su obra “De la Nature” señala:

“Los minerales poseen todos los órganos y todas las facultades necesarias para la conservación de su propio ser, vale decir para la nutrición. No tienen la facultad locomotriz como tampoco la tienen las plantas, y algunos animales con concha como la ostra y las lapas. Es que no tienen necesidad de ir a buscar su alimento que viene a ellos. Esta facultad, lejos de ser esencial a la animalidad, en los animales que la poseen, no es sino un medio para subvenir a su conservación (...) ¿No estoy pues en lo cierto, al considerar a los minerales como privilegiados a este respecto, ya que sin cambiar de sitio, encuentran el alimento al alcance de sus labios?”

Observamos que la analogía animista, utilizada para explicar el origen de las rocas, va a ejercer su influencia como obstáculo epistemológico hasta finales del siglo XVIII.

Cambios geográficos, diagénesis y extinción de especies

Veremos a continuación tres instrumentos conceptuales básicos para construir las nociones acerca del origen de las rocas y, consecuentemente, de los fósiles, que suman a su importancia científica la dificultad que históricamente han presentado para su elaboración: diagénesis, extinción de especies y movilidad en la distribución de tierras y mares.

No todos los fósiles presentaban igual grado de dificultad para su interpretación. Los fósiles marinos recientes que, con fre-

cuencia, pertenecen a especies actuales, y cuya naturaleza orgánica no era posible negar, se encuentran por lo general en sedimentos sin compactar próximos a zonas marinas. Ello permitía explicar su existencia suponiendo cambios geográficos de una magnitud aceptable para las concepciones de la época, al tiempo que evitaba una de las dificultades conceptuales para su interpretación: la noción de diagénesis. Por el contrario, suponer un origen orgánico para los fósiles encontrados en el interior de rocas perfectamente diagenizadas implicaba, no sólo aceptar cambios geográficos de enormes proporciones, sino además explicar cómo podían haber penetrado en el interior de rocas coherentes cuyo aspecto resultaba muy diferente del de los sedimentos. O dicho en otros términos, implicaba tener construido no sólo el concepto de sedimentación sino, además, el concepto de diagénesis.

Para Rudwick (1976) gran parte de los filósofos que frecuentemente han sido citados por historiadores de la ciencia como científicos que supieron dar una interpretación “correcta” del origen de los fósiles, se han referido a los llamados fósiles “fáciles”. Es el caso, por ej., de Jenophanes de Colophon (siglo VI a. C.).

Leonardo da Vinci (1452- 1519) conocía los procesos de erosión y sedimentación, incluso explicaba la consolidación de las rocas como un proceso de “secado” de dichos sedimentos. Ello le permitió dar una interpretación sorprendentemente moderna del origen orgánico de los fósiles. No obstante, él se refería esencialmente a los fósiles cenozoicos del norte de Italia, generalmente moluscos muy parecidos a los que actualmente viven en el Mediterráneo.

Otro autodidacta como Leonardo da Vinci que hace importantes aportaciones sobre el origen de los fósiles es Bernard de Palissy (1510-1590). Palissy no duda del

origen orgánico de los fósiles, incluso, y esa es probablemente la innovación más destacable, de los que no se conocen ejemplares similares en la actualidad y que él considera especies "perdidas". Como causa de estas "pérdidas" ofrece una interpretación ingenua: "se han perdido por exceso de pesca". Explicación que además evidencia su idea sobre la escasa duración de los tiempos geológicos, lo que no puede sorprendernos en un hombre del siglo XVI.

Quizá convenga destacar que aunque Palissy está persuadido de que el origen de los fósiles no debe buscarse en el Diluvio ni en los "juegos de la naturaleza", sino que son restos de seres vivos que han sido petrificados, sin embargo ello no le conduce a dar el siguiente paso, que desde la perspectiva actual, resultaría inevitable: admitir importantes cambios en la distribución de tierras y mares en el pasado. Por el contrario formula interpretaciones "ad hoc", con frecuencia poco convincentes, para explicar la presencia de fósiles marinos en lugares alejados del mar. Ello permite apoyar la idea de la importancia de los cambios geográficos (o más correctamente, de la concepción inhibidora de dichos cambios: el fijismo más o menos radical) como obstáculo epistemológico.

Más aún que los "aciertos" parciales en la interpretación de los fósiles, resulta extraordinariamente ilustrativa la dificultad para admitir su origen orgánico, que tuvieron naturalistas cuyo conocimiento de los seres vivos era lo suficientemente profundo como para que, desde la perspectiva actual, resultase ello casi inevitable. Sin embargo la cuestión era más compleja, ya que no se trataba sólo de dar una explicación causal de la forma de los fósiles, sino además de la materia que los constituía y, sobre todo de su presencia en el interior de rocas consolidadas y su ubicación geográfica. Por ello no debe extrañarnos que

resultara más plausible una explicación que recurriese a "fuerzas moldeadoras" o a "semillas" arrastradas por las filtraciones de agua.

Así, Falloppio (1532-1563) cuyos trabajos de anatomía en Padua fueron de gran relevancia, aún siendo consciente de las semejanzas entre ciertos fósiles y los seres vivos opinaba que su presencia en la cima de colinas alejadas del mar, hacía que su origen orgánico resultara inaceptable. Por ello parecía inclinarse antes por una explicación basada en la generación espontánea, o en la existencia de fluidos petrificantes de diversa naturaleza que justificase la diferencia en las propiedades físicas de los "objetos excavados", que admitir cambios geográficos de proporciones tan enormes.

Todo ello parece indicarnos que la necesidad de incluir cambios geográficos de gran envergadura en las teorías sobre el origen de los fósiles ha constituido, en el sentido "bachelardiano", un verdadero obstáculo epistemológico.

Una explicación recurrente sobre el origen de los fósiles era la que partiendo de su origen orgánico, justificaba su localización relacionándolos con el Diluvio. Martín Lutero, que debía estar familiarizado con las rocas pues era hijo de un minero, en su obra "In primum librum Mose enarrationes" (1544) como parte de sus comentarios al Génesis, defiende dichas posiciones. Probablemente el triunfo de la Reforma protestante ayudó a la difusión de las explicaciones diluvialistas que, por lo demás, también se hallan presentes en los científicos católicos, llegando a ser las tesis dominantes a finales del siglo XVII.

Como puede verse, no bastaba con defender un origen orgánico de los fósiles para dar una explicación mínimamente satisfactoria (desde el punto de vista actual de la ciencia) de su presencia en el interior de rocas situadas en la cima de algu-

nas montañas. Hoy podemos afirmar que, además de contar con ideas acerca de los procesos de fosilización, ello exigía disponer de:

- *Una teoría de la sedimentación*, que explicase la simultaneidad en el depósito de los restos de seres vivos y los materiales inorgánicos.

- *Una teoría de la diagénesis*, que permitiera comprender los procesos por los que un sedimento puede transformarse en una roca sedimentaria.

- *Una teoría orogénica*, que justificase cómo los materiales depositados en un fondo oceánico pueden deformarse y emerger hasta ocupar la situación actual.

Las dos primeras teorías comienzan a tener una formulación científicamente sólida con Steno. La tercera aún tardaría siglo y medio más.

El danés Niels Stensen (1638-1686), más conocido por su nombre latinizado Steno, tiene el enorme acierto de formular su hipótesis acerca del origen de los fósiles integrándola dentro de una teoría fundamentada sobre los procesos de formación de las rocas estratificadas.

Steno, haciendo el estudio anatómico de un tiburón gigante identificó sus dientes con las "glosopetrae", llegando a la conclusión, que rechazó que fuese categórica, del origen orgánico de estos fósiles. Expuso sus conclusiones en "Canis Carcharie" (1667). Comenzó su ordenada argumentación mostrando que no había ninguna evidencia acerca de su posible crecimiento "in situ" en el interior de la roca. Los dientes de tiburón, al principio debieron estar recubiertos por tierra sin compactar, dado que no presentaban deformaciones como las raíces de los árboles que crecen en los intersticios de las rocas. Las diferencias entre la naturaleza del material que componía las "glosopetrae" y los dientes de tiburón los explicaba como resultado de impregnaciones o de pérdidas de

productos volátiles. Finalmente Steno considera que "Nada parece oponerse a que los cuerpos extraídos de la tierra, parecidos a partes de animales, sean considerados partes de animales", y "no veo nada que nos impida considerar esta tierra como un sedimento del agua, acumulado poco a poco".

Merece la pena detenerse en lo que probablemente sea su aportación más importante: "*los estratos son antiguos depósitos de sedimentos acumulados poco a poco*". Ellenberger (1988) hace una amplia reseña de la obra de Steno de la que destacamos los aspectos más relevantes para el tema que nos ocupa:

"- Ya la naturaleza variada de los estratos incita a creerlo [que la tierra es un sedimento del agua, acumulado poco a poco]."

Es fácil observar, tanto en los lechos como en las desembocaduras de los ríos, lo que ocurre en las aguas turbias, marinas o torrenciales; una vez vuelta la calma, el agua deja de caer al fondo los cuerpos que causaban dicha turbidez, los más pesados primeramente, los más ligeros, que permanecen flotando durante mucho tiempo, en último término. Esto explica en un sedimento dado, los estratos variados".

Enumera seguidamente las posibles modalidades de sedimentación, separándose del agua limpia los materiales que contenía: el enfriamiento, la evaporación y la presencia de ciertos fluidos.

A continuación señala el origen de los fósiles:

" Los animales ya en el fondo, o muertos o bien vivos pero incapaces de moverse, se recubrirán por un nuevo sedimento (...) Mientras que durante una larga serie de años el sedimento se endurece poco a poco, acumulado en un todo con los cuerpos mencionados anteriormente, el fluido

muy sutil no puede dejar intactos a éstos. Según la naturaleza de la tierra ambiente, extrae de ellos el jugo animal, o bien le añade un jugo mineral, o bien el jugo animal una vez agostado, introduce el jugo mineral..."

Observamos como Steno da respuestas a las cuestiones relacionadas con la forma de los fósiles, la naturaleza de la materia que los constituye y su localización en el seno de los estratos. Estas respuestas coherentes son posibles en la medida en que dispone de una teoría acerca de la formación de las rocas, lo que le permite justificar la presencia en ellas de fósiles que se habrían depositado al mismo tiempo que los sedimentos.

Por otra parte, Steno introduce un elemento clarificador al diferenciar conceptualmente los cristales de los "cuerpos parecidos a partes de animales". Hasta entonces el debate había resultado especialmente complejo dado que, como se ha referido con anterioridad, el concepto de fósil que se tenía en la época era mucho más amplio que el actual, y las respuestas no podían ser iguales para las "glossope trae" que para los cristales. Señalar esta diferenciación resultaba, en consecuencia, necesario para avanzar.

Steno, igual que sus contemporáneos, considera que la edad de la Tierra es de unos seis mil años, por ello, para justificar la existencia de estratos inclinados y la ubicación de fósiles en zonas alejadas del mar, recurre a catástrofes o cataclismos subterráneos que recuerdan el modelo de formación de la Tierra expuesto por Descartes (Gohau 1983).

Al mismo tiempo que Steno, otro gran científico Robert Hooke (1635-1703) estudiaba también el problema de los fósiles, y lo hace, como cabría esperar de él, partiendo de un análisis microscópico. Detecta que la microestructura de algunos

ejemplares de madera fósil, presentaba marcadas semejanzas con la de la madera seca o el carbón. La naturaleza pétreo de la madera fósil, pensó que podía deberse a que "hubiera yacido en algún lugar en el que quedó perfectamente impregnada con agua petrificadora" (Micrografía).

Hooke se detiene en explicar con todo detalle la forma y la naturaleza de los fósiles, realizando una minuciosa argumentación contra la falta de fundamentación de la hipótesis basada en la "virtud plástica". Sin embargo no parece preocuparle demasiado la ubicación de los fósiles en tierra firme, atribuyéndolo a "algún diluvio, inundación, terremoto u otros medios por el estilo".

Más adelante añade otro argumento, en este caso se trata de un argumento teleológico: " (...) pues es algo que me parece contrario [la formación atribuida a la virtud plástica] a la infinita prudencia de la naturaleza, la cual, en todas sus obras y producciones, puede verse que planifica todas las cosas para un fin determinado (...)"

Este finalismo viene a recordarnos que a pesar de la lógica irreprochable de su análisis se trata de un hombre del siglo XVII que, como tal, participa de una interpretación del mundo como obra del Creador, en el que todos los elementos integrantes han sido puestos para un fin determinado.

No deben infravalorarse las dificultades que presentaba una interpretación "correcta" del origen de los fósiles con los instrumentos conceptuales de que se disponía. Especialmente elocuente puede ser el caso de un naturalista de prestigio: Martin Lister (1638?-1712) pertenecía a la Royal Society. Había leído la traducción al inglés de la obra de Steno. Su gran conocimiento de los moluscos vivientes (había publicado un magnífico tratado al respecto: "The History of Shell") le permitió afirmar que

el origen orgánico de los fósiles defendido por Steno, podría aceptarse para los fósiles italianos que describía (que se encontraban entre los que podemos considerar "fáciles"), pero no para los ingleses que él conocía (procedentes en su mayoría del Carbonífero y del Jurásico y correspondientes a especies extinguidas).

Consideraba Lister que el argumento del origen orgánico se basaba en un análisis superficial de "ciertas similitudes". No existen, afirmaba Lister, seres vivos con conchas como las que se pueden encontrar petrificadas en las canteras inglesas y declaraba estar dispuesto a rectificar su posición acerca de su origen si se le demostraba que existían seres vivos idénticos. Como puede verse su argumentación estaba basada en un sólido conocimiento de la fauna viviente. Aceptar que los fósiles a los que se refería eran restos de seres vivos, implicaba suponer que en el pasado podían haber existido seres vivos diferentes a los actuales y, ésta, era una hipótesis que llevaba aneja una concepción del mundo diferente y que aún no había sido contemplada por la ciencia.

Pero el concienzudo análisis de Martin Lister fué más allá. Observó que los fósiles presentes en rocas diferentes, eran también diferentes. Concluyendo que de ser el proceso de formación de fósiles, tal y como lo concebía Robert Hooke, consecuencia de haber sido "arrojadas" a tierra las conchas, deberían ser todas iguales, con independencia de las rocas en que se encontrasen. Podemos constatar como la detección de un hecho que tendrá posteriormente una importancia crucial en Geología (la existencia en los estratos de fósiles característicos), supone, paradójicamente, un obstáculo conceptual de primera magnitud.

John Ray (1627-1705), en su trabajo "Observations topographical, moral and physiological, made in a Journey through part of the low Countries..." planteó con

gran claridad la solidez de los argumentos, tanto a favor como en contra, del origen orgánico de los fósiles. Expuso, de una parte, que la naturaleza de las similitudes entre las conchas de los seres vivos y los fósiles, hacían poco creíble cualquier interpretación que no fuera la del origen orgánico. Así, la articulación que presentaban las conchas de los bivalvos fósiles era igual que la de los vivientes y no parecía razonable su presencia en los fósiles si no había sido funcional. De otra parte, el hecho de tratarse de especies diferentes obligaba a admitir la extinción de especies. Lo que suponía dificultades de diversa índole, no siendo la menor de ellas que implicaba que la Creación original no había sido perfecta.

Ante esta dificultad, John Ray prefería suponer que se trataba de especies que seguían vivas, aunque todavía no habían sido descubiertas. Tesis ésta, especialmente verosímil en un momento en que los continuos viajes al nuevo mundo estaban mostrando la existencia de especies hasta entonces desconocidas.

No obstante, quedaban sin resolver problemas como la presencia de los fósiles en el interior de estratos rocosos y su ubicación a veces en cumbres tan altas como los Alpes. El recurso al Diluvio o a la acción de terremotos causantes del levantamiento de las montañas, aunque no le parecían suficientemente sólidos, era los únicos de que disponía.

John Woodward (1665-1728) en su "Essay toward a Natural History of the Earth" (1695), parte del origen orgánico de los fósiles, centrándose en intentar dar una explicación a la presencia de éstos en el interior de los estratos y proponiendo el Diluvio como motor de todo el proceso. Para Woodward, durante el Diluvio se había formado una densa suspensión acuosa de materiales terrestres y de organismos, a partir de la cual se irían sedimentando según su peso específico originándose los estratos.

No es de extrañar que ante las dificultades, que parecían insalvables, para conjugar el origen orgánico de los fósiles con su naturaleza pétreo, su ubicación en el seno de los estratos y su localización geográfica, surgieran de nuevo tesis similares a las aristotélicas. Es el caso de Edward Lhwyd (1670-1709) que recogiendo las ideas "animaliculistas" de la existencia de las características del individuo en el seno de la "semilla" de cada especie, planteó la posibilidad de que, a través de las grietas de las rocas, se hubiesen introducido en el interior de la tierra las "semillas" de los organismos, desarrollándose "in situ".

Una idea de la dificultad de conceptualización de los procesos diagenéticos puede obtenerse del estudio de "Traité du Deluge", obra de Micheli du Crest publicada en 1761. Du Crest opina que en los años que siguieron al Diluvio, debieron ser muy escasas las rocas duras predominando el barro, del cual se formarían, gracias al calor del sol, la mayor parte de las rocas que hoy constituyen las montañas (Capel 1985).

Georges Buffon (1707-1788), uno de los naturalistas más importantes del siglo XVIII, sometió a dura crítica las teorías diluvialistas como las de Burnet o Woodward. Si las conchas fósiles, argumentaba Buffon, hubiesen sido esparcidas por el diluvio, la mayoría deberían encontrarse sobre la superficie, y no sería posible hallarlas a gran profundidad y en el interior de rocas consolidadas. Además su distribución en capas paralelas mostrarían que el depósito "no se hizo en un instante sino por los sedimentos que poco a poco se fueron acumulando" (Capel 1985).

Orígenes del basalto y del granito.

Si hasta el siglo XVII, buena parte de las teorías sobre la génesis de las rocas, hemos debido inferirlas de las concepcio-

nes que se ofrecen acerca del origen de los fósiles, a partir del siglo XVIII comienzan a ser relativamente frecuentes las teorías que se centran en el origen de las rocas, y que incorporan justificaciones de la presencia de fósiles en su interior.

Una de las teorías de la Tierra más globalizadoras fué la formulada por alemán Abraham Werner (1749-1817) en una breve publicación "Kurze Klassifikation und Beschreibung der verschiedenen Gebirgsarten". En ella no sólo hacía una clasificación (con pretensiones de validez universal) de las rocas, sino que señalaba su origen y, simultáneamente, explicaba el origen del relieve terrestre.

Werner recoge las aportaciones realizadas para la clasificación de las rocas por otros dos alemanes Lehman y Füchsel, las amplía y generaliza al tiempo que las incluye en un modelo global que explica su origen.

Parte de la idea de Leibnitz de una Tierra inicialmente cubierta por un océano primordial. Las aguas de este océano todo lo cubrían (razón esta por la que pronto fué conocida como teoría neptunista) y contenían gran cantidad de materiales disueltos y en suspensión. Para Werner, la historia de la Tierra había consistido en un proceso lineal en el que han ido depositándose los materiales al mismo tiempo que iba bajando el nivel de las aguas. De esta manera se formarían sucesivamente los distintos niveles de rocas:

Urgebirge, o rocas primitivas, su origen sería exclusivamente por precipitación química. Aquí incluía el granito, gneis, esquisto y otras rocas cristalinas. No presentan fósiles.

A medida que va descendiendo el nivel del océano se depositan las rocas de "transición" (übergangsgebirge). Son en parte de precipitación química y en parte de origen mecánico. Contienen pocos fósiles. Incluía pizarras, grauwacas y calizas.

Más tarde se depositan los floetz (flötzgebirge). Son rocas estratificadas en las que ha predominado el componente mecánico sobre el químico y que poseen abundantes fósiles. Werner incluye en este grupo desde areniscas y calizas hasta yesos y basaltos.

Finalmente, y una vez que han emergido ya los terrenos más altos, se depositan los terrenos aluviales (aufgeschwemmte), formados por la meteorización mecánica de rocas anteriores. Son sedimentos poco compactados que incluyen conglomerados, arenas y arcillas. Por último estaban los materiales volcánicos muy recientes, lavas y tobas (Vulkanische gesteine)

Lo innovador de una clasificación como ésta es que relacionaba las características litológicas con su origen, antigüedad y presencia o ausencia de fósiles, al tiempo que tenía una validez universal. No resulta, en consecuencia, extraño que tuviera éxito.

Una de las primeras objeciones planteadas a Werner fué qué había ocurrido con el agua de ese oceano primitivo, cuyo volumen debió haber sido enorme para contener todos los materiales que se depositaron posteriormente. Werner nunca dió una respuesta satisfactoria a esta cuestión. Sin embargo fué la pretensión de universalidad de su clasificación de rocas y, sobre todo, el origen del basalto lo que motivó las mayores polémicas.

El basalto que conocía Werner era el de Sajonia, allí se presenta en capas horizontales o subhorizontales intercaladas entre rocas sedimentarias estratificadas y, frecuentemente, con disyunción columnar. Estas características, junto con la ausencia de escorias volcánicas relacionadas con aquellos basaltos parecían avalar la hipótesis sedimentaria de los neptunistas. Por contra, otros autores como Dolomieu (1750-1801) y Desmarest (1725-1815), que conocían los volcanes de Auvernia en el

Macizo Central, no dudaban en asignarle al basalto un origen volcánico, razón esta por la que se les conoció como vulcanistas.

Los vulcanistas consideraban al granito una roca primordial que formaría parte de la corteza original de la Tierra. Hutton (1726-1797), por el contrario le asignaba un origen ígneo. La polémica entre neptunistas, vulcanistas y plutonistas (partidarios de las posiciones de Hutton) se prolongó a lo largo de las dos últimas décadas del siglo XVIII y la primera del XIX, y ha sido bien recogida por Hallam (1983), autor al que remitimos.

La historia posterior es menos relevante para el objetivo de este trabajo. Conviene, no obstante, llamar la atención sobre el hecho de que las diferentes teorías acerca del origen de las rocas que se han reseñado, hacen intervenir el agua, los procesos ígneos o ambos. Nada se ha dicho en relación con la noción de metamorfismo. Para Cailleux (1961) este término fué introducido en 1825 por Lyell. Orcey, J. (1964) señala que unos años antes que Lyell, Leopold von Buch había realizado algunas observaciones sobre procesos metamórficos en las rocas. Sea como fuere, lo cierto es que, de las nociones básicas relacionadas con el origen de las rocas, el metamorfismo es la última en aparecer.

No parece ser casual su tardía introducción histórica. Es este un hecho sobre el que conviene reflexionar por su posible relevancia para la enseñanza y el aprendizaje de la geología. En efecto, se trata de procesos que, en general, ocurren a grandes profundidades y que presentan perfiles no siempre claros, oscilando entre la diagénesis y los procesos de fusión de las rocas. Todo ello deberá considerarse antes de decidir a partir de qué momento conviene la introducción de estas nociones, que sin duda presentan importantes dificultades de conceptualización, en el aula.

Obstáculos en la construcción de las nociones sobre el origen de las rocas

En las páginas anteriores se ha pretendido hacer una aproximación al estudio de las dificultades, inercias u obstáculos epistemológicos, en el sentido bachelardiano, que, históricamente, se han presentado al formular teorías que ofrecieran una interpretación acerca del origen de los fósiles y/o de las rocas. Se ha dado un enfoque diacrónico, a veces globalizado, integrando o relacionando obstáculos parciales de diversa índole: conceptuales, metodológicos y actitudinales.

A continuación, a modo de conclusión y siguiendo un enfoque más analítico, se relacionan aquellos obstáculos epistemológicos que consideramos históricamente más relevantes para el tema que nos ocupa:

1. Obstáculos relacionados con teorías del mundo.

Incluimos aquí aquellos sistemas interpretativos globales y visiones precientíficas de la naturaleza que han condicionado la interpretación del origen de las rocas. En general son obstáculos complejos, con perfiles polimorfos, que frecuentemente tienen implicaciones actitudinales, a veces metodológicas, pero que siempre han supuesto obstáculos conceptuales:

- El "Fijismo". Este término, que habitualmente se utiliza por oposición al evolucionismo para aludir a una determinada interpretación de la historia de los seres vivos, encierra toda una teoría de la naturaleza y, consecuentemente, tiene implicaciones geológicas. En efecto, la visión estática de la Tierra ha sido quizá el más importante y persistente obstáculo para el desarrollo de las interpretaciones sobre el origen de las rocas y, probablemente, sea el más determinante y el primero que deba considerarse en el aprendizaje de este campo conceptual (Pedrinaci, 1987).

- El "Creacionismo". Relacionado con el anterior, pero con perfiles propios, dado que no siempre van asociados.

Tanto el fijismo como la creencia de que los materiales terrestres proceden del "acto" de la Creación, han actuado como inhibidores de cualquier explicación, científicamente fundamentada, sobre los orígenes de las rocas. Sólo si se considera la posibilidad de que las rocas actualmente existentes, no sean las mismas que había cuando se formó el planeta, tiene sentido interrogarse acerca de los procesos de formación de esas rocas. En caso contrario no hay pregunta y, consecuentemente, no habrá respuesta.

- La "Cronología corta" o cronología bíblica, que atribuía a la Tierra una edad aproximada de seis mil años, obligaba a incluir en este estrecho margen todos los procesos geológicos. Ha estado frecuentemente relacionada con el creacionismo y ha favorecido interpretaciones fijistas (en tan corto lapso de tiempo pocos cambios importantes han podido ocurrir), o visiones catastrofistas (si han ocurrido cambios importantes, habrán sido causados por catástrofes).

- El "Animismo" o analogía vitalista, como se ha intentado mostrar, alcanza probablemente su máxima influencia en el siglo XVI y la primera mitad del XVII, siendo en este último siglo su máximo exponente el padre Athanasius Kircher con su obra "Mundus subterraneus".

2. Obstáculos metodológicos:

- La "metodología de la superficialidad" (Gil y Carrascosa 1985), como forma de abordar la resolución de los problemas geológicos, ha sido dominante hasta el siglo XIX. La falta de rigor que implica, no sólo ha dificultado el avance científico, sino que ha posibilitado, cuando no favorecido, la supervivencia de concepciones míticas o precientíficas.

- El "inductivismo ingenuo" no ha estado ausente en el tratamiento de las cuestiones relacionadas con el origen de las rocas.

Junto a estos obstáculos metodológicos, podemos señalar algunas dificultades procedimentales "objetivas" (no propiamente obstáculos epistemológicos en el sentido "bachelardiano") que complejizan u obstaculizan el desarrollo conceptual. Entre estas podemos citar:

- La profundidad e inaccesibilidad a la que ocurren muchos de los procesos relacionados con la génesis de las rocas.

- La imposibilidad/dificultad que existe de reproducir en el laboratorio dichos procesos.

- Las enormes escalas espaciales y temporales implicadas en la formación de las rocas.

3. Obstáculos actitudinales:

Entre ellos podrían citarse la actitud dogmática, tan frecuente en la historia de la ciencia, la transferencia acrítica al campo científico de ideas o creencias religiosas, el conservadurismo intelectual, entre otros. Todos ellos se hallan, en mayor o menor medida, implícitos en los obstáculos epistemológicos relacionados con los sistemas interpretativos del mundo señalados en el punto 1.

Sin pretender hacer una traslación simplista entre el proceso histórico de construcción de las ideas acerca del origen de las rocas y su desarrollo en el aula, los obstáculos reseñados sí que nos parecen una referencia, útil como hipótesis de partida, para investigar en qué medida constituyen también obstáculos para el aprendizaje. Así, de todos ellos unos, como el creacionismo o el animismo parecen ser más propios de épocas pasadas (su posible presencia en nuestras aulas convendría investigar), en cambio otros como el fijismo, la metodología de la superficialidad o

la actitud dogmática, por citar tres ejemplos representativos, parecen tener mayor incidencia en los procesos de aprendizaje del campo conceptual que nos ocupa.

Queremos subrayar por último que la historia de las concepciones sobre el origen de las rocas, avala la importancia de trabajar los procesos por los que las rocas se forman y cambian. Y ello por dos razones, de una parte porque, como se ha pretendido mostrar, no resulta evidente para cualquier observador de la naturaleza que las rocas se hayan originado (y que lo seguirán haciendo) a lo largo de la historia de la Tierra y, de otra, porque ello favorece la construcción de una noción que consideramos uno de los conceptos clave y con mayor potencialidad estructurante: la roca entendida como material en el que se encuentran encerradas las informaciones de que disponemos para reconstruir el pasado de la Tierra. O, expresado en otros términos, las rocas serían los "documentos" o "archivos" (Gohau 1987) que contienen la información sobre la historia del planeta, y la enseñanza de la Geología pretendería el aprendizaje de los procedimientos para interpretar o descifrar dichos "archivos".

REFERENCIAS

- ALBRITTON, C. C. 1984, Geologic Time, *Journal of Geological Education*, v. 32, pp 29-37.
- ARISTOTELES, *Meteoros* (Tr. francés J. Tricot, Les Meteorologiques, 1955, Librairie Philosophique, J. Vrin).
- BACHELARD, G. 1938. *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin (Tr. cast. La formación del espíritu científico, 1983, Siglo XXI: México).
- CAILLEUX, A., 1961. *Histoire de la Géologie* (Presses Universitaires de France:Paris). (Tr. castellana de N. Bastard, Historia de la geología, 1964, Eudeba :Rivadavia).

- CAPEL, H. 1980. Organicismo, fuego interior y terremotos en la Ciencia Española del sgo XVIII. *Geo-Crítica*, n 27-28, Universidad de Barcelona, 94 pp.
- CAPEL, H. 1985. *La física sagrada*. Serbal: Barcelona.
- ELLENBERGER, F., 1988. *Histoire de la Géologie* (Tr. castellana M. Rubió, Historia de la Geología, 1989, Labor: Madrid).
- GAGLIARDI, R. Y GIORDAN, A. 1986. La historia de las ciencias: una herramienta para la enseñanza, *Enseñanza de las Ciencias*, vol.4, pp 253-258.
- GIL, D. y CARASCOSA, J. 1985. Science learning as a conceptual and methodological change, *European Journal of Science Education*, vol 7, pp. 231-236.
- GIORDAN, A. et al. 1987 *Histoire de la Biologie* (Tr. cast. M. Crespo, Conceptos de Biología, 1988. Labor: Barcelona).
- GOHAU, G. 1983. Idées anciennes sur la formation des montagnes, *cabiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, n 7, 86 p.
- GOHAU, G. 1987. *Histoire de la Géologie*. La Découverte: Paris.
- HALLAM, A. 1983. *Great Geological Controversies* (Oxford University Press). (Tr. española de J.M. Fontboté, Grandes controversias geológicas, Labor: Barcelona).
- HOOKE, R. *Micrographia*, (Tr. cast. C. Solís, Micrografía, 1989, Alfaguara: Madrid).
- ORCEL, J. 1964. *Las ciencias mineralógicas*. En Taton, R. *Histoire générale des sciences*, Paris PUF, 4 vols.
- PEDRINACI, E., 1987. Representaciones de los alumnos sobre los cambios geológicos, *Investigación en la Escuela*, n 2, pp 65-74.
- RUDWICK, M. 1976. *The meaning of fossils: episodes in the History of Paleontology* (Tr. cast. A. Resines, El significado de los fósiles, 1987, Blume: Madrid).
- SALTIEL, E. Y VIENNOT, L., 1985. ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los alumnos, *Enseñanza de las Ciencias*, vol 3, pp. 137-144.
- SEQUEIROS, L. 1984. Producción científica paleontológica española en el siglo XIX: impacto de la modernidad. *Actas del II Congreso Sociedad Española de Historia de la Ciencia*, Jaca pp 453-468.
- SEQUEIROS, L. 1986. Evolución de las Teorías de la Evolución (1859-1986). *Memoria Museo paleont. Zaragoza*
- SIERRA, E., 1981. El Geocosmos de Kircher. Una cosmovisión científica del siglo XVII. *Geo-Crítica*, 33-34 pp 5-82.
- TATON, R. (Ed.), 1957-64, *Histoire générale des sciences*, Paris, PUF, 4 vols. (tr. cast. Historia General de las Ciencias, 1971, Destino: Barcelona).
- TOULMIN, S. Y GOODFIELD, J. 1965. *The Discovery of Time*

SUMMARY

In this issue interpretations of historic evolution about rocks origin are analyzed. Authors suggest possible epistemological obstacles, that might be considered for the treatment of this conceptual field.

RESUMÉE

Dans ce travail est analysé l'évolution historique des interprétations sur l'origine des roches et sont remarqués de possibles obstacles épistémologiques qu'il convient considérer pour le traitement, dans la classe, de ce champ conceptuel.