

## **EL TIEMPO EN LA GEOLOGÍA**

*Comunicación efectuada  
por el Académico Titular Dr. Alberto C. Riccardi  
en la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires,  
en la sesión plenaria del 29 de noviembre de 2010*



# EL TIEMPO EN LA GEOLOGÍA

Dr. ALBERTO C. RICCARDI

Palabras clave: Estratigrafía, Cronoestratigrafía, Geocronología, GSSP

## El Tiempo

Ya San Agustín, en sus *Confesiones*, realiza la profunda pregunta: “¿Qué es, pues, el Tiempo?” para luego responderse: “Si nadie me lo pregunta, lo sé; si quiero explicárselo al que pregunta, no lo sé. Pero con seguridad afirmo que sé que si nada pasara no habría tiempo pasado; y si nada llegara, no habría tiempo futuro; y si nada existiera no habría tiempo presente” (Agustín, 2006).

El tiempo que interesa aquí es el tiempo de las ciencias naturales o tiempo físico, el cual tiene dos significados (cf. Harrington, 1965), por un lado el número que representa la duración de un acontecimiento o la duración entre dos acontecimientos y por otro el número (“fecha”) que representa el instante de un acontecimiento. El concepto fundamental es el segundo y no el de medida de una duración, pues el segundo puede ser derivado del primero, mientras que lo inverso no es posible. De esta forma el tiempo es un sistema de particiones en el mundo cuatridimensional, un sistema de “instantes” imaginarios, infinitesimales y universales, en el espacio-tiempo, que desde aquí-ahora se proyecta hacia el Pasado y Futuro Absolutos. De esta manera construimos una trama del tiempo divisible en intervalos progresivamente más largos o más cortos que comienzan en un cero común y están relacionados entre sí por relaciones fijas e inmutables. Pero esta trama solamente cobra significado cuando en ella colocamos los acontecimientos (y sus resultados) del mundo exterior, tal como lo dijera San Agustín en el siglo IV.

De acuerdo con las características de tales acontecimientos podemos hablar de distintos tipos de tiempo, como intervalos de diferente tipo, discriminados de alguna forma específica o implícita de

otros intervalos. Podemos así hablar de tiempos medievales o de tiempos modernos o contemporáneos o de tiempos geológicos. En este caso nos referimos usualmente a los que se extienden desde la formación de la Tierra hasta el presente.

A través de la historia de la especie humana, el origen de la Tierra ha sido muchas veces relacionado con el comienzo del Tiempo como tal, lo cual ha dado lugar a opiniones divididas. Así en diversas culturas y civilizaciones, como la hindú, la china, las de América central o los budistas y los griegos precristianos se ha considerado al tiempo como un ciclo eterno, vinculado a diferentes dioses, similar a los ciclos diurnos, lunares o estacionales. Esta visión contrasta con la de la tradición judeo-cristiana, que dio origen a la investigación científica moderna, en la que hay un solo Dios en cuyo acto creativo se origina y desenvuelve el Universo y el tiempo hasta un fin que se diluye en la eternidad del mismo Creador.

De esta manera lo temporal y lo eterno, y la linealidad y la ciclicidad del tiempo han convivido en las grandes religiones y han perdurado de diversas maneras en la sociedad contemporánea. En un extremo de esta dicotomía la historia es una sucesión irreversible de sucesos que no se repiten, y en el otro extremo hay una repetición de ciclos que reflejan estados inmanentes de la materia. La comprensión de la linealidad o flecha del tiempo se basa en sucesos distintivos e irrepetibles, mientras que la de los ciclos temporales lo hace en la estructura legaliforme subyacente, sin un ordenamiento temporal manifiesto.

Al tratar el tema del Tiempo en la historia de la ciencia moderna se hace usualmente referencia en primer lugar a Galileo, quien estableció el Tiempo como una cantidad mensurable en la actividad legaliforme del Cosmos, al descubrir la ley del péndulo midiendo el movimiento de una lámpara colgante con relación a sus propias pulsaciones. Se sigue luego con la definición del Tiempo absoluto, verdadero y matemático de Newton, basado en la hipótesis de que los movimientos de los cuerpos materiales a través del espacio siguen estrictas leyes matemáticas, lo que dio lugar a una visión de un Cosmos asimilable a un gigantesco mecanismo de relojería, predecible hasta en sus más mínimos detalles. El tiempo absoluto de Newton sería luego, culminando la saga, invalidado por la relatividad espacio-temporal de Einstein.

Vistas las contribuciones de estos científicos y enfatizando otros aspectos se podría decir que Galileo, junto con Copérnico, revolucionaron con sus observaciones la idea de la ubicación de la especie

humana, a la que desalojaron del centro del Universo. Es en ese contexto que se hace visible el hecho de que en la mayor parte de las contribuciones dedicadas a estos temas prácticamente no hay mención alguna de las observaciones que condujeron al descubrimiento del “Tiempo profundo”, hecho que desplazó a la especie humana del centro del Tiempo al abandonar una concepción limitada del mismo.

Hasta el siglo XVII, en tiempos de Newton, la idea predominante era que el mundo había sido creado en el año 4000 a. de C. Tal idea no era caprichosa sino que se basaba en una serie de detallados estudios efectuados en prestigiosas universidades de la época, en los que se intentaban relacionar los sucesos relatados en la Biblia con observaciones realizadas sobre el planeta Tierra.

Esta cronología se originaba en un cálculo de genealogías bíblicas debido a Martín Lutero y otros en el siglo XVI y perfeccionado a principios del siglo XVII por el obispo anglicano James Ussher (1581-1656) en su obra *Cronología Sagrada*, sobre la base de relaciones establecidas con una cronología de eclipses solares determinada por Kepler. De esta forma se había llegado a aceptar que la creación del Universo se había efectuado en el año 4004 a. de C. O sea que la antigüedad aceptada para el mundo y el Universo en general era de unos 5.600 años, en coincidencia con la historia reconocida para la propia especie humana

En este contexto la mayor parte de los académicos de la época trató de presentar la historia del planeta como una evidencia de la concordancia entre la palabra de Dios, según los textos sagrados, y sus obras, representadas por los objetos de la naturaleza. En definitiva se trataba de identificar causas naturales en la sucesión de eventos narrados en la Biblia y de demostrar así la perfección de la creación divina.

Al margen de Galileo y de Newton, un ejemplo de este tipo de análisis se halla en Thomas Burnett (1635?-1715), cuyas ideas fueron alabadas por su amigo Isaac Newton, quien trató incluso de ayudar a mejorarlas. Una síntesis de las mismas se halla en la portada de la obra de Burnett *Teoría Sagrada de la Tierra*, donde se observa (Figura 1) a Jesús parado sobre una sucesión circular de representaciones de la Tierra, con su pie izquierdo al comienzo y el derecho al final de su historia. Sobre su cabeza se observa la frase del Apocalipsis: Yo soy el Alfa y el Omega. Siguiendo la sucesión de izquierda a derecha se ve en primer lugar el caos de la Tierra original, luego sigue la Tierra perfecta del Paraíso representada sin rasgos característicos y a continuación la Tierra cubierta por las aguas del Diluvio Universal, con el arca de Noé incluida. Luego del retiro de las aguas



Figura 1. Portada de la obra de T. Burnet, 1684, *Teoría Segrada de la Tierra* (en Rudwick, 1972)

aparece, abajo en el centro, la Tierra tal como la conocemos. Este estadio es seguido hacia la derecha, por la Tierra consumida por el fuego, la que es seguida por condiciones de perfección bajo el reinado milenario de Cristo y, posteriormente, por la Tierra convertida en una estrella, ya innecesaria como lugar para la Humanidad luego de la batalla final contra las fuerzas del mal, el Juicio Final y el ascenso de los justos al Cielo. En definitiva se presenta una narración temporal lineal dentro de un ciclo temporal que muestra correspondencias entre el pasado y el futuro. Con ello se rechazaba la idea de una repetición en ciclos idénticos, la que según Burnett destruiría toda posibilidad de historia. Este dilema, el de la incomprensión de lo infinito ante una ausencia de repetición, ha sido denominado el dilema de Borges (cf. Gould, 1987), en referencia a “El libro de arena” (Borges, 2005) donde éste canjea un valioso ejemplar de la Biblia por un libro infinito, en el cual no se puede encontrar un principio y un fin y nada se repite. En este cuento, Borges concluye que el libro en cuestión es una monstruosidad y resuelve su dilema perdiéndolo en forma intencional en un estante oscuro de la Biblioteca Nacional.

La visión de Burnett, de concepción universalista y basada en el paradigma aceptado por la sociedad de la época, debe ser confrontada con otras observaciones de carácter aparentemente local, efectuadas en la misma época, que tuvieron profunda significación para la determinación de la historia de la Tierra y de la edad de los eventos en ella representados.

## **El tiempo en la geología desde el Renacimiento al siglo XIX**

Tales observaciones fueron efectuadas por Nicolás Steno (1638-1686), un dinamarqués al servicio del Gran Duque de Toscana Fernando II, que estableció un criterio básico de la Geología, conocido como Principio de Superposición, según el cual en toda sucesión normal de sedimentos los estratos que están más arriba son más jóvenes que los que están más abajo, con lo cual transformó una descripción estática en términos de altura en una descripción dinámica interpretativa, en términos de tiempo (cf. Callomon, 1984). Esto es, de tiempo relativo, porque la sucesión sedimentaria en sí misma no dice nada con respecto al tiempo absoluto que llevó su formación. Adicionalmente Steno también dio cuenta de la forma en que se originan los fósiles que pueden encontrarse dentro de los estratos (cf. Rudwick, 1972).

Sus conclusiones van más allá de lo expuesto y se hallan reflejadas en una figura (Figura 2) en la que se muestra un mismo conjunto sedimentario en seis estados sucesivos agrupados en dos ciclos de tres. Cada ciclo pasa de abajo hacia arriba a través de los mismos tres estados: deposición de un conjunto uniforme de capas, erosión de las rocas estratificadas y colapso de las capas superiores en los espacios erosionados. En esta repetición se introduce sin embargo una diferencia, que diluye el dilema de Borges, esto es los estratos del segundo ciclo (22 - 20 en la Figura 2) incluyen restos de plantas y animales que no se encuentran en los del primer ciclo.

Sobre este telón de fondo se produce, a fines del siglo XVIII, una importante contribución que conducirá a una modificación substan-

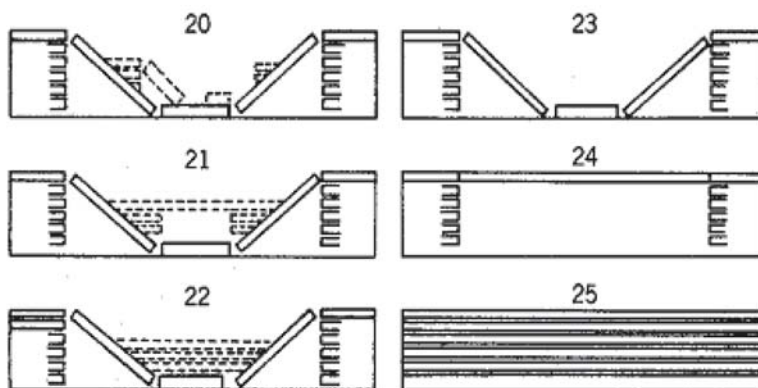


Figura 2. Esquema de la geología de la Toscana según N. Steno, 1669 (en Gould, 1987)

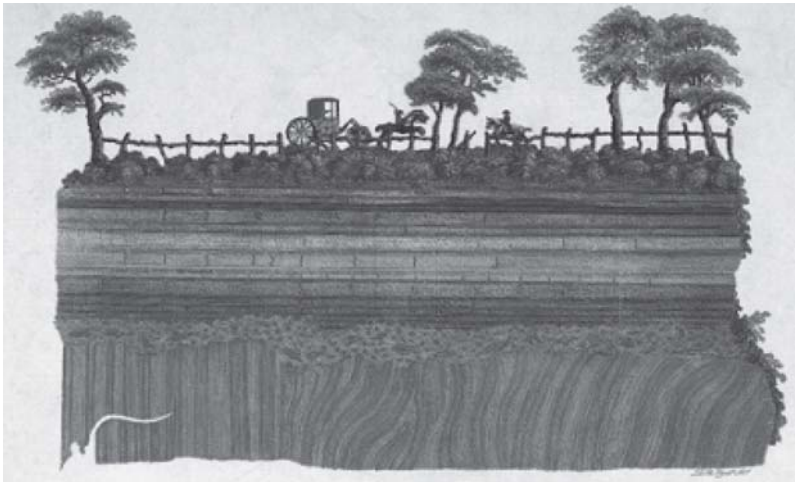
cial en la concepción geológica del tiempo. Tal aporte se debe a James Hutton (1726-1797) en su libro *Teoría de la Tierra* (1795), aunque dado el carácter oscuro de su prosa el mismo recién fue divulgado, con modificaciones, a principios del siglo XIX por otros autores, fundamentalmente por Charles Lyell (cf. Baxter, 2003).

Hutton, contemporáneo del filósofo David Hume y simpatizante de sus ideas, e íntimo amigo del economista Adam Smith y del inventor James Watt, introdujo el principio del Uniformismo por el que postuló que todos los cambios acaecidos en la historia de la Tierra fueron producidos por procesos naturales que se observan en la actualidad. En la visión de Hutton la Tierra es una máquina perfecta cuyo propósito fundamental es sostener la Vida. Adicionalmente,



Hutton reconoció que una superficie de erosión entre dos conjuntos de rocas, o sea una discordancia, representa un hiato temporal entre los sucesos que dieron origen a éstos. De esta forma las discordancias constituyen una evidencia directa de que la historia de la Tierra comprende varios ciclos de deposición y levantamientos. Estas ideas han quedado reflejadas en una ilustración de la discordancia estudiada por Hutton en Escocia (Figura 3), de cuya geometría resulta posible deducir una compleja historia geológica.

De esta figura se infiere, que los estratos inferiores fueron en primer lugar depositado en forma horizontal en un medio ácuico, que posteriormente fueron alterados y levantados hasta una posición



*Figura 3.* Discordancias observada por J. Hutton en Jedburgh, Escocia (en Gould, 1987)

vertical por encima del agua, que a continuación la superficie expuesta fue erosionada dando como resultado un relieve irregular que fue nuevamente cubierto por el agua y dio lugar, por erosión, a la formación de un conglomerado. Luego se depositaron nuevos sedimentos en capas horizontales y todo el conjunto fue levantado nuevamente por encima del nivel del mar, tal como lo muestran el carruaje y el jinete representados en la parte superior. En definitiva, en la ilustración hay representados dos grandes ciclos de sedimentación y dos periodos de levantamiento de diferentes características.

Uno de los aspectos revolucionarios de esta representación, con respecto a otras anteriores, donde la historia del planeta era vista

como un proceso ininterrumpido de erosión, es que aquí se introduce por primera vez un mecanismo de levantamiento o de restauración de una configuración anterior, en una visión que implicaba que los procesos geológicos son repetibles y no tienen un límite temporal. En definitiva se postula una ciclicidad (erosión, deposición, consolidación y levantamiento) producida por procesos iguales a los que se observan en la actualidad. El resultado, desde el punto de vista del tiempo involucrado es, en las palabras de Hutton, “que no hallamos vestigio alguno de principio, ni perspectiva de final”.

Esto no significó postular la eternidad de la Tierra, sino el hecho de que su comienzo y su final se hallaban más allá del campo de la investigación, de forma tal que el dilema de Borges es relegado a un campo foráneo a la Ciencia. La teoría de Hutton sobre la Tierra resultó así un ciclo de eventos repetidos tan regularmente como la revolución de los planetas en el sistema de Newton. Para Hutton el interés en comprender lo que sucedió en el tiempo solo se explica en función de un interés en inferir el sistema de cambio cíclico atemporal y con ello la perfección de la naturaleza. Los sedimentos de las capas más antiguas son vistos como derivados de continentes anteriores y así continuamente hasta un comienzo del que no hay vestigio. En este contexto los fósiles no constituían una evidencia histórica pues, en la visión de Hutton, se correspondían con especies vivientes.

Para la misma época en que Hutton postulaba una extensión enorme pero no precisada del Tiempo geológico, otras estimaciones se alejaban de los 4.004 años comúnmente aceptados en la época pero sin aproximarse a una estimación realista de los verdaderos lapsos involucrados (cf. Gribbin, 2000).

Así George-Louis Leclerc, conde Buffon (1707-1788), efectuó estimaciones sobre la edad de la Tierra usando esferas de hierro de diferentes tamaños y determinando el tiempo que tardaban en enfriarse a partir de un estado incandescente. Sobre tal base calculó que una esfera del tamaño de la Tierra tardaría 36.000 años en llegar a una temperatura que permitiera la vida y otros 39.000 en alcanzar los niveles actuales.

Tales estimaciones fueron con seguridad superadas por las que efectuó Jean Fourier (1768-1830), quien usó ecuaciones matemáticas que había desarrollado para describir el flujo térmico, para calcular cuanto tiempo habría tardado la Tierra en enfriarse. Los resultados nunca fueron divulgados en su época pero hoy día sabemos que, si bien habrían estado en el orden de 100 millones de años, tampoco se

aproximan a los valores que se infieren de las ideas de Hutton, ni a los actualmente conocidos y aceptados.

El concepto del Uniformismo de Hutton, al igual que la enorme extensión del tiempo geológico implícita en él, fueron ampliamente difundidos por Charles Lyell (1797-1895), en las once ediciones de su obra *Principios de Geología* (1830-1872), subtitulada con propiedad “Un intento por explicar los cambios pasados de la superficie de la Tierra por referencia a las causas actualmente en actividad” (cf. Baxter, 2003). Para Lyell la máquina del mundo de Hutton es como el Cosmos de Newton, una repetición de orden a través del tiempo, de forma tal que para conocer los procesos que actuaron en el pasado debemos comparar las resultantes de los mismos con las configuraciones que se forman en la actualidad merced a procesos que podemos observar directamente. Esta concepción metodológica fue mezclada sin embargo con propuestas más radicales, tales como que los procesos actuantes han sido siempre los mismos y que lo han hecho con la misma velocidad e intensidad. Esta visión del Uniformismo fue extendida incluso a lo viviente, donde la introducción y extinción de especies se efectuaría manteniendo el balance total y sin que hubiera una progresión en organización o complejidad.

Hoy día sabemos que el Uniformismo de Lyell implica desde un punto de vista metodológico dos principios generales de la ciencia, el de Legalidad y el de Simplicidad. Por el primero se reconoce que el Universo, en lo que respecta a sus propiedades inmanentes, es un sistema único y consistente en todo momento. Es un principio ontológico propuesto y confirmado por la investigación científica (Bunge, 1969), o la versión metafísica (Popper, 1974) de una regla metodológica que establece que no debe abandonarse la búsqueda de leyes universales y de un sistema teórico coherente. En lo que hace a la Uniformidad en los procesos, como expresión del Principio de Simplicidad, la idea es que si las configuraciones del pasado pueden ser explicadas como producidas por procesos iguales a los que se observan en la actualidad, resulta innecesario inventar causas inexistentes o desconocidas para dar cuenta de ellas.

En su versión extrema el Uniformismo de Lyell implica, por un lado un equilibrio dinámico a través del tiempo, y por otro uniformidad en las intensidades y velocidades de los procesos de la historia de la Tierra, todo lo cual no puede ser sostenido a la luz de las evidencias geológicas. Pues no sólo han existido procesos que hoy día no actúan, sino que los que siempre han existido se han caracterizado por sus variaciones en intensidad.

Por otro lado aunque la Teoría de la Selección Natural de Darwin y su corolario evolutivo llevaron a Lyell a dejar de lado la Uniformidad temporal o ausencia de progresión, según la cual la tierra y la vida se hallaban en un estado de balance dinámico, junto con Darwin mantuvo su creencia que los procesos que han actuado y actúan sobre la tierra y la vida se han caracterizado por su gradualismo.

## La geología y el tiempo relativo y absoluto: antecedentes

La historia de la Tierra se halla documentada en las rocas y para reconstruirla es necesario establecer las relaciones temporales de los cuerpos en los que éstas se pueden diferenciar.

Se debe a W. Smith y G. Cuvier el haber descubierto en las pos-trimerías del siglo XVIII, que los cuerpos de rocas pueden ser clasificados y relacionados temporalmente usando los fósiles que contienen. Así fue posible el uso de agregados específicos de fósiles para delinear unidades de rocas con significación temporal, por más que en ese entonces no se hubiera aceptado todavía como válido el proceso evolutivo que explica la diferenciación cronológica que se observa en el registro fósil. Cada unidad fue inicialmente reconocida en un área determinada, en la cual se estableció su posición relativa dentro de una sucesión de unidades del mismo tipo, y un nombre vinculado a esa región fue usado para denominar a la unidad en cuestión.

De esa forma se originaron los Sistemas incluidos actualmente en la Escala Estratigráfica, e.g. Ordovícico, Silúrico, Devónico, la cual tuvo por ello una clara significación temporal (Figura 4). Adicionalmente, también sobre la base de los fósiles, los Sistemas fueron divididos en unidades menores, los Pisos y éstos a su vez en Zonas (Berry, 1968). Así, para 1879 las principales divisiones de

|            |             |      |
|------------|-------------|------|
| CENOZOICO  | RECIENTE    | 1873 |
|            | PLEISTOCENO | 1839 |
|            | PLIOCENO    | 1833 |
|            | MIOCENO     | 1833 |
|            | OLIGOCENO   | 1854 |
|            | EOCENO      | 1833 |
|            | PALEOCENO   | 1874 |
| MESOZOICO  | CRETACIO    | 1822 |
|            | JURASICO    | 1829 |
|            | TRIASICO    | 1834 |
| PALEOZOICO | PERMICO     | 1841 |
|            | CARBONIFERO | 1833 |
|            | DEVONICO    | 1839 |
|            | SILURICO    | 1833 |
|            | ORDOVICICO  | 1879 |
|            | CAMBRICO    | 1835 |
|            | PRECAMBRICO | 1872 |

Figura 4. Escala Estratigráfica mostrando el año de introducción de cada Sistema

la Escala Estratigráfica ya estaban establecidas y todos los Sistemas aceptados en la actualidad habían sido reconocidos sobre la base de sus fósiles.

Esta escala es una tabulación de los tiempos en los cuales (fechas) o dentro de los cuales (duración) han ocurrido ciertos acontecimientos, o sea es una lista de acontecimientos que ocurrieron en el pasado geológico en un determinado orden de sucesión. La magnitud del tiempo involucrado se infería, *prima facie*, sobre la base del tipo, cantidad y magnitud de los fenómenos representados.

Así desde la Geología y la Biología se sostenía que la Tierra y como consecuencia el Sol, debían tener una antigüedad mucho mayor que la propuesta numéricamente hasta ese momento sobre la base de criterios astronómicos y geofísicos (véase Callomon, 1984). Estas diferencias enfrentaron a los geólogos y a los biólogos con los físicos, especialmente con el más famoso de éstos en esa época, William Thomson, más conocido como Lord Kelvin.

Entre los muchos logros científicos de Lord Kelvin se halla el haber sentado las bases de la Termodinámica merced a estudios que lo llevaron durante la segunda mitad del siglo XIX a evaluar la cuestión de la edad de la Tierra y el Sol y a desarrollar la escala, que luego se llamaría de Kelvin-Helmholtz, según la cual una estrella como el Sol debería tener unos 20-24 millones de años.

Por la misma época, sin embargo, una serie de descubrimientos modificaron la situación de forma tal que los valores numéricos comenzaran a concordar con el conocimiento geológico fáctico.

Así en 1896, Henry Becquerel descubrió una nueva forma de radiación producida por sales de Uranio, y en 1898 Marie y Pierre Curie introdujeron el término “sustancia radiactiva” e identificaron el polonio y el radio. Estos descubrimientos fueron perfeccionados por Ernest Rutherford (1871-1937) quien, entre otros logros importantes determinó, que cualquiera sea la cantidad de material radiactivo con que comienza una muestra, la mitad de sus átomos se desintegran en un plazo determinado, llamado vida media del elemento. Finalmente en 1903 Joly concluyó que la radioactividad es responsable del gradiente térmico de la Tierra y del Sol. Estos hallazgos llevaron a establecer métodos para datar las ro-

| Elemento          | Producto          | Vida Media | Inicio |
|-------------------|-------------------|------------|--------|
| <sup>14</sup> C   | <sup>14</sup> N   | 5.730      | 1947   |
| <sup>238</sup> U  | <sup>206</sup> Pb | 4.470      | 1907   |
| <sup>232</sup> Th | <sup>208</sup> Pb | 13.700     | 1938   |
| <sup>40</sup> K   | <sup>40</sup> Ar  | 11.930     | 1948   |
| <sup>87</sup> Rb  | <sup>87</sup> Sr  | 48.800     | 1946   |
| <sup>147</sup> Sm | <sup>143</sup> Nd | 106.000    | 1975   |

Figura 5. Métodos radioactivos usados para determinaciones de edades absolutas

cas sobre la base del decaimiento radiactivo (Figura 5) y de esta manera fue posible contar con un reloj que puede ser usado para medir la edad de la Tierra.

## **Cronoestratigrafía y geocronología**

De esta forma para mediados del siglo XX los geólogos diferenciaban, por un lado la Cronoestratigrafía mediante la cual se establecen las edades y relaciones temporales relativas de los cuerpos de rocas, y por otro la Geocronología que permite datar la secuencia temporal de los eventos de la historia de la Tierra.

Las unidades cronoestratigráficas son unidades materiales (Hedberg, 1976; Salvador, 1994), cada una de las cuales comprende todas las rocas formadas en un intervalo de tiempo, comprendido entre el comienzo y la finalización de la deposición, u otro modo de origen, de las rocas contenidas en la sección tipo o en el tipo designado de la unidad, el que es definido mediante la selección de un estratotipo de límite inferior, de forma tal que el límite superior queda establecido por el límite inferior de la unidad suprayacente. Sobre la base de las unidades cronoestratigráficas así definidas se establece una escala estándar en la cual las diferentes unidades se disponen en contigüidad, sin hiatos ni superposiciones.

Los métodos radimétricos, basados en el decaimiento de elementos radiactivos, han permitido posteriormente fijar edades en años, tanto para los límites de estas unidades, como para muchos de los eventos registrados en la Escala Cronoestratigráfica.

## **Métodos de correlación**

Correlacionar es, en geología, establecer relaciones temporales entre eventos que han dado lugar a diferentes cuerpos de rocas. Para ello se usan actualmente diferentes métodos, en los que se reflejan claramente la ciclicidad o linealidad temporal de tales sucesos.

Estos métodos pueden diferenciarse en primarios y secundarios, o equívocos e inequívocos (Odin et al., 2004; cf. Riccardi 2005). Los primarios o inequívocos, en los que las características usadas son únicas para cada momento, comprenden la bioestratigrafía y la radimetría. Los equívocos o secundarios, en los que las mismas carac-

terísticas se pueden repetir en el tiempo, incluyen la magnetoestratigrafía, la quimioestratigrafía y la cicloestratigrafía.

**Bioestratigrafía.** Tal como ya se explicó, desde un punto de vista histórico todos las unidades de la escala estratigráfica internacional (Sistemas, Pisos) fueron definidos sobre la base de su contenido fósil, con lo cual éstas tienen carácter interpretativo y pueden ser reconocidas a través del mundo. Los pisos pueden ser divididos en unidades menores (Zonas, Subzonas y Horizontes Faunísticos), con lo cual se logra un alto poder de resolución temporal. Así en un conjunto de rocas con una antigüedad de 150 millones de años se puede alcanzar una precisión temporal de aproximadamente 100.000 años (Callomon, 1984), con lo cual el poder resolutivo es tal que equivale a poder distinguir dos acontecimientos históricos ocurridos en los años 483 y 484.

**Radimetría.** La radimetría es otro método primario (o inequívoco) para hacer dataciones. Aunque debe remarcarse que, si hay fósiles presentes, su significación estratigráfica es usualmente subordinada o complementaria de la de la bioestratigrafía.

Se han efectuado muchos intentos de datar radimétricamente la escala estratigráfica estándar y casi todos los años se presentan revisiones (véase Mennig, 1989; Gradstein et al., 2004). Estas dataciones difieren entre ellas por varias razones, pero fundamentalmente debido a imprecisiones residuales de las determinaciones individuales de edades y al hecho de que no existe todavía en el registro geológico un número suficiente de puntos o niveles precisos con anclajes temporales directos. Adicionalmente, la resolución de las dataciones disminuye con el incremento en edad.

Pese a lo expuesto el esquema cronológico básico de la historia de la Tierra se encuentra claramente establecido. Hoy día sabemos que la antigüedad de la Tierra, basada en dataciones sobre meteoritos, componentes primordiales de los que se formaron los planetas, es de 4.465 Ma. Las rocas más antiguas datadas en la superficie terrestre provienen del Bloque Yilgarn en Australia Occidental, las que tienen 4.400 Ma, o sea que su antigüedad es apenas 100 Ma de años menor que la de la Tierra. En este caso la muestra en sí misma proviene de la cristalización de magma en contacto con agua y estaba englobada en una roca sedimentaria metamorfozada, todo lo cual indica que ya en esa Tierra inicial había océanos, en cuyas costas se depositaban sedimentos: tal como sucede en la actualidad.

**Magnetoestratigrafía.** Los cambios en la dirección de la magnetización remanente presente en las rocas, como registro de inversiones en la polaridad del campo magnético terrestre, resultan útiles para la correlación estratigráfica debido a que potencialmente, pueden ser reconocidos globalmente. El problema que presentan es que tienen una mínima individualidad relativa debido al hecho que las inversiones de polaridad son similares entre sí, razón por la cual deben ser relacionadas con otros métodos (e.g. bioestratigráficos, radimétricos) que puedan proveer un control cronoestratigráfico que sirva de base (cf. Iglesia Llanos y Riccardi, 2000). De la calidad de estos elementos dependerá la precisión de las relaciones que se establezcan.

**Quimioestratigrafía.** El estudio de las modificaciones de las relaciones isotópicas de C, O, S y Sr, etc., en rocas de origen marino, constituye otra herramienta importante para establecer dataciones regionales y globales. Sin embargo, la mayoría de ellas generalmente debe ser identificada sobre la base de evidencias complementarias (e.g. bioestratigráficas, véase Valencio et al., 2005).

Una de las relaciones con mejor potencial corresponde al  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , que cambia sistemáticamente a través del tiempo geológico (Jones et al., 1994; Jones y Jenkyns, 2001). Sin embargo, aquí también la mayor parte de los datos han sido calibrados con respecto a información bioestratigráfica.

**Cicloestratigrafía.** La identificación y caracterización de variaciones cíclicas, originadas en la mecánica orbital de la Tierra, denominadas Ciclos de Milankovitch, y documentadas en las sucesiones sedimentarias mediante cambios en los patrones sedimentarios, también se han constituido en una herramienta importante para efectuar dataciones estratigráficas (Hilgen et al., 2002). Esta metodología ha dado lugar a lo que se ha denominado Cicloestratigrafía, Astroestratigrafía u Orbitoestratigrafía (Fisher, 2001).

No obstante, este método solamente puede ser usado, si se asume que las constantes actuales no se han modificado a través del tiempo, para efectuar correlaciones temporales a partir del presente y extenderse hasta aproximadamente 20 Ma, mediante otros métodos (magnetoestratigrafía, bioestratigrafía) suplementarios de calibración. Para registros más antiguos existe falta de precisión temporal de las variaciones en la precesión, oblicuidad y excentricidad, de forma tal que las relaciones de fases resultan impredecibles.



Por ello las variaciones orbitales son derivadas del registro en forma temporalmente fragmentaria, y solamente pueden ser relacionadas con la geocronología mediante el anclaje que proveen otras herramientas, i.e. bioestratigrafía, magnetoestratigrafía u otras señales temporales que hayan sido relacionadas en un esquema cronológico mediante interpolaciones radimétricas (Fisher, 2001).

## **Discusión**

Es evidente que la escala de los resultados de los eventos geológicos tiene una significación fundamental en la concepción geológica del tiempo y en el reconocimiento de la aparente ciclicidad o linealidad de aquéllos.

Por otra parte la importancia de lo histórico y de lo no histórico, así como el carácter de los enunciados legaliformes, parecen estar determinados por la relación existente entre los humanos y sus objetos de estudio. Así los enunciados legaliformes y las teorías se han desarrollado mayormente en niveles donde sólo son de interés las estructuras y comportamientos más generales de la materia y donde las historias individuales sólo interesan hasta cierto punto pues en la mayor parte de los casos carecen de significación (Riccardi, 1977).

En contraposición a éstos, existen otros niveles, como aquellos propios de la Geología, en los cuales existe una *aparente* falta de universalidad, tanto debido no solo al hecho de que la humanidad está limitada en el espacio y en el tiempo, como al hecho de que la materia organizada en planetas sólo compone una ínfima parte del Universo (cf. Watson, 1966, 1969). A ello se suma el énfasis que el interés humano otorga a determinados tipos de fenómenos, del cual depende el grado especificación que se hace del mismo, el que culmina cuando se fijan sus coordenadas espacio-temporales y se lo identifica con su ejemplo.

En el contexto del tema bajo análisis es natural que el interés de la especie humana esté centrado en el período de la historia terrestre que la tiene como protagonista y en el registro orgánico que la precedió. Este lapso, que se ubica en los últimos 560 millones de años, está caracterizado por una *aparente* uniformidad y ciclicidad en el desarrollo geológico de la Tierra, excepción hecha de la sucesión lineal de la vida. Es evidente sin embargo que las condiciones imperantes sobre la superficie terrestre en los casi 4.000 millones de años previos muestran una clara variación que se halla en consonancia

con una linealidad temporal ligada a la historia del Sistema Solar y del Universo.

De todo lo expuesto cabe remarcar que la historia de la Tierra muestra en sus 4.500 millones de años la existencia de eventos cíclicos dentro de una linealidad propia de la evolución del Universo. Por ello resulta difícil explicar el funcionamiento del planeta sobre la base de generalizaciones basadas en procesos restringidos a lapsos y áreas propias de los humanos.

Esto adquiere relevancia si se considera que una comprensión acabada de los procesos y tiempos involucrados en la historia de la Tierra es fundamental para poder predecir cambios futuros que puedan afectar la existencia humana.

De allí la importancia de estudiar y ubicar en su adecuado contexto temporal todo lo acaecido a través de toda la historia del planeta, de diferenciar sucesos cíclicos y lineales y de reconocer que los mismos pueden ser explicados por procesos que pueden o no ser comunes en la actualidad. De esta manera será posible entender el funcionamiento de la Tierra incluso en situaciones extremas y, entre otras cosas, predecir cambios graduales y catastróficos que puedan amenazar la existencia humana y así tratar de controlar, minimizar o eludir sus efectos.

Para finalizar y en relación con la evolución y amplitud reconocida para el Universo y la aparente posición marginal de la especie humana en tal contexto, cabe preguntarse si el carácter biocéntrico del cosmos no sigue estando vigente, no ya como una visión estática acotada en el espacio y en el tiempo sino como producto de un proceso evolutivo desarrollado en una dimensión espacio-temporal mucho más amplia.

## **Bibliografía**

- Agustín, Santo, 2006. *Confesiones*, Colihue, Buenos Aires, 584 pp.
- Baxter, S., 2003. *Revolutions in the Earth. James Hutton and the true age of the world*, Orion Books Ltd., London, pp. 245.
- Berry, W. B., 1968. *Growth of a Prehistoric Time Scale*, W. H. Freeman and Company.
- Borges, J. L., 2005. *El libro de arena*, Emecé Editores, Buenos Aires, 176 pp.
- Bunge, M., 1969. *La investigación científica*, Ediciones Ariel, 934 pp.
- Callomon, J. H., 1984. "The Measurement of Geological Time", *Proceedings of the Royal Institution of Great Britain* 56: 65-99.

- Fisher, A. G., 2001. *Cyclostratigraphy, General Comments*, International Subcommission on Stratigraphic Classification, Circular 99: 3-5.
- Gould, S. J., 1987. *Time's arrow, time's cycle*, Harvard, Harvard University Press, pp. 222.
- Gradstein, F., Ogg, J. y Smith, A., 2004. *A Geologic Time Scale 2004*, Cambridge & New York, Cambridge University Press, pp. 589.
- Gribbin, J., 2000. *El nacimiento del tiempo*, Barcelona, Ed. Paidós, pp. 233.
- Harrington, H. J., 1965. "Space, things, time and events – An essay on stratigraphy", American Association Petroleum Geologists, *Bulletin* 49: 1601-1646.
- Hedberg, H. D. (ed.), 1976. *International Stratigraphic Guide*, First Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Hilgen, F., Schwarzacher, W. y Strasser, A., 2002. *Concept and definitions in Cyclostratigraphy (Second Report of the Cyclostratigraphy Working Group)*, International Subcommission on Stratigraphic Classification Circular 100, Appendix C, pp. 1-6.
- Iglesia Llanos, M. P. y Riccardi, A. C., 2000. "The Neuquén Composite Section: Magnetostratigraphy and Biostratigraphy of the marine Lower Jurassic from the Neuquén Basin (Argentina)", *Earth and Planetary Science Letters*, 181(3): 443-457.
- Jones, Ch. y Jenkyns, H. C., 2001. "Seawater Strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous", *American Journal of Science* 301: 112-149.
- Jones, Ch. E., Jenkyns, H. C. y Hesselbo, S. P., 1994. "Strontium isotopes in Early Jurassic seawater", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 1285-1301.
- Mennig, M., 1988. "A synopsis of numerical timescales 1917-1986", *Episodes* 12: 3-4.
- Odin, G. S., Gardin, S., Robaszynki, F. y Thierry, J., 2004. *Stage boundaries, global stratigraphy and the time scale: towards a simplification*, Carnets de Géologie/Notebooks on Geology, Brest, Article 2004/02, 12 p.
- Popper, K. R., 1974. *Conocimiento objetivo*, Madrid, Ed. Tecnos.
- Riccardi, A. C., 1977. "Geología: ¿protociencia, especulación o ciencia?", *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 32(1): 52-69.
- Riccardi, A. C., 2005. "Estratigrafía, GSSP y Tiempo", *XVI Congreso Geológico Argentino, Actas*; 287-294, La Plata.
- Riccardi, A. C., 2008. "Vida en la Tierra", *Ciencia Hoy* 18(103): 7-21.
- Rudwick, M. J. S., 1972. *The meaning of fossils*, London & New York, Macdonald and American Elsevier Inc., pp. 287.
- Salvador, A. (ed.), 1994. *International Stratigraphic Guide*, Second Edition, The International Union of Geological Sciences and The Geological Society of America, Inc.
- Valencio, S. A., Cagnoni, M. C., Ramos, A. M., Riccardi, A. C. y Panarello, H. O., 2005. "Chemostratigraphy of the Pliensbachian, Puesto Araya Formation (Neuquen Basin, Argentina)", *Geologica Acta* 3(2): 147-154.

- Watson, R. A., 1966. "Is Geology Different: a critical discussion of the 'Fabric of Geology'", *Pilosophy of Science* 33: 172-185.
- Watson, R. A., 1969. "Explanation and predicion on geology", *Journal of Geology* 77: 488-494.

CONICET  
Facultad de Ciencias Naturales y Museo,  
Universidad Nacional de La Plata,  
Paseo del Bosque s/n, 1900 La Plata