

Alberto C Riccardi

Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP

Los invertebrados fósiles y la escala geológica

El estudio de los diferentes grupos de invertebrados fósiles resulta de importancia para el conocimiento de su morfología, sistemática, evolución, ecología y distribución geográfica. A partir de los estudios hechos por Amans Gressly (1814-1865) en los montes Jura, en los Alpes, se comprobó que hay invertebrados que pueden ser usados para inferir el ambiente en el que se depositaron los sedimentos que los contienen y para determinar junto con estas las variaciones ambientales sufridas por ambos.

La distribución geográfica de los invertebrados fósiles, especialmente en ambientes marinos, permitió delimitar regiones paleobiogeográficas, caracterizadas por variados conjuntos de especies, y contribuir así a establecer reconstrucciones paleogeográficas y conexiones oceánicas diferentes de las actuales. Su registro también ayudó a documentar la existencia de extinciones masivas, las de mayor importancia acaecidas a fines del Ordovícico

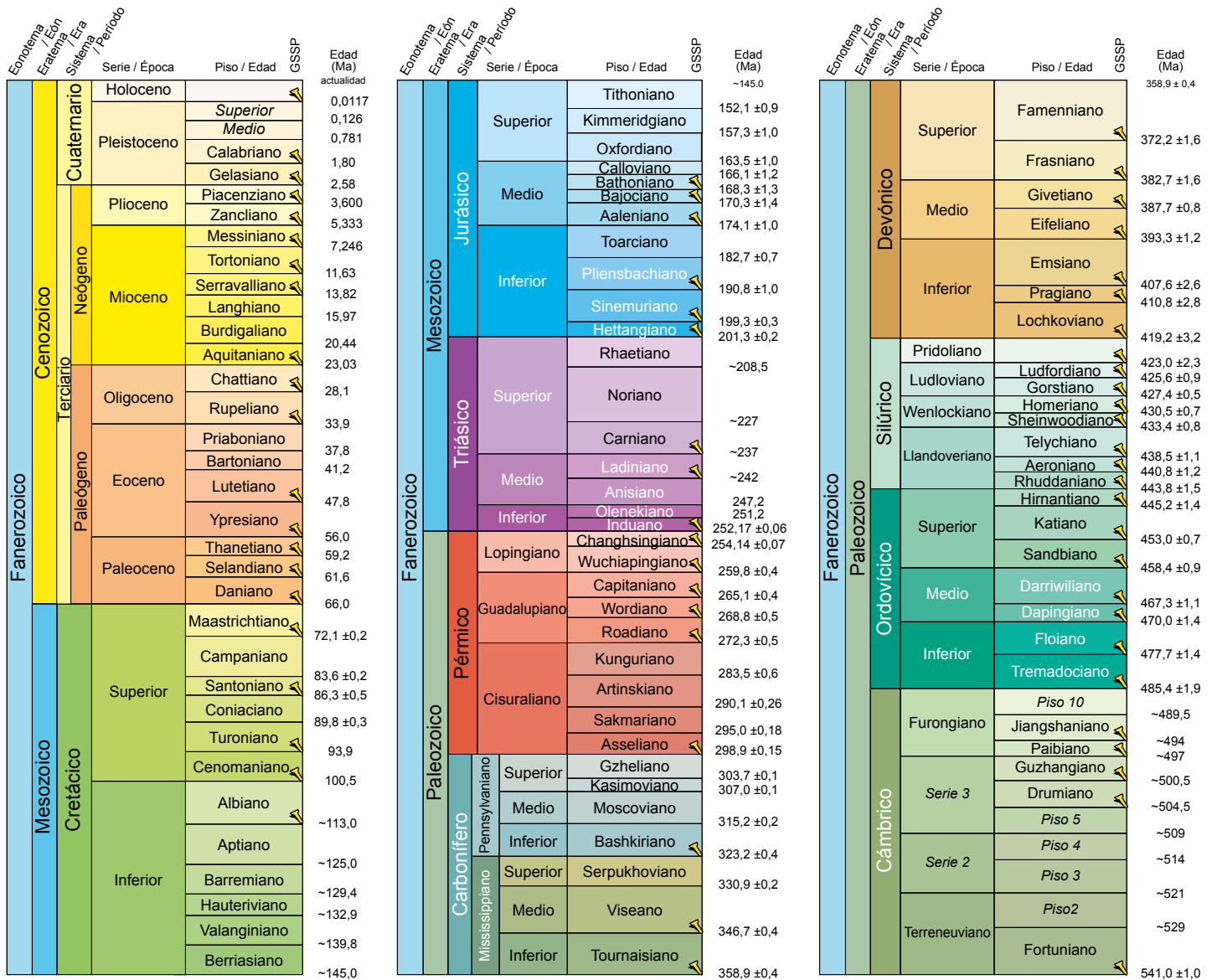
(444Ma), del Devónico (359Ma), del Pérmico (252Ma), del Triásico (201Ma) y del Cretácico (66Ma).

Por otra parte, la evolución relativamente rápida de los invertebrados, su adecuada preservación y su abundancia los hizo sumamente útiles para la delimitación temporal de las rocas que constituyen la corteza terrestre. Sin estos fósiles, la historia de la Tierra sería prácticamente incomprensible, por lo menos con el grado de detalle con que la conocemos en la actualidad.

Las diferentes rocas y los fósiles presentes en la mayoría de ellas, igual que los sucesos que originaron a ambos, se ordenan en una escala (temporal) conocida como *escala estratigráfica o cronoestratigráfica*, que es la base para todas las actividades geológicas, puras y aplicadas. Esta escala es el resultado final de una serie de estudios que comenzaron en el siglo XVI y sirvieron para sentar los criterios básicos de la estratigrafía y, por ende, de la geología. En un principio la necesidad de disponer de una escala temporal, mediante la cual se pudieran establecer las

¿DE QUÉ SE TRATA?

La importancia de los invertebrados fósiles en la construcción de la tabla estratigráfica o geocronológica.



Escala cronoestratigráfica del Comité Argentino de Estratigrafía (simplificada). Los colores se rigen por la norma de la Comisión del Mapa Geológico del Mundo (ccgm.org). El eón Precámbrico (4600 a 541Ma) no se incluye en la figura. La marca amarilla en los pisos (GSSP, sigla en inglés de *Global Stratotype Section and Point*) indica que sus bases están definidas por un *estratotipo*.

relaciones y los momentos de formación de los diferentes cuerpos de roca, se debió a las actividades de la minería, cuya vinculación con la ciencia nació con Georg Bauer (1494-1555), que según las prácticas de su época latinizó su nombre a Georgius Agricola.

Para este tipo de relaciones el danés Niels Steensen (1638-1686), latinizado a Nicolaus Steno, estableció en el siglo siguiente un criterio básico de la geología, conocido como *principio de superposición*, según el cual (i) toda capa o estrato litológico se forma sobre una superficie sólida; (ii) cuando una capa se forma, sus costados están delimitados por sustancias sólidas, salvo que cubra toda la tierra; (iii) cuando una capa superior se está forman-

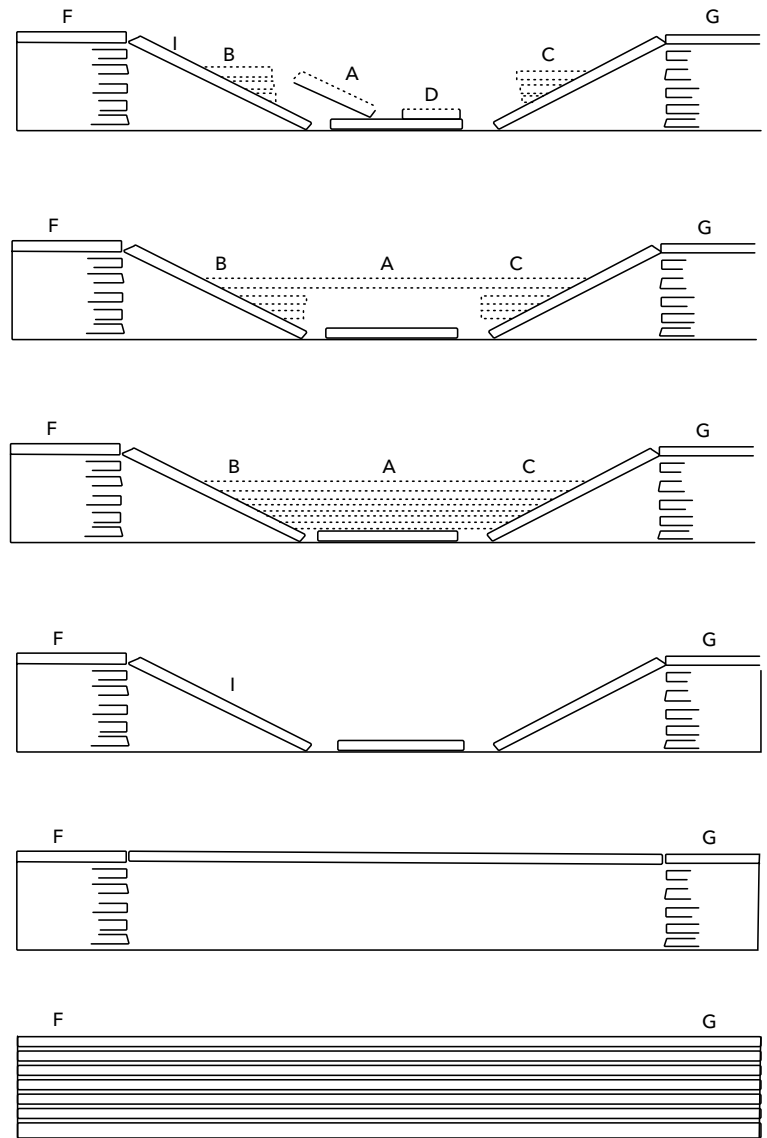
do, la de abajo ya debe ser sólida; (iv) solamente el fluido que le da origen puede estar por encima, lo cual implica que ninguna capa puede haber existido mientras se estaban formando las inferiores, y (v) cuando una serie de estratos se forma, estos deben ser casi horizontales. De esta manera, en toda sucesión normal de sedimentos los estratos que están más arriba son más jóvenes que los que están más abajo, con lo que se transforma una descripción estática en términos de altura en una descripción dinámica interpretativa, en términos de tiempo. Esto es, de *tiempo relativo*, porque la sucesión sedimentaria en sí misma no dice nada sobre el *tiempo absoluto* que llevó su formación.

Con las actividades mineras, los diferentes cuerpos locales de rocas recibieron nombres informales. El geólogo veneciano Giovanni Arduino (1714-1795) distinguió, en líneas generales, tres tipos de rocas: 1) primitivo, rocas sin fósiles (esquistos, granitos, basaltos) que forman el núcleo de las montañas (cristalinas con minerales metálicos); 2) secundario, rocas estratificadas presentes en los flancos de las altas montañas (con fósiles y sin minerales metálicos), y 3) terciario, rocas más jóvenes, compuestas por sedimentos (calizas, areniscas y arcillitas) consolidados y no consolidados derivados del secundario y del primitivo, muy fosilíferas. Sobre tales bases, Arduino y sus contemporáneos caracterizaron las sucesiones locales de rocas de manera fundamentalmente descriptiva y sin ninguna connotación temporal.

El tiempo relativo y los invertebrados fósiles

El geólogo inglés William Smith (1769-1839) determinó que los cuerpos de rocas pueden ser diferenciados y clasificados usando los fósiles que contienen, y demostró la validez del principio de sucesión faunística, según el cual los fósiles tienen un orden definido de sucesión y que los agregados fósiles, especialmente de invertebrados, aparecen siempre en el mismo orden secuencial donde quiera que se encuentren. La diferenciación de especies a través del tiempo y sus correspondientes rangos estratigráficos tuvieron explicación, a partir de 1859, cuando Charles Darwin (1809-1882) sentó las bases de la teoría de la evolución por selección natural, un proceso unidireccional según el cual todos los organismos se modifican a través del tiempo. En otras palabras, el carácter lineal o irreplicable de la vida difiere sustancialmente de los ciclos repetidos de las rocas. Por lo tanto, es posible usar conjuntos de invertebrados para reconocer unidades de rocas y atribuirles una significación temporal.

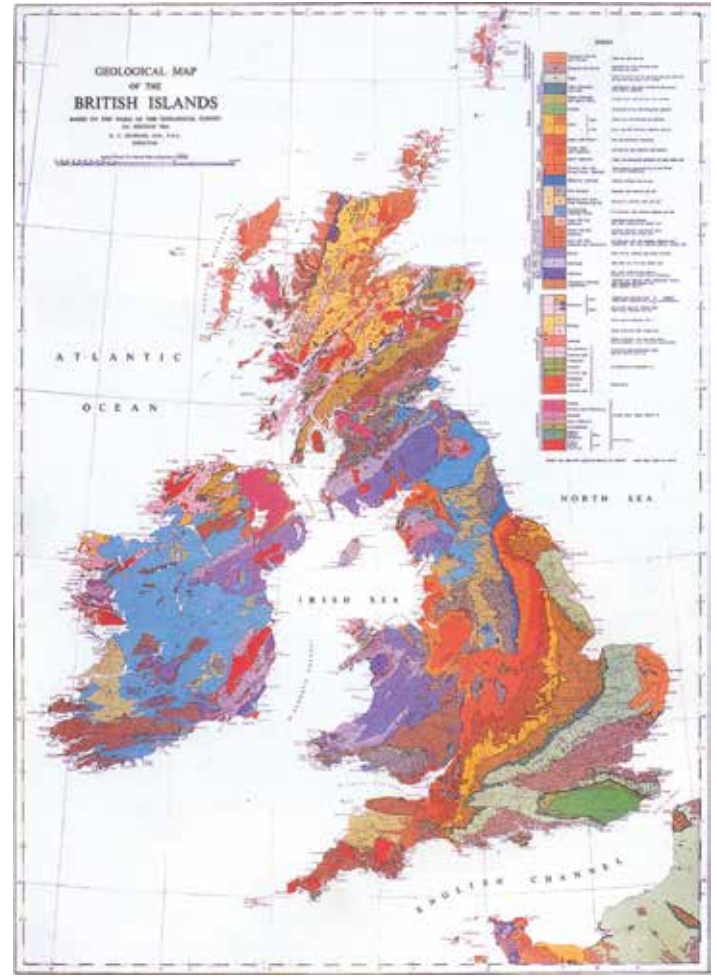
Cada unidad de rocas fue inicialmente reconocida en un área determinada, en la cual se estableció su posición relativa en una sucesión de unidades del mismo tipo, y se le dio un nombre vinculado con esa región. Es así que usando el principio de superposición se determinó la ubicación relativa en el tiempo de las capas fosilíferas y de las asociaciones de invertebrados contenidos en ellas. Sobre tal base se pudo referir cualquier fósil aislado y las rocas portadoras a la sucesión general. Con lo anterior, la tarea inicialmente descriptiva se convirtió en interpretativa y permitió establecer un ordenamiento cronológico de cuerpos de rocas, incluso a través de diferentes regiones. En virtud de estos conceptos, en 1815 Smith presentó el primer mapa geológico de Inglaterra y Gales.



Esquema de la geología de la Toscana según N. Steno, 1669. La figura muestra un conjunto sedimentario en seis estados sucesivos (desde abajo hacia arriba). Los tres esquemas inferiores corresponden a un ciclo y los tres superiores a otro. Cada ciclo pasa, de abajo hacia arriba, a través de los estados de deposición uniforme de capas, erosión de rocas estratificadas y colapso de las capas superiores en los espacios erosionados. Los estratos de ambos ciclos se repiten, pero el segundo ciclo incluye restos de plantas y animales, ausentes en el primero.

Un ejemplo típico de una unidad inicialmente descriptiva y luego interpretativa es el Terciario de Arduino, que pudo ser reconocido en otras regiones, dentro y fuera de Italia, por su contenido de invertebrados fósiles. El escocés Charles Lyell (1797-1875) lo subdividió, basándose en los porcentajes de especies de moluscos vivientes en la actualidad registrados en sucesivos niveles, en Eoceno, Mioceno y Plioceno. Con el tiempo, los nombres usados para estos tipos de rocas se hicieron extensivos a los lapsos en que se habían formado.

Otro ejemplo clásico es el Jurásico, cuyo estudio llevó a importantes avances metodológicos en el campo



Mapa geológico de las islas británicas presentado por W Smith en 1815 (a la izquierda) y mapa geológico actual (a la derecha).

de la estratigrafía. El nombre Jurásico se originó en las descripciones realizadas por Alexander von Humboldt (1796-1859) de un conjunto de calizas halladas en los montes Jura, en el sur de Francia, el oeste de Suiza y el norte de Italia, a las que llamó *Jura-Kalkstein*. Estas rocas fueron posteriormente divididas por Leopold von Buch (1774-1853) en tres unidades sobre la base de diferencias de color; de abajo hacia arriba, las denominó Jura negro, Jura pardo y Jura blanco. El estudio de los invertebrados fósiles del Jura negro y del pardo, comparados con los de las islas británicas y de diversas regiones de Francia, permitió establecer su equivalencia con las rocas que Smith había denominado *Lias* y *Oolite* en Inglaterra. De esta manera, con todos estos estudios el Jurásico pasó a ser una unidad interpretativa.

En forma similar se originaron los demás sistemas incluidos actualmente en la escala estratigráfica, ya sea como unidades primero descriptivas y luego interpretativas, como Cámbrico o Cretácico, o interpretativas desde un principio como Ordovícico, Silúrico, Devónico o Pérmico. Para 1879 las principales divisiones de la es-

cala estratigráfica estaban establecidas y todos los sistemas aceptados en la actualidad habían sido reconocidos mayormente sobre la base de sus invertebrados fósiles.

Luego estos sistemas se incluyeron en unidades mayores, como el Paleozoico, propuesto originalmente por el geólogo y clérigo anglicano Adam Sedgwick (1785-1873), y como el Mesozoico y el Cenozoico, introducidos por John Phillips (1800-1874), usando como criterio para agrupar los sistemas el predominio de determinadas especies, géneros, familias y aun órdenes y clases de animales y plantas. Las rocas, usualmente no fosilíferas, que se ubicaban invariablemente por debajo de las que contienen fósiles, fueron agrupadas en el Precámbrico por James Dana (1813-1895).

Pisos y zonas

La necesidad de contar con unidades más pequeñas que los sistemas y períodos llevó a Alcides d'Orbigny (1802-1857) a introducir el concepto de piso, aplicable

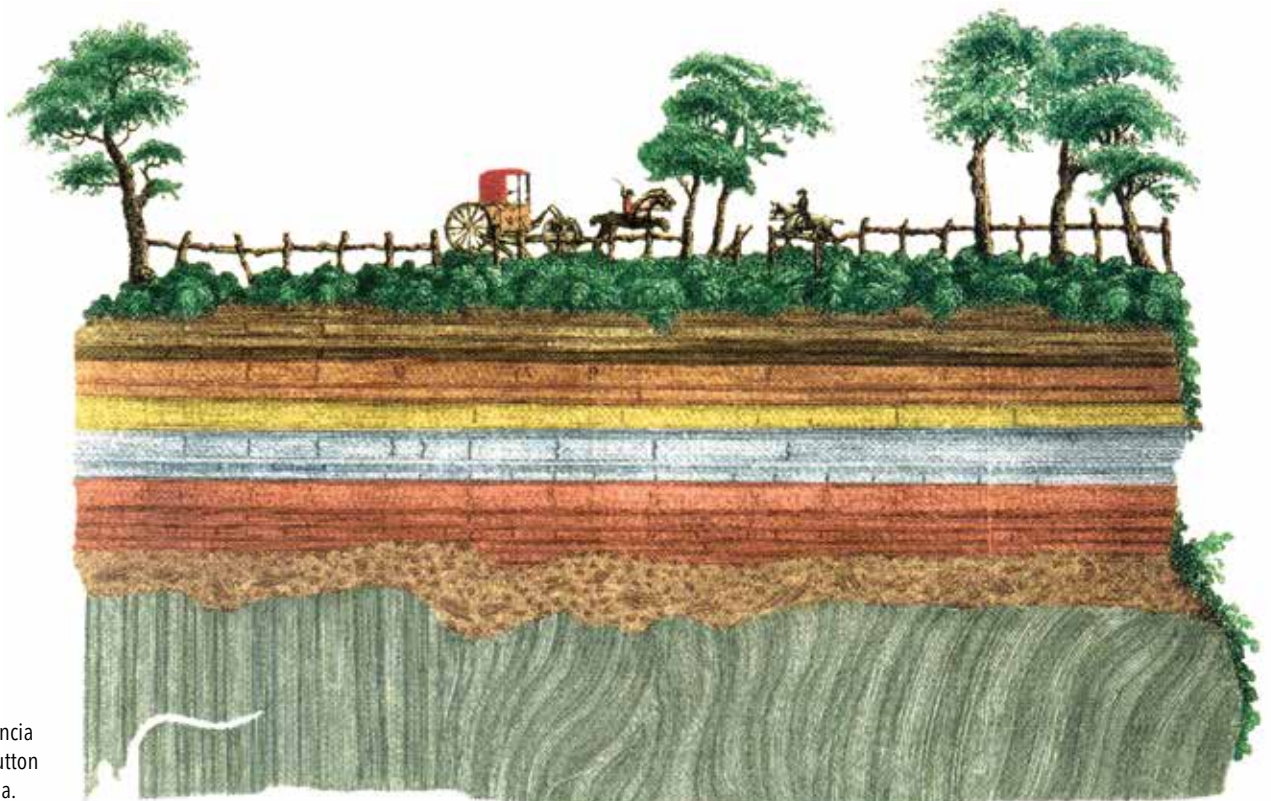
a un grupo de estratos con un mismo conjunto o asociación fósil, al que se denomina con el nombre de la localidad geográfica en la que se reconocen por primera vez las rocas portadoras de la mayor parte de sus fósiles característicos. En el concepto original, cada piso es un espesor de roca caracterizado por una determinada asociación de invertebrados fósiles y subsidiariamente, a partir del Carbonífero, de vertebrados y plantas.

Sin embargo, el uso de asociaciones fósiles constituidas por numerosas especies provenientes de diferentes localidades y estratos, sin considerar sus rangos estratigráficos, resultaba poco preciso. En consecuencia, fue necesario estudiar en detalle los rangos estratigráficos de las especies en muchas localidades, para lograr una mejor comprensión de la sucesión de faunas.

Sobre la base de sus estudios del Jurásico del sur de Alemania y de varias regiones de Europa, Carl Albert Opper (1831-1865) pudo establecer la unidad más pequeña de la escala geológica. Estableció, en distintas localidades, la distribución vertical de cada especie de invertebrados, fundamentalmente amonites. Esa distribución fue graficada y de los gráficos resultó que había grupos de estratos caracterizados por conjuntos de invertebrados fósiles similares, aunque con rasgos diferentes, y que tales estratos se correlacionaban temporalmente. Para cada asociación, Opper usó el término *zona*, y reconoció 33 zonas de invertebrados para el Jurásico, 22 basadas en amonites y las restantes en bivalvos, braquiópodos, equinodermos, gastrópodos y poríferos.

Cenozoico	Holoceno	1867
	Pleistoceno	1839
	Plioceno	1833
	Mioceno	1833
	Oligoceno	1854
	Eoceno	1833
	Paleoceno	1874
Mesozoico	Cretácico	1822
	Jurásico	1829
	Triásico	1834
Paleozoico	Pérmico	1841
	Carbonífero	1833
	Devónico	1839
	Silúrico	1833
	Ordovícico	1879
	Cámbrico	1835
Precámbrico		1872

Escala estratigráfica mostrando el año de introducción de cada sistema. Los colores utilizados en la tabla se corresponden con la actual norma de la Comisión del Mapa Geológico del Mundo.



Sucesión y discordancia observadas por J Hutton en Jedburgh, Escocia.



Sección estratigráfica del Jurásico Medio, Chacay Melehue, Neuquén. A la izquierda, vista general hacia el este y a la derecha, detalle con invertebrados fósiles.

La aparición de ciertas especies nuevas permite establecer los límites entre zonas, de manera tal que cada agregado se distingue por la aparición en su base de esas especies y en su techo por la de otras. El tiempo transcurrido entre estos eventos permite el reconocimiento de unidades temporales claramente delimitadas. Cada zona se denomina con el nombre de una especie elegida en forma arbitraria, que no necesariamente debe estar limitada estratigráficamente a esa zona, pudiendo también variar su grado (escaso o abundante) de representación. El rasgo característico de la zona es el conjunto de especies y su nombre debe estar limitado a la región en que se reconoce. El límite inferior de la zona reconocida en la base de un piso y sistema sirve a su vez de base a tales unidades.

El concepto de zona fue luego extendido a los demás sistemas. Las zonas fueron agrupadas en pisos, los que, en consecuencia, están caracterizados por asociaciones fósiles de una magnitud mayor, basados también en la superposición de diferentes rangos estratigráficos de especies. Las zonas pueden a su vez ser divididas en subzonas y estas en horizontes faunísticos, con lo cual se logra un alto grado de resolución temporal.

Cada piso es definido en una localidad elegida como tipo, actualmente no solo mediante fósiles de invertebrados, sino también con microfósiles, y metodologías auxiliares, como cambios en la dirección de la magnetización remanente presente en las rocas o registro de inversiones en la polaridad del campo magnético terrestre

(magnetoestratigrafía), modificaciones de las relaciones isotópicas de varios elementos en rocas de origen marino (quimioestratigrafía), y con las variaciones cíclicas de la órbita de la Tierra documentadas en las sucesiones sedimentarias mediante cambios en los patrones sedimentarios (cicloestratigrafía).

El tiempo absoluto de la geología

La escala del tiempo geológico absoluto registra las fechas y duración en que ocurrieron ciertos acontecimientos, en un determinado orden de sucesión. La magnitud del tiempo involucrado se infería, en un principio, sobre la base del tipo, cantidad y magnitud de los fenómenos representados. Las primeras estimaciones sobre la edad de la Tierra se basaron en exégesis bíblicas, la más aceptada de las cuales era de 4004 años. Estimaciones posteriores del naturalista y enciclopedista francés Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon (1707-1788), realizadas usando esferas de hierro de diferentes tamaños y determinando el tiempo que tardaban en enfriarse a partir de un estado incandescente, estableció que una esfera del tamaño de la Tierra tardaría 36.000 años en llegar a valores que permitieran la vida y otros 39.000 en alcanzar los niveles actuales.


La concepción geológica del tiempo se vio modificada cuando James Hutton (1726-1797) introdujo el principio del uniformismo, por el que postuló que todos

los cambios acaecidos en la historia de la Tierra resultaron de procesos naturales iguales a los que se observan en la actualidad y que la historia de la Tierra comprende varios ciclos de depositación y de levantamientos en un tiempo tan prolongado que no habría vestigios de principio ni de fin. Sus ideas, luego difundidas por Lyell y que han quedado reflejadas en una conocida ilustración, postulaban que los sedimentos de las capas más antiguas son derivados de rocas anteriores y así continuamente hasta un comienzo del que no hay vestigio. Algo más tarde, William Thomson, lord Kelvin (1824-1907), concluyó en sus estudios de termodinámica que una estrella como el Sol debía tener unos 20 a 24Ma. Posteriormente Darwin, en su obra acerca del origen de las especies de 1859, siguiendo a Lyell, a quien atribuía haberle ‘regalado el tiempo’, recurrió para explicar la diferenciación evolutiva de las formas actualmente vivientes a un marco temporal enormemente más vasto.

El descubrimiento de Henri Becquerel (1852-1908) de la radiación producida por sales de uranio, y la identificación de sustancias radiactivas, como el polonio y el radio, por Marie Skłodowska (1867-1934) y Pierre Curie (1859-1906), llevaron a Ernest Rutherford (1871-1937) a determinar que cualquiera sea la cantidad de material radiactivo con que comienza una muestra, la mitad de sus átomos se desintegrará en un plazo determinado llamado *vida media* del elemento. Estos hallazgos condujeron a establecer los métodos de *datación radiométrica* sobre la base del decaimiento radiactivo y proporcio-

Elemento	Producto	Vida media	Inicio
^{14}C	^{14}N	5.730	1947
^{238}U	^{206}Pb	4.470	1907
^{232}Th	^{208}Pb	13.700	1938
^{40}K	^{40}Ar	11.930	1948
^{87}Rb	^{87}Sr	48.800	1946
^{147}Sm	^{143}Nd	106.000	1975

Métodos radioactivos usados para determinaciones de edades absolutas y la fecha de inicio de su utilización.

naron un reloj que puede ser usado para medir la edad de la Tierra. La datación basada en el decaimiento de elementos radiactivos sirvió para complementar la escala basada en invertebrados fósiles y permitió fijar en años las diferentes unidades reconocidas en la escala estratigráfica. Estas edades absolutas no alcanzan sin embargo la precisión que permiten las dataciones relativas basadas en invertebrados, las que permiten en última instancia diferenciar entre un antes y un después. Así, en un conjunto de rocas del Jurásico de 150Ma se puede llegar, merced a los invertebrados presentes, a una precisión de aproximadamente cien mil años, un poder resolutivo equivalente, por ejemplo, a poder distinguir dos acontecimientos históricos ocurridos en los años 483 y 484 de nuestra era. 

LECTURAS SUGERIDAS

- GOULD SJ**, 1987, *Time's Arrow, Time's Cycle*, Harvard University Press, Harvard.
- GRIBBIN J**, 2000, *El nacimiento del tiempo*, Paidós, Barcelona.
- RICCARDI AC**, 2011, 'El tiempo en la geología', *Anales de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires*, 44: 185-204.
- RICCARDI AC**, 2016, 'Escala cronoestratigráfica', *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 73, 2: 292-293.



Alberto C Riccardi

Doctor en ciencias naturales, UNLP.
Investigador superior del Conicet en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP.
Jefe de la división de Paleozoología de invertebrados del Museo de La Plata.