

LECCIÓN INAUGURAL
CURSO 2022-2023

ESTRATIGRAFÍA Y TIEMPO
GEOLÓGICO:
Aspectos fundamentales

JOSÉ MIGUEL MOLINA CÁMARA



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESTRATIGRAFÍA Y TIEMPO GEOLÓGICO:
ASPECTOS FUNDAMENTALES

*Lección inaugural pronunciada por el
Dr. D. José Miguel Molina Cámara,
Catedrático de Estratigrafía de la Universidad de Jaén,
en el acto Académico celebrado el 27 de septiembre de 2022,
con ocasión de la Solemne Apertura del Curso Académico 2022-2023,
presidida por el Rector Magnífico de la Universidad de Jaén
Prof. Dr. Juan Gómez Ortega*

JOSÉ MIGUEL MOLINA CÁMARA

ESTRATIGRAFÍA Y TIEMPO
GEOLÓGICO: Aspectos fundamentales

2022



UNIVERSIDAD DE JAÉN

© Universidad de Jaén
© Autor

Publicaciones de la Universidad de Jaén
Vicerrectorado de Proyección de la Cultura y Deporte

ISBN
978-84-9159489-5

Depósito Legal
J 474-2022

Impreso por
Gráficas La Paz

Impreso en España

Printed in Spain

A Victoria y a nuestros hijos José Miguel y Enrique.

*A mis padres, a mi hermana y especialmente
en memoria de mi hermano Manolo*

ÍNDICE

PREÁMBULO	11
ESTRATIGRAFÍA: CONCEPTO, HISTORIA, PRINCIPIOS FUNDAMENTALES Y OBJETIVOS	13
Concepto	14
Breve historia	16
Principios fundamentales	24
Objetivos	27
EL TIEMPO EN ESTRATIGRAFÍA. TIEMPO RELATIVO Y TIEMPO NUMÉRICO	29
Escala de tiempo geológico relativo	31
Primeros intentos de datación numérica	33
Descubrimiento de la radioactividad y primeras dataciones numéricas	34
Métodos de datación numérica de las rocas	36
Calibración de la escala de tiempo geológico	43
Tabla cronoestratigráfica internacional	45
Comparación del tiempo geológico con el calendario anual	53
EPÍLOGO	55
BIBLIOGRAFÍA	57

Sr. Rector Magnífico de la Universidad de Jaén
Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades
Miembros de la Comunidad Universitaria
Amigas y amigos
Señoras y Señores

Para comenzar quiero manifestar mi agradecimiento al Sr. Rector Magnífico y a su Equipo de Gobierno al ofrecerme la posibilidad de impartir la Lección Inaugural de este Curso Académico.

Me siento muy honrado por haber confiado en mí para esta tarea. Aunque pueda parecer un tópico, quiero expresar con toda sinceridad, la gran emoción y responsabilidad que siento ya que considero que es uno de los mayores honores que puede tener un profesor universitario en su vida académica.

Es un gran privilegio y satisfacción realizar este acto universitario festivo y solemne en el Aula Magna que me trae emocionantes recuerdos, pues ya existía cuando entré a formar parte en 1981 como profesor ayudante del Colegio Universitario Santo Reino de Jaén, adscrito a la Universidad de Granada y auténtico embrión de esta universidad. Ya han pasado 41 años pero, ¡mucho menos que un suspiro a la escala del tiempo geológico!

Entre los acontecimientos sucedidos en esta noble Aula Magna, aparte de las inauguraciones de curso académico y de innumerables actos a los que he asistido y en los que he participado, destacaré particularmente la lectura de mi Tesis Doctoral en 1987 y mis oposiciones a Cátedra de Universidad en 1999. Quiero además resaltar otros dos hechos importantes desde el

punto de vista geológico, en los que fueron protagonistas mis dos directores de Tesis, maestros, compañeros y amigos. Me refiero en primer lugar a la lectura de la Lección Inaugural del curso académico 1993-1994, el primer discurso de apertura de un curso académico e inauguración oficial de la recién creada Universidad de Jaén, por parte del Profesor Dr. D. Pedro Alejandro Ruiz Ortiz, y en segundo lugar a la Ceremonia de Investidura como Doctor "Honoris Causa" del Profesor Excmo. Sr. Dr. D. Juan Antonio Vera Torres en 2014. Agradezco a los dos su continuo apoyo incondicional en toda mi trayectoria profesional.

Aprovecho también para expresar mi mayor consideración y agradecimiento a mis compañeros y compañeras de nuestro grupo de investigación RNM-200 y a los demás integrantes del Departamento de Geología con los que comparto desde hace muchos años una magnífica relación de amistad y compañerismo. Finalmente, en este apartado, quiero dedicar un merecido reconocimiento y toda mi gratitud, por su paciencia y comprensión, a mi familia, especialmente a Victoria, a mis hijos José Miguel y Enrique, a mis padres, a mi hermana y a mi querido hermano Manolo, recientemente fallecido.

Es por tanto la segunda vez que se va a hablar en la Universidad de Jaén de asuntos geológicos en una Lección Inaugural. Al recibir este encargo y ante esta enorme responsabilidad, pensé elegir un tema de mi área de conocimiento, la estratigrafía, procurando a la vez que mi lección fuera amena y comprensible. Al mismo tiempo, no quería desmerecer del resto de compañeros y compañeras que magníficamente me han precedido en cursos anteriores, y espero no defraudar la confianza que se ha puesto en mi persona. Con el tema escogido, dentro de mi línea de investigación, pretendo dar a conocer algunos aspectos fundamentales de la estratigrafía y el tiempo geológico, ambos íntimamente relacionados entre sí.

En la redacción y exposición voy a tratar de utilizar un lenguaje lo más sencillo posible que facilite la comprensión, sin necesidad de ser especialistas de la materia.

Así, a continuación, expondré en primer lugar algunos aspectos fundamentales sobre la estratigrafía, su concepto, desarrollo, principios básicos y objetivos, y en segundo lugar trataré sobre el tiempo geológico en cuanto a su importancia y las ideas de tiempo relativo y numérico, sus métodos de determinación, y acerca de la Tabla Internacional del Tiempo Geológico y la relación con el calendario humano.

ESTRATIGRAFÍA: CONCEPTO, HISTORIA, PRINCIPIOS FUNDAMENTALES Y OBJETIVOS

La geología presenta la peculiaridad de tener un fundamento básico, sin tanta importancia en las demás ciencias: el tiempo. El aspecto fundamental de la geología como ciencia histórica es el tiempo geológico que es a su vez precisamente la base de la estratigrafía.

El descubrimiento del tiempo geológico y de su registro en las rocas revolucionó el pensamiento científico y fue el principal acontecimiento que condujo a la diferenciación y el desarrollo de la geología moderna (por ej., Laudan, 1987; Cervato y Frodeman, 2012). Efectivamente, una aportación fundamental y quizás la más importante de la geología a la ciencia en su conjunto, es el concepto de “tiempo geológico”, un tiempo inmenso a la escala humana ya que hablamos de millones de años (Ma). El desarrollo y la incorporación de este concepto al conocimiento científico se ha considerado según algunos autores (por ej., Gould, 1987; Rudwick, 2014) incluso como una cuarta gran revolución en el campo de la ciencia, junto a las revoluciones copernicana, darwiniana y freudiana.

El conocimiento del tiempo geológico está basado en el estudio de las rocas. Se diferencian por su génesis tres tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas ígneas también llamadas rocas magmáticas, están formadas por la solidificación de un magma procedente del interior de la Tierra. Las rocas sedimentarias se originan en la superficie de la Tierra por los procesos de erosión, transporte, sedimentación y diagénesis, y se caracterizan por presentar un dispositivo en capas o estratos que corresponden a los depósitos en diferentes intervalos de tiempo. Finalmente, las rocas metamórficas son el resultado de los aumentos de presión y temperatura que afectan a rocas previas y que causan la formación de minerales más estables en las nuevas condiciones.

Concepto

La estratigrafía es, desde hace más de un siglo, una rama con entidad propia diferenciada dentro de la geología. Su nombre deriva del latín *stratum* y del griego *graphia*, que alude etimológicamente a la “ciencia que estudia los estratos”.

La estratigrafía es una ciencia geológica cuya finalidad es el estudio y la interpretación de las rocas estratificadas. Las rocas estratificadas son las que presentan estratificación, es decir, una disposición en capas superpuestas o estratos desde el momento de su depósito o formación. La mayoría de las rocas estratificadas son rocas sedimentarias. Así, la estratigrafía estudia principalmente las rocas sedimentarias pero también las rocas metamórficas formadas a partir de rocas sedimentarias, que conservan su estratificación originaria, las rocas volcánicas estratificadas, y las capas de sedimentos que no han sido litificados (o consolidados como rocas). Cada uno de los estratos es el resultado del depósito durante un intervalo de tiempo concreto. El estudio de los estratos permite reconstruir las condiciones ambientales en que se realizó su depósito, así como su edad, principalmente a partir de los fósiles que contengan. El análisis de múltiples estratos presentes en distintas localidades posibilita la reconstrucción de un intervalo temporal de la historia de la Tierra.

Hay muchas interesantes definiciones de lo que es la estratigrafía en casi todos los libros sobre esta ciencia (ver referencias en la bibliografía final). Por ejemplo, Corrales *et al.* (1977) definen la estratigrafía como “*el estudio e interpretación de los procesos registrados en las sucesiones sedimentarias, que van a permitir, además de conocer la naturaleza y disposición de las rocas estratificadas, la correlación, tanto de los materiales como de los sucesos, y una ordenación temporal correcta de la secuencia de materiales y sucesos*”. Vera (2003) en su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales precisaba que la estratigrafía es la “*ciencia geológica que tiene como objetivo principal el estudio de las rocas estratificadas y a partir del mismo obtener la información necesaria para elaborar la historia de nuestro planeta con la máxima fiabilidad y con el mayor grado de precisión posibles*”. Otra definición que puede aparecer como más simple, pero que sin embargo abarca a todos los tipos de rocas es la que dice: “*estratigrafía es el estudio de las unidades de roca y la interpretación de las sucesiones de rocas como una serie de acontecimientos en la historia de la Tierra*” (Doyle y Bennet, 1998).

Todas las definiciones, incluidas las tres citadas, coinciden en que el factor tiempo enfocado a la interpretación de la historia geológica es fundamental. La estratigrafía proporciona la perspectiva del tiempo geológico con el que está íntimamente ligada; una perspectiva, que como hemos dicho, hace a la geología única dentro del conjunto de las ciencias. Aunque el tiempo a la escala humana puede medirse en horas o años, también está representado o registrado en un sentido material por aspectos de las rocas cuyas relaciones de edad pueden determinarse mediante los principios estratigráficos. La estratigrafía se encarga del estudio y reconstrucción del tiempo geológico y de la ordenación de los sucesos en un armazón temporal y por tanto, su función principal será el estudio de la evolución o historia de la Tierra en el espacio y en el tiempo.

La importancia de la estratigrafía dentro de las ciencias geológicas es evidente, por ejemplo, según Von Zittel (1901) “*es la rama más puramente geológica entre todas las partes de la geología*”, Gilluly (1977) consideró a la estratigrafía como “*la columna vertebral de las ciencias geológicas*”, y de acuerdo con Sengor (2016) “*la estratigrafía es la más fundamental de todas las ciencias geológicas*”. La estratigrafía es una de las ciencias geológicas básicas que se separó del tronco común (la geología) hace poco más de un siglo. Pese a su juventud, el desarrollo de esta ciencia ha sido muy importante hasta el punto de haberse ramificado en diversas disciplinas. Esta diversificación dentro de la estratigrafía a partir de sus primeras décadas como ciencia individual, ha llevado consigo que se haya introducido un nuevo término (*geología sedimentaria*) para denominar al conjunto de estas ramas interrelacionadas (estratigrafía, sedimentología, geología histórica, paleogeografía, paleoclimatología) y otras afines.

Los estudiosos de la estratigrafía pretendemos con nuestra investigación fundamentalmente deducir fragmentos de la historia de la Tierra a partir de la interpretación de los estratos sucesivos de diferentes edades y de diversas localidades. En definitiva, el papel del estratígrafo es describir, ordenar e interpretar las unidades de roca en términos de acontecimientos y procesos, y correlacionar esta información en el tiempo para reconstruir el registro de la historia de la Tierra o registro geológico (Ruiz Ortiz, 1993; Vera, 2003).

Aunque quizás algo exageradamente, en cierto modo, considero que todos los geólogos somos estratígrafos, ya que casi toda la investigación geológica intenta desentrañar los secretos de la Tierra y la estratigrafía

proporciona el armazón que es el tiempo geológico como base de referencia que sustenta nuestra investigación.

Hay que tener en cuenta también que en la estratigrafía como ciencia se conjugan dos enfoques distintos, pero complementarios: el científico y el aplicado (Corrales *et al.*, 1977; Vera, 1994, 2003). El enfoque puramente científico del que estamos hablando, básicamente pretende la obtención de los datos más exactos posibles para poder elaborar una reconstrucción de la historia geológica. El enfoque aplicado, que no voy a tratar en esta lección, pero que no hay que olvidar ya que es fundamental, tiene como objetivo principal la prospección de materias primas ligadas a rocas estratificadas de interés económico. Son estudios aplicados que dependen o forman parte de la estratigrafía, que por ejemplo es esencial en la exploración de reservas de petróleo, gas o carbón, de yacimientos minerales sedimentarios (por ejemplo, bauxitas, lateritas, fosfatos, evaporitas), de rocas industriales y materiales de construcción, en estudios hidrogeológicos, en ingeniería geológica, en la localización de almacenes subterráneos para gases y evacuación de residuos tóxicos, y en otros muchos aspectos de geología ambiental, patrimonio geológico y geodiversidad. En este sentido, especialmente hay que destacar que, aunque estamos inmersos en una transición energética en la que las llamadas energías renovables tendrán cada vez más protagonismo, los recursos energéticos fósiles, cuya prospección depende fundamentalmente de la estratigrafía, seguirán siendo muy necesarios durante décadas para producir multitud de bienes de uso cotidiano en sectores industriales, sanitarios o agrícolas entre otros. De hecho, los derivados del petróleo se han convertido en un elemento fundamental en gran cantidad de artículos de consumo.

Breve historia

La historia de la estratigrafía lógicamente tiene una parte común con la geología, que se inició en el siglo XVII, continuó en el siglo XVIII y se desarrolló más ampliamente en el siglo XIX. En las etapas iniciales de la geología como ciencia los aspectos estratigráficos, los que en un futuro formarían el cuerpo de doctrina de la estratigrafía, son de los más importantes. Así durante el siglo XVII y especialmente el siglo XVIII se definieron los conceptos de estrato, de concordancia y discordancia, y se hicieron las primeras clasificaciones de conjuntos de rocas de acuerdo con su antigüedad. Llama la atención el hecho de que el estudio de la geología

era en gran parte equivalente al de la estratigrafía, de modo que en los libros de texto de geología, entre los aspectos tratados, destacaba como asunto fundamental el examen y reconstrucción de los ambientes del pasado y de la vida a través del tiempo. Claramente, la estratigrafía fue la fuerza conductora intelectual de la geología, y los mayores avances y debates fueron casi todos de naturaleza estratigráfica (por ej., Rudwick, 1985; Secord, 1986). Durante el siglo XIX el desarrollo de los conceptos estratigráficos, dentro todavía del tronco común de la geología, fue muy importante, lo que se reflejó en la subdivisión del tiempo geológico en múltiples intervalos a partir de los fósiles que contienen las rocas. A principios del siglo XX el cuerpo doctrinal de la geología se hace tan extenso que empiezan a separarse diferentes ciencias geológicas con características propias (estratigrafía, geodinámica, paleontología, petrología, etc.), además de la mineralogía que ya tenía entidad propia incluso antes que la geología.

1. Fundadores de la geología y de la estratigrafía.

Como todas las ciencias, la geología y la estratigrafía tienen sus héroes científicos, pero estos protagonistas del desarrollo y avance de la geología, son quizás mucho menos conocidos que los de ciencias como la física, la química o la biología. Del intervalo histórico común de la estratigrafía y la geología destacaré las aportaciones de tres importantes científicos, uno del siglo XVII (Steno), otro del siglo XVIII (Hutton) y el tercero del siglo XIX (Lyell). Los tres hicieron notables contribuciones científicas, especialmente en campos de la geología relacionados con las rocas estratificadas y su interpretación genética y temporal, que constituyen los pilares de la estratigrafía. Sobre cada uno de ellos indicaré a continuación algunas de sus aportaciones esenciales.

Nicolaus Steno (1638-1686). En 1669 publicó en Florencia su obra geológica más importante titulada “*De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*”, más conocida abreviadamente como “*Prodromus*”. Fue el primero en definir un estrato como una unidad de rocas limitada por dos superficies que serían originariamente horizontales y que muestran continuidad lateral. También planteó que cuando un estrato se estaba depositando se iban consolidando los estratos originados previamente, explicando la diferencia entre sedimentos y rocas sedimentarias. Así mismo fue quien propuso por primera vez que en las sucesiones de estratos, o conjuntos de estratos superpuestos, los más antiguos eran los

que están debajo y los más modernos los que están encima. Con estas dos grandes ideas planteó dos de los principios fundamentales de la estratigrafía (el *principio de la horizontalidad original y continuidad lateral* y el *principio de la superposición*). Otro de los campos donde Steno hizo aportaciones muy interesantes y originales fue en la interpretación del origen de los fósiles como restos de organismos marinos. Steno fue nombrado obispo de Titiopolis en 1677 y beatificado en 1988 por el papa Juan Pablo II.

James Hutton (1726-1797). Médico de formación, se le considera, sin embargo, como el fundador de la geología moderna. Hizo aportaciones extraordinarias que en gran parte no fueron consideradas por la comunidad científica de su época, aunque se aceptaron 30 años después de su muerte, cuando Charles Lyell las difundió. La mayor aportación científica de Hutton fue la teoría del uniformismo (o uniformitarismo) en la que planteaba que todos los procesos geológicos han sido uniformes, de modo que conociendo los procesos actuales podemos deducir los que hubo en tiempos pasados. En la actualidad se conoce como el *principio del uniformismo*. Propuso la utilización de la metodología de actualismo consistente en analizar los procesos geológicos actuales y compararlos con los de tiempos pasados. Tras medir tasas de sedimentación en sedimentos recientes y comparar con los espesores de rocas sedimentarias antiguas llegó a la conclusión de que la edad de las rocas y por tanto de la Tierra era extraordinariamente superior a la que se consideraba en su tiempo (limitada a 6000 años principalmente por motivos religiosos). Es también el pionero en describir e interpretar una discordancia, concretamente la observada en las costas de Escocia (Siccar Point) entre capas verticales del Ordovícico y capas superpuestas con escasa inclinación del Devónico.

Charles Lyell (1797-1875). Nació en Londres en 1797, el mismo año en que murió James Hutton. Abogado de formación se interesó por la geología y llegó a ser profesor de esta materia en el *King's College* de Londres durante dos años (1831-1833). El resto de su vida vivió a costa de sus propios medios y de los derechos de autor de su libro *Principles of Geology* que en sus sucesivas ediciones (la primera en 1830), llegó a ser uno de los libros científicos más vendidos de su época. En su libro reflejaba las ideas de Hutton, matizadas por John Playfair (un amigo y colaborador de Hutton), emitidas treinta años antes. Lyell estableció las bases de lo que actualmente se conoce como el “ciclo geológico o ciclo de las rocas”. Se reconoce a Lyell por su famosa frase “*el presente es la clave del pasado*” que contiene toda una

enseñanza que implica la necesidad de estudiar los fenómenos geológicos actuales para poder interpretar los antiguos. Se trataba de la propuesta de utilizar el *método actualista*, complementario del principio del *uniformismo*. Sus publicaciones científicas llevaron a que se iniciara una fuerte controversia entre los defensores de las ideas catastrofistas (que sostenían que la Tierra se había formado principalmente por eventos violentos repentinos, de corta duración, posiblemente a nivel mundial) y los uniformistas (que defendían que los fenómenos del pasado fueron los mismos que observamos en la actualidad). La *controversia catastrofismo-uniformismo* acabó hacia 1840, decantándose el conjunto de la comunidad científica a favor de la teoría del uniformismo y de la aplicación generalizada del método actualista. Las primeras aplicaciones de este método llevaron a proponer edades de la Tierra muy superiores a las que se aceptaban con anterioridad y que provenían de una interpretación de la Biblia.

2. Desarrollo de la geología y de la estratigrafía en el siglo XIX

A principios del siglo XIX el grado de conocimiento de la geología todavía era aún bastante escaso, en gran parte debido al control religioso que se había impuesto limitando la edad de la Tierra a un máximo de 6000 años. Todos los fenómenos geológicos deducidos a partir del estudio de los estratos y de los fósiles que contenían debían explicarse como fenómenos catastróficos, siendo el modelo de catástrofe el Diluvio Universal referido en la Biblia. Se desarrolló y consolidó una doctrina (*Catastrofismo*) que frenaba el propio crecimiento de la geología como ciencia.

En la década comprendida entre 1830 y 1840 se produjo la citada controversia científica catastrofismo-uniformismo. Finalizada la misma con el abandono de las ideas catastrofistas, comenzó la aplicación del método actualista para interpretar los diferentes procesos geológicos del pasado, a partir de los datos deducidos del estudio de los procesos similares recientes. Se empezaron a realizar medidas de tasas de sedimentación actuales y a comparar sus valores con los espesores de sucesiones de estratos antiguos, con lo que se obtenían valores expresados en millones de años (Ma). Se rompe totalmente con las atribuciones de edad de la Tierra que la Iglesia había fijado en 6000 años y que ya Buffon al final del siglo XVIII había ampliado hasta los 74 000 años. Se inicia una nueva e interesante polémica: la de la edad de la Tierra expresada en años y sus múltiplos, lo que hoy llamamos edad numérica de la Tierra. Las aplicaciones del método actualista permitieron proponer edades para el origen de la Tierra del orden

de 100 Ma. Esta polémica finalizó cuando, tras el descubrimiento de la radioactividad, desde los primeros años del siglo XX se aplicaron medidas de elementos radioactivos en las rocas y se obtuvieron valores de más de 4500 Ma para la edad de la Tierra.

Durante el siglo XIX se definieron numerosas unidades de tiempo geológico (lo que actualmente se llaman *unidades cronoestratigráficas*) basadas en el contenido en fósiles de las rocas. Se estableció una escala de tiempo relativo que contenía más de 50 divisiones temporales sucesivas con rango de piso, que se agrupaban en unidades de rango mayor *sistemas* (o períodos) y en *eratemas* (o eras), con límites marcados por cambios importantes en los organismos fósiles. La mayoría de estas unidades cronoestratigráficas definidas en este siglo permanecen en las tablas de tiempo geológico actuales. La aplicación de la teoría de la evolución (Darwin, 1859) al estudio de los fósiles certificaba el método seguido para establecer los intervalos de tiempo geológico sucesivos, a partir de los cambios en el contenido fosilífero de las rocas estratificadas.

3. Nacimiento y desarrollo de la estratigrafía. Su relación con otras ciencias

Se acepta de manera general que la estratigrafía se separó del tronco común de la geología en el año 1913, fecha de la publicación del libro *Principles of Stratigraphy* (Grabau, 1913). Se trata de una ciencia bastante joven, con algo más de un siglo de historia, que sin embargo ha experimentado un importante desarrollo. Algunas de sus ramas ya han tenido un crecimiento tan notable que constituyen ciencias geológicas afines pero independientes; son el caso de la *sedimentología* y la *geología histórica*. Otras ramas van alcanzando progresivamente un desarrollo importante como la *litoestratigrafía*, *bioestratigrafía*, *magnetoestratigrafía*, *cronoestratigrafía*, *quimioestratigrafía*, *análisis de cuencas*, *estratigrafía secuencial*, *estratigrafía de eventos*, *cicloestratigrafía*, *paleogeografía*, o la *paleoclimatología*.

Los métodos de estudio se han ido diversificando y perfeccionando, aunque el más importante de todos sigue siendo la observación en el campo de las rocas estratificadas. La abundante información de datos de geología del subsuelo (métodos geofísicos y sondeos) ha contribuido a la interpretación más correcta de la formación, del depósito y la evolución de las cuencas sedimentarias.

Por otro lado, como toda la ciencia moderna la estratigrafía cada vez tiene un enfoque más interdisciplinar, de modo que buena parte de los

grandes avances científicos son aportaciones conjuntas desde diversas ciencias. Así, en el crecimiento de la estratigrafía ha tenido una importancia esencial la colaboración con otras ciencias y las etapas de su mayor avance y desarrollo se pueden relacionar con aportaciones interdisciplinarias (Vera, 1994; Miall, 2022). Una de ellas, como ejemplo, es la aplicación de las técnicas radiométricas a la datación de las rocas que comenzó hacia el año 1907 y que es una gran aportación de la física y de la química. La propia tectónica de placas que revolucionó hacia 1965 todas las ciencias geológicas es otro magnífico ejemplo de colaboración interdisciplinar, ya que en ella confluyen las aportaciones de la geofísica, la geología marina, la geodinámica interna, la petrología, la paleontología y la propia estratigrafía.

Las aportaciones interdisciplinarias de distintos campos de la ciencia han sido las responsables del desarrollo de algunas de las nuevas ramas de la estratigrafía (*magnetoestratigrafía*, *quimioestratigrafía*, *bioestratigrafía*, *estratigrafía secuencial*, ...) y de ciencias afines como la sedimentología y la geología histórica.

Se plantea que algunas de las ramas actuales de la estratigrafía lleguen a alcanzar un desarrollo tan importante que se pudieran diferenciar del tronco común de la estratigrafía. Estas ramas son las siguientes:

La *litoestratigrafía* que tiene como objetivo la delimitación de las unidades de rocas (unidades *litoestratigráficas*) con características propias, que las diferencian de las infrayacentes y las suprayacentes.

La *bioestratigrafía* es una rama de la ciencia a caballo entre la paleontología y la estratigrafía que se ocupa de la diferenciación de unidades estratigráficas (volumen de rocas estratificadas) en función de su contenido en fósiles.

La *cronoestratigrafía* tiene como finalidad la elaboración de una escala de intervalos de tiempo geológico consecutivos y de la datación en valores numéricos (años y sus múltiplos) de los límites de los mismos.

La *magnetoestratigrafía* pretende elaborar una tabla de tiempo geológico en la que se representen todos los fenómenos de inversión magnética reflejados en los minerales magnéticos de las rocas estratificadas.

La *quimioestratigrafía* se ocupa del estudio de los componentes químicos mayores y, especialmente de los minoritarios de las rocas. A partir de él deduce los cambios en las condiciones sedimentarias que se han detectado a lo largo del tiempo. Especial interés tienen en este campo los estudios de isótopos estables de oxígeno y carbono.

La *estratigrafía secuencial* estudia las relaciones de las secuencias de depósito, limitadas por discontinuidades estratigráficas, con las unidades cronoestratigráficas, e intenta elaborar una escala de los cambios del nivel del mar que afectaron de manera simultánea a todos los océanos y mares (cambios eustáticos).

La *cicloestratigrafía* se ocupa del estudio y reconocimiento de los ciclos de todo tipo reflejados en las secciones estratigráficas, y tiene como objetivo final la elaboración de una escala del tiempo astronómico.

La *estratigrafía de eventos* reconoce el resultado de fenómenos geológicos raros, imprevisibles y a menudo catastróficos (tormentas, inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas, impactos de origen extraterrestre, ...) que se superponen a los fenómenos normales y frecuentes.

El *análisis de cuencas* se considera como el objetivo final de un estudio estratigráfico. Pretende realizar estudios integrales de los rellenos de las cuencas sedimentarias de manera que se conozca el momento del inicio, los momentos más singulares en las fases de relleno y el momento de finalización del depósito. Estos datos deben resumirse de manera que puedan ser integrados en una reconstrucción de la historia de la Tierra.

La estratigrafía está íntimamente relacionada con todas las ciencias geológicas y con otras ciencias experimentales que han contribuido notablemente a su desarrollo.

La relación más estrecha es con las ciencias geológicas que se han separado de la propia estratigrafía al tener un importante cuerpo de doctrina propio. Una de ellas es la *sedimentología*, ciencia que se ocupa del estudio de los medios sedimentarios actuales para poder explicar la génesis de las rocas sedimentarias antiguas aplicando el método actualista. La otra es la *geología histórica* que es la ciencia que recopila los datos de las investigaciones estratigráficas de rocas de diferentes edades y muy diversas localidades y los presenta de una manera ordenada de más antiguos a más modernos. Dentro de la geología histórica hay ramas con entidad propia, como la *paleogeografía*, que se ocupa de la distribución de mares y continentes en tiempos pasados y la *paleoclimatología*, que trata sobre la evolución del clima de la Tierra en tiempos pasados.

Puesto que la estratigrafía estudia las rocas estratificadas tiene a su vez una estrecha relación con la *petrología* que estudia las rocas, y a través de ella con la *mineralogía* que se ocupa del estudio de los minerales. Como

uno de los objetivos esenciales de la estratigrafía es introducir la coordenada tiempo en las secciones estratigráficas, tiene una relación importante con la ciencia que estudia los fósiles (*paleontología*). Al estudiar rocas estratificadas deformadas es evidente la conexión cercana con la *geodinámica interna*, ya que además las cuencas sedimentarias y la historia de su relleno deben explicarse a la luz de la tectónica global o tectónica de placas. Como el proceso inicial del ciclo geológico externo es la modelación del relieve hay también una relación significativa con la *geodinámica externa* y como en dicho proceso, en sus fases iniciales, se forman suelos hay también relación con la *edafología*. A través de estas dos últimas ciencias tiene conexión con la *climatología*. Los estudios de isótopos radioactivos encaminados a obtener dataciones numéricas y la de isótopos estables para conocer paleotemperaturas la relacionan con la *geoquímica*. El necesario estudio estratigráfico que debe realizarse en cualquier prospección de rocas sedimentarias de interés económico (entre ellas el carbón y el petróleo) o del agua subterránea, hacen que exista una estrecha relación con la *geología aplicada* y dentro de ella con la *geología del petróleo*, la *geología del carbón*, la *geología de yacimientos* y la *hidrogeología*. La progresiva concienciación de la necesidad de protección del medio ambiente bajo el enfoque del desarrollo sostenible hace que la estratigrafía esté también muy relacionada con la *geología ambiental*.

En cuanto a la relación con las demás ciencias entre la geología y la biología ha existido un vínculo permanente, desde los primeros tiempos (siglos XVIII y XIX), ya que las dataciones relativas se realizan a partir del estudio de los restos de organismos (fósiles) presentes en las rocas sedimentarias. En el caso de la estratigrafía esta colaboración con la biología ha sido muy intensa, hasta el punto de existir una disciplina (*bioestratigrafía*) como ciencia intermedia entre la biología y la estratigrafía. Las relaciones con la física y la química han sido muy importantes desde el inicio del siglo XX tras el descubrimiento de la radioactividad y su aplicación en la datación numérica de las rocas. Actualmente, los centros de investigación más prestigiosos se han dotado de equipos instrumentales complejos y costosos para realizar medidas de edad numérica de las rocas aplicando los métodos radiométricos. Entre la física y la geología se ha desarrollado una ciencia mixta, la *geofísica*, que se ocupa entre otros aspectos del estudio de la geometría de cuerpos estratigráficos en el subsuelo. El estudio del magnetismo terrestre en tiempos pasados (*paleomagnetismo*) es otra importante colaboración entre ambas ciencias hasta el punto de constituir uno de los pilares de la Teoría de

la Tectónica de placas y el fundamento de la escala magnetoestratigráfica. Entre la química y la geología la colaboración ha sido constante hasta el punto de que surge una ciencia intermedia, la *geoquímica*, que se ocupa del estudio de la composición de las rocas y de su interpretación genética. En el campo más afín a la estratigrafía se ha desarrollado el estudio de los isótopos estables como criterio para el reconocimiento de ciclos climáticos en las rocas sedimentarias y de las medidas de paleotemperaturas. En los últimos decenios se ha establecido una importante colaboración entre la geología y las matemáticas (*geomatemáticas*), y en especial con la estratigrafía concretamente con el análisis matemático, en la interpretación de los ciclos de Milankovitch, tanto en testigos de sondeos como en afloramientos superficiales.

Principios fundamentales

Gran parte de las bases doctrinales de la estratigrafía se establecieron en la fase de historia común de la estratigrafía con la geología. Así durante los siglos XVII, XVIII y XIX se definieron varios principios de la geología que constituyen la base de los principios fundamentales de la estratigrafía. El último de estos principios (el Principio de la simultaneidad de eventos) se emitió en la segunda mitad del siglo XX.

Principio de la horizontalidad original y la continuidad lateral de los estratos

Se fundamenta en las ideas de Steno expresadas en su obra *Prodromus*, citada anteriormente, y dice que: “los estratos en el momento de su depósito son horizontales y quedan limitados por dos superficies que tienen continuidad lateral”. En definitiva, se considera que cada estrato corresponde al depósito durante un intervalo de tiempo. Los estudios recientes, en especial de geología del subsuelo, permiten matizar la definición ya que en diferentes ocasiones los estratos presentan alguna inclinación original, en general escasa, al depositarse paralelos a superficies con cierta pendiente. Por ello se podría cambiar en la propia definición la palabra “horizontales” por “subhorizontales”. El mismo Steno planteaba que cuando un estrato (o conjunto de estratos) no están horizontales se debe a deformaciones posteriores a su depósito. El principio tiene una validez total y constituye uno de los pilares de la estratigrafía de modo que si los estratos aparecen

inclinados o incluso invertidos se debe al efecto de deformaciones tectónicas que afectaron a capas que originariamente eran subhorizontales.

Principio de la superposición

También se basa en las ideas de Steno reflejadas en el *Prodromus*. Se puede explicar con el siguiente texto: “en una sucesión de estratos superpuestos los que están debajo son más antiguos y los que están encima son más modernos”. Se trata de otro principio básico de la estratigrafía ya que permite establecer ordenaciones temporales de estratos de más antiguos a más modernos, aunque se trate de ordenaciones relativas (sin datación numérica). Lógicamente se pueden encontrar problemas al intentar aplicar este principio en conjuntos de estratos verticales o invertidos. En estos casos se deben usar los llamados criterios de polaridad vertical que permiten reconocer donde están los niveles más antiguos y los más modernos. Este principio también tiene algunas excepciones, como es el caso de los depósitos en el seno de cavidades excavadas en rocas más antiguas (como sería el caso de cuevas).

Principios de las relaciones de corte y de los fragmentos incluidos

Son también dos principios básicos en el establecimiento de relaciones temporales en estratigrafía (datación relativa). El *principio de las relaciones de corte o relación transversal* puede enunciarse diciendo que “el elemento geológico que corta a otro es el más moderno de los dos”, así los cuerpos sedimentarios (estratos, miembros, formaciones) o estructuras como fallas, fracturas, intrusiones o diques que cortan a otros, son más recientes que los cortados. El *principio de los fragmentos incluidos o de inclusiones* se puede expresar diciendo que “cuando en una roca se encuentran fragmentos (cantos o inclusiones) de otra roca, la roca de la que proceden los cantos o inclusiones es más antigua que la que los contiene”. Si lo que encontramos es un canto o un bloque, este procede de una roca más antigua que la roca donde se encuentra; mientras que si en el seno de una roca (intrusiva o metamórfica) se encuentra una inclusión, esta procede de una roca preexistente, es decir más antigua.

Principio del uniformismo

Se basa en las ideas de Hutton difundidas y completadas por Lyell, 30 años después. Se podría enunciar diciendo: “los procesos que han ocurrido a lo largo de la historia geológica han sido uniformes y semejantes a los actuales”. Este es el denominado principio del uniformismo (o uniformitarismo) cuya

emisión conlleva la propuesta de aplicación de una metodología (método actualista) que consiste en estudiar en detalle los procesos actuales para interpretar los procesos análogos de tiempos anteriores. Con frecuencia se consideran erróneamente sinónimos uniformismo (que es el principio) y actualismo (que es una metodología). La aplicación del principio y la citada metodología llevan a la simplificación de la conocida frase “el presente es la clave del pasado” que cada vez se tiende más a cambiar por “el Cuaternario es la clave del pasado” (Matthews, 1984), ampliando el intervalo temporal a los últimos 2,5 Ma y no a un tiempo corto indefinido.

Principio de la sucesión faunística y florística o de la correlación

Fue emitido por el ingeniero inglés William Smith (1769-1839), una figura importante en el inicio de la estratigrafía, y desarrollado por el paleontólogo francés George Cuvier (1769-1832). Constituye el fundamento más importante para la datación relativa de las rocas estratificadas. Se puede describir con la siguiente frase: “en cada intervalo temporal de la historia geológica (representado por un conjunto de estratos) los organismos que vivieron y que por tanto pudieron fosilizar fueron diferentes y no repetibles”. Plantea en definitiva que en cada episodio temporal los organismos existentes fueron distintos, lo que pudo explicarse unas décadas después con la teoría de la evolución de Darwin (1859). Este principio permite establecer comparaciones (correlaciones) entre secciones estratigráficas de edad semejante de distintas regiones y con ello definir unidades de tiempo relativo a nivel mundial basadas en el contenido fosilífero de las rocas estratificadas.

Principio de la simultaneidad de eventos

Al contrario que los otros principios fundamentales, este se definió hacia los años 80 del siglo XX, por tanto, bastante después de la individualización de la estratigrafía dentro de la geología. La controversia entre *catastrofismo* y *uniformismo* desarrollada principalmente entre 1830 y 1840, que acabó con la aceptación generalizada del uniformismo, se reactiva de nuevo hacia 1980 y se llega a la conclusión de que ambas teorías no son excluyentes, sino que son compatibles, con lo que nace una nueva manera de pensar (el *Neocatastrofismo* o *Catastrofismo* actualista; Vera, 1990; Ager, 1993). Se define un evento como un “fenómeno geológico raro y episódico que queda reflejado en el registro estratigráfico y que se superpone a los fenómenos normales y frecuentes”. Los eventos coinciden mayoritariamente con grandes catástrofes ocurridas sobre la Tierra y con frecuencia son reconocibles en el

registro estratigráfico a escala regional o global. Según este principio los eventos reconocibles en las secciones estratigráficas constituyen excelentes criterios de correlación incluso a escala mundial.

Objetivos

Se han expuesto a grandes rasgos al explicar el concepto de estratigrafía. Sin embargo, es conveniente dedicar unas palabras a este asunto para concretar más aquellas ideas generales. En el estudio de las rocas estratificadas se pretenden alcanzar diferentes objetivos sucesivos que son el fundamento de la metodología estratigráfica y que se pueden ordenar desde los más simples a los más complejos, de la siguiente manera (Vera, 1994):

1. *Identificación de los materiales.* Es el objetivo más básico y consiste en el reconocimiento e identificación de los diferentes estratos estudiados. Para ello se estudian mediante la observación todas sus características: litología, color, estructura, estructuras y contenido fósil. Todas estas propiedades se reúnen bajo el concepto de facies, que cuando se basa esencialmente en los aspectos litológicos se llama litofacies. A veces en la identificación se utilizan datos obtenidos mediante el microscopio petrográfico (*microfacies*), datos geofísicos obtenidos del subsuelo y datos geoquímicos basados en estudios de laboratorio.

2. *Distinción de unidades litoestratigráficas.* Trata de delimitar volúmenes de rocas estratificadas en función de su litofacies y, por tanto, de diferenciar unidades litoestratigráficas. Estas unidades son las que se observan en el campo y las que se representan en los mapas geológicos usuales.

3. *Relación de continuidad y/o discontinuidad entre unidades litoestratigráficas superpuestas.* Tiene como finalidad el diferenciar si entre dos unidades litoestratigráficas superpuestas falta algún intervalo de tiempo medible. Cuando no falta intervalo de tiempo se dice que la relación entre ambas unidades es de continuidad y cuando hay intervalo de tiempo ausente se dice que hay *discontinuidad*.

4. *Interpretación genética de los materiales.* Pretende reconstruir las condiciones genéticas de las rocas estratificadas mediante el estudio comparado con los medios sedimentarios actuales y la consiguiente aplicación del principio del uniformismo y del método actualista. De este aspecto se ocupa fundamentalmente la sedimentología.

5. *Levantamiento de secciones estratigráficas.* Consiste en la ordenación temporal de las diferentes unidades litoestratigráficas que aparecen en una región concreta. Esta ordenación se expresa mediante gráficos a escala (columnas o secciones estratigráficas) en los que se representan las unidades de rocas, las más antiguas debajo y las más modernas arriba, con su espesor, litología y demás propiedades, utilizando una normativa gráfica normalizada.

6. *Correlación estratigráfica.* Se trata de comparar varias secciones estratigráficas para intervalos de tiempo análogos lo que permite ampliar la validez de los datos a regiones cada vez más extensas. El fin último de este objetivo es reconocer líneas de igualdad de tiempo (isócronas) en diferentes secciones estratigráficas, algunas de las cuales pueden coincidir con eventos.

7. *Introducción de la coordenada tiempo.* Consiste en la utilización conjunta de todos los métodos de datación disponibles que trataremos a continuación. De una parte, está la utilización de los datos proporcionados principalmente por los fósiles (bioestratigráficos) que delimitan intervalos de tiempo relativo. De otra parte, estaría la introducción de datos de edades numéricas, directamente mediante dataciones radiométricas o utilizando los límites numéricos (en Ma) que figuran en las tablas del tiempo geológico calibrado. Así se delimitan las unidades bioestratigráficas, cronoestratigráficas y a veces las magnetoestratigráficas.

8. *Análisis de cuencas.* Es el objetivo final de todo trabajo estratigráfico. Trata de elaborar la historia geológica completa de una cuenca sedimentaria (o de una parte de esta) a partir del estudio integral de su relleno sedimentario. Los datos obtenidos en este objetivo se deberán presentar de manera que puedan ser recopilados por la ciencia que se ocupa de reconstruir la historia de la Tierra (geología histórica).

Resulta evidente que para llegar al objetivo final (análisis de cuencas) se deben realizar sucesivamente cada uno de los siete objetivos anteriores.

EL TIEMPO EN ESTRATIGRAFÍA. TIEMPO RELATIVO Y TIEMPO NUMÉRICO

Uno de los temas más apasionantes y por ello más debatidos en la historia de la geología y de la estratigrafía, ha sido la datación de las rocas, de los fenómenos geológicos sucedidos en tiempos pasados y de la propia edad de la Tierra.

Tras la emisión de los principios fundamentales de la estratigrafía y la aplicación simultánea de dos de ellos (el principio de la superposición y el principio de la sucesión faunística o de la correlación) en los trabajos geológicos realizados en diferentes regiones, especialmente europeas, se empezaron a definir intervalos de tiempo sucesivos caracterizados por los fósiles contenidos en las rocas estratificadas. Durante el siglo XVIII y especialmente el siglo XIX se establecieron subdivisiones del tiempo geológico de diferente rango (eras, periodos, edades) que formaban una escala de tiempo geológico constituida por unidades de rocas ordenadas de más antigua a más moderna, pero cuya edad exacta en años se desconocía por completo.

Se fijaron dos conceptos de edad geológica muy diferentes: la *edad relativa* y la *edad numérica*. La edad relativa es la que se establece con la aplicación de los dos principios fundamentales citados en el anterior párrafo y se basa en la ordenación de los intervalos de tiempo consecutivos definidos por su contenido fósil. La *edad numérica* es la que se expresa en cifras de unidades de tiempo (años y sus múltiplos). Inicialmente se le llamó *edad absoluta*, término utilizado durante casi un siglo pero que ha quedado obsoleto. Hay esencialmente dos razones para emplear el término edad numérica en lugar de edad absoluta. La primera es que resulta poco apropiado usar el adjetivo absoluto aplicado a edad o datación cuando se refiere a cifras medidas con respecto a una fecha cambiante (la actualidad). La segunda y principal es que la datación, en especial de rocas muy antiguas, puede tener márgenes

de error de hasta decenas de millones de años (Ma) por lo que el término absoluto no resulta apropiado.

La polémica sobre la edad de las rocas, de los acontecimientos geológicos y de la propia Tierra realmente se centró sobre la edad numérica. Se inició en los comienzos de la geología como ciencia (siglos XVII y XVIII) y llegó al máximo nivel en el siglo XIX. Precisamente en este siglo la escala de tiempo geológico relativo se fue completando hasta llegar a tener más de 50 divisiones consecutivas, cuando las valoraciones de tiempo numérico eran meras especulaciones. En los inicios del siglo XIX la mayoría de los autores aceptaban que la edad de la Tierra era de 6000 años, cifra que se había establecido a partir de la interpretación de la Biblia. Sin embargo, después de la *controversia del catastrofismo-uniformismo* (1830-1840) con el triunfo del uniformismo y la aplicación del método actualista, se empezaron a manejar cifras indicadas, por primera vez, en millones de años (Ma) para la edad de la Tierra.

La controversia finalizó tras el descubrimiento de la radioactividad, en el tránsito entre los siglos XIX y XX, y su inmediata aplicación en la medida de la edad numérica de las rocas, expresada en Ma. A partir de 1940 la edad numérica de las rocas y la edad de la propia Tierra, ya indicadas en cifras de unidades de tiempo (Ma) pasaron a ser conceptos científicos confirmados, de aceptación general.

Las cifras de edades numéricas que actualmente se utilizan para las rocas más antiguas y para la edad de la Tierra son de unas magnitudes tan grandes que al ciudadano medio puede costarle trabajo entenderlas. Al estudiante que se inicia en la geología y en la estratigrafía también le resulta difícil manejar estas cifras tan poco usuales. Se trata de miles de millones de años (10^9 años) para los tiempos más antiguos. Para tiempos más recientes, en los que la Tierra estuvo poblada por seres vivos con una estructura compleja y que conservaron sus restos como fósiles (al que llamamos eón *Fanerozoico*) se usan cifras de centenas o decenas de millones de años (10^8 y 10^7 años), que siguen siendo muy altas con respecto a las utilizamos normalmente.

En la actualidad, los únicos debates que se mantienen sobre las dataciones numéricas se limitan al valor exacto de las mismas, ya que los márgenes de error varían según el grado de precisión del equipo instrumental que se use. Las cifras de las dataciones numéricas obtenidas, constantemente revisadas y actualizadas, son aceptadas en general sin la mínima objeción por la comunidad científica.

Escala de tiempo geológico relativo

Desde los primeros estudios geológicos, en los inicios de la geología como ciencia, uno de los objetivos prioritarios de estudio consistía en intentar ordenar temporalmente los conjuntos de rocas observados en el campo.

A finales del siglo XVII y durante el siglo XVIII diversos autores (Moro, Arduino, Lehman, Werner, etc.) definieron tres grandes conjuntos de rocas. El conjunto más antiguo, al que llamaron *Primario*, estaba formado por rocas ígneas y metamórficas muy deformadas. El segundo grupo, al que llamaron *Secundario*, lo constituían las rocas sedimentarias plegadas, con un grado de deformación mucho menor. El tercer grupo, al que llamaron *Terciario*, correspondía a los materiales más modernos subhorizontales o de escasa deformación. Los tres nombres (*Primario*, *Secundario* y *Terciario*) sirvieron para denominar a las tres grandes subdivisiones del intervalo de tiempo geológico caracterizado por la presencia de fósiles (al que ahora se llama *Fanerozoico*). A estas divisiones de orden mayor se les llamaron *era primaria*, *era secundaria* y *era terciaria*, cuyos nombres se mantuvieron más de siglo y medio hasta ser sustituidos por los de *Paleozoico*, *Mesozoico* y *Cenozoico*, respectivamente, que se usan en la actualidad.

Durante el siglo XIX se definieron los intervalos de tiempo dentro de cada una de las eras a los que se llamaron periodos. La división se establecía haciendo coincidir los límites de unidades con cambios notables en cuanto a la desaparición y/o aparición de grupos o clases de los fósiles que contenían los estratos. No todos los fósiles tienen el mismo valor para establecer divisiones de tiempo relativo. Hay algunos con un valor muy superior al resto; son los llamados *fósiles característicos* o *fósiles guía*, que se caracterizan por ser abundantes, tener una distribución geográfica extensa y una evolución rápida de modo que vivieron un intervalo de tiempo corto.

En la entonces denominada era primaria (el actual *Paleozoico* o Era Paleozoica) se definieron seis periodos que, de más antiguo más moderno, son: *Cámbrico*, *Ordovícico*, *Silúrico*, *Devónico*, *Carbonífero* y *Pérmico*. En la llamada era secundaria (actual *Mesozoico* o Era Mesozoica) se diferenciaron tres periodos: Triásico, Jurásico y Cretácico. En la antigua era terciaria (actual *Cenozoico* o Era Cenozoica) se diferenciaron otros dos periodos (*Paleógeno*, *Neógeno*) o tres (*Paleógeno*, *Neógeno* y *Cuaternario*) según los autores. Todos

estos períodos se establecieron en regiones concretas y basándose en los fósiles que contenían las rocas. Una parte de ellos fueron denominados con el nombre de la región terminándolo con el sufijo -ico en español (excepto el Carbonífero y los del Cenozoico). Por ejemplo: el Devónico alude al condado de Devon (Inglaterra), el Jurásico se refiere a las montañas del Jura (entre Francia y Suiza). En otros casos se usaron nombres alusivos al tipo de roca dominante. Por ejemplo: el Cretácico tomó su nombre de la creta (tipo de roca carbonatada de grano muy fino, abundante en la región donde se definió) o Carbonífero del carbón. Finalmente, otras veces su nombre se refiere a su posición temporal (p. ej. Paleógeno, Neógeno) o al hecho de estar formado por tres términos litológicos (Triásico). Los nombres de los periodos definidos en este siglo, mucho antes de que se conocieran sus edades numéricas, se mantienen con la nomenclatura actual, con la única variación del Cuaternario que fue inicialmente definido como una era y que actualmente se considera como un periodo dentro del Cenozoico.

Dentro de los periodos se delimitaron unidades de rango menor, de las que destacan los pisos, que corresponden a afloramientos de rocas sedimentarias depositadas durante una edad concreta. Gran parte de los pisos de la nomenclatura actual fueron definidos en el siglo XIX a partir de su contenido fosilífero y generalmente fueron bautizados con el nombre de la localidad que se propone como referencia con el sufijo *-iense*. Algunos de los pisos antiguos han sido reemplazados por otros, con distinto nombre, que expresan mejor las características que lo definen. Sin embargo, la mayoría de los pisos definidos en el siglo XIX se mantiene en la nomenclatura actual.

El principal problema en cuanto a la escala del tiempo relativo es lo que podemos llamar “*fenómenos de la discontinuidad del registro estratigráfico y de la mayor importancia de los hiatos sobre el registro sedimentario*” (Dabrio y Hernando, 2003). La discontinuidad del registro estratigráfico o de la falta de representación del tiempo geológico en los estratos se ha comprobado por los estudios realizados durante muchos años. Predominan los hiatos que corresponden a superficies de discontinuidad, marcadas por el cese del depósito de sedimentos o por la erosión de los sedimentos o rocas sedimentarias previamente depositadas. Salvo raras excepciones, como es el caso de depósitos pelágicos en los que, aunque la sedimentación sea lenta hay una cierta continuidad de depósito, el registro sedimentario de una región para un período de tiempo dado es siempre discontinuo. Esto equivale a decir que el registro sedimentario en la práctica nunca es continuo.

La mayor importancia de los hiatos sobre el registro sedimentario, intuida por Dunbar y Rodgers (1957) fue expresada y precisada por Ager (1973) y podría referirse así: “*en cualquier registro sedimentario, y salvo muy raras excepciones, el tiempo no representado por sedimentos es mayor que el que sí lo está*”. Ager indica que la historia más real del registro sedimentario sería la de un largo hiato con solo sedimentación ocasional.

Primeros intentos de datación numérica

La primera datación numérica que se conoce sobre la edad de la Tierra es la que hizo el arzobispo irlandés James Ussher (1581-1656) a partir de estudios de la Biblia en su libro *Annales Veteris Testamenti (Anales del Antiguo Testamento)* el año 1650. Se precisaba la creación de la Tierra a las 12 del mediodía del martes 23 de octubre del año 4004 a.C. (Leddra, 2010). Esta cifra, aunque pueda parecer jocosa en la actualidad, en realidad era fruto de un estudio muy minucioso que se hacía suponiendo que la aparición del hombre fuese coetánea con la creación de la Tierra. Por ello, es recomendable considerar esta datación realizada a partir de un exhaustivo estudio de la Biblia, no como una extravagancia del citado arzobispo sino también en parte como la expresión del grado de desconocimiento que sobre la edad de la Tierra y de las rocas se tenía en el siglo XVII.

Durante el siglo XVIII se aceptaba de manera generalizada que la Tierra tenía una edad como máximo de 6000 años. El primer científico que se atrevió a dar una cifra superior fue George Louis Leclerc, conde de Buffon (1707-1788), quien en 1778 fijó la edad de la Tierra en 74 000 años. Se basó en la evidencia del calor interno terrestre, calculando su tasa de enfriamiento a partir de una masa inicial fundida. Esta cifra desde la perspectiva actual puede parecer escasa pero en su tiempo era verdaderamente revolucionaria.

En el siglo XIX empiezan a producirse cambios muy notables, en especial, una vez finalizada la controversia catastrofismo-uniformismo (1830-1840). Darwin en 1859 en su libro *El origen de las especies* no aportaba cifras, pero decía que “*los periodos de tiempo pasado eran incomprensiblemente inmensos*”. Lyell en 1868, en la décima edición de su libro *Principles of Geology*, estimó que la edad numérica de las rocas más antiguas con fósiles (las del inicio del Cámbrico) podría ser de 240 Ma.

Entre 1860 y 1870 William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907), físico de un enorme prestigio en su época, desarrolló una teoría con la que

pretendía medir la edad de la Tierra. En ella planteaba que desde el momento de la formación de la Tierra como un cuerpo fundido la temperatura había ido disminuyendo progresivamente. Tras medir lo que consideró como tasa de enfriamiento de la Tierra, calculó el tiempo inicial en el que las rocas estuvieron a la temperatura de solidificación. Con ello llegó a estimar que la edad de la Tierra era de unos 100 Ma. Estos cálculos de Kelvin en su tiempo tuvieron un grado de aceptación muy amplio.

En la segunda mitad del siglo XIX, mediante la aplicación del método actualista se hicieron muchos cálculos para conocer la edad de la Tierra. Se medían las tasas de sedimentación en medios sedimentarios recientes y se comparaban con los espesores de antiguas unidades litológicas cuyo origen fuese semejante. Considerando datos de diferentes edades y medios sedimentarios se hicieron estimaciones sobre la edad de la Tierra cuyas cifras en su mayoría se acercaban, consciente o inconscientemente, a los 100 Ma.

A finales del siglo XIX, John Joly (1857-1933) partiendo de otra teoría peculiar, ya propuesta por Edmund Halley (1656-1742) a principios del siglo anterior, intentó calcular la edad de la Tierra. La teoría planteaba que los mares y océanos eran originalmente de agua dulce y que se fueron salinizando progresivamente hasta la actualidad. Midiendo lo que consideraba la tasa de incremento actual de la salinidad calculó la edad de la Tierra en 90 Ma.

Descubrimiento de la radioactividad y dataciones numéricas

Durante la década comprendida entre 1895 y 1905 sucedió uno de los descubrimientos más importantes en los campos de la física y de la química: el de la *radioactividad*. El reconocimiento de elementos radioactivos en los minerales y la aplicación de técnicas radiométricas en la medida de la edad numérica de las rocas significó un avance enorme en el campo de la geología, que acabó con las discusiones sobre la edad de la Tierra.

En 1896, el físico francés Antoine Henri Becquerel (1852-1908) descubrió accidentalmente lo que posteriormente se llamó la radioactividad cuando estudiaba la fosforescencia de un mineral de uranio. Inmediatamente el matrimonio Curie (Pierre y Marie) empezó a estudiar minerales que tuvieran elementos con los mismos rasgos que el uranio. El primero fue el torio y en 1898 descubrieron el radio y el polonio. El matrimonio Curie fue precisamente el que introdujo el término *radioactividad*, para definir la

propiedad común de estos elementos. En 1903 los tres científicos citados (Becquerel y el matrimonio Curie) obtuvieron conjuntamente el Premio Nobel de Física por el descubrimiento de la radioactividad natural.

En el mismo intervalo de tiempo el físico de origen neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937), que desarrolló su labor docente e investigadora mayoritariamente en la Universidad de Cambridge, planteó la idea que resultó fundamental para la datación numérica de las rocas. Consistía en aceptar que la radioactividad ocasionaba una pérdida de masa de las muestras, por desaparición continua de los elementos radioactivos y la aparición de nuevos elementos. En 1908 Rutherford recibió el Premio Nobel de Química.

Entre 1905 y 1907 Bertram Boltwood (1870-1927) aplicó el primer método radiométrico de medida de edad numérica de rocas ígneas basado en la relación entre uranio y plomo. Consideró que el uranio radioactivo era el elemento que se formó cuando la roca cristalizó y que el plomo era el que se fue formando a medida que aquél se iba desintegrando. Calculó en el laboratorio la velocidad de desintegración del uranio radioactivo. Midió la relación uranio/plomo de nueve muestras de rocas ígneas de diferentes localidades y calculó el tiempo que había pasado desde su solidificación y, por tanto, la edad de las rocas. Los valores obtenidos oscilaban entre 410 y 2200 Ma, según la localidad. También calculó la edad de algunas rocas de Groenlandia que dieron una edad media de 3015 Ma.

Durante los años 1908-1910 fue Robert John Strutt (1875-1947) quien calculó nuevas edades de rocas mediante el estudio de los minerales radioactivos, en su laboratorio del *Imperial College* de Londres. Un discípulo de Strutt, llamado Arthur Holmes (1890-1965) fue realmente quien a partir de 1911 puso a punto los métodos de medida de edades numéricas basados en el estudio de elementos radioactivos. En 1913, cuando apenas tenía 23 años, publicó un trabajo (*The age of the Earth*) en el que se databan numéricamente y por primera vez los límites de las eras y periodos definidos previamente en la escala de tiempo relativo. A partir de esta fecha se publicaron nuevas tablas con los valores numéricos de los límites de periodos y edades, e incluso de pisos, entre las que destacaron las de Joseph Barrell (1917) y las del propio Arthur Holmes (1933, 1947, 1960). Henry Norris Russell (1877-1957) en 1921 consideró una edad de 4000 Ma para la corteza terrestre.

Posteriormente, Harrison Brown (1917-1986) y Claire Patterson (1922-1995) calcularon la edad del meteorito que formó el cráter Meteor de Arizona en 4510 Ma de antigüedad. Por su parte las muestras traídas de la Luna mayoritariamente tienen entre 3000 y 3500 Ma, aunque alguna de ellas fue datada como de hace 4150 Ma. En estudios posteriores se han localizado las rocas terrestres posiblemente más antiguas en la costa de la Bahía de Hudson, en el este de Canadá, de hasta 4280 Ma (aunque la edad real de estas muestras aún está en debate), y los minerales más antiguos conocidos (circones en rocas sedimentarias de Jack Hills al oeste de Australia) tienen una edad de 4,4 Ma (Valley *et al.*, 2014). Las rocas ígneas originales en las que se generaron estos cristales no se han encontrado todavía o quizás ya no existan. La edad actual aceptada para la Tierra se estima en unos 4600 Ma (Dalrymple, 2004; Van Kranendonk *et al.*, 2019).

Métodos de datación numérica de las rocas

Tras el descubrimiento de la radioactividad y sus primeras aplicaciones a la medida de edad numérica de las rocas se desarrollaron varias técnicas de datación a partir del estudio de los elementos radioactivos, a las que en su conjunto se denominan métodos radiométricos. En la actualidad hay además otros métodos de medida de edad numérica que no son radiométricos y que los complementan.

Fundamento de los métodos radiométricos

Parte del hecho de que un elemento radioactivo natural, que forma parte de un mineral en una roca ígnea, inició su desintegración en el momento en el que se cristalizó la roca y que dicha desintegración se realizó a una velocidad constante. En el caso de tratarse de medidas aplicables directamente a rocas sedimentarias se acepta que la desintegración comenzó en el momento que se depositó el sedimento.

Al elemento radioactivo natural se le llama elemento padre (P) y al elemento que se forma por la desintegración se le llama elemento hijo (H). La relación entre ambos elementos (H/P) en las rocas será el dato esencial para su datación numérica. La desintegración del elemento radioactivo se efectúa de una manera especial, ya que para cada elemento radioactivo ocurre que al cabo de un tiempo determinado la cantidad del elemento padre se reduce a la mitad. Pasado otro intervalo de tiempo igual se reduce de nuevo a la mitad, por tanto, a un cuarto de la cantidad inicial,

y así sucesivamente. A este intervalo de tiempo en el cual se produce la desintegración de la mitad del elemento padre es al que se le denomina *periodo de semidesintegración*. Su valor varía para cada elemento radioactivo y puede ser medido experimentalmente en el laboratorio.

La duración del período de semidesintegración marcará el límite de fiabilidad del método empleado ya que cuando los valores de H/P pasen a ser muy semejantes, con variaciones que pueden llegar a ser del mismo orden de magnitud que el posible error de medida instrumental, las mediciones pueden ser erróneas.

En todos los casos la medida de la edad numérica (t) expresada en años y sus múltiplos se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$t = 1/\lambda \ln (1 + H/P)$$

en la que λ es el periodo de semidesintegración del elemento radioactivo conocido a partir de medidas experimentales en el laboratorio, H la cantidad del elemento hijo y P la cantidad de elemento padre.

Las medidas de las cantidades de elemento padre y de elemento hijo se hacen sobre muestras de rocas aplicando las mejores técnicas de microanálisis químico, como la microsonda iónica de alta sensibilidad y resolución (SHRIMP). El perfeccionamiento continuo de estas técnicas permite obtener datos cada vez más precisos y fiables.

Principales métodos radiométricos

Los métodos radiométricos que se han utilizado en la datación numérica de las rocas son muy diversos, aunque algunos de ellos han alcanzado mayor grado de fiabilidad y son los que habitualmente se aplican en los laboratorios de geocronología. Los métodos en general son bastante costosos ya que implican el uso de equipos caros de alta resolución que necesitan un permanente cuidado y control, lo que hace que el costo real de cada muestra estudiada sea muy elevado. Describiré brevemente algunos de los más importantes.

Método del Potasio/Argón ($^{40}K/^{40}Ar$). Es uno de los métodos radiométricos más utilizados desde mediados del siglo XX en las dataciones numéricas de rocas o cenizas volcánicas. La medida se realiza sobre biotita, moscovita, hornblenda, feldespatos o muestra total de la roca volcánica. El potasio es uno de los ocho elementos más abundantes en la naturaleza y un 0,4% del mismo es radioactivo (^{40}K). El elemento padre es este potasio radiactivo

(^{40}K) de las rocas volcánicas, que se desintegra a partir del momento de la formación de las rocas y proporciona dos elementos hijos, un 11% de ^{40}Ar y un 89% de ^{40}Ca . Como el ^{40}Ca es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza la fracción nueva formada por la desintegración no se puede diferenciar del original de la muestra y por tanto no se puede calcular. Por ello, lo que se mide es la cantidad de ^{40}Ar , que es un gas inerte, razón por la que el método se llama del $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$. El periodo de semidesintegración del ^{40}K es de 1250 Ma por lo que es aplicable a rocas de cualquier edad. Las dataciones para rocas de los últimos 100 000 años no son fiables, ya que como el margen de error puede llegar a ser más del 10% las dataciones pueden ser incorrectas o confusas.

Método del Rubidio/Estroncio ($^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$). Es otro de los métodos más usuales aplicables sobre biotita, feldespato o muestras totales de rocas ígneas o metamórficas. El elemento padre es el ^{87}Rb que a partir de la formación de la roca ígnea se desintegra en un elemento hijo ^{87}Sr . En el caso de las rocas metamórficas la edad que aporta no es la de las rocas sino la de la fase de metamorfismo que afectó a las rocas, a partir de la cual se inició la desintegración. El periodo de semidesintegración del ^{87}Rb es de 48 800 Ma, o sea muy superior que la edad de la Tierra por lo que se puede aplicar a rocas de cualquier edad.

Métodos del Uranio/Plomo. Se trata de un conjunto de métodos bastante fiables, entre los que se encuentran los primeros utilizados al inicio del siglo XX. El uranio en la naturaleza se presenta en tres isótopos radioactivos: uno mayoritario ^{238}U que representa aproximadamente el 99,3%, el ^{235}U que representa el 0,7% y el ^{234}U en cantidades muy pequeñas (menos del 0,006%). Los dos primeros son los que se usan para realizar dataciones radiométricas. En ambos casos el elemento padre es el uranio y el elemento hijo el plomo, pero entre ellos durante el proceso de la desintegración hay muchos isótopos intermedios (Th, Pa, Ac, Ra, Po, etc.). El método $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ que tiene un periodo de semidesintegración de 4510 Ma permite datar rocas ígneas de cualquier edad. El método $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ tiene un periodo de semidesintegración de 700 Ma aplicable a rocas ígneas de menos de 3000 Ma. En ambos casos se analiza el uranio contenido en minerales accesorios de las rocas ígneas, en especial en el circón. Se pueden aplicar los dos métodos en las mismas muestras y con ello obtener unos datos más fiables, aunque para calibrar los resultados de ambos métodos es necesario medir, además y en las mismas muestras, las cantidades presentes de ^{232}Th

y aplicar el método $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$ cuyo periodo de semidesintegración es de 14 000 Ma.

Método del Samario/Neodimio ($^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$). Suele aplicarse a rocas ígneas, principalmente basaltos y gabros. Aunque el samario y el neodimio tienen varios isótopos se suele utilizar el $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ porque su periodo de semidesintegración es muy grande (10,6 Ga). Por esta razón, el método es apropiado para datar rocas con edades superiores a los 1000 Ma, es decir rocas precámbricas.

Métodos utilizados en rocas del Cuaternario

Al contrario que en los cuatro métodos radiométricos anteriores, en los que las dataciones se realizan básicamente sobre rocas ígneas, para el Cuaternario hay técnicas radiométricas que se aplican directamente sobre rocas sedimentarias o sobre los fósiles que contienen. El progresivo interés del estudio de la geología del Cuaternario y de los estudios arqueológicos, ha llevado a la utilización de algunos métodos radiométricos y de otros no radiométricos de aplicación mayoritaria al Cuaternario, que se tratan brevemente a continuación.

Método del ^{14}C . El ^{14}C es el isótopo radioactivo del ^{12}C que fue descubierto hacia 1940 por Willard F. Libby (1908-1980). Este investigador de la Universidad de Chicago fue galardonado con el Premio Nobel de Química en 1960. El ^{14}C se forma continuamente en las partes altas de la atmósfera por el bombardeo de los rayos cósmicos sobre el ^{14}N , y es captado continuamente por los seres vivos, primero como CO_2 por las plantas y después por los animales mediante la cadena trófica. Al morir los organismos cesa la adquisición del ^{14}C (radioactivo) y el ya existente continúa su proceso de desintegración, en el que el elemento radioactivo ^{14}C (elemento padre) se transforma en ^{14}N (elemento hijo). El periodo de semidesintegración es muy corto (5730 años) por lo que el intervalo de aplicación se reduce a sedimentos y rocas sedimentarias de menos de 40 000 años. El método tiene un error de medida del 10% y las muestras que se analizan son restos de organismos existentes en una roca sedimentaria o sedimento. En el campo de la arqueología este método se aplica fundamentalmente sobre restos de madera o pergaminos.

Métodos basados en series de uranio. Para muestras principalmente de testigos de pistón de fondos oceánicos se han utilizado conjuntamente dos métodos radiométricos ($^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ y $^{230}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$) que permiten datar

los sedimentos y rocas sedimentarias desde la actualidad hasta los últimos 350 000 años. Algunos de estos métodos han sido aplicados también en la datación numérica de estalactitas y travertinos, para el mismo intervalo de tiempo. Estos métodos se emplean directamente sobre muestras de roca carbonatada o sobre foraminíferos contenidos en las rocas sedimentarias.

Métodos de datación numérica no radiométricos. Además de los métodos radiométricos se utilizan otros métodos de datación numérica, principalmente para materiales del Cuaternario pero incluso para tiempos anteriores, entre los cuales destacan los siguientes:

1) *Varvas.* El estudio de sedimentos laminados en lagos permite establecer medidas de tiempo absoluto, porque las laminaciones corresponden a depósitos sedimentarios formados en parejas que se generan con periodicidad anual a consecuencia de los cambios estacionales. Son pares de láminas que están compuestos por limos de color claro depositados en verano y arcillas de color más oscuro y con más materia orgánica depositadas en invierno. El ejemplo más conocido de estas alternancias sedimentarias periódicas asociadas a contextos lacustres, muchas veces glaciares, son las denominadas varvas. Como la secuencia formada por las dos láminas supone un año en la sedimentación lacustre, el conteo de las varvas puede utilizarse como método de datación absoluta. El principal inconveniente de este método sedimentológico de datación es que el lapso temporal que abarca (del orden de miles de años) es muy pequeño desde una perspectiva geológica.

2) *Dendrocronología.* La dendrocronología estudia la información proporcionada por los anillos de crecimiento de los árboles. El fundamento es muy sencillo: los troncos de los árboles van creciendo en grosor de modo que la parte más moderna es justo la que está tocando con la corteza. Sin embargo, el crecimiento no es continuo, sino que se detiene cuando las condiciones climáticas son desfavorables y se reanuda cuando vuelven a ser adecuadas. Las paradas en el crecimiento dejan una marca que nosotros identificamos en una sección transversal del tronco como un anillo. Cada anillo corresponderá a un ciclo anual de crecimiento del árbol de modo que contando los anillos de un tronco desde el exterior al interior podemos retroceder año a año en el tiempo. Las variaciones en la velocidad de crecimiento quedan también registradas en el tronco de los árboles con diferencias en el grosor y color de los anillos. Midiendo y comparando los anillos se pueden correlacionar a escala regional con los de otras muestras. Este sistema de datación es muy preciso y proporciona fechas sin margen

de error. De nuevo, su punto débil radica en que no nos permite conocer edades superiores a unos cuantos miles de años. Por ejemplo, mientras que el estudio de pinos en España ha permitido establecer cronologías que superan los 1000 años, en Europa central y en los países escandinavos se han obtenido edades superiores a los 10 000 años a partir del estudio de pinos albares y robles milenarios.

3) *Huellas de fisión*. La desintegración espontánea (fisión espontánea) de algunos elementos radioactivos (^{238}U , ^{235}U , ^{232}U) produce núcleos más pequeños que se agitan como proyectiles y originan unas huellas lineales que se llaman trazas de fisión. Las trazas lineales pueden observarse al microscopio tras un ataque a la muestra en lámina delgada con ácido fluorhídrico para ensancharlas. La datación de las rocas se hace midiendo la concentración de las trazas por unidad de superficie y dividiendo por la concentración de uranio radioactivo en el mineral. Este método no se incluye como método radiométrico porque en él no se miden las cantidades de elemento padre y elemento hijo, sino la abundancia de trazas de fisión. El método se ha aplicado con éxito para dataciones de rocas del Neógeno y del Cuaternario.

4) *Racemización de aminoácidos*. Se basa en el estudio de los aminoácidos de las proteínas fósiles preservadas en rocas carbonatadas. Cuando se forman los aminoácidos en plantas y animales vivientes son de una sola forma (levógira o dextrógira) preferente. Cuando el organismo muere la forma se modifica con una tasa constante hasta alcanzar un equilibrio entre las dos formas indicadas, al que se llama racemización. La edad de las rocas se mide a partir de las proporciones existentes entre las dos formas (levógira o dextrógira) y por tanto del tiempo que queda para alcanzar la racemización. El método se aplica sobre materia orgánica, huesos, dientes o suelos, y tiene un rango de aplicación variable en función del clima de la región. En regiones cálidas puede llegar a datar hasta 3 Ma con un error de medida del 15% y en regiones árticas puede alcanzar los 6 Ma, con un error similar.

5) *Termoluminiscencia*. Este método comenzó a utilizarse en la década de los 50 del siglo pasado y se basa en la capacidad de algunos minerales, generalmente cuarzo y feldespato, para acumular los efectos de la radiación ionizante solar presente en el ambiente en que se encuentran. Este efecto se manifiesta en la emisión de radiación en forma de luz al ser sometidos a una fuente de calor. Dicho de otro modo: la radiación que reciben los minerales

provoca que sus átomos se ionicen y liberen electrones que quedan atrapados en la red cristalina. En estas circunstancias, si el mineral se calienta los electrones que están fuera de sus órbitas reciben la suficiente energía como para “regresar” a los átomos de los que provienen, generándose entonces una emisión luminosa. La acumulación electrónica genera una señal que se puede medir en el laboratorio, y a mayor cantidad de electrones, mayor tiempo transcurrido, de modo que podemos utilizar este método para datar muestras. Permite datar un intervalo temporal de entre centenares y miles de años (unos 500 a 400 000 años), ampliando de manera significativa el rango de edad que abarca el método del radiocarbono. Además, a diferencia de este último método, puede utilizarse con materiales inorgánicos.

6) *Resonancia de espín electrónico* (RSE). Es un método que se aplica desde 1980 y se basa en la posibilidad de medir la cantidad de electrones desapareados atrapados en la red cristalina procedentes de elementos radiactivos presentes en la roca. Se ha utilizado esencialmente para rocas del Cuaternario. Se aplica sobre muestras totales de carbonatos o sobre dientes, conchas de moluscos, granos de cuarzo, etc. Con esta técnica se han datado travertinos y espeleotemas.

7) *Hidratación de la obsidiana*. La obsidiana es un vidrio volcánico que fue muy utilizado para la fabricación de útiles prehistóricos, de forma similar al sílex. En presencia de agua se genera en su superficie una capa de hidratación cuyo espesor es función del tiempo, por lo que se puede utilizar para datar. El momento en que se pone en marcha este reloj es cuando el utensilio acababa de fabricarse, es decir, cuando estaba recién extraído del núcleo de obsidiana original. A partir de ahí comienza a hidratarse. El método es tan preciso como el del ^{14}C o el K/Ar y se utiliza para datar útiles de los últimos 10 000 años, y hasta hace aproximadamente un millón de años.

8) *Otros métodos*. También se usan la *tefrocronología* que es una técnica geocronológica que utiliza niveles de tefra (cenizas volcánicas de una erupción) para establecer un marco cronológico, aunque no es exactamente un método de datación numérica, la *liquenometría* mediante el estudio del crecimiento de las diferentes especies de líquenes sobre rocas y el *análisis de bandas y anillos de crecimiento de animales*, principalmente invertebrados marinos.

Calibración de la escala de tiempo geológico

La mayor parte de los métodos de datación numérica se realizan sobre rocas ígneas y por tanto no son aplicables directamente en rocas sedimentarias. La excepción son los métodos que se utilizan en las dataciones del Cuaternario que se aplican directamente en las rocas sedimentarias o en los fósiles que contienen. Por lo tanto, es necesario trasladar los datos de edades numéricas obtenidos en rocas ígneas a las sucesiones de rocas sedimentarias con fósiles. De este modo se podrán obtener los valores numéricos (en Ma) de los límites de unidades de tiempo geológico que se han establecido previamente a partir de edades relativas. Se llama *calibración* a la datación de los límites de unidades cronoestratigráficas en términos de edades expresadas en años y sus múltiplos (Vera, 1994). También se podría definir como la datación numérica de los límites de las unidades cronoestratigráficas establecida previamente por criterios de edad relativa.

Calibración a partir de rocas volcánicas

Uno de los métodos de calibración más simple y preciso consiste en la datación numérica de coladas de rocas volcánicas que estén intercaladas entre rocas sedimentarias y que contengan fósiles. De acuerdo con el *principio de superposición* la edad numérica obtenida en la roca volcánica será más moderna que la de las rocas sedimentarias infrayacentes y más antigua que la de las rocas suprayacentes. El mejor resultado se obtiene cuando ambos materiales, infrayacentes y suprayacentes, tienen fósiles que permitan datar a las rocas con edades relativas y atribuirlos a una unidad cronoestratigráfica concreta. Los límites de estas unidades se basan en la aparición o desaparición de los fósiles característicos que de acuerdo con el *principio de la sucesión faunística o de la correlación* se consideran isócronos a nivel mundial. Si en una localidad en concreto hay rocas volcánicas intercaladas justamente en el límite entre dos unidades cronoestratigráficas establecidas por fósiles, la datación numérica que se obtenga será un dato válido a nivel mundial para la calibración de la escala de tiempo geológico. Cuando se trate de dataciones de coladas volcánicas en el seno de unidades cronoestratigráficas, no coincidentes con los límites, los datos son también bastante interesantes ya que permiten hacer aproximaciones para la datación de los límites.

Existen lugares donde se dan las condiciones óptimas para calibrar la escala de tiempo geológico, ya que se pueden obtener dataciones numéricas de rocas volcánicas y dataciones relativas de los sedimentos marinos

depositados inmediatamente sobre ellas. Se trata de los fondos oceánicos, en especial los localizados a ambos lados de las dorsales oceánicas. De acuerdo con la teoría de la tectónica global en las dorsales hay una salida continua de material magmático procedente del manto que se solidifica en el fondo marino formando basaltos de la corteza oceánica. La expansión del océano, como es en el caso de la dorsal medioatlántica, hace que a medida que se va formando nueva corteza oceánica las rocas basálticas formadas en fases anteriores se vayan desplazando hacia ambos lados de la dorsal. De este modo la edad de las rocas basálticas de la corteza oceánica y de los sedimentos directamente suprayacentes es cada vez más antigua cuanto más nos separamos de la dorsal. En definitiva, la edad numérica de los basaltos obtenida por técnicas radiométricas será la misma que la de la roca sedimentaria inmediatamente suprayacente, cuya edad relativa puede conocerse a partir de sus fósiles. Por tanto, en los fondos oceánicos se tiene una considerable fuente de datos para hacer calibraciones muy precisas.

Calibración a partir de rocas plutónicas

Generalmente da menos precisión que la anterior y consiste en estudiar la posición relativa de afloramientos de rocas plutónicas (p. ej. granitos), de las rocas encajantes de los propios plutones y de los filones que atraviesan tanto a los cuerpos magmáticos como a las rocas encajantes, aplicando los principios de las *relaciones de corte* y de los *fragmentos incluidos* descritos anteriormente.

La edad numérica que se obtiene a partir de muestras de la roca plutónica es la del momento de su formación. Los cuerpos plutónicos se han introducido en rocas más antiguas y por lo tanto lo único que indican las dataciones de las rocas plutónicas es que su edad es posterior a la de la roca encajante. Si hay filones que cruzan el plutón y la roca encajante, se puede afirmar que la edad de la roca filoniana (obtenida por métodos radiométricos) será posterior a la intrusión del plutón y a la de la roca encajante.

Por otra parte, puede haber conjuntos de rocas estratificadas que se disponen sobre una superficie erosiva que se ha formado por la prolongada erosión de la roca encajante y del plutón. Estas rocas estratificadas que se podrían datar mediante fósiles o a partir de la datación numérica de coladas volcánicas intercaladas serán siempre más modernas que la roca plutónica. En el caso de no ser atravesadas por los filones que afecten a la roca plutónica y la roca encajante, serán también posteriores a la edad numérica de la

roca filoniana. Otra posibilidad sería la de superficies erosivas sobre las que existan cantos de rocas plutónicas. La edad numérica obtenida en los cantos de las rocas plutónicas será sin duda más antigua que las rocas situadas sobre la citada superficie erosiva.

Tabla cronoestratigráfica internacional

Como hemos indicado desde los años inmediatamente siguientes al descubrimiento de la radioactividad ya se intentaron aplicar los métodos radiométricos para la datación de las rocas. El objetivo fundamental es obtener una tabla cronoestratigráfica formada por todos los intervalos de tiempo relativo definidos por fósiles, pero calibrada, esto es, incluyendo los valores numéricos en Ma de los límites de estas unidades.

La primera tabla cronoestratigráfica calibrada la propuso Arthur Holmes en 1913 y era una aproximación, con cifras muy diferentes a las que se aceptan en la actualidad. Son también distintas a las que publicó el mismo autor en años posteriores (1937, 1960, 1965), a partir de bases de datos cada vez más completas y obtenidos con mayor precisión de los métodos de datación. Tras una etapa de publicaciones de tablas de tiempo geológico calibrado por parte de autores individuales (Barrell, Holmes, Berggren, Hardenbol, etc.) a partir de 1982 se inició la publicación de obras colectivas, auspiciadas por la Comisión Internacional de Estratigrafía (*International Commission on Stratigraphy - ICS*) en las que colaboraron un amplio grupo de autores de muy diferentes países. Inicialmente se publicaron tres obras en *Cambridge Academic Press* con el nombre genérico de *Geologic Time Scale* (GTS) seguido del año de publicación (GTS 82, GTS 89, GTS 2004) las dos primeras coordinadas por Harland y la tercera por Gradstein. Posteriormente en la Editorial Elsevier se han publicado las GTS 2012 y GTS 2020 coordinadas también por Gradstein.

En los últimos años la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS)¹ y dentro de ella la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS), es

¹ La Unión Internacional de Ciencias Geológicas (International Union of Geological Sciences o IUGS) (www.iugs.org) es una organización no gubernamental internacional dedicada a la promoción de estudios relevantes sobre el sistema Tierra. La IUGS se fundó en 1961 y en la actualidad están representados en ella geólogos de aproximadamente 120 países, a través de sus organizaciones nacionales y, en su caso, de las regionales. La IUGS promueve y alienta el estudio de problemas geológicos, en especial aquellos de importancia

la institución oficial que está encargada de definir con precisión las unidades cronoestratigráficas globales. Esta Comisión revisa, actualiza y publica periódicamente en su página web (www.stratigraphy.org) la tabla del tiempo geológico calibrado, con el título *Tabla Cronoestratigráfica Internacional*. Esta tabla de la cual se publicó en enero de 2013 la primera versión en español incluye la relación completa, ordenada y actualizada de todas las unidades de tiempo geológico relativo o unidades cronoestratigráficas aceptadas internacionalmente (eonotemas, eratemas, sistemas, series y pisos) sobre las que se basan las unidades cronoestratigráficas (eones, eras, periodos, épocas y edades). Se aportan los datos de edad numérica (expresados en Ma) más exactos disponibles, resultado de la calibración de los límites de todas las unidades cronoestratigráficas, indicando cuando es preciso el margen de error posible.

Las unidades básicas de esta Tabla (pisos o edades) se definen por el Estratotipo Global de Límite (*GSSP-Global Boundary Stratotype and Point*) referido siempre a su límite inferior. Este proceso todavía no está acabado e incluirá también a las unidades del Arcaico y Proterozoico, cuyas divisiones se acordaron inicialmente mediante edades numéricas (*GSSA-Global Standard Stratigraphic Ages*). La posición de los GSSP oficiales se indica en la tabla mediante el símbolo del “Clavo Dorado” (*Golden Spike*) que se materializa físicamente en sucesiones estratigráficas en el campo. Desde 1977 cuando empezó a elaborarse la tabla se han aprobado oficialmente 67 GSSP para los 102 pisos que hay en Fanerozoico. Hay además otro GSSP en la base del Ediacárico dentro del Neoproterozoico.

España cuenta con cinco estratotipos GSSP con sus “clavos dorados” correspondientes. El primero en definirse en el año 2000 fue el de Fuentelsaz (Guadalajara), que marca el límite entre el Jurásico Inferior (piso Toarciense) y el Jurásico Medio (piso Aleniense). El segundo y el tercero se establecieron en 2010 en la playa de Itzurun (Zumaia, Guipúzcoa) dentro del Paleoceno y marcan respectivamente el tránsito entre los pisos Daniense y Selandiense, y el límite entre los pisos Selandiense y Thanetiense. El cuarto clavo dorado

global, y apoya y facilita la cooperación Internacional e interdisciplinaria en las ciencias de la Tierra. La Secretaría de la Unión se encuentra desde el 1 de diciembre de 2012 en la Academia China de Ciencias en Pekín. Dentro de la IUGS hay varias comisiones, entre ellas destaca la Comisión Internacional de Estratigrafía (*International Commission on Stratigraphy - ICS*) formada en 1974 que es la institución oficial que está encargada de analizar, revisar, actualizar y publicar periódicamente en su página web (www.stratigraphy.org) la Tabla Cronoestratigráfica Internacional.

se colocó en 2012 en la playa de Gorrondatxe en Getxo (Vizcaya) en el límite entre los pisos Ypresiense y Luteciense del Eoceno. La cantera de margas de Olazagutía (Navarra) fue ratificada en 2013 como GSSP del límite Coniaciense-Santoniense en el Cretácico Superior. Además, tenemos algunos candidatos propuestos para otros límites de pisos, por lo que este número podría aumentar en los próximos años.

La última versión actualizada de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional en español de febrero de 2022 (versión 2022/02 en español) publicada por la Comisión Internacional de Estratigrafía, con la participación de los organismos científicos españoles dedicados a la geología (SGE, IGME, IGEO y RAC) puede verse en las páginas 48 y 49. Esta tabla de libre acceso por internet se encuentra en:

<https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2022-02Spanish.pdf>

<https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2022-02Spanish.jpg>



Eonotema / Eón Eratema / Era Sistema / Período		Serie / Época	Piso / Edad	GSSP	Edad (Ma)
Fanerozoico	Paleozoico	Devónico	Superior	Fameniense	358.9 ±0.4
				Frasniense	372.2 ±1.6
				Givetiense	382.7 ±1.6
			Medio	Eifeliense	387.7 ±0.8
				Emsiense	393.3 ±1.2
				Pragiense	407.6 ±2.6
			Inferior	Lochkoviense	410.8 ±2.8
				Ludlow	419.2 ±3.2
				Ludfordiense	423.0 ±2.3
		Silúrico	Wenlock	Gorstiense	425.6 ±0.9
				Homeriense	427.4 ±0.5
				Sheinwoodiense	430.5 ±0.7
			Llandovery	Telychiense	433.4 ±0.8
				Aeroniense	438.5 ±1.1
				Rhuddaniense	440.8 ±1.2
	Ordovícico		Superior	Hirnantense	443.8 ±1.5
				Katiense	445.2 ±1.4
				Sandbiense	453.0 ±0.7
		Medio	Darriwiliense	458.4 ±0.9	
			Dapingiense	467.3 ±1.1	
			Floienze	470.0 ±1.4	
	Cámbrico	Furongiense	Tremadociense	477.7 ±1.4	
			Piso 10	485.4 ±1.9	
			Jiangshaniense	~ 489.5	
		Miaolingiense	Paibiense	~ 494	
			Guzhangense	~ 497	
			Drumiense	~ 500.5	
		Terreneuviense	Wuliense	~ 504.5	
			Piso 4	~ 509	
			Piso 3	~ 514	
Piso 2	~ 521				
Fortuniense	~ 529				

Eonotema / Eón Eratema / Era Sistema / Período		Serie / Época	GSSP	Edad (Ma)
Precámbrico	Proterozoico	Ediacárico	GSSP	538.8 ±0.2
		Neoproterozoico	Criogénico	~ 635
		Tónico	~ 720	
		Mesoproterozoico	Esténico	1000
			Ectásico	1200
			Calímico	1400
		Paleoproterozoico	Estatérico	1600
			Orosérico	1800
			Riácico	2050
	Arcaico	Neo-arcaico	Sidérico	2300
			2500	
			2800	
		Meso-arcaico	3200	
			Paleo-arcaico	3600
			Eo-arcaico	4000
Hádico				~ 4600

Todas las unidades de esta Table, cualquiera que sea su rango, se definen por el Estratotipo Global de Límite (GSSP - *Global Boundary Stratotype Section and Point*) referido siempre a su límite inferior. Este proceso se halla todavía inacabado e incluirá las unidades del Arcaico y Proterozoico, cuyas divisiones se convirtieron inicialmente mediante edades absolutas (GSSA - *Global Standard Stratigraphic Ages*). La posición de los GSSP oficiales se indica en la tabla mediante el símbolo del "Clavo Dorado" (*Golden Spike*), que los materializa en el terreno. El original de la tabla en distintos idiomas y formatos, junto con los detalles de los estratotipos globales de límite (criterio de definición de cada uno, localización geográfica y geológica, correlación, etc.), están disponibles en la web www.stratigraphy.org.

Las edades absolutas, expresadas en millones de años (Ma), son sólo orientativas, pues tanto el Ediacárico como las unidades del Fanerozoico se definen formalmente por sus correspondientes GSSP, en vez de por edades numéricas. No obstante, para aquellas divisiones que no cuentan aún con un estratotipo global o con edades bien establecidas, se indican las dataciones aproximadas (~ Ma) de sus límites. Las edades numéricas han sido tomadas de Gradstein *et al.* (*A Geologic Time Scale 2012*), con excepción de las correspondientes al Cuaternario, Paleógeno superior, Cretácico, Triásico, Pérmico, Cámbrico y Precámbrico, que fueron aportadas por las subcomisiones respectivas de la ICS-IUGS.

Tabla diseñada por K.M. Cohen, D.A.T. Harper, P.L. Gibbard y N. Car
© International Commission on Stratigraphy (IUGS), Febrero 2022

Citar como: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013; actualizada). The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204.

<http://www.stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2022-02Spanish.pdf>



En esta Tabla *Cronoestratigráfica Internacional* publicada en 2022 (v2022/02) hay algunos aspectos que merecen ser comentados. El primero de ellos que puede llamar la atención es que algunos límites de unidades dentro del eón Fanerozoico se expresan en cifras de Ma con mucho detalle (p.ej. 2,58, 66,0, 251,2, etc.) y en numerosos casos indicando el margen de error (p. ej. $170,3 \pm 1,4$, $251,902 \pm 0,024$, $410,8 \pm 2,8$, $485,4 \pm 1,9$, etc.). La explicación es sencilla ya que se trata de los datos obtenidos en las dataciones numéricas de los límites de unidades cronoestratigráficas, previamente definidas en los estratos por cambios en el contenido fósil. En el conjunto del Precámbrico, las divisiones de eones (Proterozoico, Arcaico y Hádico) y las subdivisiones de los dos primeros en eras y periodos se hacen en intervalos temporales cuya duración es la de números múltiplos de 50 Ma, con intervalos de 150 Ma y 200 Ma hasta los 1800 Ma, de 250 Ma desde los 1800 Ma a los 2300 Ma, y de 300-400 Ma en los anteriores a los 2300 Ma. También hay una explicación sencilla, ya que se trata de divisiones convencionales del tiempo geológico, de manera que las dataciones numéricas de rocas se incluyen en la división o subdivisión correspondiente. No se trata de la adaptación de los cambios en el contenido fosilífero de las rocas, como es el caso del Fanerozoico.

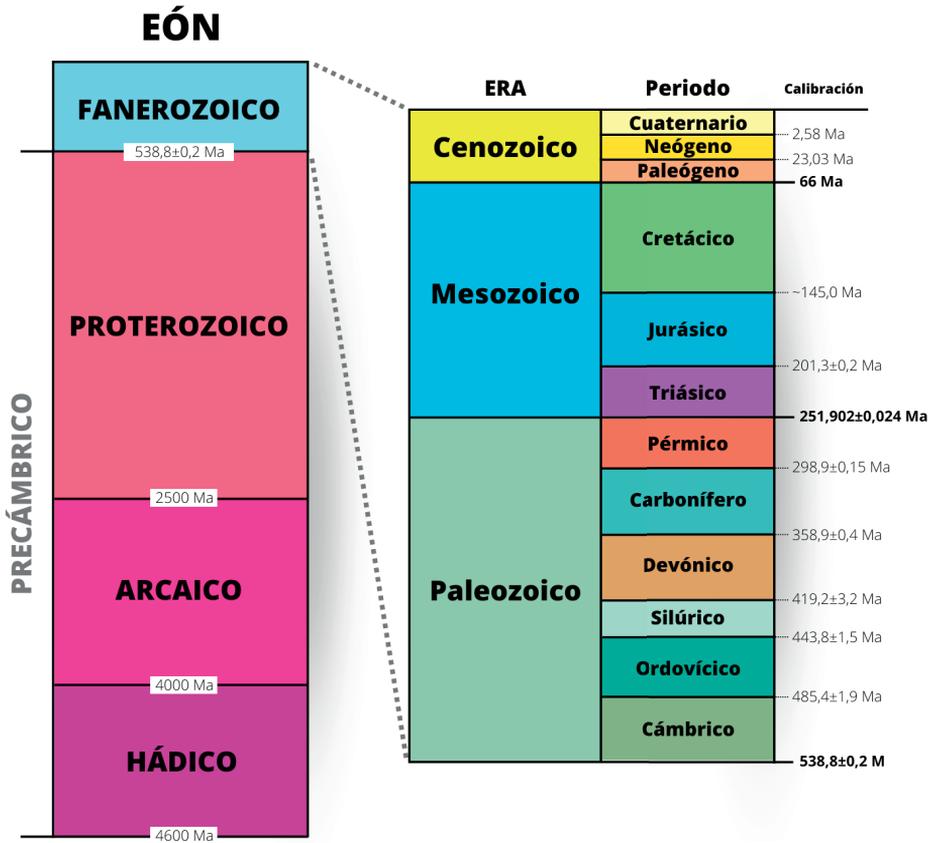


Figura 1. Tabla de tiempo geológico calibrado, en la que se indican las edades numéricas (en Ma) de los límites entre los diferentes eones del Precámbrico y de los límites de eras y periodos dentro del Fanerozoico. Elaborada con datos de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional (v2022/02).

En la figura 1 se presenta un esquema, elaborado con los datos de la citada tabla, en la que se reproducen los valores de los límites de los eones y en el caso concreto del eón Fanerozoico de las eras y periodos. El primer dato que merece destacarse es que el Fanerozoico, con una duración de 538,8 Ma, significa aproximadamente el 12% del total de tiempo geológico, mientras que el 88% restante corresponde al Precámbrico.

En el Precámbrico se incluyen tres eones: el más moderno, el Proterozoico, tuvo una duración de poco menos de 2000 Ma, el Arcaico de 1500 Ma y el más antiguo, el Hádico de 600 Ma. Estas divisiones se hacen de acuerdo con argumentos geológicos, concretamente la división entre Arcaico y Proterozoico se hace coincidir con un cambio en la forma de las cadenas de plegamiento, de elípticas a lineales. La división entre Arcaico y Hádico coincide con el final del bombardeo masivo de asteroides sobre la superficie de la Tierra. Para el Precámbrico las únicas técnicas de datación válidas son las numéricas, mediante métodos radiométricos, los cuales tienen márgenes de error con frecuencia elevados.

El límite entre el Cámbrico y el Precámbrico, por tanto, el inicio del eón Fanerozoico, es muy significativo ya que coincide con la aparición repentina, desde un punto de vista geológico, de fósiles correspondientes a organismos macroscópicos multicelulares complejos (la llamada explosión cámbrica o radiación evolutiva del Cámbrico).

Dentro del eón Fanerozoico, con una duración total de unos 539 Ma, se diferencian tres eras de duración diversa. La más antigua el Paleozoico, duró 286,9 Ma, la segunda, el Mesozoico, 185,9 Ma, y la más moderna, el Cenozoico desde hace 66 Ma a la actualidad. Los límites entre ellas coinciden con dos de los momentos en los que hubo las mayores variaciones en la flora y la fauna (bioeventos), criterios en los que se basaron los autores del siglo XIX para marcar los límites de términos de edad relativa.

Dentro del Paleozoico se diferencian los seis periodos que se definieron en el siglo XIX de acuerdo con los fósiles contenidos y que una vez calibrados tienen duraciones muy diversas. El más antiguo es el Cámbrico que tuvo una duración de 53,4 Ma, le siguen el Ordovícico, con 41,6 Ma, el Silúrico con 24,6 Ma, el Devónico con 60,3 Ma, el Carbonífero con 60 Ma y el Pérmico con 47 Ma.

Dentro del Mesozoico se reconocen tres periodos con duraciones muy diferentes. El más antiguo, el Triásico, es el más corto con una duración de unos 50,6 Ma, el segundo es el Jurásico con 55 Ma y el tercero el Cretácico con 79 Ma que es el periodo más largo de todos los del Fanerozoico.

Finalmente, dentro del Cenozoico se diferencian otros tres periodos de duración desigual. El más antiguo es el Paleógeno con una duración de unos 43 Ma, el segundo el Neógeno con unos 20,4 Ma y el último el

Cuaternario con 2,58 Ma, que es el periodo más corto de todos los del Fanerozoico.

La división detallada de cada uno de los periodos en series/épocas y pisos/edades correspondientes puede verse en la Tabla Cronoestratigráfica Internacional (páginas 48 y 49).

Comparación del tiempo geológico con el calendario anual

Las cifras de dataciones numéricas de las rocas y de la edad de la Tierra resultan en general de difícil comprensión cuando no estamos acostumbrados a estas enormes cantidades.

Para facilitar el manejo de estas cifras se pueden reducir todas ellas en un símil, a un intervalo de tiempo que el hombre maneja con mucha facilidad, como sería el de un calendario anual (Eicher, 1976; Vera, 1994; Prothero, 2021). Si dividimos los 4600 Ma de la Tierra en 365 partes que serían los 365 días del año, entonces cada día equivaldría a 12,3 Ma, cada hora en esta analogía sería equivalente a aproximadamente medio millón de años (513 660 años, para ser precisos), cada minuto serían 8561 años y cada segundo correspondería a 142,7 años. El inicio del año se hace coincidir con la edad de la Tierra y la fecha actual con el fin de año.

Algunos hitos significativos en este símil serían: 1) El origen de la Tierra lógicamente se fija en el inicio del día 1 de enero; 2) La edad de las rocas más antiguas conocidas sobre la Tierra sería de mediados de febrero; 3) Las primeras formas primitivas de vida (bacterias) no aparecerían hasta el 21 de febrero; 4) El inicio del Cámbrico (y por tanto del eón Fanerozoico) con el desarrollo importante de los primeros animales multicelulares habría sucedido a mediados de noviembre (concretamente el 19 de noviembre); 5) El máximo desarrollo de las plantas terrestres (el del Carbonífero) se produciría a principios de diciembre; 6) Los dinosaurios poblaron la Tierra desde mediados de diciembre hasta su desaparición al final del Cretácico, el 26 de diciembre; 7) Los 66 millones de años correspondientes al Cenozoico, la edad de los mamíferos, se situarían dentro de la última semana entre el día de Navidad y la Nochevieja; 8) Los primeros homínidos aparecieron sobre la superficie de la Tierra en la tarde del 31 de diciembre (siete horas antes de la medianoche) y los primeros miembros de nuestro género Homo se encuentran sólo una hora antes de la medianoche; 9) La retirada de los grandes glaciares que cubrían gran parte de Europa y América

del Norte en el Cuaternario habría ocurrido un minuto y 15 segundos antes de fin de año; 10) El Imperio Romano habría iniciado su auge 10 segundos antes de fin de año y finalizado casi 5 segundos más tarde; 11) El descubrimiento de América por Cristóbal Colón habría sido 3 segundos antes de la medianoche; 12) Hutton habría publicado su teoría uniformista y propuesto el uso del método actualista un segundo antes de fin de año; 13) La vida media de una persona correspondería aproximadamente a medio segundo. La comparación anterior permite comprender mejor la escala de tiempo geológico y valorar la enorme complejidad que conlleva el manejo de una escala de tiempo de estas dimensiones.

Es obvio que lo anteriormente expuesto, suscita muchas consideraciones, en especial relacionadas con la brevedad de la vida humana e incluso de la historia de la Humanidad comparada con la historia de la Tierra. Está claro que nuestro modo antropocéntrico de ver la naturaleza (tanto personal como socialmente) dificulta, e incluso, impide el entendimiento correcto de los largos procesos evolutivos del “Sistema Tierra”.

Expresado de otro modo esta comparación de la escala de tiempo con un calendario anual puede ser una lección de humildad para los humanos con el exagerado sentido antropocéntrico acerca de nuestra propia importancia. Somos una especie animal muy reciente que acabamos de llegar al escenario de la historia de la Tierra, y ni siquiera hemos existido tanto tiempo como la mayoría de las especies en el registro fósil. El linaje humano solo se remonta a hace unos 7 Ma, mientras que por ejemplo los dinosaurios dominaron el planeta durante más de 130 Ma. Tendríamos mucha suerte si nuestra especie permaneciese tanto tiempo como la mayoría de las especies que han existido y existen en la Tierra. Además, por si la perspectiva del tiempo geológico no fuera una lección de humildad suficiente, consideremos la inmensidad del espacio y nuestra posición en el mismo. Vivimos en un pequeño planeta de nuestro Sistema Solar, en una pequeña galaxia en los suburbios del Universo. Si la Tierra fuera del tamaño de un guisante el Sol sería del tamaño de una pelota de baloncesto y estarían a unos 1600 m de distancia. Si redujéramos todo nuestro sistema solar al tamaño de una pelota de unos 10 cm de diámetro entonces toda nuestra galaxia, la Vía Láctea, sería del tamaño de la Tierra. Y hay millones de galaxias además de la nuestra.

EPÍLOGO

Decía San Agustín que “el tiempo no existe sin un cambio producido por movimiento” y en el caso de nuestro planeta su continuo cambio está registrado en las rocas que estudia la estratigrafía.

A partir de sus orígenes la estratigrafía ha crecido y se ha desarrollado, especialmente desde principios del siglo XX, como ciencia multidisciplinar contando con los apoyos imprescindibles de las demás ciencias básicas (química, física, biología y matemáticas) sin perder su carácter de núcleo fundamental dentro de la geología, al dedicarse sobre todo a los aspectos relacionados con el tiempo geológico que, constituyen el núcleo de la geología como ciencia histórica.

La clave para entender la geología es la estimación del tiempo geológico. La subdivisión del tiempo geológico, y por tanto, de la historia de la Tierra, se realiza mediante los principios de la estratigrafía. Esencialmente se trata de situar los estratos en su orden de depósito (*tiempo relativo*) y calibrar esta secuencia (*tiempo numérico*) mediante las técnicas de datación radiométrica. El tiempo puede entonces caracterizarse como una sucesión de acontecimientos históricos, ordenados y con un cálculo de su duración.

La estratigrafía, que aporta los datos fundamentales para el estudio del tiempo geológico y la reconstrucción de la historia de la Tierra, es una disciplina esencial y dinámica en la geología moderna. Conforme se va acelerando nuestro conocimiento de los procesos geológicos globales, hay una clara demanda en aumento de datos estratigráficos cada vez más precisos. En años recientes esto ha conducido al desarrollo de un despliegue apabullante de especialistas y de técnicas analíticas cada vez más resolutivas y sofisticadas.

Un buen ejemplo de los avances recientes que ha experimentado la estratigrafía, con un esfuerzo y trabajo científico enorme, es la continua mejora de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional (Escala de Tiempo

Geológico), cuya precisión se sigue incrementando año tras año, y que permite analizar y fijar sucesos de la historia terrestre en un marco temporal de alta resolución.

En las últimas décadas, ese carácter histórico de la estratigrafía coexiste con una creciente vocación aplicada que da un importante carácter predictivo a la disciplina. Los abundantes conocimientos acumulados sobre los procesos del Sistema Tierra en este marco temporal de alta resolución permiten hoy en día afrontar y responder a retos sociales y económicos impensables hace unos pocos años. Así, se han abierto numerosas líneas de actuación científico-técnica en las que la estratigrafía aparece como una herramienta fundamental.

Ese carácter predictivo tiene dos grandes vertientes: una de ellas se ubica en el “dominio tiempo” y está enfocada a comprender mejor los cambios futuros en el Sistema Tierra, principalmente relacionados con el Cambio Global y su evolución; la otra, situada en los “dominios espacial y aplicado”, estaría focalizada principalmente en la caracterización de la superficie y subsuelo terrestre, con el doble objetivo de prospección (hidrocarburos, minerales, agua) y de almacenamiento (CO₂, gases energéticos, residuos). Así, a la premisa fundamental del pensamiento huttoniano “el presente es la clave del pasado” se le superpone hoy en día otra aparentemente opuesta según la cual “el pasado es la clave del presente (y del futuro)”.

Pero, es importante no olvidar que el mejor laboratorio del estratígrafo sigue siendo el campo y que los objetivos fundamentales de la estratigrafía permanecen sin cambio: aquellos que pretenden establecer la secuencia de unidades de rocas para interpretarlas como acontecimientos en la historia de la Tierra descifrando el tiempo geológico.

Como científicos, tenemos mucho que estudiar, pero quizás dedicamos cada vez menos tiempo para meditar y analizar. Frente a un mundo actual dominado por la rapidez, la prisa y lo inmediato, quizás reflexionar un poco sobre la inmensidad de la escala del tiempo geológico puede hacernos más humildes y situarnos mejor en nuestro contexto como sencillos humanos que habitamos durante un tiempo muy corto en la Tierra. Aprovechemos y disfrutemos del presente y de los años que nos quedan por vivir, aunque sean una parte insignificante de la escala del tiempo geológico.

Muchas gracias por la atención prestada.

He dicho.

BIBLIOGRAFÍA

Se incluyen todas las referencias citadas en el texto y además un conjunto de obras que considero interesantes y que se han tenido en cuenta a la hora de elaborar esta lección.

- Adams, F.D. (1938). *The Birth and Development of the Geological Sciences*. (Reimpresión publicada en 1954) Dover, New York, 506 p.
- Ager, D.V. (1981). *The nature of the stratigraphical record* (2nd ed.). John Wiley, New York, 122 p.
- Ager, D.V. (1993). *The New Catastrophism. The importance of the rare event in geological history*. Cambridge University Press, Cambridge, 231 p.
- Albritton, C.C. Jr. (Ed.) (1963). *The Fabric of Geology*. Freeman, Cooper, & Co, Standford, California. 372 p. (En español: Albritton, C.C. Jr. (1970). *Filosofía de la Geología*. Compañía Editorial Continental S.A. Buenos Aires, 438 p.)
- Albritton, C.C. Jr. (1980). *The Abyss of Time: Changing Conceptions of the Earth's Antiquity after the Sixteenth Century*. Freeman Cooper Publishers, San Francisco, 251 p.
- Albritton, C.C. Jr. (1989). *Catastrophic Episodes in Earth History*. Chapman and Hall Ltd., London, 221 p.
- Allègre, C.J. (2012). *Isotope Geology*. Cambridge University Press, Cambridge, 512 p.
- Bailey, E.B. (1967). *James Hutton: the Founder of Modern Geology*. Elsevier, Amsterdam, 161 p.
- Barrell, J. (1917). Rhythms and the measurement of geologic time. *Geological Society of America Bulletin*, 28, 745–904.
- Baxter, S. (2003). *Revolutions in the Earth. James Hutton and the True Age of the World*. Weidenfeld & Nicolson Ltd, London, 245 p.
- Berggren, W.A., Kent, D.V., Aubry, M.P., Hardenbol, J. (Eds.) (1995). *Geochronology, Time scales and Global Stratigraphic Correlation*, SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special publication, 54, 386 p.

- Berggren, W.A., Van Couvering, J.A. (Eds.) (1984). *Catastrophes and Earth History. The New Uniformitarianism*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 464 p.
- Bjornerud, M. (2018). *Timefullness. How Thinking Like a Geologist Can Help Save the World*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 208 p.
- Blundell, D.J., Scott, A.C. (1998). *Lyell: the Past is the Key to the Present*. Geological Society, Special Publication, London, 143, 276 p.
- Boggs, S. Jr. (2014). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* (Fifth Ed.). Pearson Education Limited, Harlow, England, 566 p.
- Brookfield, M.E. (2004). *Principles of Stratigraphy*. Blackwell, Oxford, 340 p.
- Burchfield, J.D. (1975). *Lord Kelvin and the Age of the Earth*. Macmillan Press, London, 260 p.
- Catuneanu, O. (2006). *Principles of Sequence Stratigraphy*. Elsevier, Amsterdam, 375 p.
- Cervato, C., Frodeman, R., (2012). The significance of geologic time: Cultural, educational, and economic frameworks. En: Kastens, K.A. and Manduca, C.A., (Eds.), *Earth and Mind II: A Synthesis of Research on Thinking and Learning in the Geosciences*. Geological Society of America Special Paper 486, 19–27.
- Cini, M. (2014). Is Time Real? En: S. Albeverio, P. Blanchard (Eds.), *Direction of Time*, Springer Int. Publ., 1-14.
- Cohen, K.M., Harper, D.A.T., Gibbard, P.L. (2022). ICS International Chronostratigraphic Chart 2022/02. *International Commission on Stratigraphy, IUGS*. www.stratigraphy.org (visited: 2022/08/26).
- Corrales, I., Rosell, J., Sánchez de la Torre, L., Vera, J.A., Vilas, L. (1977). *Estratigrafía*. Rueda, Madrid, 718 p.
- Craig, G.Y., Hull, J. H. (Eds.) (1999). *James Hutton - Present and Future*. Geological Society, London, Special Publications, 150, 192 p.
- Cutler, A. (2004). *The seashell on the mountaintop. How Nicolaus Steno Solved an Ancient Mystery and Created a Science of the Earth*. Plume Books, Penguin, New York, 228 p. (En español: Cutler, A. (2007). Una nueva historia de la Tierra. Un relato sobre la ciencia y Nicolaus Steno, un genio que descubrió la geología. RBA Libros S.A. Barcelona, 255 p.)
- Dabrio, C.J. y Hernando, S. (2003). *Estratigrafía*. Colección Geociencias. Editorial Complutense, Madrid, 382 p.
- Dalrymple, G.B. (1991). *The Age of the Earth*. Stanford University Press, Stanford, CA., 474 p.
- Dalrymple, G.B. (2004). *Ancient Earth, Ancient Skies: The Age of the Earth and Its Cosmic Surroundings*. Stanford University Press, Stanford, CA. 264 p.

- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or the reservation of favoured races in the struggle for life*. John Murray, London, 502 p.
- De Wever, P. (2002). *Le temps mesuré par les sciences. L'homme à l'échelle géologique*. Vuibert- Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 131 p.
- De Wever, P., Labrousse, L., Raymond, D., Schaaf, A. (2005). *La mesure du temps dans l'histoire de la Terre*. Société géologique de France-Vuibert, Paris, 132 p.
- Doyle, P., Bennett, M.R. (Eds.) (1998). *Unlocking the stratigraphical record*. John Wiley and Sons, Chichester, 532 p.
- Doyle, P., Bennett, M.R., Baxter, A.N. (2001). *The Key to Earth History. An Introduction to Stratigraphy* (2nd ed.). John Wiley and Sons, Chichester, 293 p.
- Dunbar, C.O., Rodgers, J. (1957). *Principles of Stratigraphy*. Wiley, New York, 356 p.
- Eicher, D.L. (1973). *El tiempo geológico*. Ediciones Omega, Barcelona, 150 p.
- Eicher, D.L. (1976). *Geologic time* (2nd ed.). Prentice Hall International Inc. London, 150 p.
- Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (1991). *Cycles and events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 955 p.
- Emery, D., Myers, K. (Eds.) (1996). *Sequence Stratigraphy*. Blackwell Science Ltd, Oxford, 289 p.
- Faure, G. (1986). *Principles of Isotope Geology* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York, 589 p.
- Fritz, W.J., Moore, J.N. (1988). *Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology*. John Wiley, Nueva York. 371 p.
- Friedman, G.M. (1998). Sedimentology and stratigraphy in the 1950s to mid-1980s: The story of a personal perspective. *Episodes*, 21 (3), 172-177.
- GEI (1980). *Guía Estratigráfica Internacional*. Reverte, Barcelona, 205 p. (Traducción al español de Hedberg, H.D. (ed.) (1976). International stratigraphic guide. John Wiley & Sons, 1976).
- Geikie, A. (1897). *The Founders of Geology*. Macmillan and Co, London, 297 p.
- Geyh, M.A., Schleicher, H. (1990). *Absolute age determination*. Springer-Verlag, New York, 503 p.
- Gignoux, M. (1960). *Geologie stratigraphique* (5e ed.). Masson. Paris, 759 p.
- Gilbert, G.K. (1895). *Sedimentary measurement of geologic time*. *Journal of Geology*, 3, 121-127.
- Gilluly, J. (1977). *American geology since 1910—a personal appraisal*. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 5: 1-12.
- Gohau, G. (1987). *Histoire de la géologie*. Editions La Découverte, Paris, 259 p.

- Gohau, G. (2003). *Naissance de la géologie historique. La Terre, des "Théories" a l'Histoire*. Vuibert, Paris, 124 p.
- Gopalan, K. (2017). *Principles of radiometric dating*. Cambridge University Press, Cambridge, 220 p.
- Gordon, H. (2021). *Notes from Deep Time: A Journey Through Our Past and Future Worlds*. Profile Books, London, 322 p.
- Gould, S.J. (1987). *Time's arrow, time's cycle*. Harvard University Press, Cambridge, 222 p. (En español: Gould, S.J. (1992). *La flecha del tiempo. Mitos y metáforas en el descubrimiento del tiempo geológico*. Alianza Universidad, Madrid, 232 p.)
- Grabau, A.W. (1913). *Principles of Stratigraphy*. A. G. Seiler and Company, New York, 1185 p.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G. (Eds.) (2004). *A Geologic Time Scale*. Cambridge University Press, Cambridge, 589 p.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G., Bleeker, W., Lourens, L.J. (2004). *A new Geologic Time Scale, with special reference to Precambrian and Neogene*. Episodes, 27, 83-100.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., Ogg, G. (Eds.) (2012). *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, New York, 1175 p.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., Ogg, G.M. (Eds.) (2020). *Geologic time scale 2020*. Elsevier, Amsterdam, 1357 p.
- Greene, M.T. (1982). *Geology in the Nineteenth Century: Changing Views of a Changing World*. Cornell University Press, Ithaca, NY. 328 p.
- Hallam, A. (1981). *Facies Interpretation and the Stratigraphic Record*, W.H. Freeman & Co, Oxford, 291 p.
- Hallam, A. (1983). *Great geological controversies*. Oxford University Press, Oxford. 256 p. (En español: Hallam, A. (1985). *Grandes controversias geológicas*. Ed. Labor, Barcelona, 188 p.).
- Harbaugh, J.W. (1968). *Stratigraphy and Geologic Time*. Wm. C. Brown Co. Publ., Dubuque, Iowa, 113 p.
- Harland, W. B. (1978). *Geochronologic scales*. En: Cohee, G.V., Glaessner, M.F., Hedberg, H.D. (Eds.), Contributions to the Geologic time scale. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, 6, 9–32.
- Harland, W.B., Armstrong, R.L., Cox, A.V., Craig, L.E., Smith, A.G., Smith, D.G. (1990). *A geologic time scale, 1989*. Cambridge Earth Science Series, Cambridge University Press, Cambridge, 263 p.
- Harland, W.B., Cox, A.V., Llewellyn, P.G., Pickton, C.A.G., Smith, A.G., Walters, R. (1982). *A geologic time scale*. Cambridge Earth Science Series, Cambridge University Press, Cambridge, 131 p.

- Harland, W.B., Francis, H. (Eds.) (1964). *The Phanerozoic time scale (A symposium dedicated to Professor Arthur Holmes)*. Quarterly Journal of the Geological Society of London, 120, 458 p.
- Harland, W.B., Francis, H. (Eds.) (1971). *The Phanerozoic time scale — A Supplement*. Geological Society of London Special Publication 5, 356 p.
- Harris, E.C. (1991). *Principios de Estratigrafía arqueológica*. Crítica, Barcelona, 229 p.
- Hedberg, H.D., 1948, *Time stratigraphic classification of sedimentary rocks*. Bulletin of the Geological Society of America, 59, 447–462.
- Hedberg, H.D. (Ed.) (1976). *International stratigraphic guide*. John Wiley & Sons, Nueva York, 220 pags. (En español: Guía Estratigráfica Internacional, Reverté, Barcelona, 205 p., 1980).
- Hendry, A.W. (2020). *The Age of the Earth. A physicist's Odyssey*. World Scientific Publishing Co. Singapore, 132 p.
- Hoefs, J. (1987). *Stable isotope geochemistry* (Third ed.). Springer-Verlag, Nueva York, 241 p.
- Holmes, A. (1913). *The Age of the Earth*. Harper and Brothers, London, 194 p.
- Holmes, A. (1933). *The thermal history of the Earth*. Journal of the Washington Academy of Sciences, 23, 169-195.
- Holmes, A. (1947). *The construction of a geological time-scale*. Transactions of the Geological Society of Glasgow, 21, 117-152.
- Holmes, A. (1960). *A revised geological time-scale*. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 17, 183–216.
- Holmes, A. (1965). *Principles of Physical Geology* (2nd ed.). Nelson, London, 1288 p.
- Huggett, R. (1997). *Catastrophism*. Verso, London, 262 p.
- Hutton, J. (1788). *Theory of the Earth, or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe*. Trans. Roy. Soc. Edinb., 1, 109-304.
- Jackson P.W. (2006). *The Chronologers' Quest. The Search for the Age of the Earth*. Cambridge University Press, Cambridge, 291 p.
- Kauffman, E. G. (1988). Concepts and methods of high-resolution event stratigraphy. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 16, 605–654.
- Koutsoukos, E.A.M. (Ed.) (2005) *Applied Stratigraphy*. Topics in Geobiology, 23, Springer, Dordrecht, 488 p.
- Krumbein, W.C., Sloss, L.L. (1963). *Stratigraphy and sedimentation* (2nd ed.). San Francisco, W. H. Freeman and Co., 660 p.

- Laudan, R. (1987). *From Mineralogy to Geology: The Foundations of a Science 1650–1830*. Chicago, University of Chicago Press, 278 p.
- Leddra, M. (2010). *Time Matters. Geology's Legacy to Scientific Thought*. Wiley-Blackwell, Oxford, 269 p.
- Lewis, C. (2000). *The Dating Game: One Man's Search for the Age of the Earth*. Cambridge University Press, Cambridge, 253 p.
- Lewis, C.L.E. (2001). *Arthur Holmes' vision of a geological timescale*. En: Lewis, C.L.E., Knell, S.J. (Eds). *The Age of the Earth: from 4004 BC to AD 2002*. Geological Society, London, Special Publications, 190, 121-138.
- Lewis, C.L.E., Knell, S.J. (2001) *The Age of the Earth from 4004 BC to AD 2002*. Geological Society, Special Publication, London, 190, 288 p.
- Lin, B. (2015). *Radiometric dating*. New York Research Press, New York, 138 p.
- Lyell, C. (1830–1833) (3 vols.). *Principles of Geology*. University of Chicago Press, Chicago.
- Lyle, P. (2016). *The Abyss of Time: a Study in Geological Time and Earth History*. Dunedin Academic Press, Edinburgh, 204 p.
- Lyle, P. (2019). *Introducing Stratigraphy*. Dunedin Academic Press, Edinburgh, 133 p.
- Macdougall, D. (2008). *Nature's Clocks: How Scientists Measure the Age of Almost Everything*. University of California Press, Berkeley, 271 p.
- Macdougall, J.D. (2011). *Why geology matters: decoding the past, anticipating the future*. University of California Press, Berkeley, 304 p.
- Maddox, B. (2017). *Reading the Rocks. How Victorian Geologists Discovered the Secret of Life*. Bloomsbury Publishing, London, 254 p.
- Mahaney, W.C. (Ed.) (1984). *Quaternary Dating Methods*. Elsevier, Amsterdam, 481 p.
- Martin-Chivelet, J., Palma, R.M., Domingo, L., López-Gómez, J. (2015). *Ciclostratigrafía, Cambio climático y la Escala de Tiempo Astronómico*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 23, 136-147.
- Masclé, G. (2008). *Les roches, mémoire du temps*. EDP Sciences, Grenoble, 288 p.
- Matthews, R.K. (1984). *Dynamic Stratigraphy* (2nd ed.). Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 489 p.
- McGowran, B. (2005). *Biostratigraphy: Microfossils and Geological Time*. Cambridge University Press, Cambridge, 459 p.
- Miall, A.D. (1999). *Principles of sedimentary basin analysis* (3rd ed.). Springer-Verlag Inc., New York, 616 p.
- Miall, A.D. (2010). *The geology of stratigraphic sequences* (2nd ed.). Springer-Verlag, Berlin, 522 p.

- Miall, A.D. (2022). *Stratigraphy. A Modern Synthesis* (2nd ed.). Springer Nature Switzerland, 518 p.
- Montenari, M. (Ed.) (2018). *Stratigraphy & Timescales. Cyclostratigraphy and Astrochronology*, v. 3. Academic Press, Elsevier Inc, 383 p.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy* (2nd ed.). Wiley-Blackwell, Oxford, 419 p.
- O'Hara, K. (2018). *A brief history of geology*. Cambridge University Press, Cambridge, 262 p.
- Osborne, R. (1998). *The Floating Egg. Episodes in the Making of Geology*. Pimlico, London, 384 p.
- Palmer, D. (2005). *Earth Time. Exploring the Deep past from Victorian England to the Grand Canyon*. John Wiley and Sons. Chichester, 436 p.
- Palmer, T. (2003). *Perilous Planet Earth. Catastrophes and Catastrophism through the Ages*. Cambridge University Press, 522 p.
- Pettijohn, F.J. (1949). *Sedimentary rocks*. Harper and Bros, New York, 513 p.
- Playfair, J. (1802). *Illustrations of the Huttonian theory of the Earth*. Dover Publications, New York, 528 p. (Ed. by G.W. White, 1956).
- Powell, J.L. (2001). *Mysteries of Terra Firma. The Age and Evolution of the Earth*. The Free Press, New York, 256 p.
- Powell, J.L. (2015). *Four revolutions in the earth sciences: from heresy to truth*. Columbia University Press, New York, 367 p.
- Prothero, D.R. (1990). *Interpreting the stratigraphic record*. W.E. Freeman & Co., Nueva York, 410 p.
- Prothero, D.R. (2021). *The Evolving Earth*. Oxford University Press, Oxford, 829 p.
- Prothero, D.R., Schwab, F. (2014). *Sedimentary Geology. An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy* (Third ed.). W. H. Freeman, New York, 593 p.
- Rampino, M.R. (2017). *Cataclysms: a new geology for the twenty-first century*. Columbia University Press, New York, 211 p.
- Reading, H.G. (Ed.) (1996). *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy* (Third ed.). Blackwell Science, Oxford, 688 p.
- Real Academia de Ciencias (2013). *Vocabulario Científico y Técnico*. 4ª ed.. Términos de geología (Vera, J.A., Ed.), Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid (www.rac.es).
- Reguant Serra, S. (2005). *Historia de la Tierra y de la Vida*. Ed. Ariel. Barcelona, 355 pp

- Repcheck, J. (2003). *The Man Who Found Time: James Hutton and the Discovery of the Earth's Antiquity*. Perseus Books, New York, 247 p.
- Richet, P.A. (2007). *A Natural History of Time*. The University of Chicago Press. Chicago, 471 p.
- Rink, W.J., Thompson, J.W. (Eds.) (2015). *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Springer Reference, Dordrecht, 978 p.
- Rodrigo Sanz, A. (2014). *La edad de la Tierra*. Los libros de la catarata, Madrid, 119 p.
- Rosenberg, G.D. (Ed.) (2009). *The Revolution in Geology from the Renaissance to the Enlightenment*. The Geological Society of America, Memoir, 203, 283 p.
- Rossi, P. (1984). *The dark abyss of time*. University of Chicago Press, Chicago, 338 p.
- Rudwick, M.J.S. (1985). *The great Devonian controversy*. University of Chicago Press, Chicago, 528 p.
- Rudwick, M.J.S. (2005). *Bursting the limits of time: the reconstruction of geohistory in the age of revolution*. University of Chicago Press, 708 p.
- Rudwick, M.J.S. (2008). *Worlds before Adam: the reconstruction of geohistory in the age of reform*. University of Chicago Press, Chicago, 614 p.
- Rudwick, M.J.S. (2014). *Earth's Deep History: How It Was Discovered and Why It Matters*. University of Chicago Press, Chicago, 360 p.
- Ruiz Ortiz, P.A. (1993). *La interpretación del registro geológico: Nuevas perspectivas*. Lección Inaugural. Curso Académico 1993-1994. Universidad de Jaén, 30 p.
- Salvador, A. (Ed.) (1994). *International Stratigraphic Guide* (2nd ed.). International Union of Geological Sciences, Trondheim (Norway) and Geological Society of America, Boulder (Colorado), 214 p.
- Schoch, R.M. (1989). *Stratigraphy. Principles and methods*. Van Nostrand Reinhold, New York, 375 p.
- Schwarzacher, W. (1993). *Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory*. Developments in Sedimentology, Elsevier, Amsterdam, 225 p.
- Secord, J.A. (1986). *Controversy in Victorian geology: the Cambrian-Silurian dispute*. Princeton University Press, Princeton, 386 p.
- Sengor, A.M.C. (2016). What Is the Use of the History of Geology to a Practicing Geologist? The Propaedeutical Case of Stratigraphy. *The Journal of Geology*, 124, 643–698.
- Shaw, A.B. (1964). *Time in stratigraphy*. McGraw Hill, New York, 365 p.
- Spychala, Y.T. (2020). About the (in)value of field work. *Journal of Sedimentary Research*, 90, 102–103.

- Steno, N. (1669). *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*. Florence, Stellae, 78 p.
- Stanley, S.M. (2005). *Earth system history*. W. H. Freeman and Company, New York, 567 p.
- Strasser, A., Hilgen, F.J., Heckel, P.H. (2006). Cyclostratigraphy: concepts, definitions, and applications. *Newsletters on Stratigraphy*, 42 (2), 75-114.
- Switek, B. (2010). *Written in Stone. Evolution, the Fossil Record, and Our Place in Future*. Bellevue Literary Press, New York, 320 p.
- Torrens, H.S. (2002). Some personal thoughts on stratigraphic precision in the twentieth century. En: Oldroyd, D. R. (Ed.) *The Earth inside and out: some major contributions to geology in the twentieth century*. Geological Society, London, Special Publication, 192, 251-272.
- Turney, C. (2007). *Huesos, piedras y estrellas. La datación científica del pasado*. Ed. Crítica, Barcelona, 200 p.
- Vai, G.B. (2001). GSSP, IUGS and IGC: an endless story toward a common language in the Earth Sciences. *Episodes*, 24, 29–31.
- Vai, G.B. (2007). A history of chronostratigraphy. *Stratigraphy*, 4 (2/3), 1-7.
- Valley, J.W., Cavosie, A.J., Ushikubo, T., Reinhard, D.A., Lawrence, D.F., Larson, D.J., Clifton, P.H., Kelly, T.F., Wilde, S.A., Desmond E., Moser, D.E., Spicuzza, M.J. (2014). Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. *Nature Geoscience*, 7, 219-223.
- Van Kranendonk, M.J., Bennett, V.C., Hoffman, J.L. (Eds.) (2019). *Earth's Oldest Rocks* (2nd Ed.). Elsevier, Amsterdam, 1078 p.
- Vera, J.A. (1990). *Estratigrafía y geología de eventos*. Discurso de Ingreso como Académico Numerario de la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales, Granada, 36 p.
- Vera, J.A. (1994). *Estratigrafía: Principios y métodos*. Editorial Rueda S. L., Madrid, 808 p.
- Vera, J.A. (1999). Bioestratigrafía, Micropaleontología y Estratigrafía secuencial. En: *Libro Homenaje a José Ramírez del Pozo*. Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo, Madrid, p. 57-70.
- Vera, J.A. (2003). *Temas de actualidad en la interpretación del registro estratigráfico*. Discurso de Ingreso como Académico Numerario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 83 p.
- Vera, J.A. (2020). *Avances en el campo de la estratigrafía*. Discurso Inaugural del año académico 2020-2021. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 75 p.
- Vilas, L. (2004). *El tiempo en Geología*. Lección Inaugural del Curso Académico 2004-2005. Universidad Complutense, Madrid, 49 p.

- Virgili, C. (2003). *El fin de los mitos geológicos: Lyell*. Nivola, Madrid, 318 p.
- Virgili, C. (2007). Charles Lyell and scientific thinking in geology. *C. R. Geoscience*, 339, 572-584.
- Von Zittel, K.A. (1901). *History of Geology and Palaeontology to the end of the nineteenth century*. Walter Scott, Londres, 562 pp.
- Walker, M. (2005). *Quaternary Dating Methods*. John Wiley & Sons, Chichester, 286 p.
- Walker, R.G., James, N.P., (Eds.) (1992). *Facies models: response to sea-level change*. Geological Association of Canada, Ontario, 409 p.
- Weedon, G.P. (2005). *Time-series analysis and Cyclostratigraphy*. Cambridge University Press, Cambridge, 276 p.
- Weintraub, D.A. (2012). *La edad del universo*. Ed. Crítica. Barcelona, 432 p.
- Wheeler, H.E. (1958). Time-stratigraphy. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 42, 1047-1063.
- Wheeler, H.E. (1959). Stratigraphic units in time and space. *American Journal of Science*, 257, 692-706.
- Weller, J.M. (1960). *Stratigraphic principles and practice*. Harper & Brothers, New York, 725 p.
- White, W.M. (2015). *Isotope Geochemistry*. Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, Oxford, 496 p.
- Whittaker, A., Cope, J.C.W., Cowie, J.W., Gibbons, W., Hailwood, E.A., House, M.R., Jenkins, D.G., Rawson, P.F., Rushton, A.A.W., Smith, D.G., Thomas, A.T., Wimbledon, W.A. (1991). A guide to stratigraphical procedure. *Journal of Geological Society (London)*, 148, 813-824.
- Winchester, S. (2001). *The map that changed the World: William Smith and the Birth of Modern Geology*. HarperCollins, New York, 330 p.
- Wright, V.P. (2019). Memes, false news, and the death of empiricism. *Journal of Sedimentary Research*, 89, 310-311.
- Zalasiewicz, J., Cita, M.B., Hilgen, F., Pratt, B.R., Strasser, A., Thierry, J., Weissert, H. (2013). Chronostratigraphy and geochronology: A proposed realignment. *GSA Today*, 23 (3), 4-8.
- Zalasiewicz, J., Smith, A., Brenchley, P., Evans, J., Knox, R., Riley, N., Gale, A., Gregory, F. J., Rushton, A., Gibbard, P., Hesselbo, S., Marshall, J., Oates, M., Rawson, P., Trewin, N., (2004). Simplifying the stratigraphy of time. *Geology*, 32, 1-4.

