

# La Petrología Sedimentaria: desde Sorby a la globalización de la Geología Sedimentaria

A. M. Alonso-Zarza

Dpto. Petrología y Geoquímica, Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), Facultad de Ciencias Geológicas,  
Universidad Complutense de Madrid, José Antonio Nováis 2, 28040 Madrid, España  
alonsoza@geo.ucm.es

## RESUMEN

En este trabajo se realiza una puesta al día sobre los hitos más relevantes y las aportaciones de la Petrología Sedimentaria. Para ello se define cual es su objeto de estudio y su interés científico y aplicado. La parte más importante del trabajo se centra en el desarrollo histórico de la Petrología Sedimentaria, desde las épocas iniciales de Sorby, hasta la actualidad. Como hitos relevantes señalaremos: 1) los trabajos iniciales más descriptivos, 2) los estudios experimentales, 3) el establecimiento de las clasificaciones de las rocas sedimentarias, 4) los estudios de caracterización de facies y ambientes sedimentarios, 5) los avances en el conocimiento de los procesos diagenéticos y su importancia en la prospección de hidrocarburos, 6) el desarrollo de la Geoquímica Sedimentaria. Se discuten las relaciones y coincidencias con la Sedimentología, para terminar resaltando los avances realizados en los últimos 30 años, en los que el estudio de las rocas sedimentarias se incluye necesariamente en los modelos que ofrecen una visión más global de nuestro planeta y formando parte del campo más amplio de la Geología Sedimentaria. La última parte del trabajo se dedica a la situación de la Petrología Sedimentaria en España.

Palabras clave: carbonatos, diagénesis, interés económico, Petrología Sedimentaria, rocas detríticas

## ***Sedimentary Petrology: from Sorby to the globalization of Sedimentary Geology***

### ABSTRACT

*We describe here the most important milestones and contributions to Sedimentary Petrology compared to other geological disciplines. We define the main aim of our study and the scientific and economic interests involved in Sedimentary Petrology. The body of the paper focuses upon the historical development of this discipline from Henry Sorby's initial work until the present day. The major milestones in its history include: 1) initial descriptive works; 2) experimental studies; 3) the establishment of the different classifications of sedimentary rocks; 4) studies into facies and sedimentary environments; 5) advances in the study of diagenetic processes and their role in hydrocarbon prospection; and 6) the development of Sedimentary Geochemistry. Relationships and coincidences with Sedimentology are discussed. We go on to look at the advances that have taken place over the last 30 years, in which the study of sedimentary rocks is necessarily included in the wider field of Sedimentary Geology as a logical result of the proposal of global models of a changing Earth in which Sedimentary Geology plays a significant part. Finally we mention the notable contributions of Spanish sedimentary petrologists to this whole field of science.*

*Key words: carbonate, clastic rocks, diagenesis, economic interest, sedimentary petrology*

### ABRIDGED ENGLISH VERSION

#### ***Introduction, aim and interest***

*Sedimentary Petrology involves the study of the formation processes (weathering, transport, sedimentation and diagenesis) and characteristics (mineralogy, components, texture, geochemistry etc.) of sedi-*

ments and sedimentary rocks. It is clearly related to other geological sciences, such as Stratigraphy, Mineralogy and Geomorphology, and non-geological disciplines, such as Biology, Mathematics, Physics and Chemistry. Sedimentary petrology has great scientific and economic interest due on the one hand to the fact that these rocks cover large areas of our planet and record the evolution and some of the most important events in the Earth's history, and on the other, from an economic point of view, to the subject's clear practical applications in fields such as geotechnical engineering, building materials, the preservation of geological and historical heritage, natural resources (hydrocarbons, metals, water, etc.) and as archives of past environmental changes, all of which might help in our management of the present and future of our planet.

### **The history of Sedimentary Petrology**

The birth and rapid growth of Sedimentary Petrology started with the invention of the petrographic microscope. In 1849 the English geologist Henry Sorby started to use such a microscope and in 1851 published the first description of a thin section, a silicified limestone. Thus Sedimentary Petrology was born. Sorby's work directly pushed the evolution of Petrology and Mineralogy onward. Gressly (1838) used the term "facies" for the first time to describe the overall features of sediments and sedimentary rocks (grain size, composition of particles, sedimentary structures, thickness, colour, lithology and fossil content). Towards the end of the century Walther (1893-1894) realised that the changes in facies in a vertical succession are the result of lateral changes, a concept that was subsequently adapted by Russian geologists to the term lithology and was later applied to igneous and metamorphic rocks.

During the early 20<sup>th</sup> century, studies into sediments and sedimentary rocks clearly diversified to deal with a great number of aspects such as: a) grain size and morphological studies of clastic deposits (Wentworth, 1922; Cailleux, 1952), including statistical approaches (Visher, 1969); b) experimental works on evaporite precipitation (Van't Hoff, 1912) and the behaviour of detrital clasts in relation to their size (Hjülstom, 1935).

A notable advance came in the mid-20<sup>th</sup> century with the understanding of the role of biological organisms in the formation of sedimentary rocks, especially carbonates (Carozzi, 1960). The widely used classifications were established around that period for both clastic (Kynine, 1948; Dott, 1964; Pettijohn, 1975) and carbonate (Folk, 1959; Dunham, 1962; Embry and Klovan, 1971) sedimentary rocks.

During the 1960s and 70s two main lines developed. The first was promoted by Folk (1974) in a classic book in which he outlined the main concepts to be developed in provenance studies during the years to come, after the development of Plate Tectonics (Zuffa, 1980; Dickinson, 1985). The second line of research was driven by the hydrocarbon companies, who required intensely detailed studies of sedimentary environments. A large number of classic and reference books were published on both clastic and carbonate depositional environments (Wilson, 1975; Friedman and Sanders, 1978; Walker, 1984; Reading, 1986, amongst many others). Evaporitic (Strakhov, 1970; Busson, 1974; Warren, 1989), siliceous (Knauth, 1979; Arbey, 1989), organic (Tissot and Welte 1984), phosphate and iron-rich (Trendall and Morris, 1983; Baturin, 1982) sedimentary rocks were also thoroughly studied during the closing decades of the twentieth century.

Diagenesis is one of the main subjects of Sedimentary Petrology. An understanding of diagenesis is directly linked to the characterization of hydrocarbon reservoirs. In 1968 Dunoyer de Segonzac undertook a historical review of the term diagenesis and his studies were followed by a number of very useful books dealing with different aspects of the diagenesis of sedimentary rocks, such as the characterization of the main processes, knowledge of geofluids and the imprint of diagenesis upon the permeability of sedimentary reservoirs (Bathurst, 1975; McIlreath and Choquette, 1990). One recurrent aspect is the so-called "dolomite problem" (Zengler et al., 1980). Weathering processes are also involved in the production of sediments and sedimentary rocks, so there is a need to understand the processes, geochemistry and deposits involved (Nahon and Noack, 1983).

The development of Sedimentary Petrology is associated with and favoured by scientific journals. We will only refer here to the more general ones. The pioneer journal is the *Journal of Sedimentary Petrology*, founded in 1931; later on its name was changed to the *Journal of Sedimentary Research*. *Sedimentology* and *Sedimentary Geology* appeared many years later, in 1962 and 1967 respectively.

Before moving on to present times we must mention a fact that has been of notably importance in the development of both Sedimentary Petrology and Stratigraphy, that is, the development of Sedimentology. The concept of Sedimentology started through an initial generic definition by Wadell (1932) as the scientific study of sediments. Its difference from Sedimentary Petrology corresponded to the limited view entertained by some authors of Sedimentary Petrology being devoted mainly to the description alone of sedimentary rocks, especially of thin sections. Our view and the significance of the word "Petrology" is that Sedimentary Petrology focuses on the overall study of sedimentary rocks, their features, and of all the processes involved in their formation, and thus also in the formation of sediments. As shown in this paper, petrological concepts are primary to the study of sedimentary rocks, which explains why the *Journal of Sedimentary Petrology* has enjoyed a longer life-span than the others. Nevertheless, the determined development since the

*1960s of Sedimentology as a discipline has caused a small revolution; it is probable a more fashionable name, but it encompasses a part of Sedimentary Petrology.*

*Over the last 20 to 30 years the integration of studies of sedimentary rocks into the Plate-tectonics model and the establishment of curves of sea-level changes triggered the development of "sequence stratigraphy", initially for marine basins, and later for continental ones. In addition, advances in various different techniques and geochemistry allowed more sophisticated methods to be applied to the study of sedimentary rocks. All this resulted in an integration of different scientific disciplines in what is called "Sedimentary Geology", which plays an important part in Sedimentary Petrology. The result is that many of the books most widely referred to (Leeder, 1999; Miall, 1999; Prothero and Schwab, 2004) try to give a more ample view of the sedimentary world than one focused specifically on sediments, rocks, sedimentary environments and diagenesis.*

*Advances over the last few years concern mainly dolomite formation in low temperature environments, the role of microorganisms in mineral precipitation, the characterization of hydrocarbon reservoirs and the correct interpretation of some diagenetic trends.*

*Spanish sedimentary petrologists have contributed substantially to advances in Sedimentary Geology and provided important, novel results and concepts, many of which are international references in their fields, and have opened up new ideas and approaches to the study of sedimentary basins.*

## Introducción

La Petrología Sedimentaria es una de las disciplinas geológicas que se puede considerar clásica, que estudia las características y los procesos que dan lugar a las rocas sedimentarias. Dentro de la Petrología se establecen dos grandes ámbitos: el endógeno y el exógeno, que reflejan dos contextos genéticos muy distintos, cuyas diferencias radican básicamente en los rangos de presión y temperatura que en ellos operan. La Petrología Sedimentaria estudia los materiales y procesos que tienen lugar en el ámbito formador exógeno, es decir, en condiciones de presión y temperatura próximas a las ambientales. En este contexto, el agua es el principal condicionante de los procesos físicos, químicos y biológicos que actúan sobre la litosfera.

El objeto de la Petrología Sedimentaria es el estudio de todos los procesos que conducen a la formación de los sedimentos y de las rocas sedimentarias (alteración o hipergénesis, transporte, sedimentación y diagénesis) y las características mineralógicas, geoquímicas, texturales y estructurales de dichos depósitos. Todo ello requiere el conocimiento de los materiales y de sus procesos generadores y transformadores. Además, siempre hay que tener en cuenta el contexto global en el que se sitúan estas rocas y en el que operan los procesos mencionados.

De acuerdo con lo anterior, la Petrología Sedimentaria, como disciplina científica y también como asignatura de cualquier plan de estudios, está ligada y necesita para sus avances de la interrelación con otras disciplinas de las Ciencias Geológicas y de otras ciencias. Las relaciones más cercanas de la Petrología Sedimentaria son: a) Estratigrafía y Paleontología que además de tener algunos objetos de estudio en común, ofrecen también una mejor contextualización

espacio-temporal de las rocas sedimentarias, b) Petrología Endógena, Cristalografía, Mineralogía y Geoquímica, constituyen un punto de apoyo fundamental, pues su objeto de estudio son también los materiales geológicos, las rocas endógenas aportan muchos de los componentes que después darán lugar a determinados tipos de rocas sedimentarias, c) Geodinámica y Geomorfología, que contribuyen con sus conocimientos sobre la dinámica terrestre y las formas que se generan en la superficie de la Tierra. En algunos casos, la Geomorfología y la Petrología Sedimentaria comparten campos comunes, si bien el acercamiento conceptual es diferente.

Este trabajo pretende dar una visión sobre el desarrollo histórico y la situación actual de la Petrología Sedimentaria. Para ello inicialmente nos centraremos en el interés y aplicaciones del estudio de las rocas sedimentarias. En una gran parte del trabajo hemos pretendido dar una visión amplia de la evolución científica de esta disciplina, pero dado su alto grado de desarrollo es posible que no todos los temas o todos los científicos relevantes estén incluidos. A lo largo del trabajo discutiremos también cual ha sido el papel y las relaciones con la Sedimentología, describiremos cuales son las nuevas tendencias dentro de la globalización de muchas disciplinas dentro del campo de la Geología Sedimentaria y, por último, nos referiremos brevemente a las contribuciones de los petrólogos sedimentarios españoles.

## Interés y aplicaciones de la Petrología Sedimentaria

El interés y las aplicaciones del estudio de las rocas sedimentarias son muy amplios, tanto desde el punto de vista científico como aplicado. Señalaremos a continuación algunos de estos aspectos.

Desde el punto de vista científico: 1) los sedimentos y rocas sedimentarias nos aportan una enorme información sobre las características y los procesos que operaron en la superficie de nuestro planeta en épocas pasadas. Así, su estudio nos permite reconstruir la paleogeografía de nuestro planeta y sus cambios a lo largo del tiempo; 2) la preservación de los restos fósiles de fauna y flora tiene lugar, de forma casi exclusiva, en sedimentos y rocas sedimentarias (al igual que la presencia de numerosos restos arqueológicos) y sin ellos no se puede entender la evolución de los seres vivos y nuestra Prehistoria; 3) los sedimentos pre-holocenos y las rocas sedimentarias cubren una gran parte de los fondos marinos y más del 66% de la superficie de los continentes.

El interés económico del estudio de las rocas sedimentarias deriva muy directamente de su interés científico y tiene su aplicación en campos muy diversos. Citaremos brevemente algunos de ellos:

- 1) Muchas grandes ciudades están situadas sobre depósitos sedimentarios y muchas obras públicas se realizan sobre sedimentos y rocas sedimentarias. Solo conociendo adecuadamente estos materiales y su comportamiento se puede construir con seguridad y solucionar los problemas geotécnicos que se presenten. Como ejemplos, por todos conocidos citaremos, los problemas de disolución y cambio de volumen de las evaporitas, que ocasionaron grandes retrasos en la construcción del tren de alta velocidad Zaragoza-Barcelona o los problemas derivados de la presencia de arcillas expansivas.
- 2) La adecuada caracterización de los materiales de construcción pasa necesariamente por el conocimiento de estas rocas. Son numerosas las formaciones carbonáticas, detríticas y evaporíticas que se utilizan como material de construcción, en la fabricación de cementos y yesos y cómo áridos (entre otras muchas aplicaciones). Solo el conocimiento de las características texturales, mineralógicas, geoquímicas y de las propiedades físicas de estas rocas (porosidad, permeabilidad, resistencia mecánica, propiedades hídricas....), permite la correcta utilización de estos materiales y que den el resultado que de ellos se espera.
- 3) Los procesos de alteración que sufren estos materiales son los responsables del deterioro de las rocas utilizadas en la construcción del Patrimonio Histórico y también del deterioro del Patrimonio natural, que engloba necesariamente el Patrimonio Geológico. La Petrología Sedimentaria tiene mucho que decir en este campo, pues el conocimiento de los materiales y de sus

procesos de alteración es la base para la mejor conservación (y también para la divulgación) del Patrimonio Histórico y Geológico.

- 4) Muchos de los sedimentos y rocas sedimentarias son en sí mismos, o contienen, recursos de interés económico como: carbón, petróleo, gas natural, yeso, azufre, uranio, aluminio, fosfatos, hierro, arenas, gravas, calizas, entre otros muchos. Pero además, estas rocas son almacenes de recursos tan importantes como el agua o los hidrocarburos. No debemos olvidarnos de los avances recientes en la caracterización de posibles almacenes de CO<sub>2</sub>, que hace necesaria un buen conocimiento de las características de las rocas que se consideren como almacén y de las reacciones que se puedan producir entre las rocas y el CO<sub>2</sub> que se inyecte.
- 5) Por último, tenemos que tener presente que vivimos en un planeta cambiante y que nuestra misión es conservarlo para las generaciones venideras. El principio del uniformitarismo enunciado inicialmente por Hutton (1788) y divulgado más ampliamente por Lyell (1830): "el conocimiento del presente es la clave para interpretar el pasado", es imprescindible para establecer las bases de la Geología moderna. Sin embargo, en los comienzos de este tercer milenio debemos añadir que también el conocimiento del pasado nos permitirá entender mejor la evolución futura de nuestro planeta. La Petrología Sedimentaria tiene aquí un campo importante de aplicación, pues el registro sedimentario es un archivo paleoclimático y paleoambiental importante que puede servir para establecer pautas que indiquen cómo pueden producirse estos cambios climáticos y ambientales en el futuro.

### **El desarrollo histórico de la Petrología Sedimentaria: desde Sorby al siglo XX**

El inicio y la rápida expansión de la Petrología se produjeron con la utilización del microscopio petrográfico. El microscopio de polarización fue ya inventado por William Nicol (1766-1851) en Edimburgo en 1829. En 1849 Sorby empezó a utilizar el microscopio petrográfico, y a pesar de las críticas que se le hicieron por estudiar montañas con herramientas para ver objetos muy pequeños, publicó la primera descripción de una lámina delgada en 1851. Se trataba de una caliza silicificada, iniciando así el desarrollo de la Petrología Sedimentaria. Posteriormente, también utilizando el microscopio petrográfico, publicó varios trabajos sobre la exfoliación de las pizarras, metalurgia, y otros

temas relacionados con la Petrología y Mineralogía. La impronta de Sorby, tanto por sus trabajos como por su influencia en otros investigadores, marcó la evolución de la Petrología y también de la Mineralogía. El caso más llamativo es el de Zirkel, que contagiado por el entusiasmo de Sorby, se dedicó a la petrografía, publicó "Lehrbuch der Petrographie" (1866) y contribuyó a la creación de la escuela alemana de estudios petrográficos.

A partir de los trabajos de Sorby avanzaron notablemente las descripciones e interpretaciones genéticas de las rocas sedimentarias, son referencias imprescindibles las monografías detalladas de Cayeux (1864-1944), que van desde una introducción (1916; 1931) al estudio de distintos tipos de rocas sedimentarias: rocas ferruginosas (1909; 1922), silíceas (1929), carbonatos (1935) y fosfatos (1939-1950).

La interpretación de las rocas sedimentarias pasa necesariamente por la aplicación del concepto de facies, introducido por Steno (1669) y utilizado por primera vez en las rocas sedimentarias del Jura por Gressly (1838). Este término se refiere al conjunto de rasgos que presenta un sedimento o roca sedimentaria (tamaño y composición de las partículas, estructuras sedimentarias, espesor, color, litología y contenido fosilífero). Fue Walther (1893-1894) quien llegó a la conclusión de que los cambios de facies en una sucesión vertical son el resultado de la distribución lateral de las mismas, lo cual supuso un avance fundamental para poder interpretar el registro sedimentario. Posteriormente el concepto de facies de Walther fue adaptado al concepto "litología" por los autores rusos, de los que se deriva su subsecuente utilización en Petrología Metamórfica e Ígnea (Okada y Kenyon-Smith, 2009). Además, Walther hizo hincapié en la importancia del conocimiento de los medios sedimentarios actuales y su relación con los organismos vivos. Ya en 1941, Cayeux observó algunos problemas en la aplicación directa del Actualismo, pues los depósitos recientes que podemos observar hoy en día representan un periodo muy corto y especial de la historia de nuestro planeta y además hay que tener en cuenta los procesos postsedimentarios que sufren los sedimentos, que modifican sus características iniciales.

Con la intensificación de la búsqueda de hidrocarburos después de la Primera Guerra Mundial, las rocas sedimentarias detríticas son el foco de numerosos trabajos, dedicados al estudio de la forma de los cantos (Wentworth, 1922), granos de cuarzo (Wadell, 1935) o al de los rasgos superficiales de los clastos (Cailleux, 1952). De esta época hay que destacar los estudios de minerales pesados; aplicados tanto a la determinación de la procedencia, como para correla-

ciones estratigráficas. Algunos de estos estudios pioneros están recogidos en Boswell (1933).

También en ese periodo se introdujeron los métodos estadísticos aplicados al estudio del tamaño de los clastos de las rocas detríticas, con objeto de establecer sus condiciones de formación (Krumbein, 1932; 1934). Estos métodos fueron refinados por Visher (1969), entre otros, y aunque su uso puede ser algo discutible, pues hay que tener en cuenta la influencia de la diagénesis y la composición de los clastos, aún hoy día siguen utilizándose para realizar interpretaciones ambientales, aunque con la incorporación de herramientas informáticas.

Los trabajos experimentales han sido fundamentales para el desarrollo de la Petrología Sedimentaria. Comenzaron con Van't Hoff, que llevó a cabo estudios experimentales sobre la precipitación de evaporitas marinas (Van't Hoff, 1912). Este autor había sido el Primer Premio Nobel de Química en el año 1901, por su descubrimiento de las leyes de la dinámica química y de la presión osmótica en disoluciones (Seibold y Seibold, 2002). Son también pioneros los trabajos de Gilbert y Murphy (1914) utilizando tanques de experimentación para estudiar el comportamiento de distintos materiales durante la erosión, transporte y sedimentación. Quizás el resultado más relevante de la primera mitad del siglo XX sea la obtención de la curva de Hjulstrom (1935), en la que se calculan las velocidades de flujo de agua para erosión, transporte y sedimentación en función del tamaño de las partículas. Posteriormente, son los trabajos experimentales de Allen (1970; 1985) los de referencia obligatoria para el estudio de sedimentos detríticos. Con respecto a los carbonatos, una parte muy importante de los avances se centran en la síntesis experimental de distintos componentes (oolitos, cristales) (Suess y Fütterer, 1972), en el análisis de determinados procesos diagenéticos (Walter y Morse, 1985) o en la determinación del papel de los micro y macroorganismos en la génesis y diagénesis de los carbonatos (Lowens-tam y Weiner, 1989).

Las clasificaciones básicas de las rocas sedimentarias quedan establecidas en los años 60, si bien hay que referirse a la primera clasificación formal de las rocas sedimentarias planteada por Grabau (1913), quien diferencia entre rocas autóctonas y alóctonas. La base conceptual de esta clasificación fue seguida posteriormente en las propuestas de Pettijohn (1949; 1975). En cuanto a las rocas carbonáticas, Folk (1959) define los principales componentes de estas rocas y propone una clasificación puramente descriptiva en 1962. En ese mismo año se publica la clasificación de Dunham (1962), muy fácil de usar y por ello ampliamente utilizada. Embry y Klovan (1971) complemen-

tan dicha clasificación, introduciendo como criterios el tamaño de los componentes y los tipos de bioconstrucciones. Ninguna de estas clasificaciones incluye rocas que hayan sufrido importantes procesos diagénéticos, de ahí la nueva propuesta más completa de Wright (1992).

Las clasificaciones de los depósitos detríticos se establecen a partir de las escalas de tamaño propuestas por Udden (1899) y modificadas posteriormente por Wentworth (1922). La clasificación inicial es la propuesta por Krynine (1948), sus pautas mayores son posteriormente seguidas en las clasificaciones de Dott (1964) y Folk (1964). Todas ellas utilizan como criterios fundamentales el tamaño de los distintos componentes y composición. El trabajo más importante y que sintetiza gran parte de los conocimientos de la Petrología Sedimentaria, hasta ese momento, es el de Folk (1974). En él figuran todos los conceptos básicos que servirán posteriormente para englobar los distintos tipos de rocas, especialmente areniscas, dentro de la Teoría de la Tectónica Global, por aquel entonces en pleno desarrollo. De esta forma, se sientan las bases para el desarrollo del estudio de la procedencia de areniscas, para lo que analizan tanto las características de determinados componentes, como su composición global, incluyendo la propuesta de clasificaciones más amplias para este grupo de rocas (Basu *et al.*, 1975; Zuffa, 1980; Dickinson, 1985; Zuffa, 1985).

El papel de los organismos en la génesis de las rocas sedimentarias empieza a considerarse relevante hacia los años 50. Los organismos dan lugar a la génesis de rocas tan características como son, entre otros, los arrecifes coralinos o los estromatolitos. Algas, bacterias y otros restos vegetales dan lugar a la formación de sedimentos ricos en materia orgánica. Los trabajos van desde la descripción en lámina delgada a la interpretación de facies y ambientes sedimentarios (Carozzi, 1960), otorgando un papel fundamental en las interpretaciones a los componentes orgánicos. Siguiendo esta línea a finales de los años 60, pero sobre todo a lo largo de los 70 y 80, se intensifica el estudio de los distintos ambientes sedimentarios y de las facies, incluyendo las estructuras sedimentarias que en ellos se generan. Todo ello está impulsado por la industria del petróleo, que necesita modelos para diseñar más adecuadamente sus prospecciones. Como manuales más generales citaremos los de Friedman y Sanders (1978), Walker (1984 y versiones posteriores), Reading (1986) y versiones posteriores). En rocas carbonáticas cabe destacar los trabajos de Friedman (1969), Wilson (1975), Flügel (1982), Scholle *et al.*, (1983) y Tucker y Wright (1991). Entre los textos clásicos sobre ambientes de sedimentación de rocas detríticas citaremos como ejemplos los de Harms *et*

*al.* (1982), Scholle y Spearing (1982) y Miall (1985), entre otros muchos.

El estudio de las rocas evaporíticas, silíceas, orgánicas, fosfáticas y ferruginosas también ha contribuido al mejor conocimiento de nuestro planeta y de sus recursos. Los avances más significativos en el conocimiento de las evaporitas se producen al inicio de los años 70, con los trabajos de Strakhov (1970). Estos trabajos tienen una importante carga experimental, analizando las secuencias de precipitación de evaporitas bajo distintos parámetros físicos, esencialmente temperatura y salinidad. De la misma época hay que destacar los trabajos de Braitsch (1971) y Busson (1974). La monografía publicada por Elf Aquitaine (1980), constituye el punto de arranque para una comprensión integral de los depósitos evaporíticos, sus mecanismos y ambientes de formación, diagénesis e interés económico. Posteriormente se publican nuevos trabajos entre los que citaremos: Schreiber (1988), Warren (1989), Ortí, (1989) o Melvin (1991).

Los avances en el conocimiento de las rocas silíceas se producen paralelamente a los de las demás rocas sedimentarias. En estas destaca el importante papel de la diagénesis en sus procesos de transformación. Los trabajos clave son los de Calvert (1974), Bustillo (1976), Knauth (1979) y Arbey (1989).

La acumulación de la materia orgánica, su incorporación a los sedimentos y su maduración da lugar a la formación de recursos tan importantes como el carbón, el petróleo, el gas natural o las arenas asfálticas. A partir de los años 60 se producen avances notables en la caracterización de la materia orgánica, de los macerales, de su evolución y maduración con el enterramiento, de los ambientes de formación y también de los modelos de prospección y exploración (Falini, 1965; Elf Aquitaine, 1976; 1981; Van Krevelen, 1981; Tissot y Welte, 1984; Busson, 1988; Bjorlykke, 1989). Sin olvidar alguna controversia, que ahora nos puede parecer una curiosidad, como es la consideración del origen inorgánico del petróleo (Porfir'er, 1974).

Muchas de las rocas fosfáticas y ferruginosas son también rocas sedimentarias, cuyo origen y mecanismos de formación no solo tienen interés desde el punto de vista económico, sino también científico, pues muchas de las formaciones ferruginosas más antiguas (formaciones de hierros bandeados) contienen el registro de una atmósfera muy distinta a la de hoy en día y de su evolución (Trendall y Morris, 1983; Young y Taylor, 1989).

Con respecto a las rocas fosfáticas los años 80, constituyen una de sus épocas doradas (Bentor, 1980; Baturin, 1982; Slansky, 1986).

El estudio de los procesos diagenéticos y la impronta que dejan en las rocas sedimentarias, y espe-

cialmente en sus propiedades petrofísicas, se intensifica a partir de los años 70, con objeto de obtener una mejor caracterización de los almacenes de hidrocarburos y también de analizar si los distintos tipos de materia orgánica han podido madurar para generar hidrocarburos o carbones. El objetivo de muchos trabajos es analizar y definir los principales procesos diagenéticos, su impronta en las rocas sedimentarias, las características de los geofluidos y la contextualización de esos procesos dentro de la evolución de las cuencas sedimentarias.

Dunoyer de Segonzac (1968) hace una revisión histórica del concepto de diagénesis y son muchas las monografías que se editan (Larsen y Chilingar, 1979; 1983; Scholle y Schluger, 1979; Marfil y De la Peña, 1989; McIlreath y Choquette, 1990, entre otros). Los aspectos específicos de la diagénesis de rocas detríticas se tratan en McDonald y Surdam (1984) y Burley *et al.* (1985). En cuanto a los carbonatos hay que destacar el texto básico de Bathurst (1975), los de Schneiderman y Harris (1985), Moore (1989) y la recopilación realizada por Tucker y Bathurst (1990). No debemos olvidar la inquietud y los avances en "el problema de la dolomita", descrita por Dolomieu (1971, en Gómez de Llerena, 1972) y cuya génesis se ha tratado de forma muy exhaustiva en numerosas monografías (Zenger *et al.*, 1980; Shukla y Baker, 1988, entre otras).

Hay que tener en cuenta que la génesis de los sedimentos y las rocas sedimentarias comienza con los procesos de meteorización, que dan lugar a los detritos que posteriormente serán transportados y sedimentados, o pueden quedar "in situ" generando los suelos, costras, depósitos residuales, etc. Todos ellos son archivos de periodos de tiempo relativamente largos en los que los procesos de alteración y formación de suelos dominaron sobre los procesos de erosión y sedimentación. En este campo los trabajos de los años 70 y 80 se centran en la descripción de los procesos, de su geoquímica y de los materiales resultantes (Nahon y Noack, 1983; Ollier, 1984). Posteriormente se integran estos estudios en trabajos más amplios de análisis de cuencas (Reinhart y Sigleo, 1988).

La Petrología Sedimentaria tiene necesariamente en cuenta los avances en campos como la Geoquímica (elemental, isotópica, orgánica), y la Físico-Química. Las aportaciones teóricas realizadas por Garrells y Christ (1965), Degens (1965) y, sobre todo, los trabajos de Berner (1971) y Krauskopf (1979), sentaron las bases para el avance de muchos aspectos de la Petrología Sedimentaria (alteración, diagénesis, precipitación de carbonatos, caracterización de geofluidos, estudios de procedencia, etc.).

El desarrollo conceptual que hemos mencionado se produce gracias a la difusión de los conocimientos

científicos en manuales, monografías más o menos especializadas y revistas periódicas. Estas últimas son las que recogen las novedades y permiten que los avances científicos se divulguen con mayor rapidez. Por ello hay que referirse a las tres revistas internacionales básicas y más amplias (Seibold y Seibold, 2002) en las que se publican los trabajos de Petrología Sedimentaria. La revista pionera es *Journal of Sedimentary Petrology*, fundada en 1931 y que en 1994 cambiaría su nombre a *Journal of Sedimentary Research*. Las otras dos revistas, *Sedimentology* (1962) y *Sedimentary Geology* (1967), fundadas las dos en la década de los 60, contribuyeron notablemente al desarrollo de la Petrología Sedimentaria y de forma más general a la Geología Sedimentaria.

### El nacimiento de la Sedimentología

A lo largo de esta exposición sobre el desarrollo de la Petrología Sedimentaria, hemos dejado de lado un aspecto, que, no por polémico, ha sido importante tanto para la Petrología Sedimentaria como para la Estratigrafía. Nos referimos al nacimiento de la Sedimentología. La noción de Sedimentología arranca, en una primera definición genérica, de Wadell (1932), como la ciencia de los depósitos sedimentarios o el estudio científico de los sedimentos. Su diferenciación con respecto a la Petrología Sedimentaria respondió a la visión parcial de algunos autores de la Petrología Sedimentaria como disciplina centrada en la descripción de las rocas y, más particularmente en descripciones de lámina delgada. Nuestra visión de la Petrología Sedimentaria es que el objeto de esta disciplina es el estudio integral de las rocas sedimentarias, de sus rasgos y de todos los procesos que intervienen en su formación, y, por tanto, también la formación de los sedimentos. Tal y como hemos expuesto, son los conceptos petrológicos los que primero arraigan y constituyen un cuerpo de doctrina. También las publicaciones periódicas de Petrología Sedimentaria son muy anteriores a las de Sedimentología. Sin embargo, el importante desarrollo de la Sedimentología a partir de los años 60 hace que se produzca una pequeña revolución y que la Sedimentología cope una parte importante de lo que histórica y etimológicamente correspondía a la Petrología.

### Los últimos 20-30 años: "la globalización" en Geología Sedimentaria

A partir de la década de los 80 algunos avances científicos y técnicos traen consigo una pequeña revolu-

ción en los estudios de los depósitos sedimentarios. Entre ellos me gustaría destacar dos aspectos fundamentales:

1. La integración del estudio de los depósitos sedimentarios dentro del modelo global de la Tectónica de Placas se hace casi de forma sistemática. Pero además, se proponen modelos globales de análisis y evolución de las cuencas sedimentarias. El establecimiento de las curvas de variación del nivel del mar (Vail *et al.*, 1977; Haq *et al.*, 1987) y los conceptos de la Estratigrafía Secuencial (Catuneanu, 2006), son básicos para la mejor comprensión de las cuencas sedimentarias. Inicialmente se aplican más a cuencas marinas y posteriormente los modelos se hacen extensivos también a cuencas continentales (Bohacs *et al.*, 2000).
2. Los avances en campos como la Geoquímica (elemental, isotópica, orgánica, técnicas radiométricas, microsondas, ICP Masas, etc.), las adaptaciones de los microscopios petrográficos para el estudio mediante catodoluminiscencia, fluorescencia o inclusiones fluidas. Sin olvidarnos de los avances de la Geofísica (paleomagnetismo, las técnicas y métodos de prospección geofísica), la Paleontología (paleoecología, evolución), la Microbiología, la Geodinámica o la Hidrogeología que contribuyen también al avance de la Geología Sedimentaria.

Todo esto favorece que en las últimas décadas se produzca lo que se podría llamar la "Globalización de la Geología Sedimentaria"; es decir, que se tiende a proponer modelos globales obtenidos a través de estudios integradores de muchas disciplinas geológicas. Estos modelos y/o estudios más generalistas se apoyan en los avances tecnológicos que hemos mencionado anteriormente. Todos estos estudios necesitan obligatoriamente una buena base petrológica y de ahí la contribución de la Petrología Sedimentaria.

La Globalización de la Geología Sedimentaria hace que los manuales básicos sean de dos tipos: 1) específicos para el estudio de sedimentos y rocas sedimentarias (Scoffin, 1987; Tucker, 1991 y 2001; Scholle y Ulmer-Scholle, 2003; Warren, 2006; Boggs, 2009, entre otros muchos); 2) manuales más amplios de Geología Sedimentaria, que recogen aspectos petrológico/sedimentológicos, estratigráficos y geocronológicos (Leeder, 1999; Miall, 1999; Prothero y Schwab, 2004).

### Los avances recientes

La globalización no impide que se siga avanzando en el conocimiento de los procesos más específicamente

petrológicos, mencionaré brevemente algunas de las tendencias y avances de las últimas décadas.

- 1) La formación de dolomita en ambientes sedimentarios de baja temperatura, es uno de los "enigmas" de la Petrología Sedimentaria. El título del trabajo de Land (1998) es bastante significativo "*Failure to precipitate dolomite at 25 °C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years*" y expresa lo difícil que es explicar la precipitación de dolomita en estos ambientes. A finales de los 90 los trabajos experimentales y las observaciones realizadas en Lagoa Vermelha en Brasil, apuntan a una nueva posibilidad: la presencia de microorganismos puede contribuir a la precipitación de dolomita en estos ambientes, pues pueden actuar como soportes para la nucleación y ayudar a romper alguna de las barreras cinéticas (Vasconcelos y McKenzie, 1997; Burns *et al.*, 2000). Si bien la presencia de minerales metaestables (Lippman, 1973) y de microorganismos pueden contribuir a explicar la presencia de dolomita, los ambientes en los que esto sucede son demasiado específicos y su representación en el registro geológico puede ser escasa.
- 2) El papel activo o pasivo de los microorganismos (EPS) en la precipitación de distintos minerales y en la formación de determinadas estructuras sedimentarias es quizás una de las líneas con mayor número de trabajos en estos últimos años. Las técnicas microscópicas, los estudios experimentales y la geoquímica orgánica han permitido estos avances, y han hecho posible una nueva interpretación de algunos depósitos sedimentarios (Gerdes *et al.*, 2000; Noffke *et al.*, 2001; Seckbach y Oren, 2010; Bouougri *et al.*, 2012). Todo ello ha permitido un mejor conocimiento de la evolución de la vida en nuestro planeta, pues se reconocen estructuras microbianas en depósitos ya del Arcaico.
- 3) La adecuada caracterización de almacenes de petróleo, gas natural o CO<sub>2</sub>, ha impulsado notablemente los trabajos sobre diagénesis de todos los tipos de rocas sedimentarias (Stonecipher, 2000; Moore, 2001; Ahr, 2008; Taylor *et al.*, 2010), de sus características petrofísicas, especialmente porosidad y permeabilidad (Giles, 1997) y de la interrelación con los geofluidos (Crossey *et al.*, 1996). El objetivo es establecer modelos adecuados de prospección, lo cual hace necesario establecer las características de P y T que han sufrido las rocas con el enterramiento. Las aportaciones de la geoquímica orgánica (Engel y Macko, 1993; Killips y Killips, 2005) y, de forma más especí-

fica, la utilización de los biomarcadores (Peters *et al.*, 2005; 2007) se han hecho imprescindibles para avanzar en esta línea.

- 4) Los procesos diagenéticos tempranos son muy selectivos. En los periodos geológicos en los que los mares eran "calcíticos" la fauna aragónica se disolvía preferentemente en ambientes marinos. Esto ha causado: a) que se produzca un sesgo favorable a la preservación de las faunas calcíticas, que afecta sobre todo a los moluscos y que tiene importantes implicaciones tafonómicas, y b) debido a estos procesos de disolución, selectivos, pero importantes, se produce lo que se denomina "estratificación diagenética" y que indica que parte del espesor inicial de los sedimentos se ha perdido; lo que complica los intentos de modelizar las tasas de aporte y sedimentación en las plataformas carbonáticas. Las implicaciones para el cálculo de las tasas de sedimentación y subsidencia son evidentes (Munnecke y Westphal, 2005; James *et al.*, 2005; Wheeley *et al.*, 2008; Cherns y Wright, 2009; Sessa *et al.*, 2009).
- 5) Las nuevas técnicas Geoquímicas y sus aplicaciones a la Geología, y en particular, a la Geología Sedimentaria han sido decisivas en dos campos principales: 1) la Geocronología, con sus múltiples y variados métodos de datación, muchos de ellos usando técnicas geoquímicas muy sofisticadas, y su reflejo en las propiedades ópticas de algunos componentes de las rocas sedimentarias (Aitken, 1998; Noller *et al.*, 2000; Hellstrom, 2003; Olszewski, 2006), y 2) en los estudios paleoambientales, diagenéticos, en la caracterización de geofluidos, contaminación de suelos, etc., en muchos de ellos se utilizan de forma sistemática isótopos estables, elementos trazas y tierras raras (Woodhead *et al.*, 2007).

## La situación en España

Los petrólogos sedimentarios españoles han contribuido de forma muy notable a los avances de la "Geología Sedimentaria" y se han sumado a esas nuevas tendencias haciendo aportaciones que pueden considerarse decisivas y novedosas, siendo muchos de ellos figuras de referencia a nivel mundial. Hemos preferido no personalizar en ninguno de ellos o en ningún grupo específico, pero si habría que señalar que sus trabajos han sido muy importantes para el desarrollo de casi todos los campos de la Geología Sedimentaria. En algunos de ellos son pioneros y sus ideas y conceptos han abierto nuevas tendencias en

el estudio de los depósitos sedimentarios y sus aplicaciones. Los campos en los que más éxito han tenido los petrólogos sedimentarios españoles son:

- el estudio de carbonatos marinos y continentales, su interpretación, arquitectura e interés económico y diagénesis,
- la procedencia y diagénesis de las rocas detríticas,
- la caracterización, interpretación ambiental, diagénesis e interés económico de las rocas evaporíticas,
- las rocas silíceas y su diagénesis,
- geoquímica orgánica, biomarcadores y diagénesis de la materia orgánica.
- la aplicación de todos estos conocimientos en campos de gran interés económico como son: la prospección de hidrocarburos, la modelización de almacenes, el secuestro de CO<sub>2</sub>, las rocas y minerales industriales, la conservación del Patrimonio Histórico y Geológico, los yacimientos sedimentarios o Geotecnia, entre otros.

En definitiva, los petrólogos sedimentarios españoles no se han limitado al análisis meramente petrográfico de las rocas sedimentarias, por el contrario realizan un estudio integral de las mismas y han introducido las técnicas, conceptos y métodos, que se han desarrollado en los últimos años. En cuanto a los aspectos docentes, y de acuerdo con lo que indican García Garmilla y Aranburu Artano (2008). La Petrología Sedimentaria se imparte en la mayoría de los centros universitarios como una materia integrada en la Petrología general, junto con la Petrología Ígnea y Metamórfica, y suele representar menos del 30% del temario. En las Universidades en que si existe como asignatura independiente su número de créditos es siempre menor que el de la mayor parte de las disciplinas, lo cual no refleja su elevado interés para la formación de los geólogos.

## Conclusiones

A lo largo de todo este trabajo he intentado mostrar cual ha sido el desarrollo de la Petrología Sedimentaria, su relación más o menos complicada con otras disciplinas y su situación actual. La Petrología Sedimentaria es una ciencia con un largo desarrollo histórico, cuyos logros y avances han repercutido muy positivamente en el avance de otras ciencias y en el conocimiento de nuestro planeta y sus recursos. Es una ciencia útil para la sociedad, que actualmente queda englobada dentro de la "Geología Sedimentaria", en este campo, en el que comparte muchos temas investigación con otras áreas de conocimiento.

## Agradecimientos

El trabajo ha mejorado sustancialmente gracias a los comentarios críticos y constructivos de J. A. de la Peña y A. Permanyer, y a la exhaustiva labor editorial realizada por I. Gil Peña.

## Referencias

- Ahr, W.M. 2008. *Geology of carbonate reservoirs: the identification, description and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks*. Wiley and Sons, 277 pp.
- Aitken, M.J. 1998. *An Introduction to Optical Dating*. Oxford University Press, Oxford, 280 pp.
- Allen, J.R.L. 1970. *Physical Processes in Sedimentation*. Allen & Unwin, London, 248 pp.
- Allen, J.R.L. 1985. *Experiments in Physical Sedimentology*. Allen & Unwin, London, 63 pp.
- Arbey, F. 1989. Les formes de la silice et l'identification des évaporites dans les formations silicifiées. *Bull. Cent. Rech. Explor-Prod. Elf-Aquitaine*, 4, 309-365.
- Basu, A., Young, E.V., Suttner, L.J., James, W.C. and Mack, G.H. 1975. A reevaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance. *Journal Sedimentary Petrology*, 45, 873-822.
- Bathurst, F.G.C. 1975. Carbonate sediments and their diagenesis. *Developments in Sedimentology*, 12, Elsevier, Amsterdam, 658 pp.
- Baturin, G.N. 1982. *Phosphorites on the sea floor: origin and compositional distribution*. Elsevier, New York, 343 pp.
- Bentor, Y.K. (ed.) 1980. *Marine phosphorites, geochemistry, occurrence, genesis*. SEMP. Spec. Pub., 29, 249 pp.
- Berner, R.A. 1971. *Principles of Chemical Sedimentology*. McGraw-Hill Book Co., New York, 240 pp.
- Bjorlykke, K. 1989. *Sedimentology and Petroleum Geology*. Springer-Verlag, Berlín, 370 pp.
- Boggs, S. 2009. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Cambridge University Press, Cambridge, 600 pp.
- Bohacs, K.M., Carroll, A.R., Neal, J.E. and Mankiewicz, P.J., 2000. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated-sequence-stratigraphic-geochemical framework. In: Gierlowski-Kordesch, E.H. and Kelts, K.R. (eds.), *Lake Basins through Space and Time*. AAPG Studies in Geology, 46, 3-34.
- Boswell, P.G.H. 1933. *On the mineralogy of the Sedimentary Rocks*. Murby, London, 393 pp.
- Bouougri, E.H., Porada, H.J., Reitner J. and Gerdes G. (2012) (eds.), Signatures of Microbes and Microbial Mats and the Sedimentary Record. *Sedimentary Geology*, 263-264, 220 pp.
- Braitsch, O. 1971. *Salt Deposits. Their origin and composition*. Springer-Verlag, Berlín, 297 pp.
- Burley, S.D., Kantorowicz, J.D. and Waugh, B. 1985. Clastic Diagenesis. In: P.J. Brenchley, B.P.J. Williams (eds.), *Sedimentology: Recent Developments and applied aspects*. Geological Society of London, Spec. Pub., 18, 189-226.
- Burns, S.J., McKenzie, J.A. and Vasconcelos, C. 2000. Dolomite formation and biogeochemical cycles in the Phanerozoic. *Sedimentology*, 47, 49-61.
- Busson, G. (ed.) 1988. *Evaporites et Hydrocarbures. Mémoires du Muséum national d'Histoire Naturelle, Sciences de la Terre*, 55, 139 pp.
- Busson, G. 1974. Sur les évaporites marines: sites actuels ou récents de dépôts d'évaporites et leur transportation dans les séries du passé. *Rev. Géog. Phys. Geol. Dyn.*, 16, 189-208.
- Bustillo, M.A. 1976. Estudio Petroológico de las rocas silíceas miocenas de la Cuenca del Tajo. *Estudios Geológicos*, 32, 451-497.
- Cailleux, A. 1952. Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkornner und ihre Bedeutung für die Palaoklimatologie. *Geologische Rundschau*, 40, 11-19.
- Calvert, S.E. 1974. Deposition and diagenesis of silica in marine environments. *Spec. Publ. Int. Assoc. Sediment.*, 1, 273-299.
- Carozzi, A.V. 1960. *Microscopic Sedimentary Petrography*, Wiley, New York, 485 pp.
- Catuneanu, O. 2006. *Principles of sequence stratigraphy*. Elsevier, Amsterdam, 375 pp.
- Cayeux, L. 1909. *Les minerais de fer oolithiques de France. Étude des gîtes minéraux de la France (Minerais de fer primaires)*. Service Carte Géologique de France, Imprimerie nationale, Paris, 344 pp.
- Cayeux, L. 1916. *Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires*. Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France, Imprimerie Nationale, Paris, 524 pp.
- Cayeux, L. 1922. *Les minerais de fer oolithiques de France. Étude des gîtes minéraux de la France Minerais de fer secondaires*. Service Carte Géologique de France, Imprimerie nationale, Paris, 1051 pp.
- Cayeux, L. 1929. *Les roches sédimentaires de France: roches siliceuses*. Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France, Imprimerie Nationale, Paris, 23, 774 pp.
- Cayeux, L. 1931. *Introduction a L'Étude Petrographique des Rocas Sédimentaires*. Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France, Imprimerie Nationale, Paris, 2 vol, 534 pp.
- Cayeux, L. 1935. *Les roches sédimentaires de France: Roches Carbonatées (Calcaires et Dolomies)*. Masson, Paris, 436 pp.
- Cayeux, L. 1939-50. *Les phosphates de chaux sédimentaires de France 1970*. Service de la Carte géologique de la France, Imprimerie Nationale, Paris, 3vol.
- Cayeux, L. 1941. *Causes anciennes et causes actuelles en géologie*. Masson. Paris, 82 pp.
- Cherns, L. and Wright, V.P. 2009. Quantifying the impacts of early diagenetic aragonite dissolution on the fossil record. *Palaos*, 24, 756-771.
- Crossey, L., Loucks, R. and Totten, M. 1996. *Diagenesis and Fluid Flow: Concepts and Applications*. Society for Sedimentary Geology, Special Publication, 55, 222 pp.
- Degens, E.T. 1965. *Geochemistry of Sediments*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 342 pp.
- Dickinson, W.R. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa, G.G., (ed.), *Provenance of Arenites*. Dordrecht, The Netherlands, D. Reidel, 333-361 pp.

- Dolomieu, D. 1771. Lettre du Commandeur Deodat de Dolomieu a M. Picot de la Peyrouse: Sur un genre de Pierres calcaires très-peu effervescentes avec les Acides et phosphorescentes par la collision, Malta, 30.01.1791. In: *Observations et mémoires sur la physique, sur l'histoire naturelle, et sur les arts et métiers*, t. XXXIX, 3-10.
- Dott, R.H. 1964. Wacke, greywacke and matrix: what approach to immature sandstone classification? *Journal Sedimentary Petrology*, 34, 625-632.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 1, 108-121.
- Dunoyer de Segonzac, G. 1968. The birth and development of the concept of diagenesis (1866-1966). *Earth Science Reviews*, 4, 153-201.
- Elf Aquitaine. 1976. La matière organique dans les sédiments. *Bull. Centr. Rech. Pau-SNPA*, 10, 83-377.
- Elf Aquitaine. 1980. Les évaporites: mécanismes, diagenese et applications. *Bull. Centre Rech, Elf Aquitaine*, 4, 205-608.
- Elf Aquitaine. 1981. La géologie des charbons, des schistes bitumineux et des kérogènes. *Bull. Cent. Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine*, 5, 269-628.
- Embry, A. and Klovan, J.E. 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin Canadian Petroleum Geology*, 19, 730-781.
- Engel, M.H. and Macko, S.A. 1993. *Organic geochemistry: principles and applications*. Plenum Press, New York, 861 pp.
- Falini, F. 1965. On the formation of coal deposits of lacustrine origin. *Geological Society America Bulletin*, 76, 1317-1346.
- Flügel, E. 1982. *Microfacies analysis of Limestones*. Springer-Verlag, Berlín, 633 pp.
- Folk, R.L. 1959. *Practical petrography classification of limestones*. Springer Verlag, Berlín, 633 pp.
- Folk, R.L. 1962. Spectral subdivision of limestone types. *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 1, 62-84.
- Folk, R.L. 1964. A review of Grain-size parameter. *Sedimentology*, 6, 73-93.
- Folk, R.L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publ.co., Austin, 182 pp.
- Friedman, G.M. (ed.) 1969. *Depositional environments in carbonate rocks*. SEMP Spec. Pub., 14, 209 pp.
- Friedman, G.V. and Sanders, J.E. 1978. *Principles of Sedimentology*. John Wiley & Sons, New York, 792 pp.
- García Garmilla, P. and Aranburu, A. 2008. Lucien Cayeux (1864-1944): un ilustre precursor en la enseñanza de la Petrología Sedimentaria. *Geogaceta*, 45, 111-114.
- Garrells, R. M. and Christ, C.L. 1965. *Solutions, Minerals and Equilibria*. Harper & Ross Publishers, New York, 450 pp.
- Gerdes, G., Klenke, T. and Noffke, N. 2000. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments, a catalogue. *Sedimentology*, 47, 279-308.
- Gilbert, K.G. and Murphy, E.C. 1914. *The Transportation of Debris by Running Waters*. U.S. Geological Survey Professional Paper 86, 263 pp.
- Giles, M.R. 1997. *Diagenesis: a quantitative perspective: implications for basin modelling and rock property predict*. Kubler Academic, Dordrecht, 526 pp.
- Gómez de Larena, J. 1972. Notas históricas sobre la dolomita y la magnesita. *Seminario de Estratigrafía*, 8, 3-8.
- Grabau, A.W. 1913. *Principles of Stratigraphy*. Dover, New York, 2 vol. 1185 pp.
- Gressly, A. 1838. Observations géologiques sur le Jura soleurois. *Soc. Helv. Sci. Nat. Nouveaux Mémoires*, 2, 349 pp.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). *Science*, 235, 1156-1167.
- Harms, J.C., Southard, J.B. and Walker, R.G. 1982. *Structures and sequences in clastic rocks*. SEPM Short Course, 259 pp.
- Hellstrom, J., 2003. Rapid and accurate uranium-series dating by MC-ICP-MS, using microdrilling and laser ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (Suppl. 1), A144.
- Hjülstrom, F. 1935. Studies on the Morphological activity of rivers as illustrated by River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute, Uppsala*, 25, 221-527.
- Hutton, J. 1788. *Theory of the Earth*. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, vol. I, Part II, 209-304.
- James, N.P., Bone, Y. and Kyser T.K. 2005. Where has all the aragonite gone?: Mineralogy of Holocene neritic cool-water carbonates, southern Australia. *Journal of Sedimentary Research*, 75, 454-463.
- Killops, S. and Killops, V. 2005. *Introduction to organic geochemistry*. Blackwell Sci, Oxford, 393 pp.
- Knauth, L.P. 1979. A model for the origin of chert in limestone. *Geology*, 7, 274-278.
- Krauskopf, B. 1979. *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill Book Co, New York, 617 pp.
- Krumbein, W.C. 1932. A history of the principles and methods of mechanical analysis. *Journal Sedimentary Petrology*, 2, 89-124.
- Krumbein, W.C. 1934. Size Frequency Distribution of Sediments. *Journal Sedimentary Petrology*, 4, 65-77.
- Krynine, P.D. 1948. The megascopic study and field classification of sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 56, 130-165.
- Land, L.S. 1998. Failure to precipitate dolomite at 25 °C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years. *Aquatic Geochemistry*, 4 (3), 361-368.
- Larsen, G. and Chilingar, G.V. (eds.) 1979. *Diagenesis in sediments and sedimentary rocks*. Developments in Sedimentology 25, Elsevier, Amsterdam, 579 pp.
- Larsen, G. and Chilingar, G.V. (eds.) 1983. *Diagenesis in sediments and sedimentary rocks*. 2. Developments in Sedimentology 25B, Elsevier, Amsterdam, 572 pp.
- Leeder, M.R. 1999. *Sedimentology and Sedimentary Basins*. Blackwell Science, Oxford, 592 pp.
- Lippmann, F. 1973. *Sedimentary Carbonate Minerals*. Springer, New York, 228 pp.
- Lowenstam H.A. and Weiner S., 1989. *On Biomineralization*. Oxford University Press, New York, 324 pp.
- Lyell, S.Ch. 1830-3. *Principles of Geology*. John Murray, London, 3 vol.
- Marfil, R. and De la Peña, J.A. 1989. Diagénesis: Rocas siliciclásticas y rocas carbonáticas. In: *Nuevas tendencias: Sedimentología*. A. Arche (Coord). C.S.I.C. Madrid, vol II, 343-427.

- McDonald, D.A. and Surdam, R.C. (eds.) 1984. *Clastic Diagenesis*. Memoir 37, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK, 434 pp.
- McIlreath, I.A. and Choquette, D.V. (eds.) 1990. *Diagenesis*. Geoscience, Canada, Reprint Series 4, 338 pp.
- Melvin, J.L. (ed.) 1991. *Evaporites; Petroleum and Mineral Resources*. Developments in Sedimentology, 50, Elsevier, Amsterdam, 556 pp.
- Miall, A.D., 1985. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, 22, 261-308.
- Miall, A.D. 1999. *Principles of sedimentary basin analysis*. Third edition, Springer-Verlag Inc., New York, 616 pp
- Moore, C.H. 1989. *Carbonate Diagenesis and Porosity*. Developments in Sedimentology, 46, Elsevier, 338 pp.
- Moore, C.H. 2001. *Carbonate Reservoirs. Porosity Evolution and Diagenesis in Sequence Stratigraphy Framework*. Developments in Sedimentology, 55, Elsevier, Amsterdam, 444 pp.
- Munnecke, A. and Westphal, H. 2005. Variations in primary aragonite, calcite, and clay in fine grained calcareous rhythmites of Cambrian to Jurassic age: An environmental archive?. *Facies*, 51, 592-607.
- Nahon, D.H. and Noack, Y. 1983. Petrologie des Alterations et des Sols. Vol. II. Petrologie des Séquences Naturelles. *Sci. Géol. Mém*, 72.
- Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T. and Krumbein, W.E. 2001. Microbially induced sedimentary structures – a new category within the classification of primary sedimentary structures. *Journal Sedimentary Petrology* A71, 649-656.
- Noller, J.S., Sowers, J.M., W.R. and Lettis, W.R. (eds.) 2000. *Quaternary geochronology: methods and applications*. American Geophysical Union, Florida, 582 pp.
- Okada, H. and Kenyon-Smith, A. 2009. The birth of sedimentology: Henry Clifton Sorby and Johannes Walther. *Geology Today*, 25, 211-216.
- Ollier, C. 1984. *Weathering*. Olive & Boyd. 2<sup>a</sup> ed., Longman, New York, 270 pp.
- Olszewski, T.H. (ed.) 2006. *Geochronology: emerging opportunities*. Paleontological Society Papers, Spec, Pub, 12, 180 pp.
- Ortí, F. 1989. Evaporitas Marinas. In: Arche, A. (ed.), *Sedimentología*. CSIC, 89-177.
- Peeters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan, J.M. 2005. *The biomarker guide. Vol. II, Biomarkers and isotopes in petroleum systems and earth history*. Cambridge University Press, Cambridge, 475-1155 pp.
- Peeters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan, J.M. 2007. *The biomarker guide. Vol. I, Biomarkers and isotopes in the environments and human history*. Cambridge University Press, Cambridge, 471 pp.
- Pettijohn, F.J. 1949. *Sedimentary rock*. Harper & Brothers, New York, 526 pp.
- Pettijohn, F.J. 1975. *Sedimentary rocks. An Introduction*. Harper & Row, Pub. New York, 628 pp.
- Porfir'ev, V.P. 1974. *Inorganic origin of petroleum*. AAPG Bull., 58, 3-33.
- Prothero, D.R. and Schwab, F. 2004. *Sedimentary Geology. An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy*. W.H. Freeman and Co. New York, 557 pp.
- Reading, H.G. 1986. *Sedimentary Environments and Facies*. Blackwell Sci. Pub., Oxford, 615 pp.
- Reinhart, J. and Sigleo, W.R., 1988. Paleosols and weathering through geologic time: principles and applications. *Spec. Pap. Geol. Soc. Amer*, 206, 181 pp.
- Schneiderman, N. and Harris, P.M. (eds.) 1985. *Carbonate Cements*. SEMP Spec. Pub, 36, 379 pp.
- Scholle, P. and Schluger, P.R. 1979. *Aspects of Diagenesis*. SEMP Spec. Pub., 26, 443 pp.
- Scholle, P.A., Bebout, C.G. and Moore, C.H. (eds.) 1983. *Carbonate Depositional Environments*. AAPG Memoir, 33, 708 pp.
- Scholle, P.A. and Spearing, D. (eds.) 1982. *Sandstone depositional environments*. AAPG Memoir, 31, Tulsa, 410 pp.
- Scholle, P.A. and Ulmer-Scholle D.S. 2003. *A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis*. AAPG Memoir, 77, 474 pp.
- Schreiber, B.C. (ed.) 1988. *Evaporites and hydrocarbons*. Columbia University Press, New York, 474 pp.
- Scoffin, T.P. 1987. *An introduction to carbonate sediments and rocks*. Blakie, Glasgow, 274 pp.
- Seckbach, J. and Oren, A. 2010. *Microbial Mats: Modern and Ancient Microorganisms in Stratified Systems*. Springer, Dordrech, 606 pp.
- Seibold, E. and Seibold, I. 2002. Sedimentology: from single grains to recent and past environments: some trends in sedimentology in the twentieth century. In: Oldroyd, D.R. (ed.). *The Earth Inside and Out: Some Major Contributions to Geology in the Twentieth Century*. Geol. Soc. London, Spec. Publ 192, 241-250.
- Sessa, J.A., Patzkowsky, M.E. and Bralower, T.J. 2009. The impact of lithification on the diversity, size distribution, and recovery dynamics of marine invertebrate assemblages. *Geology*, 37, 115-118.
- Shukla, V. and Baker, P.A. (eds.) 1988. *Sedimentology and Geochemistry of Dolostones*. SEMP Spec. Pub., 43, 266 pp.
- Slansky, M., 1986. *Geology of sedimentary phosphates*. Elsevier, 210 pp.
- Sorby, H.C. 1851. On the microscopical structure of the calcareous grit of the Yorkshire Coast. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 7, 1-6.
- Steno, N. 1669. *De Solido intra Solidum Naturaliter Contento Dissertationis Prodrromus*. Florencia.
- Stonecipher, S.A. 2000. *Applied sandstone diagenesis: practical petrographic solutions for a variety of common exploration, development and production problems*. SEPM, Tulsa, OK, U.S.A., 146 pp.
- Strakhov, N.M. 1970. *Principles of lithogenesis*. Oliver and Boyd, Edimburg, 3, 577 pp.
- Suess, E. and Fütterer, D. 1972. Aragonitic ooids: experimental precipitation from seawater in the presence of humic acid. *Sedimentology*, 19, 129-139.
- Taylor, T.R., Giles, M.R., Hathon, L.A., Diggs, T.N., Braunsdorf, N.R., Birbiglia, G.V., Kittridge, M.G., Macaulay, C.I. and Espejo, I.S. 2010. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality. *AAPG Bulletin*, 94, 1093-1132.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H. 1984. *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag, Berlín, 699 pp.

- Trendall, A.F. and Morris, R.C. 1983. *Iron-Formation facts and problems*. Elsevier. Amsterdam, 558 pp.
- Tucker, M.E. 1991. *Sedimentary Petrology. An Introduction to the origin of sedimentary rocks*. (2<sup>a</sup> ed.). Blackwell Sci. Publ, Oxford, 269 pp.
- Tucker, M.E. 2001. *Sedimentary Petrology. An Introduction to the origin of sedimentary rocks*. (3<sup>a</sup> ed.). Blackwell Sci. Publ, Oxford, 262 pp.
- Tucker, M.E. and Wright, V.P. 1991. *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Sci. Publ. Oxford, 482 pp.
- Tucker, M.E. and Bathurst, R.G.C. (eds.) 1990. *Carbonate Diagenesis*. Int. Ass. Sedim. Reprint Series. 1, 312 pp.
- Udden, J.A. 1899. *Mechanical composition of wind deposits*. Augustana Library, 1, 69 pp.
- Vail, P.R., Mitchum, R.M. Jr., Todd, R.G., Widmier, J.M., Thompson, S.III., Sangree, J.B., Bubba, J.N. and Hatlelid, W.G. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. In: Payton, C.E. (ed.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir, 26, 49–212.
- Van Krevelen, D.W. 1981. *Coal, Typology, chemistry, physics, constitution*. Coal. Sci. Technol. Elsevier. Amsterdam, 514 pp.
- Van't Hoff, J.H. 1912. *Untersuchungen über die Bildungsverhältnisse der ozeanischen Salzablagerungen insbesondere des Stassfurter Salzlagers*. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft m.b.h., 374 pp.
- Vasconcelos, C. and McKenzie, J.A. 1997. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil). *Journal of Sedimentary Research* 67, 378–390.
- Visher, G.S. 1969. Grain Size Distribution and Depositional Processes. *Journal Sedimentary Petrology*, 39, 1074-1106.
- Wadell, H. 1932. Sedimentation and Sedimentology. *Science*, 75, 20.
- Wadell, H. 1935. Volume, shape and roundness of quartz particles. *Journal of Geology*, 43, 250-280.
- Walker, R.G. (ed.) 1984. *Facies Models*. Geoscience Canada, Reprint Series 1, 317 pp.
- Walter, L.M. and Morse, J.W. 1985. The dissolution kinetics of shallow marine carbonates in seawater: a laboratory study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 1503-1513.
- Walther, J. 1893–1894. Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. (Introduction to Geology as a historical science). G. Fischer, Jena, 1055 pp.
- Warren, J.K. 1989. *Evaporite Sedimentology: Importance in Hydrocarbon Accumulation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 285 pp.
- Warren, J.K. 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer. 1036 pp.
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.
- Wheelely, J.R., Cherns L. and Wright, V.P. 2008. Provenance of microcrystalline carbonate cement in limestone–marl alternations (LMA): Aragonite mud or molluscs?. *Journal of the Geological Society, London*, 165, 395–403.
- Wilson, J.L. 1975. *Carbonate Facies in Geologic History*. Springer-Verlag, New York, 471 pp.
- Woodhead, J., Hellstrom, J., Hergt, J., Greig, A. and Maas, R., 2007. Isotopic and elemental imaging of geological materials by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Journal of Geostandards and Geoanalytical Research*, 31, 331-343.
- Wright, V.P. 1992. A revised classification of limestones. *Sedimentary Geology*, 76, 177-185.
- Young, T.P. and Taylor, W.E.G. (eds.) 1989. *Phanerozoic Ironstones*. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., 46, 251 pp.
- Zenger, D.H., Dunham, J.B. and Ethington, R.L. (eds.) 1980. *Concepts and Models of Dolomitization*. SEMP Spec. Pub., 28, 320 pp.
- Zirkel, F. 1866. *Lehrbuch der petrography*. A. Marcus Pub. Bonn, Aprox 607 pp.
- Zuffa, G.G. 1980. Hybrid arenites: their composition and classification. *Journal Sedimentary Petrology*, 50, 21-29.
- Zuffa, G.G. (ed.) 1985. *Provenance of arenites*. Nato Asi Series, Reidel, Dordrecht, 408 pp.

Recibido: febrero 2012  
Revisado: mayo 2012  
Aceptado: octubre 2012  
Publicado: enero 2013