

LA POROSIDAD COMO COMPONENTE PETROGRÁFICO: LA POROSIDAD DE LAS ROCAS CARBONATADAS

1. INTRODUCCIÓN

Las rocas –en particular las calizas y dolomías– son cuerpos porosos, es decir, están formadas por fases minerales sólidas, entre las que se sitúan espacios vacíos, ocupados por fases fluidas (aire y agua normalmente).

Se denomina *porosidad* al conjunto de los espacios vacíos que posee una roca y, en su sentido más amplio, la porosidad puede ser contemplada bajo dos puntos de vista que se complementan:

- como un *componente petrográfico o textural*
- como una *propiedad física* de la roca.

En consecuencia, y concordantemente con diversos autores (Archie, 1950; Bertrand, 1969; Elf-Aquitaine, 1977; Selley, 1982; Bourbie, et al. 1987) la porosidad constituye el parámetro petrográfico fundamental cuando se trata de establecer relaciones entre las características petrográficas y las propiedades físicas de las rocas: *análisis petrofísico*.

1.1. La porosidad como componente petrográfico

Desde el punto de vista petrográfico, se trata de un componente más de la roca. En principio se considera una fase única –la formada por los espacios vacíos–, constituyendo junto con el resto de las fases minerales el volumen rocoso total. Además, como cualquier otro componente, posee unas características o elementos texturales: tamaño, forma, distribución (orientación, homogeneidad...), que contribuyen junto al resto de los componentes a la textura de la roca.

No obstante, presenta una diferencia fundamental respecto a las fases minerales, y es la continuidad que normalmente presentan los espacios vacíos, constituyendo lo que suele denominarse: *sistema poroso*.

El sistema poroso atiende a la configuración tridimensional de los espacios vacíos: como son realmente, lo cual –en los materiales rocosos– resulta difícil de observar, y mucho más difícil de describir o cuantificar. En consecuencia, el análisis petrográfico da una visión más real de la porosidad, pero esencialmente descriptiva y cualitativa.

Su estudio se realiza normalmente por métodos directos a distintas escalas: observación de visu, microscopía óptica de polarización (MOP), microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía de fluorescencia, confocal, etc. En la mayoría de los casos, dicha observación requiere una adecuada preparación de las muestras: muestras pulidas, impregnadas con resinas fluorescentes, obtención de moldes, etc. A partir de dichas imágenes, mediante métodos estereológicos o proceso digital de imágenes pueden cuantificarse elementos particulares del sistema poroso.

1.2. La porosidad como propiedad física

Como propiedad física, se trata de una propiedad elemental y también fundamental de las rocas, y como tal, nos suministra parámetros numéricos que permiten caracterizar los

materiales rocosos como un todo homogéneo. Dicho parámetro se define como la relación: volumen de espacios vacíos por unidad de volumen total de roca, expresándose normalmente en tanto por ciento.

En principio, de acuerdo con su definición, se trata de una propiedad fácil de obtener; sin embargo, la obtención del volumen correspondiente a los espacios vacíos, admite diversas matizaciones –en relación normalmente con los métodos utilizados para su determinación–, lo que permite establecer nuevos conceptos como:

- porosidad total
- porosidad abierta o comunicada (eficaz)
- porosidad cerrada.
- porosidad libre.
- porosidad atrapada.

La porosidad como propiedad física –también denominada: *volumen poroso* o volumen de poros– es un parámetro cuantitativo, por lo que puede correlacionarse con otras propiedades y recibir tratamientos matemáticos; si bien, la información que suministra del medio poroso es parcial y más pobre.

Su determinación se realiza fundamentalmente a partir de métodos indirectos: saturación de los espacios vacíos con fases fluidas (agua, mercurio, helio, nitrógeno, etc.). Estas técnicas indirectas –además de porosidad– están diseñadas principalmente para suministrar otros parámetros más específicos del sistema poroso, que aunque parciales presentan gran interés en el comportamiento de los materiales (Haynes, 1973); entre ellas cabe destacar:

- la inyección de mercurio, indicada para obtener el radio de acceso de poro.
- la adsorción de nitrógeno, apropiada para determinar la superficie específica.

1.3. Complejidad del sistema poroso

Sin perder de vista lo que representa el volumen de poros en el volumen total de roca, resulta también esencial conocer las características de los espacios vacíos y del sistema poroso en su conjunto. Así, atendiendo en primer lugar a la morfología de dichos espacios vacíos, puede establecerse dos *modelos*: medios porosos y medios fisurados.

En medios fisurados la porosidad es debida a fisuras. Las fisuras se consideran discontinuidades de la fase sólida –mejor que poros en su sentido usual–, e incluyen desde fracturas a exfoliaciones y bordes de grano abiertos. A pesar de la baja porosidad que suponen, las fisuras tienen gran importancia en el comportamiento mecánico de las rocas; en este sentido, valores de porosidad superiores al 1 % pueden considerarse elevados.

Su estudio es notablemente complejo, ya que resultan difíciles de observar, sensibles a la creación de artefactos durante la preparación o toma de las muestras, y cuando se trata de muestras procedentes de zonas profundas pueden depender del estado tensional del macizo.

En medios porosos el rango de variación de la porosidad es mucho más elevado, y su morfología más compleja. El sistema poroso constituye un medio continuo en el que pueden diferenciarse distintos elementos; en concreto, suelen distinguirse entre poros y accesos de poro.

Los *poros* corresponden a los ensanchamientos del sistema poroso y contribuyen a elevar la porosidad de las rocas; presentan interés por su capacidad para almacenar fluidos. Los *accesos de poro* son las zonas más estrechas que comunican los poros; guardan relación con la conexión del sistema poroso y aspectos más dinámicos de las rocas, como su capacidad para el transporte de fluidos (succión, permeabilidad).

En el análisis del sistema poroso, además del tamaño y forma de los poros y de sus accesos, debe considerar otros *elementos* de gran interés como:

- la relación: tamaño de poro / tamaño de acceso,
- el número de coordinación de los poros,
- relación con la fábrica de la roca (selectiva o no),
- homogeneidad,
- isotropía.

1.4. La porosidad en las rocas carbonatadas

Las calizas y dolomías presentan un *sistema poroso* notablemente complejo, tanto desde el punto de vista físico como genético. En principio, su morfología responde al modelo de medios porosos; no obstante, las calizas más cristalinas se sitúan ya dentro de los medios fisurados.

La indicada complejidad física –relativa a la geometría de los poros– es consecuencia fundamentalmente de su complicada génesis. Así, la porosidad de estas rocas es típicamente poligénica, consecuencia tanto de las distintas etapas en que pueden desarrollarse los poros, como de los diversos procesos implicados en su formación. En las rocas carbonatadas la génesis de los poros –de la misma forma que la de la fase sólida– posee normalmente una historia larga y compleja, debido a la movilidad química de sus minerales.

La *porosidad inicial* es ya de por sí elevada y compleja, de acuerdo con la variabilidad que puede presentar la textura deposicional de estas rocas. Así, las rocas bioconstruidas muestran una porosidad característica, que depende de los organismos que las constituyen; otra tipo importante de rocas son las que poseen texturas granudas, en ellas la porosidad es fundamentalmente intergranular y depende del tamaño y forma de los granos (ahora mucho más variable que en las areniscas); finalmente, los lodos carbonatados son los que presentan una mayor porosidad, alcanzándose a veces valores superiores al 70% en el momento del depósito.

Su *evolución diagenética* es sumamente importante. Es sabido que los depósitos de calizas presentan minerales inestables (calcita rica en Mg, aragonito), que junto al pequeño tamaño que pueden alcanzar los cristales, la presencia a veces de inclusiones o sus formas aciculares, favorecen los procesos diagenéticos: disolución, cementación y neomorfismo (recristalización, reemplazamiento). Todos estos procesos pueden tener lugar desde las etapas más iniciales de la diagénesis –durante el depósito y la diagénesis temprana– hasta las etapas más tardías (telogénesis).

En resumen, puede decirse que las modificaciones texturales –con frecuentes intercambios entre los espacios vacíos y la materia sólida– es la norma en las rocas carbonatadas. En consecuencia, una determinada roca puede presentar varios tipos de poros, correspondientes bien sea a distintos procesos, a distintas generaciones o, frecuentemente, a ambos hechos.

2. CLASIFICACIONES

De forma similar a lo que ocurre para otros parámetros petrográficos, existen clasificaciones de la porosidad que atienden más a los aspectos descriptivos y otras que pueden considerarse más genéticas.

Las *clasificaciones descriptivas* suelen establecerse en relación con elementos particulares del sistema poroso (tamaño, forma, etc.) o con la porosidad como propiedad física, y constituyen clases definidas numéricamente. Con frecuencia están orientadas a fines aplicados, permitiendo realizar correlaciones entre distintos parámetros: permeabilidad, resistividad, etc.

Las *clasificaciones genéticas* se sitúan más en el campo de la porosidad como componente petrográfico, ya que la formación de los espacios vacíos se encuentra ligada a la de los restantes componentes minerales, y participan de forma notable en el conocimiento de la génesis de la roca. Normalmente son difíciles de utilizar a priori.

2.1. Clasificaciones descriptivas

Dentro de este grupo pueden considerarse clasificaciones que atienden a la porosidad total, al tamaño, forma y distribución de los poros, así como a su localización en el seno de la roca.

Porosidad total. La porosidad –como propiedad física o el volumen poroso– que posee una roca es el primer parámetro a considerar por su importancia. De acuerdo con sus valores se suelen considerar las siguientes clases (Archie, 1952; Sander, 1967):

- porosidad muy baja: menor de 4 %
- porosidad baja: de 4 a 8 % (valor medio alrededor de 6 %),
- porosidad media: de 8 a 16 % (valor medio alrededor de 10 %),
- porosidad alta: de 16 a 32 % (valor medio alrededor de 20 %),
- porosidad muy alta: mayor de 32 %.

Estos valores incluyen todos los espacios vacíos de la roca, es decir, la porosidad de poro y la porosidad de fisura; normalmente la contribución de las fisuras al volumen poroso total es muy pequeña, excepto en las rocas de muy baja porosidad.

Tamaño de los espacios vacíos. Se puede considerar el segundo elemento del sistema poroso por su importancia. Como parámetro físico es mucho más difícil de tratar, dada la continuidad y el carácter tridimensional del sistema poroso y su dependencia de la forma. La complicación aún es mayor debido al amplio rango de poros abarcados (desde inferiores a la μm a superiores al mm) y los problemas de escala que pueden presentarse, sobre todo cuando existen distintos tipos de poros con rangos de tamaño diferentes (Bourbie et al., 1987).

En primer lugar –en rocas porosas– debe distinguirse entre el tamaño de los poros y el tamaño de los accesos de poro:

- Respecto al *tamaño de los poros* –considerados más o menos regulares, equidimensionales– puede establecerse la siguiente escala (Choquette y Pray, 1970), basada en la definida por Wentworth para los componentes detríticos:

- megaporos: poros mayores de 2 mm (4 mm según otros autores)
- mesoporos: poros de 2 mm a 60 μm
- microporos: poros menores de 60 μm (10 o 1 μm según otros autores).

- El *tamaño de los accesos de poro* suele determinarse por métodos indirectos, y –de acuerdo con los ensayos de porosimetría por inyección de Hg– se establece la siguiente escala para el radio de acceso de poro (a veces, abusando del lenguaje, se habla de radio de poro):

- macroaccesos (macroporosidad): accesos mayores de 7,5 μm
- microaccesos (microporosidad): accesos menores de 7,5 μm .

Además, interesa conocer la *variación de tamaño* –tanto de los poros como de sus accesos– que presenta una roca. Esta característica suele expresarse mediante histogramas, curvas de frecuencia y curvas de distribución (similares a las curvas granulométricas, utilizadas para clasificar el tamaño de los granos en arenas). A partir de ellas pueden obtenerse diferentes parámetros estadísticos: valor medio, moda, desviación típica, rango superior e inferior, etc.

Forma de los poros. La forma de los poros es sumamente variable y, en general, muy irregular; no obstante, se aproxima si es posible a formas regulares ideales. Entre dichas formas extremas suelen considerarse tres, de acuerdo con la relación que existe sus dimensiones principales: A, B y C, y se establecen las siguientes categorías (el límite "mayor que" suele situarse alrededor de diez veces):

- equidimensionales: cuando $A = B = C$
- cilíndricos: cuando $A > B = C$
- planares: cuando $A = B > C$.

En los medios porosos las formas equidimensionales son propias de los poros, mientras que cilíndricas, cónicas y planares son más comunes en los accesos a los poros. Los medios fisurados presentan mayoritariamente formas planares.

Localización de los poros. Normalmente la mejor forma de expresar como se distribuyen los poros en las rocas es en función de su textura. Se trata de una característica descriptiva de la porosidad de gran interés –dada su relación con el tamaño, la morfología y génesis de los poros–, y requiere un buen conocimiento de la textura. De acuerdo con las características texturales de las rocas pueden establecerse distintos tipos de poros (Scoffin, 1987):

- en relación con los cristales: intracristalinos, intercristalinos, móldicos, etc.
- en relación con los granos: intragranulares, intergranulares, móldicos, etc.
- en estratos masivos: fisuras, burrows, vacuolares, fenestrales, etc.
- en conjuntos de estratos: grietas, brechas, carstificación, etc.

2.2. Clasificaciones genéticas

Las clasificaciones exclusivamente genéticas son menos utilizadas –dadas las dificultades que suele presentar su aplicación a priori– y presentan menor interés en la caracterización petrofísica de las rocas. Entre ellas cabe señalar la clasificación de Murray (1960), así como otras (Levorsen, de Harbaugh, de Robinson, de Klement, etc.) recogidas por Elf-Aquitaine (1977) y Flügel (1982). Pueden atender a distintos criterio de clasificación: las etapas en que se generan los poros, los procesos que intervienen o a ambos hechos.

Etapas (según Choquette y Pray, 1970):

- Primaria: - Predeposicional
- Deposicional
- Secundaria o diagenética: - Eogénesis (diagénesis temprana)
- Mesogénesis (diagénesis de enterramiento)
- Telogénesis (diagénesis tardía).

Procesos (según Elf-Aquitaine, 1977):

- Porosidad heredada
- Porosidad creada por destrucción de la materia orgánica
- Porosidad creada por organismos
- Porosidad de disolución
- Porosidad por transformación mineralógica
- Porosidad de origen mecánico.

Etapas y procesos (según Levorsen et al., tomado de Elf-Aquitaine, 1977):

- Primaria: - de bioconstrucción
- intergranular
- de lodos
- Secundaria: - de disolución
- de recristalización
- de dolomitización
- de fracturación.

2.3. Clasificación de Choquette y Pray (1970)

La clasificación de Choquette y Pray (1970) es la clasificación más utilizada, en especial los tipos básicos de poros que establece. Su éxito puede atribuirse a considerar tipos de poros descriptivos –fáciles de establecer en relación con la textura de la roca– que a la vez posee un acusado significado genético. Su aplicación requiere un conocimiento preciso de los componentes petrográficos que forman la parte sólida de la roca y de su disposición textural; a partir de ellos, el espacio poroso queda definido como parte complementaria respecto a dichos componentes sólidos.

La clasificación considera 15 tipos básicos de poro, sobre los cuales establece tres géneros de modificadores que permiten una caracterización más completa de los mismos, tanto desde el punto de vista geométrico como genético. Los modificadores matizan y adjetivan el carácter de la porosidad. Los tipos básicos de poro poseen unas características geométricas y normalmente llevan asociados otras genéticas, si bien estas últimas no se consideran en las definiciones. En consecuencia, se trata de 15 tipos descriptivos de poros, 7 de los cuales se consideran más frecuentes y los 8 restantes más esporádicos.

Entre sus características se da importancia al hecho de si la porosidad guardar o no relación con la textura de la roca, en este sentido la clasificación introduce la categoría de poros selectivos o no selectivos respecto a la fábrica de la roca. Con frecuencia la porosidad en las rocas no se presenta al azar, sino que es selectiva, y este concepto de poros de fábrica selectiva resulta muy útil a la hora de establecer el origen de la porosidad (Figuras 1 y 2).

Clasificación de Choquette y Pray (1970):

Tipos básicos de poros son (en cursiva se resaltan los poros más frecuentes):

- De fábrica selectiva:
 - *Interpartícula.*
 - *Intrapartícula.*
 - *Intercristalino.*
 - *Móldico.*
 - *Fenestral.*
 - De protección (shelter).
 - De construcción (framework).
- De fábrica no selectiva:
 - *Fractura.*
 - *Vacuola (vug).*
 - *Canal.*
 - *Caverna.*
- De fábrica selectiva o no:
 - *Brecha.*
 - *De removilización (burrow).*
 - *De perforación (boring).*
 - *De retracción (shrinkage).*

Modificadores genéticos:

- Proceso implicado:
 - Disolución.
 - Cementación.
 - Sedimentación interna.
- Etapa en que tiene lugar:
 - Primaria (predeposicional, deposicional).
 - Secundaria (eogénesis, mesogénesis, telogénesis).
- Sentido del proceso: Incremento. Reducción. Relleno.

Modificadores Geométricos:

- Tamaño de los poros: Megaporos. Mesoporos. Microporos.
- Forma de los poros.

Modificadores de abundancia:

- Porcentaje.

Esta clasificación permite además considerar sistemas porosos que sean compuestos o gradacionales respecto a los tipos básicos de poro. Así, con frecuencia, muchas calizas presentan más de un tipo de poro, que pueden analizarse separadamente teniendo en cuenta sus proporciones y relaciones en la porosidad total de la roca. Otras veces, como consecuencia de la acción de varios procesos, se presentan poros que pueden considerarse tipos intermedios respecto a los establecidos como básicos.

En resumen, se trata de una clasificación muy completa, detallada y precisa en cuanto a los tipos de poros, su origen y evolución; en contrapartida requiere un buen conocimiento de los procesos sedimentológicos para ser aplicada.

3. TIPOS DE POROS.

Se describen los principales tipos de poros siguiendo fundamentalmente la nomenclatura de Choquette y Pray (1970). De acuerdo con dichos autores los términos usados son meramente descriptivos, relativos al lugar donde se localizan; no obstante, gran parte de ellos tienen un importante significado genético. Se recogen también otros tipos menos abundantes que frecuentemente pueden relacionarse con los primeros, como variedades o poros asociados.

Cada uno de los tipos considerados se relaciona con el proceso al que se atribuye su origen con más frecuencia, reflejando a grandes rasgos la cronología de la porosidad en las rocas carbonatadas. Los tipos de poros considerados son los siguientes:

<u>CARACTER GENÉTICO</u>	<u>TIPOS DESCRIPTIVOS</u>
- Primarios:	• Intragranulares
- Predeposicionales	• Perforación (boring)
	• Bioconstrucción (framework)
- Deposicionales	• Intergranulares
	• Protección (shelter)
	• Fenestrales
	• Retracción (shrinkage)
	• Matriciales
	• Removilización (burrow).
- Secundarios:	• Intercristalinos
- Eogenéticos	• Intracristalinos
	• Móldicos
	• Seudomórficos
- Mesogenéticos	• Fracturas
	• Brechas
	• Estilolitos
- Telogenéticos	• Vacuolas (vug)
	• Cavidades o cavernas
	• Conductos o canales

Para cada tipo de poro se analizan las siguientes características:

- Localización:
 - Tipos de rocas en que suelen presentarse.
 - Lugar donde se sitúan dentro de la roca.
 - Relación con la fábrica (selectiva o no).
- Génesis:
 - Etapa en que se forman.
 - Proceso generador.
- Petrografía:
 - Tamaño de los poros y su variación.
 - Formas de los poros.
 - Tamaño de los accesos
 - Isotropía, homogeneidad.
- Propiedades:
 - Porosidad (abundancia de poros)
 - Permeabilidad (grado de comunicación)

3.1. Poros Intragranulares

Localización. Se presentan en las rocas granulas, dentro de los granos, normalmente en los bioclastos, constituyendo cavidades en relación con la estructura esquelética del organismo que genera los granos (cámaras de foraminíferos, zoecios de brios, etc.). Los poros guardan relación con la textura de la roca: son poros de fábrica selectiva.

Génesis. Pueden ser primarios o producidos en la diagénesis temprana: por maceración (descomposición de la materia orgánica del interior), por movilización o disolución de partes internas de los granos débilmente calcificadas (por ej: en Halimeda), o por perforación (“boring”) producida por otros organismos.

Petrografía. Los poros normalmente son de tamaño pequeño (0,01 a 1 mm) –según el organismo del que proceden–, con pocas o moderadas variaciones de tamaño, formas más o menos equidimensionales, y dan lugar normalmente a sistemas porosos isótropos. Pueden presentarse en elevada proporción –sobre todo en los depósitos actuales–, llegando a generar rocas de elevada porosidad. La comunicación entre los poros suele ser baja y, por tanto, también lo es la permeabilidad.

Variedades y tipos asociados:

Poros de perforación (“boring”). Son poros debidos a organismos litófagos que perforan los granos, o el armazón de la roca en las bioconstruidas, actuando siempre sobre materiales coherentes. Tienen lugar en etapas más o menos sinsedimentarias, aunque también pueden generarse guante la telogénesis en superficies meteorizadas. Su tamaño y morfología depende de las características de los organismos perforadores (algas, hongos, líquenes, etc.).

Poros de bioconstrucción (“growth-framework”). Son poros presentados por las rocas bioconstruidas –generadas in situ– y pueden considerarse próximos o a veces gradar a poros intragranulares. Dichos poros están constituidos por las cámaras y huecos dejados por los organismos durante su crecimiento. Los componentes que forman las rocas son ahora de tamaño mucho mayor y, en consecuencia, el tamaño de los poros es más elevado, y su grado de comunicación suele ser normalmente mayor.

3.2. Poros Intergranulares

Localización. Se presentan con disposición intersticial respecto a los granos. Esta porosidad es característica de las calizas con textura granuda (clástica, oolítica) –tipo grainstone–, en las cuales constituye la porosidad dominante en el momento del depósito. Son poros que dependen de la textura de la roca –de las características de sus granos–, y por tanto de fábrica selectiva.

Génesis. Se trata normalmente de poros primarios, debidos a la ausencia de matriz entre los granos en el depósito y de cemento durante la diagénesis. Este hecho puede deberse: a falta de flujo de agua, a la presencia de películas de arcilla o de sales alrededor de los granos que inhiban la precipitación, a un rápido enterramiento o al emplazamiento temprano de petróleo. Excepcionalmente pueden ser poros secundarios, por disolución selectiva de la matriz durante la diagénesis temprana.

Petrografía. Sus características –sobre todo en cuanto al tamaño de los poros y de sus accesos, así como al volumen poroso total que representan– varía con las características de los granos, fundamentalmente con su tamaño, forma, calibre y empaquetamiento. Morfológicamente son el negativo de los granos: el sistema poroso presenta formas intersticiales respecto a los granos.

En depósitos actuales o poco evolucionados el volumen de poros es elevado, siendo éstos de tamaño moderado (0,05 a 1 mm) y con poca variación, y normalmente se encuentran bien comunicados, excepto en presencia de matriz o compactación elevada. En consecuencia, estos poros suelen generar rocas de alta porosidad y alta permeabilidad. En ocasiones –dependiendo de la textura de la roca– pueden presentarse sistemas porosos anisótropos, dan lugar a permeabilidades también anisótropas.

Teóricamente, considerado un modelo ideal de poros intergranulares –a partir de granos esféricos todos del mismo tamaño–, la máxima porosidad se da para un empaquetamiento cúbico simple (45 %) y la mínima para un hexagonal compacto, rómbico (26 %). Un empaquetamiento denso al azar presenta una porosidad alrededor del 36% (Bourbié et al., 1987). En el caso de un empaquetamiento cúbico simple, si se toman esferas de radio unidad para los granos, el radio máximo de los poros es 0,73 y el radio máximo de los accesos de poro 0,41; en consecuencia, la distinción entre poros y accesos es difícil de establecer en este tipo de porosidad.

Variedades y tipos asociados:

Poros de protección (“shelter”). Son poros primarios generados cuando entre los granos se presentan algunos de mayor tamaño y de forma más o menos plana, impidiendo el depósito en la zona resguardada o de sombra de dicho grano.

3.3. Poros Fenestrales

Localización. Son espacios vacíos formados en el seno de la roca, mucho mayores que los que pueden ser soportados por sus componentes petrográficos. Se presentan en sedimentos finos, tipo mudstone: micritas laminadas a grumelares (mallas de algas), siendo característicos de ambientes supramareales. Son poros de fábrica selectiva: pueden relacionarse con la textura de la roca.

Génesis. Se atribuyen diversos orígenes a estos poros, entre los que destacan: retracción paralela a la estratificación o, frecuentemente, desprendimiento de burbujas de gas debido a la putrefacción de la materia orgánica. En rocas antiguas suelen aparecer rellenos de sedimento interno, de cemento espático, o de ambos elementos a la vez (generando en este último caso estructuras geopetales).

Petrografía. Son poros abundantes en determinadas facies, de tamaño relativamente elevado (0,01 a 10 mm) y variable, su forma es irregular y con frecuencia alargados según la estratificación, y suelen presentar pequeño tamaño de acceso de poro. En consecuencia, pueden generar rocas de porosidad relativamente elevada y de permeabilidad baja y anisótropa.

Variedades y tipos asociados

Poros de retracción (“shrinkage”). Son espacios vacíos primarios debidos a procesos de desecación que llevan asociados la aparición de grietas y fisuras; son de tamaño variable, más o menos perpendiculares y paralelas a la estratificación, y no guardan relación con la fábrica de la roca. También se presentan mayoritariamente en sedimentos finos de zonas inter a supramareales.

3.4. Poros Matriciales

Localización. Son poros asociados a la micrita (cristales de calcita inferiores a 4 μm), independientemente de que ésta se presente en los componentes aloquímicos o en la matriz de la roca. Por su localización pueden considerarse espacios intercristalinos a escala de los cristales de micrita y, por tanto, de fábrica selectiva. Este tipo de porosidad se presentan mayoritariamente en calizas mudstone y wackestone, si bien pueden aparecen en cualquier otro tipo petrográfico que tenga micrita.

Génesis. De acuerdo con su naturaleza –poros intercristalinos respecto a los cristales de micrita–, pueden considerarse contemporáneos de la micrita. En consecuencia, adquieren su configuración usual en etapas tempranas de la diagénesis, normalmente por evolución de la porosidad primaria –mucho más elevada– del sedimento lodoso del que procede la micrita. Cuando la roca recrystaliza y la calcita sobrepasa el tamaño micrita tiene lugar una pérdida drástica de porosidad.

Petrografía. Son espacios vacíos de muy pequeño tamaño (inferior a 0,1 μm) y de formas planares, atribuyéndose al sistema porosos una morfología del tipo red en nido de abeja. Aparecen asociados a la micrita, por lo que la porosidad generada por este tipo de poros, depende del porcentaje de micrita en la roca y de su grado de recrystalización, que condiciona del tamaño de los cristales.

En presencia únicamente de este tipo de poros, la porosidad generada en las rocas es baja (5 %) y su permeabilidad es muy baja o prácticamente nula, debido a la fuerza de capilaridad existente en poros de ese tamaño, que dificultan su movimiento.

Variedades y tipos asociados

Poros de removilización (“burrows”). Se consideran también poros matriciales, en relación con zonas de bioturbación, y también son propios de sedimentos finos: mudstone. Suelen presentar cristales de micrita de diferente tamaño; no obstante, estas zonas poseen porosidades y permeabilidades ligeramente superiores al resto de la roca. A veces esas zonas, concordantemente con su mayor aptitud para el paso de fluidos, presentan también fenómenos de dolomitización, incrementándose aún más la porosidad y la permeabilidad.

3.5. Poros intercristalinos

Localización. Son poros situados entre los cristales, propios por tanto de rocas cristalinas, esencialmente de las dolomías (por ej: dolomías sacaroideas). En las calizas se observa una disminución drástica de porosidad cuando la calcita supera el tamaño

micrita, por lo que esta porosidad no se presenta; las dolomías, contrariamente, presentan cristales euhedrales que genera abundantes espacios vacíos entre ellos. Se trata de una porosidad selectiva respecto a la fábrica de la roca y a veces también lo es respecto a la fábrica relictiva de la caliza preexistente, que condiciona el crecimiento cristalino durante la dolomitización.

Génesis. Los poros son debidos al crecimiento de cristales por fenómenos de recristalización y –en las rocas carbonatadas– por fenómenos de reemplazamiento: sustitución de calcita por dolomita. En consecuencia, se trata de poros generados en etapas diagenéticas más o menos tempranas o tardías, de acuerdo con el periodo de la dolomitización.

Petrografía. En este caso los poros son abundantes, su tamaño es en general pequeño (0,1 a 10 μm) –de acuerdo con el tamaño de los cristales– y homogéneo, y sus formas son más o menos prismáticas –intersticiales ahora respecto a los cristales– mostrando con frecuencia secciones poliédricas (forma de estrella). Los accesos de poro también presentan tamaño elevado y dependiente asimismo del de los cristales, y por tanto los poros están bien comunicados. El sistema poroso resultante es isótropo, siendo también en este caso muy difícil diferenciar poros y acceso de poro.

En consecuencia, este tipo de poros generan rocas de elevada porosidad y permeabilidad; además, la porosidad suele ser muy constante y uniforme, y la permeabilidad isótropa.

Variedades y tipos asociados

Poros intracristalinos. En las rocas carbonatadas este tipo de poros también se presentan fundamentalmente en las dolomías cristalinas –parte de su porosidad debe atribuirse a ellos– y, en general, existe buena comunicación entre ambos tipos de poros: intracristalinos e intercristalinos.

3.6. Poros Móldicos

Localización. Se trata de poros bastante frecuentes en los distintos tipos de calizas, que se caracterizan por su correspondencia con los componentes petrográficos de la roca (granos normalmente). Constituyen el molde, vaciado o positivo de los granos; se trata, por tanto, poros de fábrica selectiva. Son característicos de rocas con textura granuda.

Génesis. Son poros secundarios, generados normalmente por disolución selectiva de los granos en etapas más o menos tempranas de la diagénesis. Las diferencias de solubilidad de algunos granos, respecto al resto de la roca, pueden deberse a varias causas: su composición mineral (aragonito/calcita, yeso/calcita, calcita/dolomita), el tamaño de los cristales, su estructura interna (presencia de inclusiones, poros primarios).

Muchos poros móldicos se forman también en etapas de enterramiento más tardías, en relación con el agua retenida por las arcillas –relativamente dulce–, o por el agua asociada al frente de avance de los hidrocarburos.

Petrografía. El tamaño y forma de los poros guarda relación con el de los granos sustituidos. Normalmente el tamaño es elevado (0,2 a 10 mm) y su variación moderada.

El sistema poroso generado es isótropo, si bien a mayor escala –de estratos– puede resultar anisótropo. Cuando abunda este tipo de poros o éstos presentan tamaño elevado, la porosidad que presenta la roca es importante; no obstante, el tamaño de sus accesos suele ser pequeño y la conexión entre los poros más o menos baja. Un modelo poroso granular ideal, requiere porosidades superiores al 30 % para que exista una buena comunicación entre sus poros.

En consecuencia, este tipo de poros puede generar rocas con elevada porosidad, pero baja permeabilidad y baja eficiencia en el drenaje, mientras la porosidad no alcance valores superiores al 30 %.

Variedades y tipos asociados

Poros pseudomórficos. Se aplica este término a poros móldicos cuando el componente sustituido es un cristal –generalmente euhedral y autógeno–, como con frecuencia se presenta la dolomita secundaria, el yeso, la anhidrita o la halita en las rocas carbonatadas. Son poros fáciles de identificar por su morfología y con frecuencia permiten determinar el componente disuelto del que proceden.

3.7. Fracturas

Localización. La porosidad de fractura se presenta formando redes paralelas o conjugadas en las rocas frágiles y homogéneas. Son propias de las calizas y dolomías cristalinas y en las cretas; en concreto, la porosidad de las calizas cristalinas se atribuye mayoritariamente a este tipo de vacíos. Debe tenerse en cuenta que la presencia de fracturas en los materiales rocosos depende de la escala considerada; así, es frecuente que prácticamente no exista en la roca matriz y sea importante a escala de campo. Se trata de una porosidad de fábrica no selectiva.

Génesis. Las fisuras son secundarias, se generan en etapas más o menos tardías de la diagénesis, después del enterramiento y la litificación. Suelen presentarse asociadas a distintos procesos (pliegues, fallas, domos de sal, disolución de niveles salinos, sobrepresión de fluidos), estando relacionadas con la tectónica local. Pueden contribuir al desarrollo de otros tipos de poros (por ej: vaculares), ya que facilitan la circulación de fluidos.

Petrografía. Las fisuras forman en redes paralelas o conjugadas, con formas planares y tamaños muy variables, alrededor de décimas de milímetro. Su contribución al volumen poroso de la roca es muy baja, pero –en presencia de otros tipos de vacíos– la comunicación que producen en el sistema poroso es elevada. De acuerdo con su disposición espacial, puede generar importantes anisotropías en las rocas.

En consecuencia, la porosidad generada por fisuración es baja normalmente, aunque muy importante, ya que supone un incremento de la permeabilidad (sobre todo en rocas porosas, que presenten los poros mal comunicados), y por su influencia en el comportamiento mecánico de las rocas.

Variedades y tipos de poros asociados

Poros de brecha. Las fracturas pueden pasar de forma gradual a este tipo de

poros cuando llevan asociadas el desplazamiento de los bloques. Esta porosidad suele aparecer asociada al colapso de las capas suprayacentes, debido a distintos procesos: disolución, deslizamiento o deformación tectónica.

Poros de estilolitos. Son espacios vacíos que se presentan en dichas estructuras, cuya génesis puede atribuirse a la existencia inicial de fisuras, circulación de fluidos y procesos de disolución por presión en etapas de enterramiento. Su contribución a la porosidad es muy baja; no obstante, presentan interés –como las fisuras– en relación con la migración de fluidos y la existencia de permeabilidades anisótropas.

3.8. Poros vacuolares (vug)

Localización. Constituyen otro tipo de poros frecuentes en las calizas, caracterizados por el elevado tamaño que pueden alcanzar –visibles normalmente a simple vista– y por presentarse sin relación con la textura de la roca: la porosidad generada es de fábrica no selectiva. Pueden aparecer en todos los tipos de calizas litificadas, es decir que han sufrido en mayor o menor medida procesos de recristalización y homogeneización.

Génesis. Son poros secundarios formados fundamentalmente en etapas tardías de la diagénesis por procesos de disolución. Suelen presentarse en relación con procesos de meteorización cárstica (en climas húmedos, con circulación de aguas dulces). Normalmente la disolución comienza en otros tipos de poros (móldico, intergranular) y, con frecuencia, la roca muestra poros de tipo intermedio, correspondientes tanto a poros primarios como secundarios realizados por disolución.

Petrografía. El tamaño y forma de los poros es muy variable. En general, el tamaño es elevado a muy elevado (1 mm a 1 m) y la variación de tamaños muy grande. La forma de los poros es muy irregular, con poros equidimensionales a muy alargados (conductos); su grado de comunicación suele ser bajo. El sistema poroso generado por este tipo de poros con frecuencia es isótropo.

La porosidad y permeabilidad de la roca va a depender del tamaño y número de poros presentes y de su conectividad. En general este tipo de poros da lugar a rocas de elevada porosidad y baja permeabilidad.

Variedades y tipos asociados

Cavidades o Cavernas. Espacios vacíos que constituyen grandes cavidades o cavernas, más o menos equidimensionales, debidas generalmente a fenómenos de disolución. Su tamaño puede situarse alrededor de medio metro (por ej: que admita una persona adulta, que se note el salto del taladro en sondeos).

Conductos o Canales. Se aplica a poros alargados, con notable continuidad en una de sus dimensiones normalmente –a veces en dos– (su longitud debe ser unas 10 veces superior a su sección). Cuando la sección de estos espacios vacíos es inferior a 60 μm se denominan microcanales. Su morfología es, por tanto, más o menos cilíndrica y pueden encontrarse asociados a los anteriores, como conductos que comunican grandes poros (cavidades).

4. RELACIÓN CON LAS FACIES

Las distintas facies sedimentarias –asociadas a los diferentes tipos rocosos– muestran elevada influencia sobre la porosidad y permeabilidad de las rocas carbonatadas. Este hecho es bien conocido en el campo aplicado; así, en gran medida, los estudios sobre facies han sido impulsados por la industria del petróleo. Este interés por las facies y su relación con los tipos petrográficos es compartido por otros usos y aplicaciones de las rocas carbonatadas (Flügel, 1982).

De la misma forma que las facies controlan la composición y textura deposicional, así como muchos procesos diagenéticos (dolomitización, disolución selectiva, cementación, etc.), también controlan la porosidad primaria y, con frecuencia, la secundaria, cuando ésta depende de la primaria (Figura 3).

En este sentido, pueden establecerse las siguientes relaciones:

- Zonas de plataforma: porosidad intragranular
 - intermareal: porosidad fenestral
 - submareal: porosidad matricial
- Arenas oolíticas y bioclásticas: porosidad intergranular.
- Zonas de arrecife: porosidad de bioconstrucción
- Zonas de talud.

Comparación de la porosidad entre areniscas y calizas

Resulta ilustrativo comparar la porosidad –así como otros elementos petrográficos– entre areniscas y calizas. En primer lugar destaca la elevada porosidad inicial en ambos materiales, es decir como sedimentos, y después la mayor reducción que experimenta esa porosidad inicial durante la diagénesis en las calizas:

	<u>Areniscas</u>	<u>Calizas</u>
– Porosidad inicial.....	25 - 40%	0 - 70 %
– Porosidad final	15 - 30 %	5 - 15 %
– Tipos de poros iniciales.....	Intergranulares	Inter/Intragranulares
– Tipos de poros finales.....	Intergranulares	Variados
– Relación entre el tamaño de poros y granos...	Elevada	Poca
– Relación entre la forma de poros y granos....	Negativo	Variada
– Homogeneidad de un cuerpo rocoso.....	Elevada	Variable
– Influencia la de diagénesis.....	Poca	Mucha
– Evaluación visual.....	Fácil	Variable
– Relación con la permeabilidad.....	Buena	Variable

5. EVOLUCION DURANTE LA DIAGÉNESIS.

La porosidad primaria siempre es elevada y a veces supera el 70 % en el depósito. En relación con las facies pueden considerarse valores significativos de porosidad:

- lodos de lagoon y barros pelágicos: 70 %
- arrecife y fragmentos de arrecife: 60 %
- arenas de ooides o bioclastos: 40%.

La reducción posterior de la porosidad –durante la diagénesis– es muy fuerte. De

acuerdo con la edad de las rocas pueden tomarse como referencia los siguientes valores:

- rocas modernas: porosidad inferior normalmente al 25 %,
- calizas pre-terciarias: porosidad inferior normalmente al 3%.

Procesos que favorecen la porosidad (Figuras 4 y 5):

- Porosidad primaria elevada.
- Conservación de la porosidad primaria:
 - por cementación temprana: formación de un armazón rígido (la cementación de carbonatos es más rápida en la zona freática y en aguas dulces)
 - en ausencia de compactación: enterramiento poco profundo
 - por presentar minerales estables
 - por existir barreras de permeabilidad
 - por la entrada de petróleo.
- Creación de la porosidad secundaria:
 - por disolución en aguas dulces (en presencia de minerales inestables la disolución generan moldes: porosidad móldica)
 - por acción de organismos
 - por cambios mineralógicos: dolomitización
 - por expulsión del agua de las arcillas
 - por migración de petróleo
 - por el desarrollo de fases tensionales, que generan fractura o estilolitos.

Procesos que destruyen la porosidad (Figuras 4 y 5):

La destrucción de la porosidad está relacionada con la profundidad de enterramiento que alcanza el material y que controla en gran medida su diagénesis (ver gráfico: porosidad / profundidad de enterramiento).

Entre los procesos que intervienen cabe citar:

- Sedimentación interna
- Compactación mecánica
- Cementación temprana
- Cementación tardía
- Disolución por presión.

La evolución de la porosidad –asociada a los procesos de litificación– tiene un sentido de pérdida normalmente, si bien en etapas parciales puede haber ganancia relativa de porosidad.

Etapas y desarrollo de la porosidad:

- Sedimentación: formación de porosidad primaria. Puede tener lugar en:
 - depósitos de alta energía: poros intergranulares, de bioconstrucciones
 - en relación con organismos: poros de protección
 - depósitos de baja energía: poros fenestrales
- Eogénesis o diagénesis temprana: pérdida muy importante de porosidad. Pueden generarse nuevos poros (porosidad secundaria): poros móldicos, etc.
- Mesogénesis o diagénesis de enterramiento: pérdida de porosidad. En etapas de distensión puede producirse fisuración.

- Telogénesis o diagénesis tardía: creación más o menos importante de porosidad (porosidad secundaria): poros vacuolares, fisuras, etc.

6. INTERÉS DE SU ESTUDIO.

El conocimiento de la porosidad de las rocas carbonatadas, presenta interés tanto desde el punto de vista científico como aplicado.

Científico. El origen y evolución de la porosidad es fundamental en el estudio de las rocas carbonatadas, tanto por su relación con los procesos formadores de dichas rocas, como en la valoración de las propias rocas en sí mismas, para utilizarlas con fin determinado.

Como se ha indicado, las distintas facies presentan acusadas diferencias de porosidad, que pueden relacionarse con los procesos físicos y químicos desarrollados en el ambiente sedimentario; pero la porosidad es, sobre todo, uno de los parámetros petrográficos de mayor importancia durante la diagénesis. La porosidad afecta en mayor o menor grado a todos los procesos diagenéticos (micritización, compactación, disolución, cementación, recristalización, reemplazamiento) y, recíprocamente, todos esos procesos la modifican. Esto es debido a que la mayoría de los procesos son consecuencia de la interacción que tiene lugar en el seno de la roca entre la parte sólida y los fluidos, los cuales están en los poros, moviéndose a mayor o menor velocidad por el sistema poroso.

En cuanto a las propias rocas en sí la porosidad puede considerarse un componente petrográfico de sumo interés, ya que confiere a las rocas unas propiedades: dureza, resistencia, porosidad, permeabilidad, y las hace aptas o muy adecuadas en distintas aplicaciones. Presenta gran interés el estudio de la influencia de la porosidad en el comportamiento de las rocas.

Relación de la porosidad con otras propiedades físicas:

- Densidad aparente o de la roca seca (ρ_d): $\rho_d = (1 - n / 100) \rho_s$
- Contenido máximo en agua (w_s): $w_s = (n_o * \rho_a) / \rho_d$
(donde, ρ_s : densidad real, de la fracción sólida o de los granos minerales, n : porosidad total, n_o : porosidad abierta).
- Permeabilidad: aumentan con la porosidad y con el tamaño de los poros.
- Capilaridad (coeficientes de absorción y penetración capilar): aumenta con la porosidad y con el tamaño de los poros.
- Capilaridad (altura máxima ascendida): disminuye con el tamaño de los poros.
- Absorción de agua: aumenta con la porosidad.
- Hinchamiento: aumenta con la porosidad.
- Dureza: disminuye con la porosidad.
- Propiedades mecánicas (resistencia, módulos): disminuyen con la porosidad.
- Propiedades dinámicas (velocidad, módulos): disminuyen con la porosidad.
- Propiedades térmicas (expansión, conductividad): disminuyen con la porosidad.

Aplicado. Pueden señalarse diversos aspectos aplicados de las rocas carbonatadas, en los que la porosidad es el parámetro que presenta mayor interés.

- Como almacén de fluidos: reservorios de petróleo, de gas natural, acuíferos. Así, por ejemplo, el 40% del petróleo que se extrae proviene de rocas carbonatadas. También pueden presentar gran interés como acuíferos.
- En la génesis de los yacimientos minerales hidrotermales. Los yacimientos formados a partir de fluidos de baja temperatura, que aprovechan la porosidad de calizas y dolomías para utilizarlas como roca encajante (yacimientos de Pb-Zn: galena, esfalerita).
- En geotecnia y rocas industriales, la porosidad suele ser el parámetro petrográfico que muestra mayor influencia en las propiedades físicas –ya veces también en las químicas– de las rocas. Es por tanto un factor fundamental a la hora de valorar el comportamiento de las rocas, o la adecuación de su utilización. En particular, todos los procesos de alteración de los materiales rocosos dependen en último extremo de dos hechos: presencia de agua en el ambiente y existencia de poros en las rocas.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- Alonso, F.J., Esbert, R.M. y Ordaz, J. (1987). Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. Boletín Geológico y Minero, 98: 226-237.
- Archie, G.E. (1952). Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 36: 278-298.
- Bertrand, J.P. (1969). Cours de pétrographie, appliquée à l'étude des problèmes pétroliers. Tome 1: Etude des roches. Technip, Paris, 130 p.
- Bourbie, T., Coussy, O. y Zinszner, B. (1987). Acoustic of porous media. Technip, Paris, 334 p.
- Choquette, P.W. y Pray, L.C (1970) .Geologic nomenclature and classification of porosity. Bull. AAPG 54: 207-250.
- Elf-Aquitaine (1977). Essai de caractérisation sédimentologique: des dépôts carbonatés. 2. Eléments d'interprétation. Elf-Aquitaine, Boussens et Pau, 230 p.
- Enos, P. (1988). Evolution pore space in the Poza Rica trend (Mid-Cretaceous), México. Sedimentology, 35: 287-325.
- Flügel, E (1982). Microfacies analysis of limestones. SpringerVerlag, Berlin, 633 p.
- Haynes, J.M. (1973). Determination of pore properties of constructional and other materials. General introduction and classifications of methods. Matériaux et Constructions (Bull. RILEM) 33: 169-174.
- Pittman, E.D. (1971). Microporosity in carbonate rocks. Bull. AAPG 55. 1873-1881.
- Sander, H.J. (1967). Classification of carbonate rocks of marine origin. Bull. AAPG 51: 325-336.
- Scoffin, T.P. (1987). An introduction to carbonate sediments and rocks. Blackie, Glasgow, 274 p.
- Selley, R.C. (1982). An introduction to sedimentology. Academic Press, London, 417 p.