

Influencia del soterramiento en la calidad de los reservorios de hidrocarburos: fundamentos, metodologías prácticas de reconocimiento e interpretación

Eduardo A. ROSSELLO

CONICET - Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Email: ea_rossello@yahoo.com.ar

Editor: Diego A. Kietzmann

RESUMEN

Se proporcionan rasgos micro y mesoscópicos reconocibles en afloramientos, núcleos y/o imágenes que permiten identificar la presencia de aplastamientos por soterramiento que influyen en la interpretación de las características petrofísicas de litologías que sostienen un sistema petrolero. A su vez, el soterramiento determina variaciones de tasas de compactación en función de las características petrológicas y tectosedimentarias originales que pueden afectar interpretaciones tectónicas y estratigráficas. Los niveles pelíticos y carbonáticos son los principales contribuyentes del aplastamiento ya que pueden sufrir más del 40% de reducción de sus potencias con respecto a los valores originales debido a la expulsión del agua que acompañó a su depositación complementada por la reorganización de los minerales laminares. Estas modificaciones impactan sobre las evaluaciones tectosedimentarias y directamente en la calidad de las condiciones petrofísicas (porosidad y permeabilidad) de las rocas que son esenciales en la definición del potencial exploratorio y/o productivo de sistemas petroleros asociados.

Palabras claves: *Soterramiento, Petrofísica, Geomecánica, Deformación, exploración/producción de hidrocarburos*

ABSTRACT

Burial influence on hydrocarbon reservoirs quality: fundamentals, practical methodologies for recognition and interpretation

Recognizable micro- and mesoscopic features in outcrops, cores and/or images that identify the presence of flattening by burial that influence the interpretation of the petrophysical characteristics of lithologies that support an oil system are described. Also, the burial determines variations of compaction rates in function of the original petrological and tectosedimentary characteristics that can affect tectonic and stratigraphic interpretations. The pelitic and carbonate levels are the main contributors to the flattening because they can suffer more than 40% reduction of their thickness with respect to the original values due to the expulsion of the water that accompanied their deposition complemented by the reorganization of the laminar minerals. These modifications have an impact on the tectosedimentary evaluations and directly on the quality of the petrophysical conditions (porosity and permeability) of the rocks that are essential in the definition of the exploratory and / or productive potential of associated petroleum systems.

Keywords: *Burial, Petrophysics, Geomechanics, Strain, Hydrocarbon exploration/production*

INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos y otros fluidos contenidos en una roca se encuentran dentro de su espacio poroso, de ahí la importancia de conocer el tipo de porosidad que domina en un cuerpo de roca y su evolución en relación con la historia de la roca y de la generación y migración de los fluidos. Se describe la influencia del soterramiento (de soterrar, *v. tr.* poner una cosa bajo tierra, enterrar), debido al incremento de la presión confinante y temperatura en ambientes relacionados con la profundidad que influyen en las respuestas deformativas de las litologías involucradas en las características estructurales, estratigráficas y petrofísicas de potenciales objetivos exploratorios.

El objetivo del presente trabajo es proporcionar una serie de rasgos micro y mesoscópicos que evidencian la presencia de aplastamientos por soterramiento que pueden contribuir con una mejor interpretación de las características petrofísicas de litologías que sostienen un sistema petrolero. La mayoría de las situaciones presentadas en este trabajo de modo simplificado se identificaron en estudios concretos de casos reales de investigaciones en proyectos exploratorios y campos de hidrocarburos de Colombia, Argentina y México.

En 1868, Von Gumbel crea el término "diagénesis" para expresar las transformaciones posteriores a la acumulación del material y luego Walther en los años 1893-1894 definió definitivamente la diagénesis como las transformaciones entre la sedimentación y antes del metamorfismo (Pettijohn 1975, Worden y Burley 2003, Ali *et al.* 2010). En el caso de los sedimentos, la diagénesis constituye el resultado del conjunto de cambios físicos y químicos que los afectan a partir de su depositación y que se producen a temperaturas y presiones relativamente bajas con respecto a las presentes en el metamorfismo (Pettijohn 1975, Ramm y Bjørlykke 1994). Por ello, se considera que los cambios diagenéticos son los que tienen lugar a temperaturas inferiores a 300 °C y a presiones de menos de 100 a 200 Mega Pascales (MPa) o Newtons por metro cuadrado (N/m²). No obstante, los límites entre diagénesis y metamorfismo

suelen ser muy difusos y dependientes de otras variables regionales y locales al punto que el extremo superior de un fenómeno se confunde con el inferior del otro. El conjunto de los fenómenos diagenéticos - como cementación, compactación, sustitución y recristalización - transforman las partículas sin consolidar que constituyen el sedimento en una roca sedimentaria compacta. La formación de esta roca dura a partir de los elementos sueltos se llama litificación. Son ejemplos la transformación de arena en arenisca, de fango en arcillita o de turba en hulla. Estas modificaciones litológicas impactan directamente en la calidad de las condiciones petrofísicas (porosidad y permeabilidad) de las rocas que son esenciales en la definición del potencial exploratorio y/o productivo de sistemas petroleros asociados. Por esta razón, se proporcionan conceptos básicos, hipótesis de trabajo y ejemplos con la finalidad de contribuir con la descripción e interpretación de estos aspectos.

VARIACIONES DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA CON LA PROFUNDIDAD

A medida que aumenta la profundidad se incrementa la temperatura debido al

gradiente geotérmico de la corteza terrestre. Este gradiente tiende a ser más elevado en ambientes basamentales que en las cuencas sedimentarias donde la acumulación de materiales sedimentarios superficiales más fríos producen su atenuación (Fig. 1).

La influencia de la sobrecarga es un factor determinante del incremento del esfuerzo vertical y de la generación de condiciones litostáticas que pueden equilibrar notablemente la acción de esfuerzos tangenciales relacionados con las convergencias tectónicas (Fig. 2). De este modo, teniéndose en cuenta los conceptos de Mohr-Coulomb (Hatcher 1995) al igualarse los módulos de los esfuerzos desaparecen las posibilidades de generar deformación discontinua (fallamientos).

En un análisis bidimensional de las relaciones entre los esfuerzos originados por escenarios tectónicos regionales tangenciales y los esfuerzos verticales locales generados por el soterramiento se pueden reconocer importantes diferencias en las respuestas deformativas (Fig. 3). De esta manera, a cierta profundidad los esfuerzos mayores tangenciales (σ_n regional) pueden equilibrarse, o incluso ser superados, por los esfuerzos mayores verticales generados por la sobrecarga local por el apilamiento de las secuencias suprayacentes σ_v local).

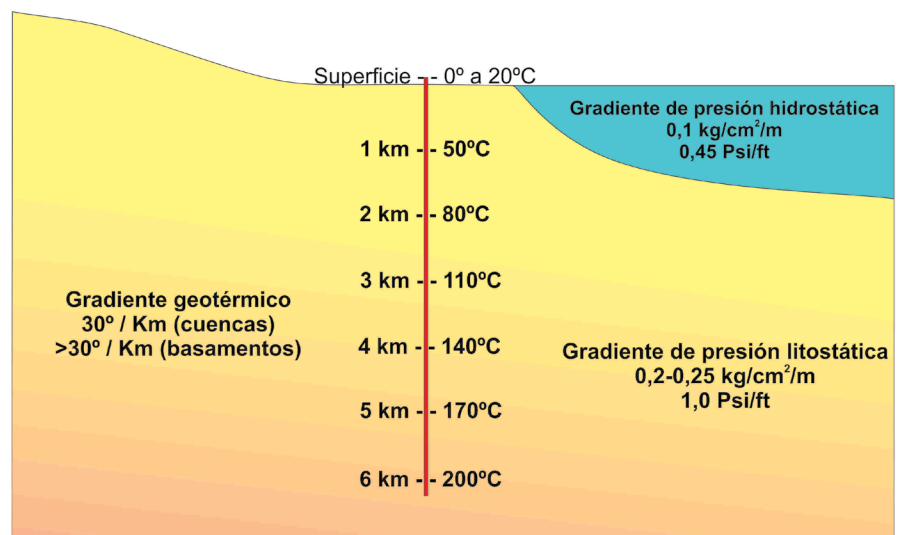


Figura 1. Esquema que muestra los valores generales de gradiente geotérmico y presiones por soterramientos dependientes de la profundidad (a partir de datos de Price y Cosgrove 1990).

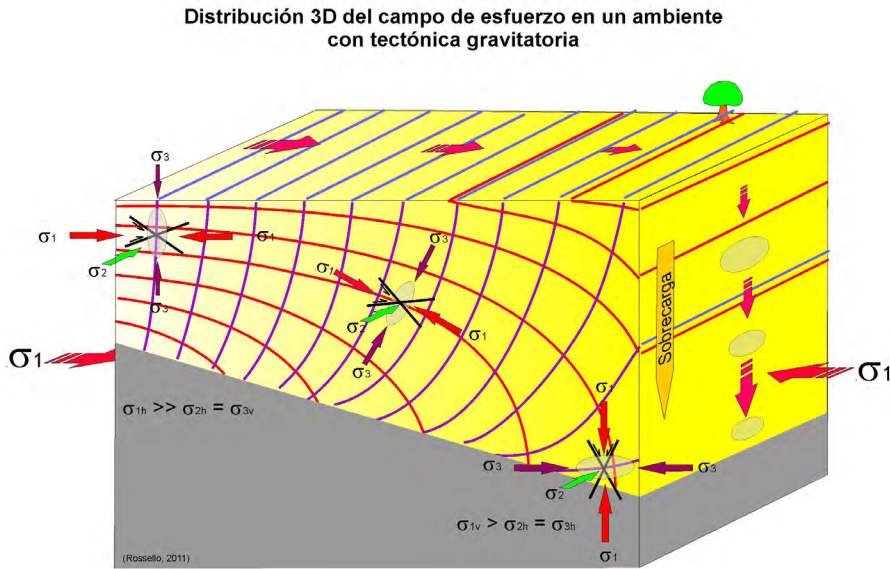


Figura 2. Esquema 3D de la distribución del campo de esfuerzos en función de la profundidad debido a la influencia del soterramiento. Se indican las trayectorias de los esfuerzos. Las líneas de trazos delimitan zonas de igual esfuerzos de cizallamiento máximo (modificado de Hafner 1951).

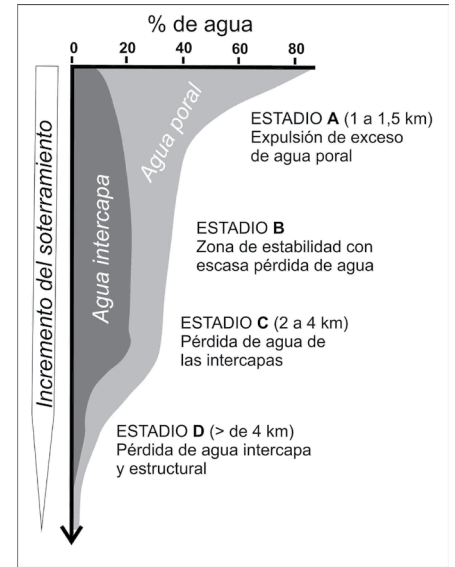


Figura 4. Esquema de los distintos estadios de expulsión de aguas de un sedimento-roca en función del soterramiento (modificado de Bloch *et al.* 2002).

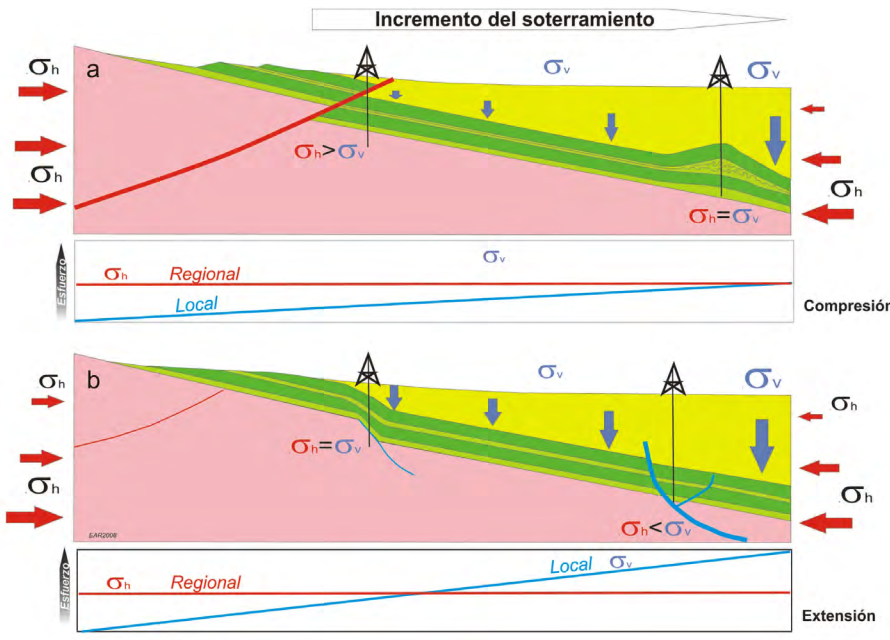


Figura 3. Esquema bidimensional de la distribución del campo de esfuerzos en una secuencia sedimentaria en función de la profundidad debido a la influencia del soterramiento. a) Situación donde el esfuerzo mayor tangencial (σ_h Regional) se equilibra hacia la derecha con la sobrecarga local por soterramiento (σ_v Local); b) Caso donde hacia la derecha la sobrecarga local por soterramiento (σ_v Local) supera el esfuerzo horizontal tangencial regional (σ_h Regional).

DIAGÉNESIS Y PROPIEDADES PETROFÍSICAS

Durante el soterramiento, la compactación llega a ser un proceso progresivo que impacta de manera importante sobre la poro-

sidad y permeabilidad de las rocas (Taylor 1950, Beard *et al.* 1973, Amaefule *et al.* 1988, Tucker y Bathurst 1990, Kupecz *et al.* 1997, Worden y Burley 2003).

En las etapas tempranas la compactación mecánica es más importante y resulta en un empaquetamiento cerrado y fractura-

miento de granos. El soterramiento afecta diferencialmente a los materiales con respuestas deformativas diversas que admiten tasas de aplastamientos que suelen ser muy contrastadas, como los que expresan las secuencias silicoclásticas gruesas más competentes con respecto a las pelíticas más deformables. Estas últimas suelen tener un volumen inicial al depositarse como fangos o lodos con más del 40% debido a la presencia del agua que será expulsada en los procesos diagenéticos vinculados con su soterramiento (Füchtbauer 1967, Schmidt y McDonald 1979, Pittman 1979). Eventualmente, se puede presentar compactación química que conduce a la disolución en los contactos entre granos y forma fábricas ajustadas (Fig. 4). Según Choquette y Pray (1970), los factores más importantes que influyen en la diagénesis de rocas carbonáticas son:

- 1) La mineralogía propia de las partículas (v. gr., la calcita con alto magnesio y la aragonita son menos estables y tienden a cambiar a calcita con bajo magnesio).
- 2) El tamaño de grano porque cuanto más finos mayor interacción con los fluidos.
- 3) El volumen y movilización de los fluidos.
- 4) Las variables de la química de los fluidos, entre otras el grado de saturación de la relación Mg/Ca y la salinidad.
- 5) El grado de acidez o pH, debido a que los carbonatos son muy sensibles a la di

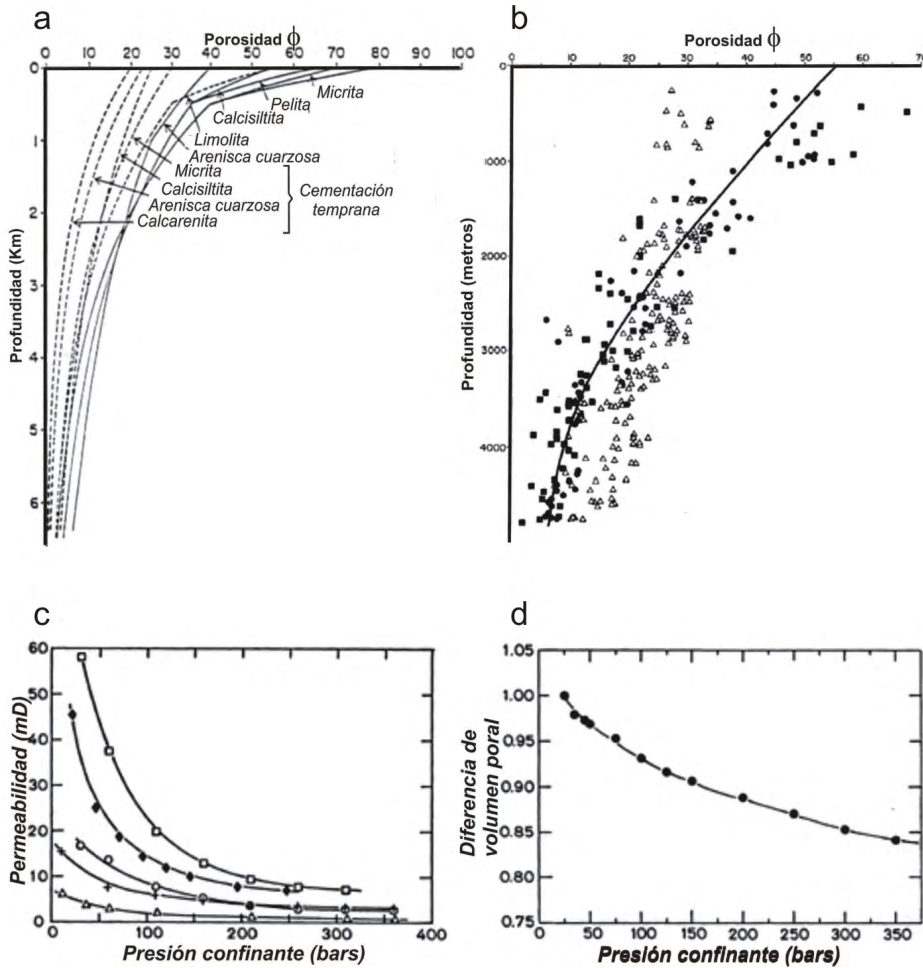


Figura 5. Ejemplos de variaciones de la porosidad y permeabilidad con el soterramiento: a) Ejemplos de pérdida de porosidad en diferentes litologías; b) Valores obtenidos a partir de perfiles de densidad (cuadrados), sínicos (círculos) y núcleos laterales (triángulos); c) Efectos de reducción sobre la permeabilidad de una arenisca; d) efectos de reducción de la porosidad en una arenisca productora (tomados de Ehrenberg y Nadeau 2005, Bjørlykke 2014, entre otros).

solución en ambientes de mayor acidez.

- 6) La presión de CO₂, pues los incrementos producen disolución y las disminuciones precipitación de carbonatos.
- 7) Las sales en solución.
- 8) La temperatura, ya que si un fluido está saturado en carbonato de calcio la mayor temperatura puede causar precipitación.
- 9) La presión, pues la solubilidad de los carbonatos se incrementa con la presión.

A estos factores, se les pueden agregar el tiempo de permanencia en estas situaciones y las condiciones de estabilidad de los mismos durante la vigencia del soterramiento.

La diagénesis de carbonatos incluye los procesos de cementación, micritización microbial, neomorfismo, disolución, compactación (mecánica y química) y dolomitización que se pueden presentar en

diferentes eventos de acuerdo con la evolución del ambiente diagenético (Tucker y Bathurst 1990). En estas litologías la cementación juega un papel primordial en la oclusión y preservación de la porosidad y toma lugar a partir de la entrada de fluidos supersaturados en cantidades entre 100 y 1000 veces el volumen del poro cementado (Ehrenberg y Nadeau 2005).

En ambientes marinos la fuente de carbonato de calcio es el agua misma bombeada a través del sedimento por la energía de las mareas y olas. En ambientes meteóricos y de subsuelo el carbonato de calcio deriva de la disolución del sedimento y la roca misma.

Se describen numerosos ejemplos donde los efectos del soterramiento influyen directamente en la progresiva disminución de las calidades petrofísicas de los

reservorios al impactar sobre el desmejoramiento progresivo de sus porosidades y permeabilidades (Fig. 5). El progresivo soterramiento modifica el espesor de los sedimentos debido a la compactación, expulsión de fluidos, reducción en la porosidad y cementación (Athy 1930, Scasso y Limarino 1997, Bloch *et al.* 2002, Sathar y Jones 2016). En cuencas sedimentarias actuales o recientes el nivel de soterramiento puede ser evaluado a través de los cambios en porosidad aunque en cuencas más antiguas deben aplicarse técnicas de des-cementación.

Una medida de la compactación es la porosidad y para el cálculo de la densidad original (y luego el espesor) se requiere conocer la porosidad actual y calcular la porosidad original.

La porosidad actual puede estimarse o medirse con técnicas petrográficas o con datos de subsuelo. La porosidad inicial puede deducirse a partir de curvas que relacionan la porosidad con la profundidad o fórmulas que representan esa misma relación tal como (Ecuación 1):

$$1) \Phi = \Phi_0 e^{-cz}$$

Donde Φ es la porosidad medida, Φ_0 la porosidad original, e es la base de los logaritmos naturales, c es una constante que depende de cada litología (e.g., para pelitas es de alrededor de 0,51 km⁻¹, para areniscas de 0,27 km⁻¹ y para areniscas fangosas puede ser de 0,39 km⁻¹) y z es la profundidad.

Si se asume que los granos no se deforman, la variación en el espesor de la secuencia se relaciona directamente con la porosidad (Ecuación 2) y por lo tanto:

$$2) S_i^* = S_i (1 - \Phi_i) / (1 - \Phi_i^*)$$

Donde S_i^* es el espesor del intervalo descompactado y S_i es el espesor del intervalo en profundidad, Φ_i es la porosidad inicial y Φ_i^* es la porosidad descompactada.

Del mismo modo, la densidad promedio δ del intervalo se relaciona con los valores generados por la compactación (Ecuación 3):

$$3) \delta_{si} = \delta_w \Phi_i^* + \delta_{gi} (1 - \Phi_i^*)$$

Donde δ_{si} y δ_{gi} corresponden a la densidad promedio del intervalo y la densidad de los sedimentos descompactados.

El espesor total de una secuencia S^* puede ser calculado tomándose los espesores individuales de los diferentes niveles involucrados (Ecuación 4):

$$4) E_0 = (1 - \Phi_n) E_n / 1 - \Phi_0$$

Donde E_0 es el espesor original y E_n es el espesor compactado

En el caso de la densidad, la masa total debe ser la suma de las masas de los n intervalos individuales considerados (Ecuación 5), por lo tanto:

$$5) \delta_s = \sum [\delta_w \Phi_i^* + \delta_{gi} (1 - \Phi_i^*)] S_i^* / S^*$$

A partir de un análisis idealizado de la evolución de un sedimento desde su depositación en un ambiente superficial y sus posteriores modificaciones diagenéticas por los incrementos de presiones

confinantes y temperaturas debidas a su soterramiento y posterior exhumación se pueden apreciar notables modificaciones en sus características petrofísicas (Fig. 6). Esta situación tan variable puede reconocerse si se accede a muestras de la misma formación a partir de pozos, pero en localizaciones actualmente diferentes:

- i) Próxima a la superficie terrestre donde al permanecer constantemente en niveles someros tuvo siempre un mínimo soterramiento y mantuvo sus características iniciales,
- ii) En una ubicación profunda donde ha sufrido un gran soterramiento generador de condiciones cercanas al metamorfismo que desarrolló estilolitas subhorizontales y fracturas y venulaciones subverticales y
- iii) En una porción somera pero luego de haber sufrido un importante soterramiento al haber estado en un ambiente como el anterior (Fig. 7).

A partir de estos análisis es posible identificar dentro de un mismo nivel de reser-

vorio situaciones petrofísicas controladas por rasgos deformacionales continuos y discontinuos con posiciones espaciales producidas por una historia de soterramiento y exhumación diferencial muy intensa en un sector.

CONSECUENCIAS DEL SOTERRAMIENTO EN LA ESTRATIGRAFÍA

Gracias a la presencia de elementos con respuestas mecánicas competentes (secuencias silicoclásticas gruesas, concreciones, fósiles, bloques, etc.) incluidos en secuencias mecánicamente menos competentes como las pelitas es posible cuantificar la tasa de aplastamiento (Coneybeare 1967). Esto es posible al poder determinarse la diferencia de potencias entre niveles guías a través de los objetos competentes y por fuera de ellos (Fig. 8). De este modo, el soterramiento diferencial

Modelo imaginativo de condiciones de enterramiento y exhumación asociado con la generación de fracturas

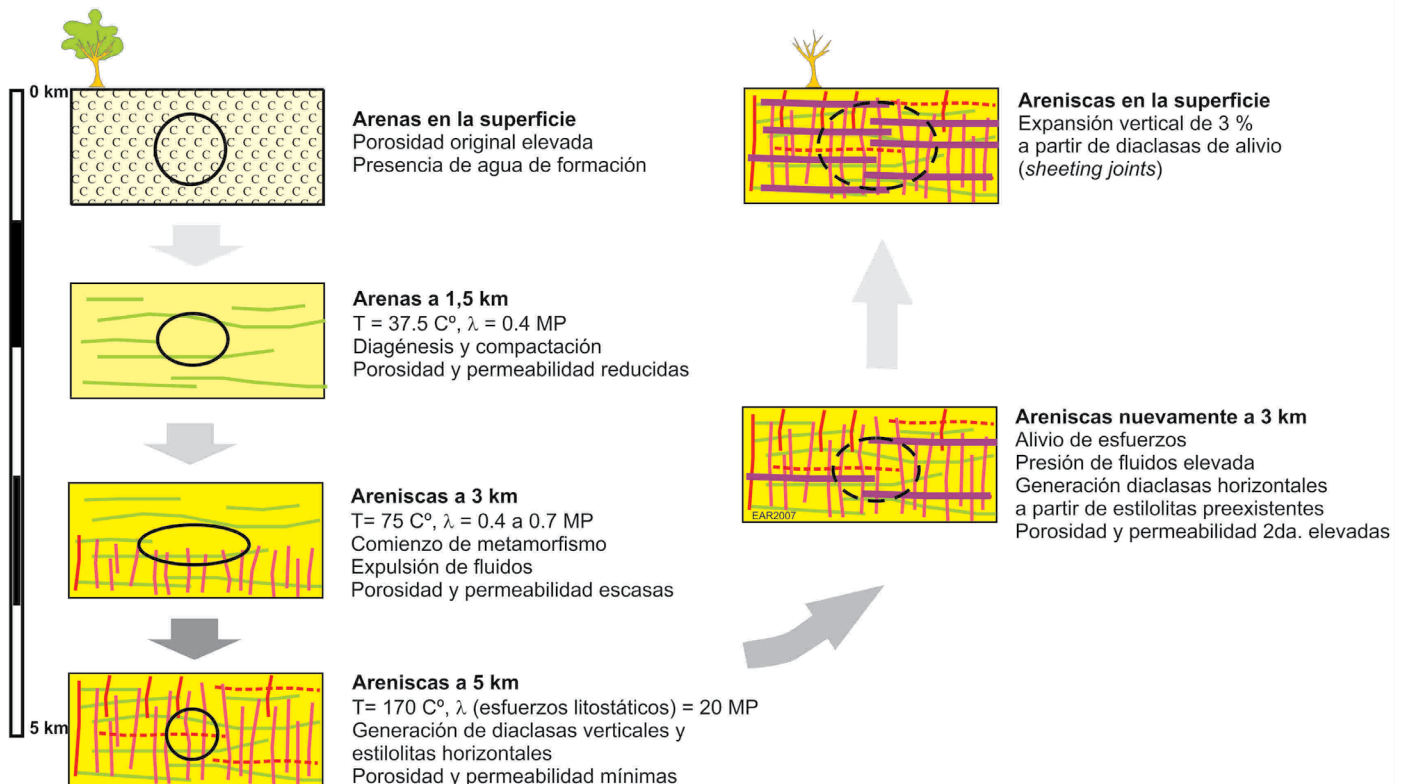


Figura 6. Modelo esquemático idealizado de la evolución petrofísica y estructural de una arena inicial que se diageniza a una arenisca que sufre modificaciones debidas a las condiciones de enterramiento y exhumación.

Condiciones mecánicas variables de un mismo reservorio en función de la historia tectónica que sufrieron

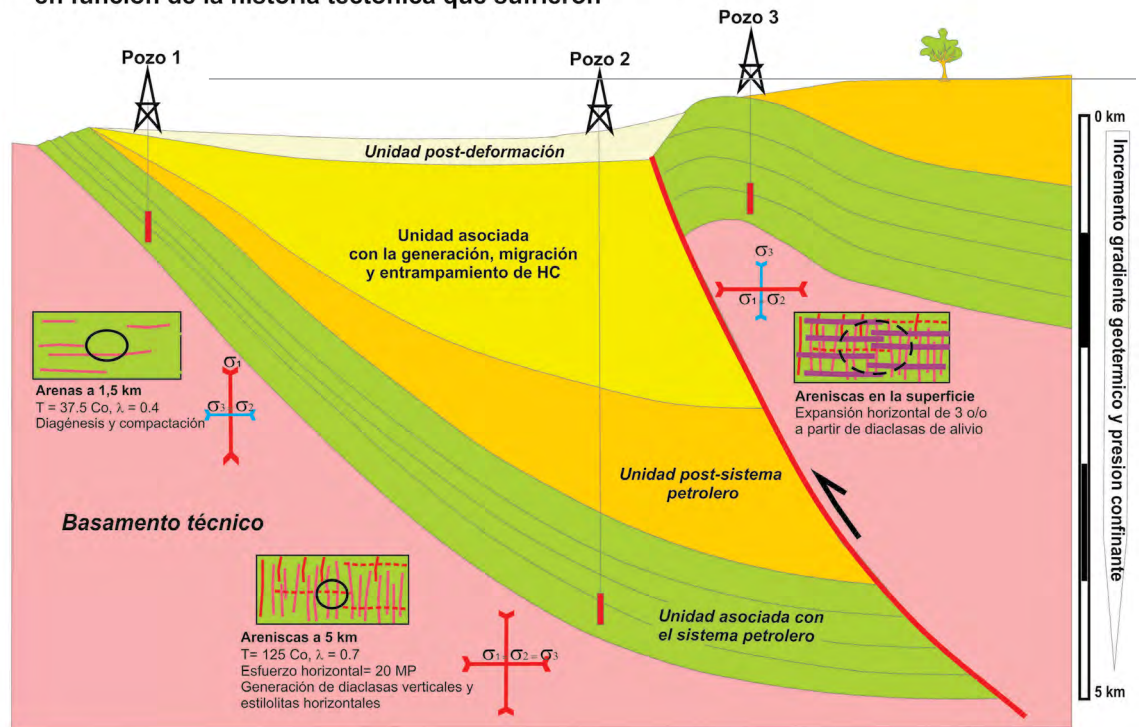


Figura 7. Esquema idealizado de las condiciones petrofísicas variables de una roca en tres localizaciones diferentes en función a las historias de soterramiento y exhumación de cada una de ellas.

que sufre una secuencia puede generar variaciones de sus espesores en función de sus valores relativos que modifican los originales asociados con sus tiempos de deposición. Así, un sector originalmente potente puede mostrar un adelgazamiento mayor debido a una mayor tasa de compactación por un mayor soterramiento mientras que un sector marginal de dicha secuencia conserva su potencia original por haber sufrido menos aplastamiento. Estas variaciones de espesores en ciertas unidades sedimentarias claves pueden soportar interpretaciones tectosedimentarias erróneas de la posición original de depocentros y márgenes de un ambiente depositacional (Fig. 9).

Por otro lado, la depositación de secuencias sedimentarias sobre una prominencia infrayacente resistente a la compactación, puede determinar la generación de flexuras tenues que se atenúan hacia arriba por el progresivo decrecimiento de la carga producida por las secuencias suprayacentes (Fig. 10).

También, puede ocurrir que una secuencia asociada a la depositación en un canal arenoso que expresa una geometría plano convexa hacia la base, por efectos de la compactación diferencial de las secuencias pelíticas que lo infrayacen determinan

un cambio a una geometría plano convexa hacia el tope. De este modo, en el caso que estas secuencias sean reservorios de un sistema petrolero puede mejorar sensiblemente sus características como trampas más eficientes (Fig. 11).

CONSECUENCIAS DEL SOTERRAMIENTO EN LA INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

El soterramiento incrementa las condiciones mecánicas del campo de esfuerzos a

partir del aumento progresivo en profundidad de la presión confinante y la temperatura que favorece una respuesta preferencialmente continua-dúctil con respecto a las respuestas discontinua-frágil que ocurren en posiciones someras.

Desde el punto de vista de los esfuerzos actuantes, en niveles someros los mismos expresan marcadas diferencias determinantes de elipsoides de esfuerzos cuyos semiejes mayores pueden disponerse tanto verticalmente, si el escenario es de fallamientos extensionales, u horizontalmente, si el escenario es de fallamientos compresionales. En cambio, a mayores

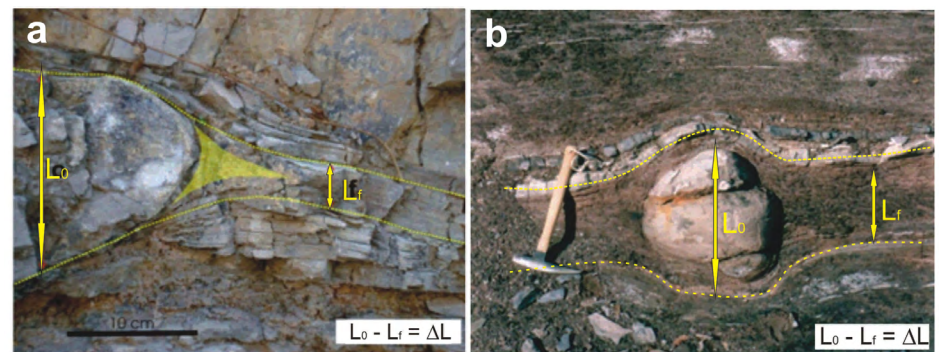


Figura 8. Ejemplos naturales de cálculo del aplastamiento por soterramiento de secuencias aflorantes con objetos mecánicamente competentes incluidos en ellas. a) calcáreos margosos de la Formación Miraflores (La Guajira, Colombia); b) Concreciones calcáreas incluidas en pelitas bituminosas de la Formación Vaca Muerta (Neuquén, Argentina).

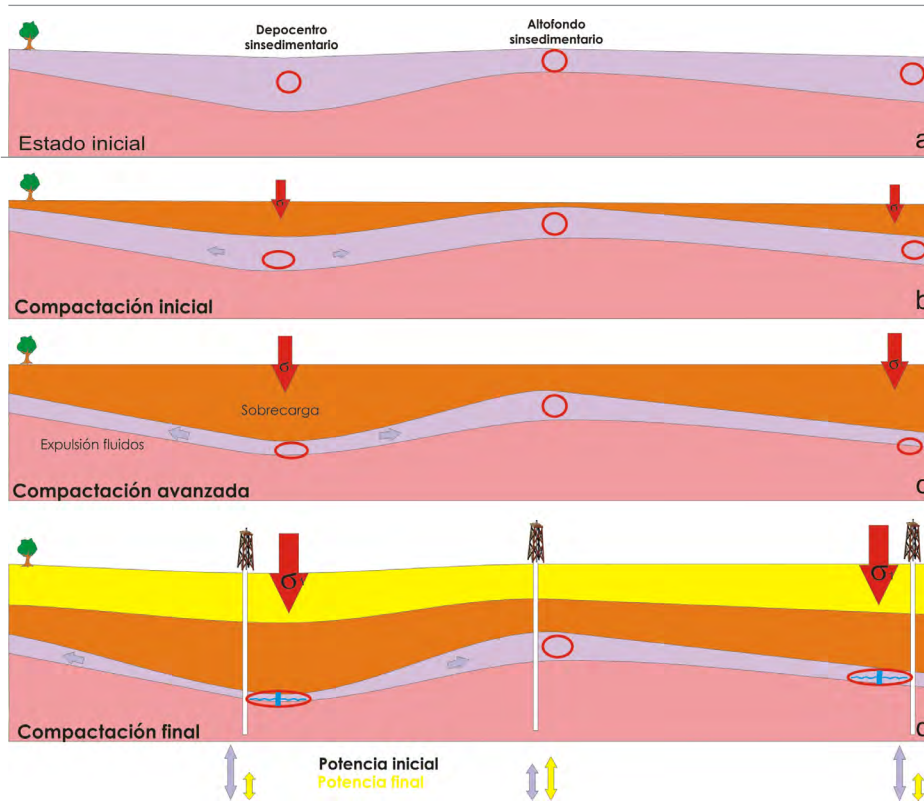


Figura 9. Esquema idealizado de la variación de la potencia original de estratos infrayacentes (a) debida compactación diferencial progresiva producida por un aplastamiento variable por el soterramiento debido a la deposición de secuencias póstumas (b, c, d). De este modo, un depocentro original puede modificarse a un aparente sector marginal con deposición condensada.

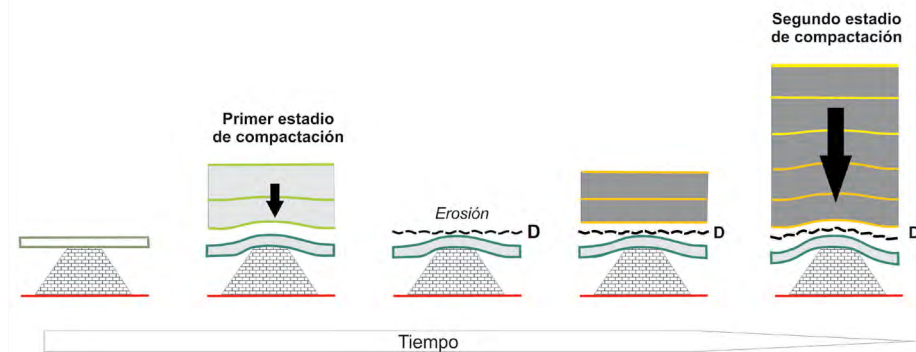


Figura 10. Representación esquemática de la compactación diferencial en dos estadios sobreimpuestos y discordancias flexuradas a lo largo del tiempo sobre una prominencia infrayacente resistente a la deformación previamente a la deposición del nivel.

profundidades, por debajo de los 3.000 - 5.000 m aproximadamente y dependiente de la naturaleza de las litologías involucradas, los esfuerzos empiezan a ser isótropos típicos de un ambiente litostático con respuestas de deformación del dominio continuo-dúctil (Fig. 12).
 Dependiendo de la litología, las respuestas a la deformación son diferentes. Por ello, en una secuencia estratificada de unidades sedimentológicas (e.g. areniscas,

calcáreos, pelitas, etc.) con resistencias variables a la deformación producida por un mismo campo de esfuerzos son disímiles por las diferentes resistencias a los mismos que producen (Fig. 13).
 En el caso hipotético de un conglomerado constituido por clastos con resistencias a la deformación diferentes inmersos en una matriz clasto-sostén puede tener respuestas globales distintas (Pettijohn 1975, Folk 1974). En el caso que la intensidad

de los esfuerzos supere la resistencia de ambos tipos de clastos se producirá un aplastamiento homogéneo del conjunto con desarrollo de clivajes subparalelos en la matriz. En cambio, si la intensidad de los esfuerzos solamente supera la resistencia de un tipo de clasto, se desarrollará un aplastamiento heterogéneo con un clivaje de la matriz envolvente a los clastos indeformados (Fig. 14).

CONSECUENCIAS DEL SOTERRAMIENTO EN LA PETROFÍSICA DE NÚCLEOS

La presencia de evidencias de soterramiento es fácilmente reconocible en el estudio mesoscópico de núcleos. Los núcleos muestran rasgos inequívocos que indican la presencia de apreciables tasas de compactación diferencial de las litologías silicoclásticas involucradas (Schmoker y Halley 1982, Keelan 1982, Henning *et al.* 2000). Esta deformación fue adquirida tempranamente entre su deposición y la diagénesis que sufrieron debido a la expulsión de fluidos formacionales y reordenamiento de sus componentes granulares y/o mineralógicos con formas biextendidas. Ejemplos de la Cuenca Putumayo (Rossello *et al.* 2006a, 2006b, 2008), y en la Cuenca Catatumbo (Rossello 2013) ambas de Colombia, donde se reconocieron muy buenos ejemplos (Figs. 15 y 16).

La compactación diferencial de niveles menos competentes puede reconocerse, en general, a partir del cambio de potencias y geometrías que exhiben superficies de referencia concretas en torno a objetos relativamente menos compresibles (y por lo tanto más competentes desde el punto de vista mecánico) durante el proceso de soterramiento (Massabie y Rossello 1985). De este modo, las superficies de estratificación y/o laminación consideradas inicialmente planas y subparalelas entre sí, luego del proceso de compactación diferencial adoptan un diseño flexurado que se ajusta englobando al objeto más competente. Así, pueden estimarse compactaciones diferenciales del orden del 50 %. Concomitantemente con estos procesos de compactación se producen disoluciones a partir de superficies estilolíticas que

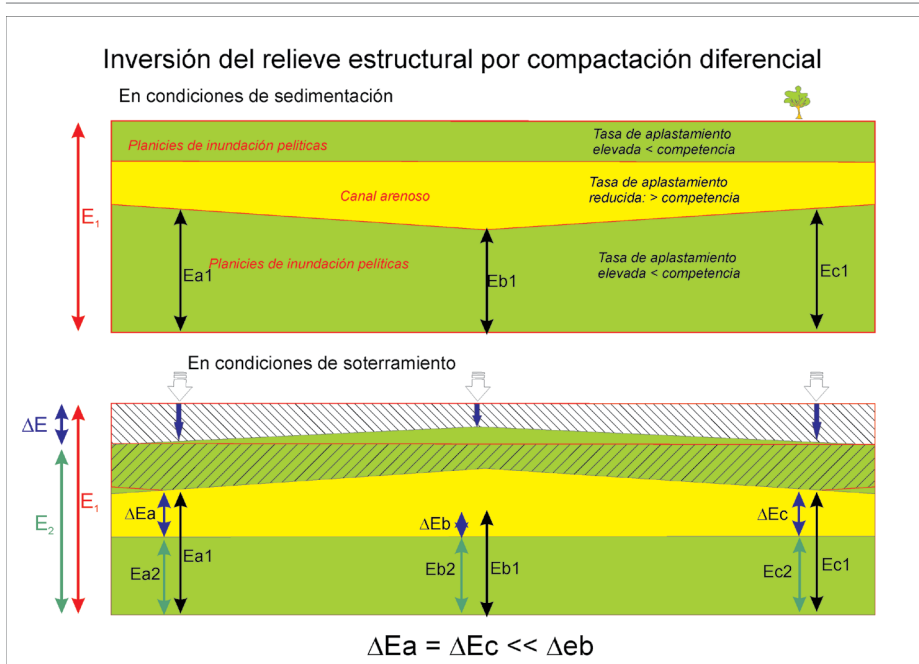


Figura 11. Inversión idealizada de la geometría de un canal arenoso por la compactación diferencial producida por el soterramiento que mejora notablemente su potencial como trampa. E: espesores. ΔE: variación de espesor.

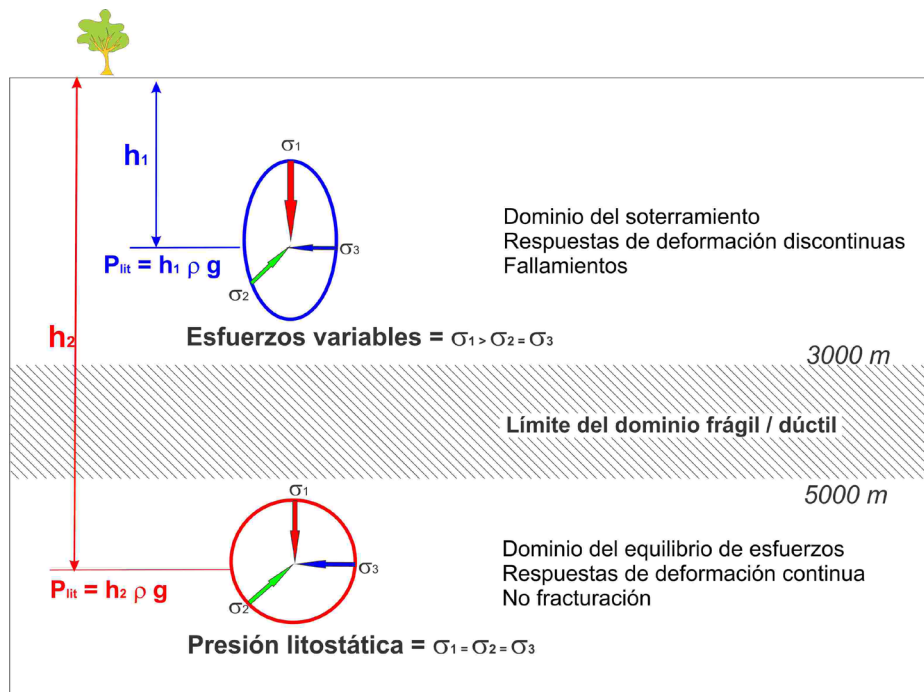


Figura 12. Esquema idealizado de la distribución en profundidad del campo de esfuerzos. En la litosfera estable en equilibrio, los esfuerzos empiezan a ser isotropos por debajo de los 3000 - 5000 m (dependiente de la naturaleza de las litologías involucradas) con respuestas de deformación del dominio continuo- dúctil. P_{lit} : presión litostática, h_1 y h_2 : alturas, ρ : densidad y g : aceleración de la gravedad. σ_1, σ_2 y σ_3 : esfuerzos.

facilitan la provisión de soluciones mineralizantes que aprovechan los espacios dilatantes contemporáneos definidos por fracturas subverticales (Tucker y Bathurst 1990, Nelson 2001). Algunas de las fracturas subverticales con rellenos calcícticos se presentan con segmentos dispuestos

escalonadamente que determinan ligeros movimientos normales. De esta manera, cuando ocurre la compactación por sobrecarga del peso de las secuencias suprayacentes que hace disminuir el volumen inicial por aplastamiento a partir de una reducción de la dimensión

vertical, se pueden reconocer las siguientes estructuras (Fig. 17):

- 1) Superficies de estratificación y/o laminación envolvente en torno a objetos más competentes (bioturbaciones, masas arenosas, etc.).
- 2) Altos relativos generados por una compactación diferencial de niveles menos competentes determinantes de estructuras supra tenues (*subtle structures*).
- 3) Los posibles niveles preservados pueden evidenciar también esta compactación diferencial con respecto a los bloques de origen plutónico-magmático más competentes adyacentes.
- 4) Fallamientos normales con fuerte ángulo y rumbos aleatorios expresados preferentemente en niveles competentes areniscosos y/o carbonáticos. Los niveles pelíticos desarrollan fallamientos con espejos de fricción centimétricos con pequeños a nullos desplazamientos verticales evidentes a ojo desnudo.
- 5) Fallamientos debidos a reactivaciones de fracturamientos preexistentes y/o anisotropías litológicas del basamento.
- 6) Estilolitas subhorizontales y venulaciones con rellenos carbonáticos subverticales y con diseños cuneiformes (*cone in cone*, Kowal-Linka 2010) presentes en niveles calcáreos que confirman la presencia de procesos de disolución y precipitación. Los niveles areniscosos adyacentes están casi siempre muy cementados. (McBride *et al.* 1990, Ramm y Bjorlykke 1994). Como datos de referencia, a continuación, se expresan algunos valores indicativos a partir de numerosos ejemplos reales teniendo en cuenta no solamente la potencia de las capas sino también la litología de diferentes niveles litológicos:
 - 1) Niveles areniscosos: decimétrico, superficies subconcoides,
 - 2) Niveles pelíticos: centimétrico, superficies subplanares y subparalelas y
 - 3) Niveles calcáreos: pluridecimétrico, superficies irregulares con intersecciones que desarrollan fábricas brechosas.
 Igualmente, a partir de imágenes de pozos es posible reconocer rasgos de compactación por soterramiento como aplastamientos diferenciales a partir de objetos más competentes y/o fracturas escalonadas que permiten identificar aspectos cinemáticos (Fig. 18). Los sedimentos carbonatados modernos

promedian una porosidad del orden del 45% en contraste con las rocas carbonatadas que exhiben una porosidad promedio de solo 1-2 % (Choquette y Pray 1970). Por otra parte, el soterramiento provoca la disolución de ciertos minerales por la presión - Principio de Riecke, definido por Henry C. Sorby (1826-1908) - que desencadena una transferencia de material entre las superficies de disolución estilolíticas y la precipitación en venillas contemporáneas cuya relación espacial entre este par de estructuras es ortogonal (Wheeler 1991). De este modo, durante la litificación se pierde una gran cantidad de porosidad debido a que mucho carbonato de calcio removilizado de los componentes originales es introducido vía fluidos que interactúan con el material y desmejoran las propiedades de porosidad y permeabilidad (Fig. 19).

Una vez litificadas las rocas son compactadas químicamente a lo largo de superficies discretas desarrollando estilolitas y suturas de disolución más planares y anastomosadas cuando la sobrecarga excede los miles de metros (Taylor 1950). Las superficies estilolíticas se remarcen por la acumulación residual de minerales insolubles (e.g. arcillas, óxidos, etc.) que otorgan un comportamiento petrofísico particular (Park y Schot 1968, Nelson 1981, 2001). De este modo, la permeabilidad sub horizontal (K_h) a estas superficies es más importante que la permeabilidad subperpendicular (K_v) a ellas. Por otro lado, la presencia de carbonato precipitado en venillas indica un desmejoramiento general de las condiciones de porosidad primaria de la roca por invasión de cementación calcárea (Heald 1959). Por lo tanto, cuando no hay estilolitas se puede estimar una buena porosidad y fracturas abiertas con hidrocarburos.

CONSECUENCIAS EN LA EXPLORACIÓN/PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS

El soterramiento influye en la morfología de las superficies de falla cuando exhiben flexuras o pandeos tanto en planta como en perfil debido a los diferentes ángulos de discontinuidad producidos por procesos de refracción al atravesar litologías con condi-

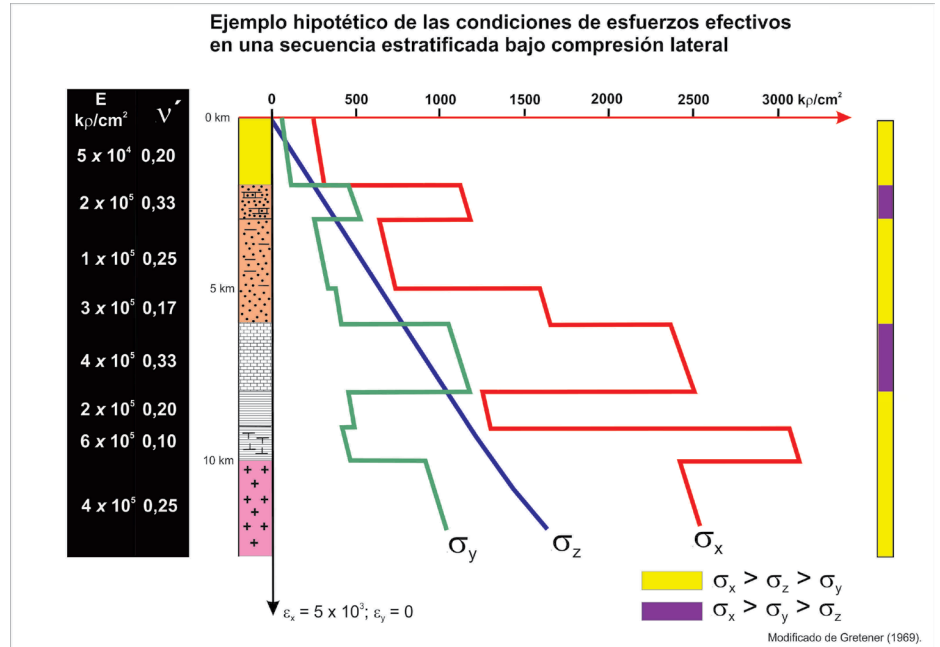


Figura 13. Ejemplo hipotético de las condiciones de esfuerzos efectivos en una secuencia estratificada bajo un campo de esfuerzos donde las respuestas a la deformación son diferentes (modificado de Gretener 1969).

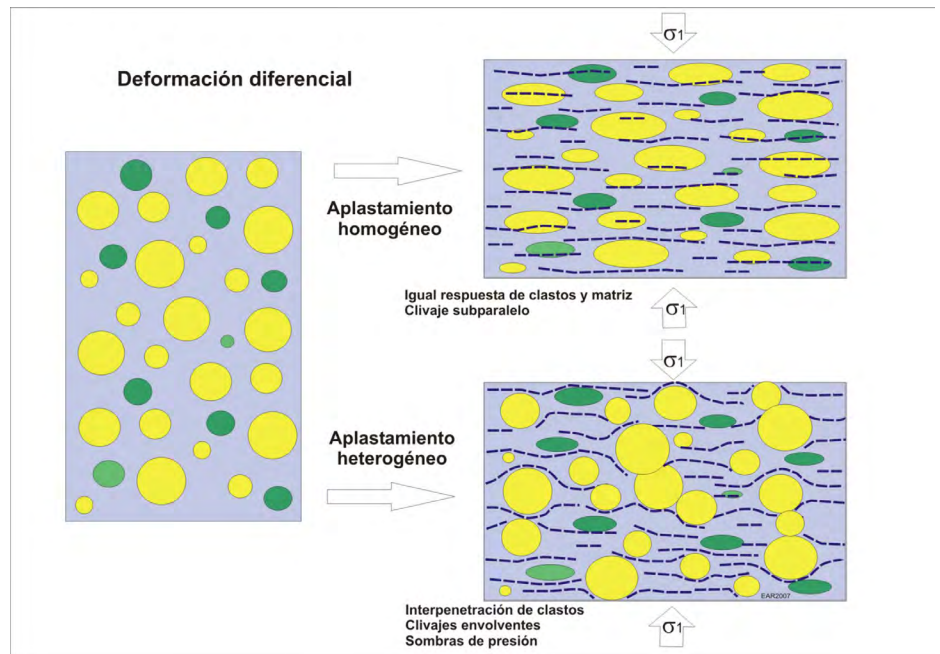


Figura 14. Ejemplos ideales de deformaciones diferenciales de los clastos de un conglomerado con diferentes límites de resistencia a la deformación inmersos en una matriz-sostén por aplastamientos homogéneos y heterogéneos. Círculos amarillos: clastos más competentes. Círculos verdes: clastos menos competentes.

ciones de deformación diferentes (Ramsay y Huber 1983, Price y Cosgrove 1990, Davis y Reynolds, 1996, Rossello 2009). De este modo, es posible reconocer cambios en las respuestas deformativas de frágil a dúctil o viceversa y modificaciones de las posiciones espaciales que deben ser teni-

das en cuenta en la interpretación 3D de un macizo rocoso (Fig. 20). En el caso de un nivel de reservorio subhorizontal que es intervenido por dos pozos cuyas evidencias de deformación (presencia y/o distribución espacial disímil de estructuras continuas y discontinuas)

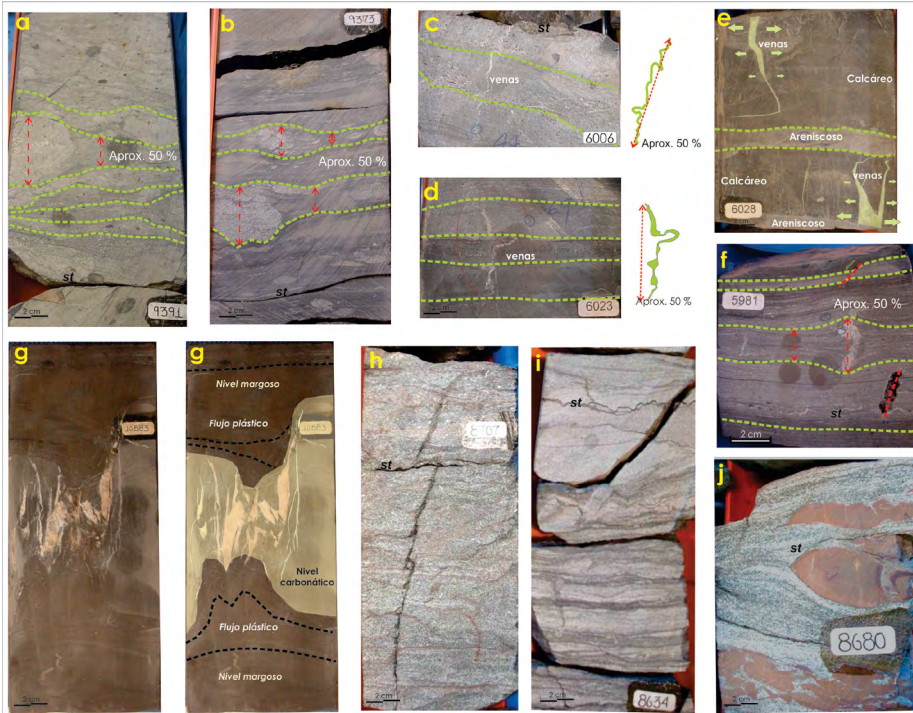


Figura 15. Fotografías de núcleos de perforación seccionados axialmente con evidencias de aplastamientos. a-b) Pozo Cencella (Cuenca Putumayo) con aplastamientos diferenciales debidos a bioturbaciones areniscosas inmersas en niveles menos competentes; c-d) Pozo Orito 3 (Cuenca Putumayo) venas subverticales plegadas por compactación asociadas con estilolitas; e) Pozo Orito 3 (Cuenca Putumayo). Venas subverticales con rellenos calcíticos en niveles calcáreos; f) Pozo Orito 3 (Cuenca Putumayo) compactación diferencial por la presencia de bioturbaciones areniscosas más competentes; g) Pozo Hormiga 1x (Cuenca Putumayo) precipitación progresiva de carbonatos en fracturas subverticales dentro de un cuello de boudinage desarrollado en un nivel carbonático más competente inmerso en niveles menos competentes que exhiben flujo plástico; h) Pozo Tibú 108K (Cuenca Catatumbo) fracturas subverticales interrumpidas por estilolitas en areniscas glauconíticas; i) Pozo Tibú 108K (Cuenca Catatumbo) estilolitas subparalelas a la estratificación y aplastamientos diferenciales por bioturbaciones; j) Pozo Tibú 108K (Cuenca Catatumbo), nódulos hematífticos competentes incluidos en areniscas glauconíticas que producen aplastamientos diferenciales.

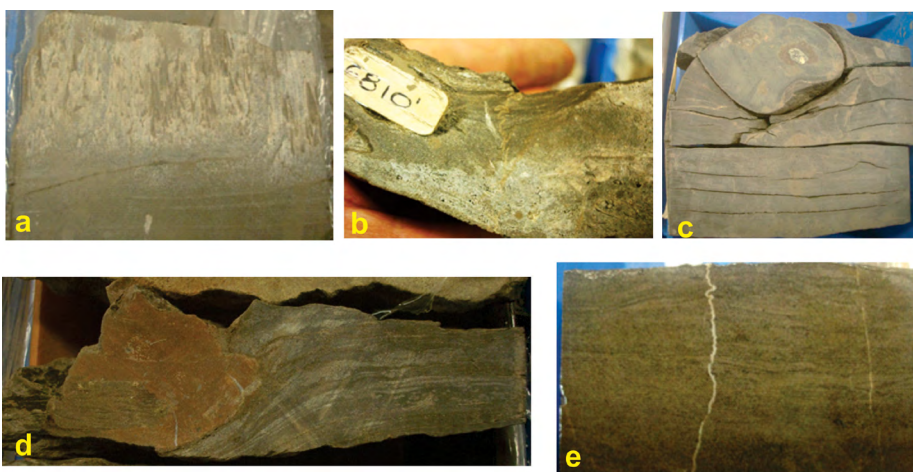


Figura 16. Fotografías de fragmentos de núcleos de perforación seccionados. a) Vista de un sector carbonático con estructuras como en cono debido a compactación diferencial solución por presión inducida por enterramiento; b) Detalle de una venilla carbonática con plegamientos (ptigmáticos) debidos a compactación diferencial emplazada dentro de niveles pelíticos; c) Vista de un molde de bivalvo más competente que provoca una deformación envolvente de la estratificación por compactación diferencial; d) Vista de un sector pelítico con un nódulo ferruginoso probablemente de origen evaporítico más competente que controla un aplastamiento convergente del nivel pelítico que lo contiene; e) Detalles donde se aprecian venas calcíticas subperpendiculares a la estratificación plegada por compactación diferencial.

son diferentes pueden estar ocasionadas en una historia tectónica que le ha impuesto un aplastamiento temprano, pero luego fue diferencialmente exhumado (Fig. 21). Asimismo, por el principio de Pascal que dice que "la presión ejercida sobre un fluido incompresible (como el agua y el petróleo) y en equilibrio dentro de un recipiente de paredes indeformables (como el espacio poral de la roca reservorio) se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y en todos los puntos del fluido" (Oliver y Agelet 2000). De este modo, niveles reservorios que están hidráulicamente conectados con porciones más profundas pueden exhibir presiones que superan las capacidades de impermeabilidad del nivel sello. En cambio, un mismo tipo de reservorio que se dispone horizontalmente el gradiente de presión de fluido generado puede ser menor al punto que el nivel de sello al mismo nivel que en el caso anterior pueda ser eficiente (Fig. 22).

Ambientes sedimentarios típicos de depocentros sedimentarios caracterizados por una rápida acumulación importante de niveles pelíticos con tasas de depositación muy altas (típicas cuencas "hambrientas" como el Valle Inferior del Magdalena de Colombia o la Macuspana de México) cuando son intervenidos con pozos exploratorios o productores suelen tener problemas graves de sobrepresión. Estos escenarios complican drásticamente las maniobras de ejecución al promover colapsos, pérdidas de herramientas, etc. como la perjudicial disminución de las capacidades de los reservorios (Stearns y Friedman 1972). Estos problemas surgen rápidamente por el estrangulamiento del pozo debido a la deformación plástica por fluencia de niveles pelíticos con mucha agua de formación remanente que se agravan a medida que aumenta la profundidad (Fig. 23).

CONCLUSIONES

La evaluación de la influencia del soterramiento puede complementar más ajustadamente el conocimiento e interpretación geológica de las características estructurales, estratigráficas y petrofísicas de un ambiente sometido al estudio de su potencial exploratorio-productivo de fluidos.

Los niveles pelíticos y carbonáticos pueden sufrir más de 40% de reducción de sus potencias con respecto a los valores iniciales debido a la expulsión del agua que acompañó a su deposición y la reorganización de la fábrica de los minerales constituyentes.

El notable cambio en el volumen de las litologías mecánicamente incompetentes, particularmente en secuencias pelíticas, puede influir en una apreciación errónea de los criterios de correlación a partir de sus potencias entre distintos puntos de observación (pozos, afloramientos, etc.). Estas variaciones de potencias que pueden estar relacionadas con condiciones de aplastamientos diferenciales impactarán en la interpretación de sectores con secuencias condensadas o depocentros. El nivel de afloramiento que exhibe una región no es necesariamente el original al igual que una perforación ya que sucesivos soterramientos y exhumaciones pudieron haber provocado y modificado las características originales de las secuencias que la constituyen.

El aplastamiento por compactación debida a la sobrecarga litológica puede asociarse con el comienzo de la maduración y generación HC, observándose una relación temporal que otorga estructuras oportunas capaces de entramparlos. Por lo tanto, estas estructuras a pesar de ser sutiles se constituyen en atractivos blancos exploratorios cuando adquieren dimensiones adecuadas en ambientes plataformales.

Estas variaciones volumétricas y geométricas influyen en la evaluación de las características petrofísicas de muestras obtenidas en pozos in situ a profundidades de interés y las analizadas en condiciones de laboratorio de presión y temperaturas ambientales. Las incongruencias de parámetros petrofísicos obtenidos en el laboratorio y los reales *in situ* pueden condicionar notablemente la economicidad de un proyecto exploratorio y/o productivo de hidrocarburos.

AGRADECIMIENTOS

Se desea dejar constancia de agradecimiento a todos los colegas de los ámbitos académicos y profesionales de la industria de hidrocarburos que contribuyeron

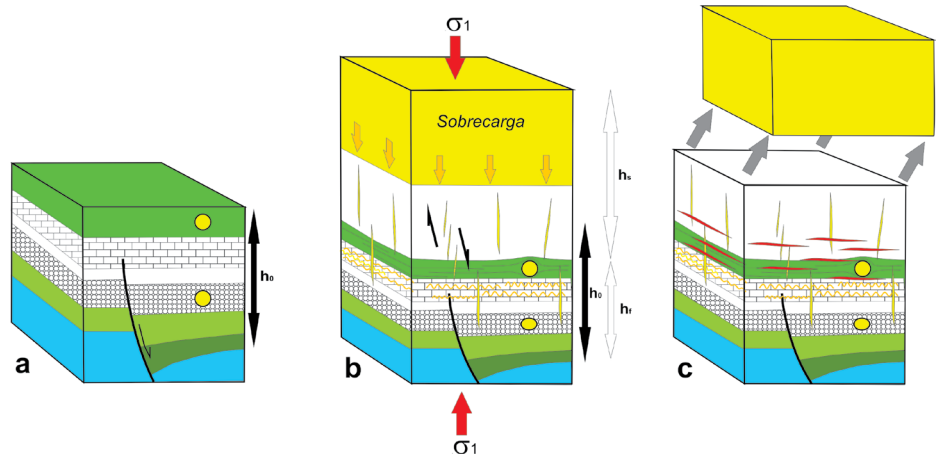


Figura 17. Esquemas evolutivos ideales de una secuencia depositada en un contexto sin-extensional original (a), que sufre una compactación subvertical por el soterramiento debido al peso de las secuencias suprayacentes con desarrollo de clivajes pizarreño en las pelitas y estilolitización y venulación en niveles más arenosos (b). Luego, una inversión tectónica puede generar fallamientos que reactivan estructuras pre-existentes y producen la exhumación de los sectores profundos (modificado de Rossello 2013).

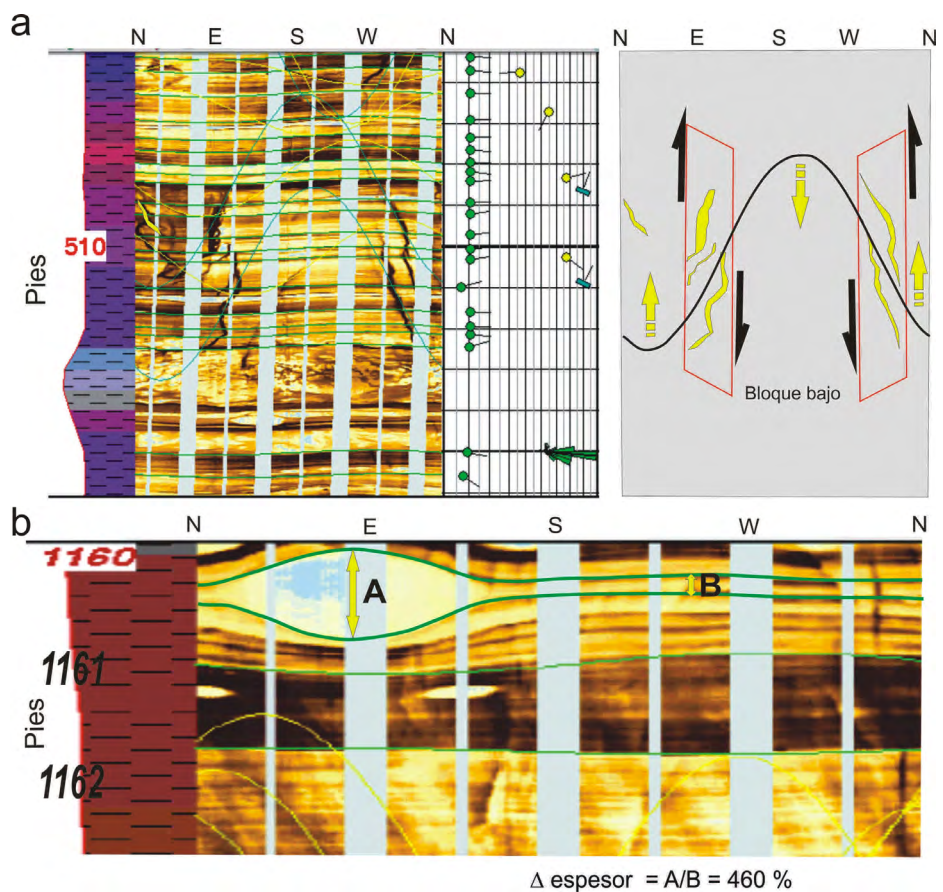


Figura 18. Ejemplos de evidencias de aplastamientos en imágenes de pozos. a) Ejemplo de un fallamiento extensional con inclinación hacia el norte de una parte media de la Formación La Luna en el Pozo Petrolera 224 (Cuenca Catatumbo, Colombia); b) Ejemplo de aplastamiento por sobrecarga de la Zona 3 de la Formación Ostrea en una imagen FMI del Pozo Petrolera 227 (Cuenca Catatumbo, Colombia). Las litologías exhiben distintos grados de aplastamiento en función de sus reologías. Los planos de estratificación tangentes al tope y base de la concreción carbonática más resistente (A) se aproximan por fuera de su influencia en la matriz arcillosa (B). La diferencia entre A y B determina el valor relativo de la compactación diferencial por sobrecarga de la matriz más arcillosa con respecto a la concreción calcárea.

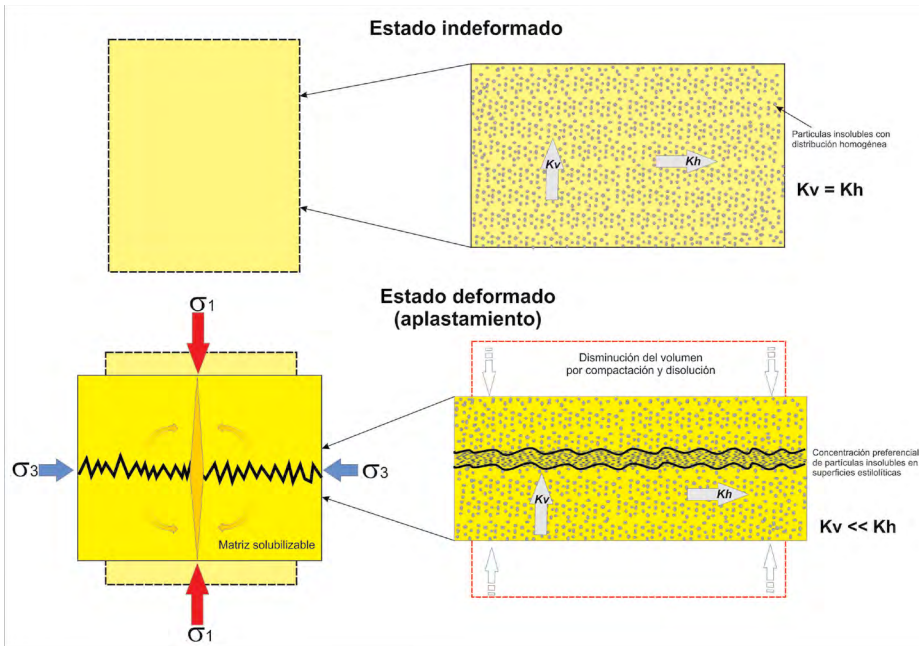


Figura 19. Esquemas del desarrollo de superficies estilolíticas y su influencia en las características de su permeabilidad. La permeabilidad vertical (K_v) resulta menos eficiente debido a la presencia de niveles estilolíticos enriquecidos de materiales insolubles como arcillas, óxidos, etc. que la permeabilidad horizontal (K_h).

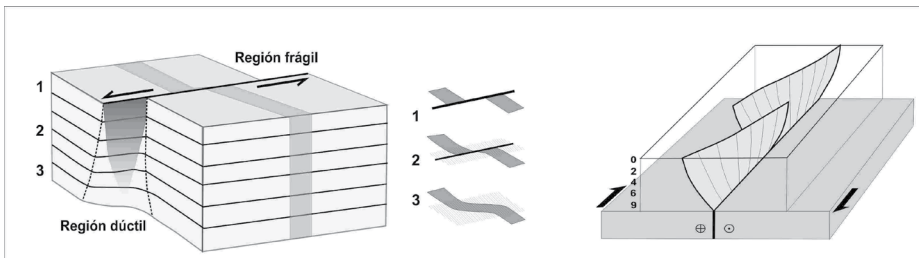


Figura 20. Izquierda: Esquemas de la variación flexural de una discontinuidad en función de la profundidad. Izquierda: Block diagrama de la variación del comportamiento frágil y dúctil. Derecha: Esquema helicoidal de los rumbos de un fallamiento y la expresión variable en sucesivas vistas en planta (adaptada de Naylor *et al.* 1986).

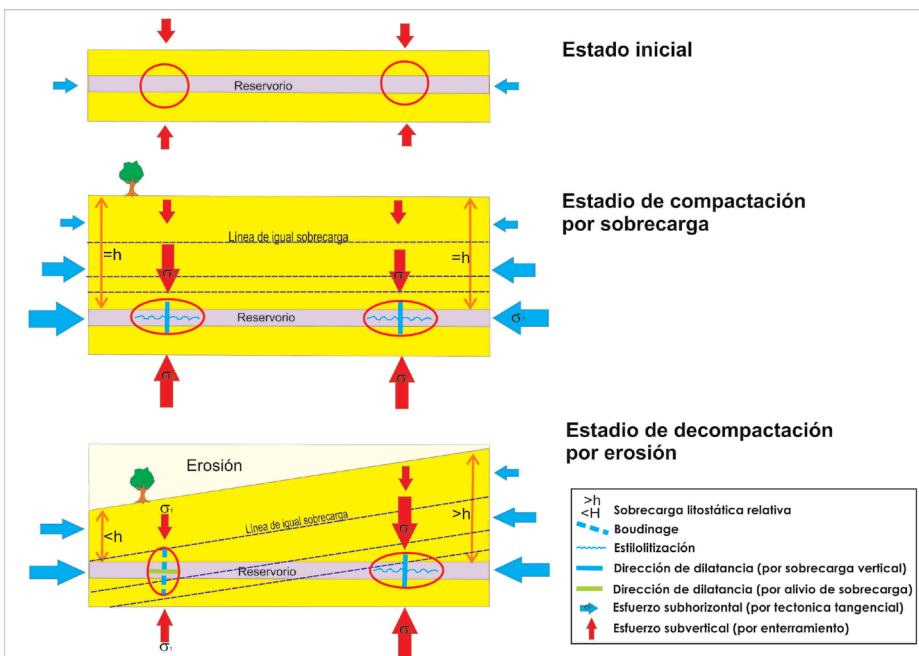


Figura 21. Esquemas simplificados de las condiciones petrofísicas variables a partir de la presencia de estructuras discontinuas y continuas debidas a un soterramiento y exhumación diferencial. A partir del análisis del comportamiento variable de la eficiencia de un nivel de sello se puede interpretar la presencia de presiones de fluidos diferenciales en niveles reservorios que pueden estar originados por la posición espacial de los mismos. Estas diferencias pueden estar originadas por la profundidad de los mismos (presión de confinamiento).

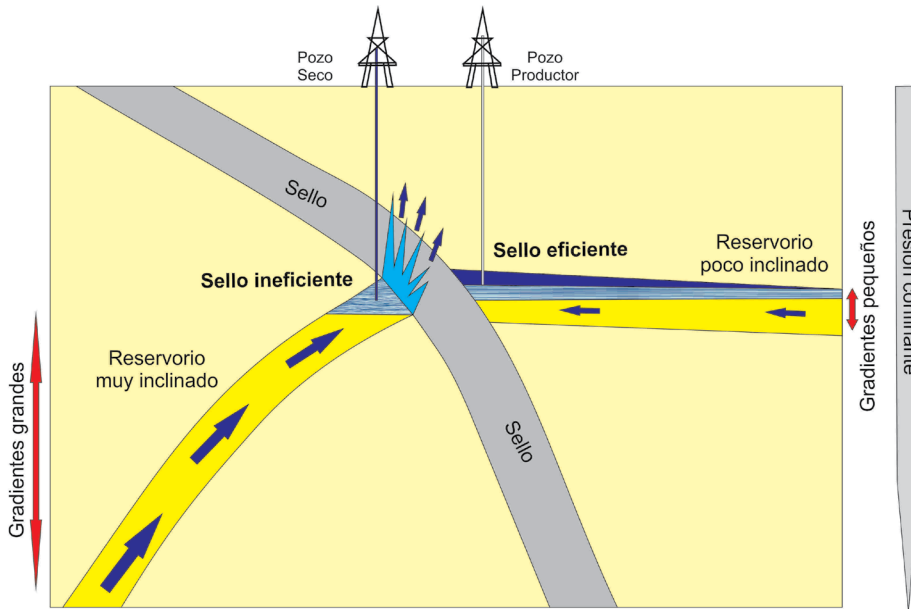


Figura 22. Esquema idealizado del funcionamiento diferencial de la eficiencia de un sello de acuerdo con la presión de fluidos más alta de un reservorio muy inclinado con respecto a otro subhorizontal menos intensa.

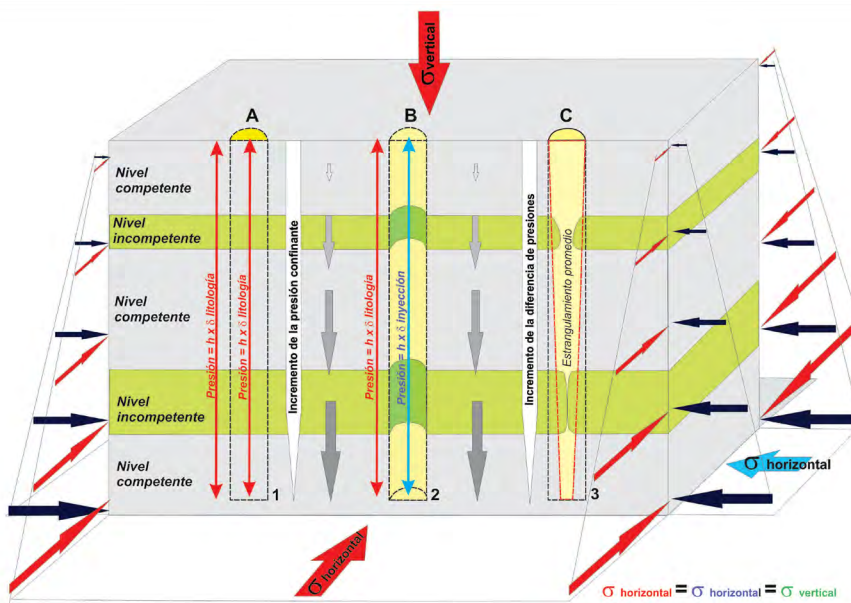


Figura 23. Block diagrama idealizado que representa la respuesta de una perforación en función del comportamiento de niveles competentes e incompetentes por la presión de soterramiento. 1: Situación original. 2: Pozo abierto. 3: Pozo con estrangulamientos diferenciales mayores en niveles incompetentes.

con desinteresadas discusiones y aportes que enriquecieron los contenidos de este trabajo. En particular, se reconoce el gran aporte de la lectura crítica del colega Francisco Gulisano que mejoró notablemente la claridad del trabajo. Los editores de la Revista de la Asociación Geológica Argentina y el autor agradecen a Luís Stinco y Raúl A. Varela por la revisión del manuscrito.

REFERENCIAS

Ali, S.A., Clark, W.J., Moore, W.R. y Dribus, J.R. 2010. Diagenesis and reservoir quality. *Oilfield Review* 22: 14-27.
 Amaefule, J.O., Keelan, D.K., Kersey, D.G. y Marshall, D.M. 1988. Reservoir description - a practical synergistic engineering and geological approach based on analysis of core data. 63 SPE Annual Technical Con-

ference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, SPE 18167, Houston.
 Athy L.F. 1930. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 14: 1-24.
 Beard, D.C. y Weyl, P.K. 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 57: 349-369.
 Bjorlykke, K. 2014. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins. *Sedimentary Geology* 301: 1-14.
 Bloch, S., Lander, R.H. y Bonnell, L. 2002. Anomously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 86: 301-328.
 Coneybeare, C.E.B. 1967. Influence of compaction on stratigraphic analysis. *Canadian Petroleum Geology Bulletin* 15: 331-345.
 Davis, G.H. y Reynolds, S.J. 1996. *Structural geology of rocks and regions*. J. Wiley & Sons Publishing: 776 p., New York.
 Choquette, P.W. y Pray, L.C. 1970. Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 54: 207-250.
 Ehrenberg, S.N. y Nadeau, P.H. 2005. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 89: 435-445.
 Folk, R. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. The University of Texas at Austin, 170 p., Hemphill.
 Füchtbauer, H. 1967. Influence of different types of diagenesis on sandstone porosity. *Proceedings 7th World Petroleum Congress 2*: 353-369, México.
 Gretener, P.E. 1969. Fluid pressure in porous media, its importance in geology - A review. *Canadian Petroleum Geology, Bulletin* 17: 255-295.
 Hafner, W. 1951. Stress distributions and faulting. *Geological Society of America, Bulletin* 62: 373-398.
 Hatcher, R.D. Jr. 1995. *Structural geology: principles, concepts, and problems*. Prentice Hall, 542 p., New Jersey.
 Heald, M.T. 1959. Significance of stylolites in

- permeable sandstones: *Journal of Sedimentary Petrology* 29: 251-253.
- Henning, P., Olson, J. y Thomson, L. 2000. Combining outcrop data and three dimensional structural models to characterize fracture reservoirs: an example from Wyoming. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 84: 830-849.
- Keelan, D.K. 1982. Core analysis for aid in reservoir description. *Journal of Petroleum Technology* 34: 2483-2491.
- Kowal-Linka, M. 2010. Origin of cone-in-cone calcite veins during calcitization of dolomites and their subsequent diagenesis: A case study from the Gogolin Formation (Middle Triassic), SW Poland. *Sedimentary Geology* 224: 54-64.
- Kupecz, J.A., Gluyas, J. y Bloch S. (eds.) 1997. Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir* 69, 250 p., Tulsa.
- Massabie, A.C. y Rossello, E.A. 1985. Cuantificación del aplastamiento por combamiento del clivaje en la Fm. Sauce Grande, Sierras Australes de Buenos Aires. 2º Reunión de Microtectónica, Universidad Nacional del Sur, Actas 1: 39-41, Bahía Blanca.
- McBride, E.F., Diggs, T.N. y Wilson, J.C. 1990. Compaction of Wilcox and Carrizo sandstones (Paleocene-Eocene) to 4420 m, Texas Gulf Coast. *Journal of Sedimentary Petrology* 61: 73-85.
- Naylor M.A., Mandl, G. y Supesteijn, C.H. 1986. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Journal of Structural Geology* 7: 737-752.
- Nelson, R.A. 1981. Significance of fracture sets associated with stylolite zones. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 65: 2417-2425.
- Nelson, R.A. 2001. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs* Gulf Publishing, 350 p., Houston.
- Oliver, X. y Agelet, C. 2000. *Mecánica de medios continuos para ingenieros*. Ediciones UPC: 200 p., Barcelona.
- Park, W.C. y Schot, E.H. 1968. Stylolites: their nature and origin. *Journal of Sedimentary Petrology* 38: 175-191
- Pettijohn, F.J. 1975. *Sedimentary rocks*. Harper y Row Publishers: 628 p., Nueva York.
- Pittman, E.D. 1979. Porosity, diagenesis and productive capability of sandstone reservoirs. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*. En: Scholle P.A. y Schluger, P.R. (eds.), *Aspects in diagenesis*. Special Publication 26: 159-173, Tulsa.
- Price, N.J. y Cosgrove, J.W. 1990. *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press 380p., Cambridge.
- Ramsay, J.G. y Huber, M.I. 1983. *The techniques of modern structural geology*. Vol. 1: Strain analysis. Academic Press, 307p., London.
- Ramm, M. y Bjorlykke, K. 1994. Porosity depth trends in reservoir sandstones - Assessing the quantitative effects of varying pore-pressure, temperature history and mineralogy, *Norwegian Shelf Data Clay Minerals* 29: 475-490.
- Rossello, E.A. 2013. Fracturación de niveles cretácicos de la cuenca Catatumbo (Colombia): a partir del análisis microtectónico de núcleos. 14º Congreso Colombiano de Geología, *Memorias*: 164-165, Bogotá.
- Rossello E.A., Salvay R.O. y Nevistic, V.A. 2006a. Microtectonic evaluation of the Villeta Formation carbonate cores (Putumayo Basin, Colombia): Its potential as fractured reservoir. *Integrating Geoscience into carbonate reservoir management EAGE Workshop Actas en CD*, Abu Dhabi.
- Rossello, E.A., Salvay, R.O., Nevistic, V.A. y Araque, L. 2006b. The calcareous levels of the Villeta Formation (Putumayo Basin, Colombia): Their potential as complementary reservoir from microtectonic evaluation of cores and logs. 9º Simposio Bolivariano. Actas 1, Cartagena.
- Rossello, E.A., Nevistic, V.A., Salvay, R.O., Pina, L.H. y Covellone, G. 2008. Cuenca Putumayo (Colombia). En: Cruz, C.E., Rodríguez, J.F., Hechem, J.J. y Villar, H.J. (eds), *Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas*. 7º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos 1-24, Mar del Plata.
- Rossello, E.A. 2009. Localización de espacios dilatantes en fallamientos: controles de la mineralización y pronósticos económicos. 9º Congreso Argentino de Geología Económica Actas: 229-234, San Fdo. del Valle de Catamarca.
- Scasso, R.A. y Limarino, C.O. 1997. Petrología y diagénesis de rocas clásticas. *Asociación Argentina de Sedimentología. Publicación Especial Nro. 1*: 258 p. Buenos Aires.
- Schmidt, V. y McDonald, D.A. 1979. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication* 26: 159-173, Tulsa.
- Schmoker, J.W. y Halley, R.B. 1982. Carbonate porosity versus depth: A predictable relation for south Florida. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 66: 2561-2570.
- Sathar, S. y Jones, S.J. 2016. Fluid overpressure as a control on sandstone reservoir quality in a mechanical compaction dominated setting: Magnolia Field, Gulf of Mexico. *Terra Nova* 28: 155-162.
- Stearns, D.W. y Friedman, M. 1972, Reservoirs in fractured rock. En: *Stratigraphic oil and gas fields: American Association of Petroleum Geologists, Memoir* 16: 82-100, Tulsa.
- Taylor, J.M. 1950. Pore-space reduction in sandstones. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 34: 701-716.
- Tucker, M.E. y Bathurst, R.G.C. (eds) 1990. *Carbonate diagenesis*. Reprint Series International Association of Sedimentologists, Blackwell Scientific 1: 312 p., Oxford.
- Wheeler, J. 1991. A view of texture dynamics. *Terra Nova* 3: 125-136.
- Worden, R.H. y Burley, S.D. 2003. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. En: Burley, S.D. y Worden, R.H. (eds.), *Sandstone diagenesis: Recent and ancient*. International Association of Sedimentologists: 2-43, New Jersey.

Recibido: 3 de agosto, 2017

Aceptado: 7 de octubre, 2017