

CRITERIOS PARA ESCRIBIR LOS CAPÍTULOS DE GEOLOGÍA PARA TRABAJOS DE GRADO Y REPORTES TÉCNICOS

Franklin G. Yoris*

Recibido: 12 de enero de 2018

Aceptado: 18 de mayo de 2018

PROLEGÓMENO (PARA LOS NO GEÓLOGOS)

En los trabajos de grado, artículos y demás reportes sobre ingeniería de yacimientos está considerado dedicar un capítulo a la geología. Lo aconsejable es colocar siempre dos capítulos en vez de uno: el primero referido a la geología regional, y el segundo, a la geología (local) del campo que será el objeto del estudio. No siendo la geología una especialidad de la ingeniería de petróleo, quien necesita involucrar esta información en su trabajo tiene la responsabilidad de consultar el material idóneo para su trabajo y asesorarse bien. Hoy en día la información geológica es vital para el aprovechamiento de todos los recursos ligados al subsuelo, y los encargados de hacerlo deben organizarse en equipos integrados; esta organización no significa que hay que “armar un rompecabezas de especialidades”, sino que cada especialidad debe estar integrada con la otra, de manera que cada profesional esté involucrado (sin ser especialista) con cada disciplina.

Este artículo brinda una guía para estudiantes de Ingeniería de Petróleo y profesionales relacionados con el área de la exploración/producción de hidrocarburos, que sirve para homogeneizar los criterios de escritura del capítulo previo de “geología” en informes especializados. Estos criterios, que no deben colidir con las normas específicas de la entidad a la que se le presenta el informe, pretenden orientar la forma cómo se pueden tratar aspectos relevantes de geología regional y geología local en lo referente a regiones y zonas o campos. Cada autor tiene, por supuesto, la libertad de ordenar los capítulos específicos de acuerdo a la problemática a tratar; lo escrito aquí se refiere tan solo al “capítulo de geología” de dichos informes. Igualmente, para apoyar al empleo de términos usados en esta proposición, se ha añadido un glosario como parte de su intención educativa.

GEOLOGÍA REGIONAL

Los puntos del capítulo de geología regional son clásicos: introducción, estratigrafía regional, geología estructural regional y geología del petróleo (o geología económica).

* Ing. geólogo, magíster en Ciencias Geológicas, doctor en Ciencias Geológicas. Consultor en Geología para la industria minera y petrolera. Profesor titular Facultad de Ingeniería de Petróleo, Departamento de Investigaciones, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7339-9759>. franklin.yoris@profesores.uamerica.edu.co

Introducción

Se explica brevemente la importancia del estudio y su relación con el área de una región con la que se encuentra relacionado el campo. Aquí se aprovecha para colocar los mapas de ubicación (a nivel continental y a nivel nacional) en un mapa geográfico, combinado con otro mapa que tenga los principales rasgos fisiográficos y/o geotectónicos, o las figuras necesarias para lograr el objetivo del reporte.

Estratigrafía regional

Se resumen las unidades estratigráficas a escala regional; esto se puede lograr colocando una columna estratigráfica en tiempo geológico (no es una columna de elementos del sistema petrolero), en la que aparezcan:

- a. Las diferentes eras y períodos geológicos. Es importante colocar los límites en Ma (millones de años del presente). Estos límites se obtienen de una carta estratigráfica actualizada (estas cartas se pueden descargar de la Internet)¹.
- b. Los nombres formales de las unidades.
- c. Los nombres informales (normalmente operacionales) de las unidades.
- d. Los rangos de espesor de las unidades formales e informales.
- e. La litología distintiva de las unidades formales e informales.
- f. Los ambientes de sedimentación generales de unidades formales e informales.

En el texto, cada unidad formal debe ser descrita “de base a tope”, o sea, en el orden de su sedimentación. Los procesos sedimentarios se suceden en el tiempo de abajo hacia arriba: no es una función bidireccional. Se ha acostumbrado a describir las unidades desde el punto de vista “del perforador”, es decir, de tope a base; el objetivo de esta descripción es prevenir a los perforadores de pozos vecinos sobre las litologías que irán enfrentando a medida que los pozos avancen. Por su parte, el objetivo de una descripción estratigráfica es otro: describir “cómo se fue sedimentando o acumulando”; esto tiene un sentido de predicción, por cuanto los modelos de facies son la base para los modelos de electrofacies y así se pueden definir las tendencias comúnmente definidas como “afinamiento/engrosamiento” o “afinamiento/engrosamiento hacia arriba”, que suelen ser usadas para la designación de “paquetes” o “sets de capas” de unidades estratigráficas y que apoyan tanto a las interpretaciones de estilos y los procesos sedimentarios, como a las características/distribución de propiedades de un yacimiento en particular.

Para cada unidad, esta descripción estratigráfica debe tener una secuencia:

- a. *Litología distintiva* de base a tope (subdivisiones litológicas relevantes). Vale recordar que las descripciones de referencia a escala regional suelen estar referidas a las secciones-tipo o secciones de referencia de las unidades formacionales; eventualmente, si las secciones-tipo están muy lejos de la región de interés, se deben escoger secciones de referencia (hipoestratotipos) que serían válidas para la región en cuestión.
- b. *Espesores de las unidades estratigráficas* descritas en la litología distintiva.
- c. *Contactos inferior y superior*. Si hay variación en los contactos, regionalmente hablando, o si estos cambian según el área.

¹ Ver, por ejemplo, <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2017-02.jpg>

- d. *Variaciones laterales de facies* en la región. Esto es sumamente importante, ya que permite enmarcar las unidades previamente a su descripción local en los campos; también, si estas variaciones inducen o están relacionadas con las variaciones en los tipos de contacto.
- e. *Ambiente(s) de sedimentación*. Para este punto se recomienda documentarse bien sobre la aplicación del término “ambiente sedimentario” y recurrir a fuentes de buena calidad. Se puede referir a la evidencia fósil o litológica para la asignación de los ambientes. El conocimiento paleogeográfico de una cuenca en tiempos determinados es de gran ayuda para la interpretación o asignación de estos.
- f. *Edad*. A pesar de que muchas de ellas son determinaciones relativas, no se debe confundir “rango posible de edad” con la edad precisa de las unidades. Hay que recordar que la correlación está muy asociada con este dato.
- g. *Correlación*. Enumerar las unidades formales que correlacionan o tienen la misma edad que la que se describe en la región de interés.

Geología estructural regional

Se explica el “estilo estructural” que domina en la región y los rasgos principales de fallas y pliegues que la afectan. De ser posible, se debe mencionar, si los hay, los mecanismos que controlan o controlaron a las fallas principales y los períodos de erosión regional. También es necesario tratar los períodos en los que se formaron las estructuras principales y si hay posibilidad de reactivación de estructuras anteriores.

Geología del petróleo

En otras disciplinas, este sería el punto de la geología económica. Aquí se pueden mencionar, si existen, los elementos del sistema petrolero que afectaron la región. Para ello se puede elaborar un cuadro de eventos del sistema petrolero, como el de la figura 1.

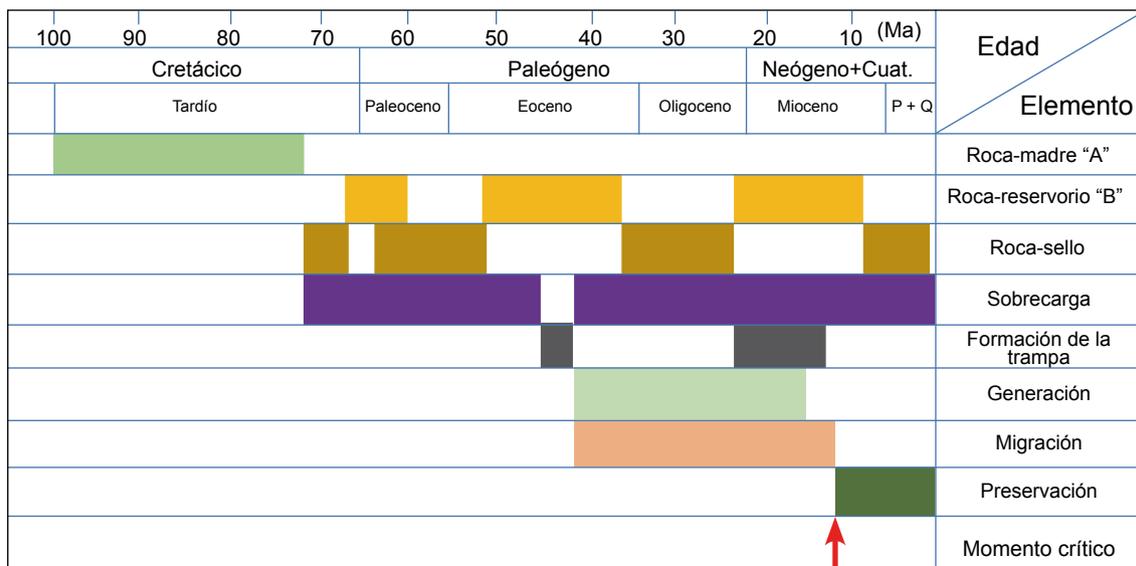


Figura. 1 Cuadro de eventos de un sistema petrolero A-B (!) (caso hipotético)².

² Véase la explicación de la nomenclatura usada en el siguiente párrafo.

Obsérvese que la escala horizontal está en tiempo geológico Ma (millones de años del presente). En la figura se muestran siete elementos: el primer elemento es la roca-madre “A” y aquí se indica su rango de edad; el segundo, la roca-reservorio, la cual puede pertenecer a diferentes unidades sedimentarias y tener diferentes edades; el tercero, el sello, que igualmente se pudo haber depositado en épocas diferentes (particularmente, si la roca sello se deposita al “mismo tiempo geológico” que la del reservorio, se puede tratar pares arena-sello de una misma formación); el cuarto, la cobertura de roca o la que específicamente “sobrecarga” a la roca-madre para generar los hidrocarburos; el quinto, la formación de la trampa, que igualmente puede tener varias etapas en el tiempo; los elementos sexto y séptimo aluden a la generación-migración, la cual debe ocurrir al menos después de haber formado las trampas que no se van a mover más o a moverse muy poco (puede estar ligada a sobrecarga o a una elevación de la temperatura por el flujo de calor que la distancia de un momento específico relacionado con acumulación sedimentaria, es decir, pueden darse diferentes “pulsos” de generación); el octavo, la “preservación” del hidrocarburo, cuyo inicio coincide aproximadamente con el “momento crítico” del sistema “A”-“B”. Por otra parte, el signo de admiración, “(!)”, se emplea cuando está geoquímicamente comprobado que el crudo en la cuenca proviene de la roca-madre “A”. Ahora, si los reservorios son de diferentes unidades formacionales, por ejemplo, “B”, “C” y “D”, podrían definirse tres sistemas petroleros diferentes: A-B, A-C o A-D, cada uno con la posibilidad de categorizarse como: (!) comprobado conocido; (.) roca-madre “A” existe, pero no está “amarrada” la geoquímica del reservorio con la roca-madre “A” (hipotético), y (?) especulativo, el *play* está definido, pero no se sabe si la roca-madre es “A” ni si la acumulación existe (véase Magoon y Dow, 1994). Es bueno recordar aquí que este cuadro se debería referir al caso regional. Una variante interesante es introducir la columna-resumen (donde el tiempo es vertical), de forma similar a la columna descrita en el apartado “Estratigrafía regional”, pero añadiendo:

- Los elementos del sistema petrolero del cuadro de eventos relacionados a intervalos de roca-madre, intervalos de roca-reservorio e intervalos de roca-sello.
- Momentos de estructuración (y, si es posible, un dibujo o *sketch* del tipo de estructura).
- Cualquier otra información relevante de tipo regional que se quiera añadir y esté relacionada con el propósito principal del trabajo.

GEOLOGÍA LOCAL

Este punto se estructura en cuatro apartados: introducción, estratigrafía local, geología estructural local y geología del petróleo.

Introducción

En este párrafo se resumen las razones por las cuales se estudiará el yacimiento en el campo escogido y se ponderarán cualitativamente los posibles factores geológicos que inciden en el problema.

Estratigrafía local

Se resumen las unidades estratigráficas a escala del campo en estudio; esto se puede lograr colocando una columna estratigráfica en tiempo geológico (que no es la columna de elementos del sistema petrolero) en la que aparezcan:

- Las diferentes eras y períodos geológicos. Es importante colocar los límites en Ma (millones de años del presente). Esta se obtiene de una carta estratigráfica actualizada (esta carta puede descargarse de la Internet)³.
- Los nombres formales de las unidades en el campo.
- Los nombres informales (normalmente operacionales) de las unidades en el campo.
- Los rangos de espesor de las unidades formales e informales en el campo.
- La litología distintiva de las unidades formales e informales en el campo.
- Los ambientes de sedimentación general de unidades formales e informales en el campo.

Las relaciones anteriores pueden aparecer en forma de columna o en forma de esquema estratigráfico, en las que además se señalen conceptualmente las relaciones laterales de las unidades y alguna información adicional de los elementos del sistema petrolero (véase, por ejemplo, García, dos Santos y Penteadó, 2015).

En el texto, cada unidad formal debe ser descrita “de base a tope”, o sea, en el orden de su sedimentación (a escala local debe definirse de qué tipo de basamento se trata: litología, edad tentativa, estructura, significado geológico). Los procesos sedimentarios se suceden en el tiempo de abajo hacia arriba, por lo tanto, no es una función bidireccional. Para cada unidad, esta descripción debe tener una secuencia:

- a. *Litología distintiva* de base a tope (subdivisiones litológicas relevantes). Aquí se recuerda que hay escoger un pozo (o varios pozos) de referencia que sería válido para el campo en cuestión. En consecuencia, se pueden añadir registros-tipo de las unidades que están presentes en el subsuelo del campo de interés. En este punto son muy útiles las secciones (estratigráficas y estructurales) con pozos, que muestren las unidades formales y de producción, así como sus variaciones laterales y estructuras-trampa. Esta sección (o secciones) servirá para ilustrar mejor los puntos subsiguientes.
- b. *Espesores de las unidades estratigráficas* descritas en “Litología distintiva”. Aquí es muy importante indicar si los espesores en el campo son en TVD, MD o TST.
- c. *Contactos inferior y superior*. Si hay variación en los contactos localmente hablando o si estos cambian según el área.
- d. *Variaciones laterales de facies* en el campo. Esto es sumamente importante, ya que permite ubicar los pozos (o el pozo) a estudiar en el contexto del campo, así como determinar si estas variaciones inducen o están relacionadas con las variaciones en los tipos de contacto.
- e. *Ambiente(s) de sedimentación*. Para este punto se recomienda documentarse bien sobre la aplicación del término “ambiente sedimentario” y recurrir a fuentes confiables. Se puede referir a la evidencia fósil o litológica para la asignación de los ambientes. La disponibilidad de secciones sísmicas (preferiblemente, sismoestratigráficamente interpretadas) del campo es sumamente útil, ya que la geometría de los cuerpos estratigráficos es esencial en la caracterización de un yacimiento, los cuales están muy ligados a los ambientes sedimentarios.
- f. *Edad*. A pesar de que muchas de las edades son determinaciones relativas, no se debe confundir rango posible de edad con la edad precisa de las unidades; hay que recordar que la correlación está muy relacionada con este dato. Si se dispone de informes con estudios bioestratigráficos del campo: mejor.

³ Véase, por ejemplo, <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2017-02.jpg>

- g. *Correlación.* La sección (o secciones) mencionada en “litología distintiva” servirá para ilustrar las conclusiones que sobre este punto se tengan. A estas secciones se les puede añadir la interpretación sísmica del campo, la cual debería ser solicitada desde un comienzo.

Geología estructural local

En función del estilo estructural que domina en la región y los rasgos principales de fallas y pliegues que la afectan, se presenta el mapa estructural del campo y se relaciona con dicho estilo estructural. De ser posible, se debe mencionar, si los hay, los mecanismos que controlan o controlaron a las fallas principales y los períodos de erosión importantes para la escala del campo. Igualmente, es necesario mencionar los períodos en los que se formaron las estructuras principales y si hay posibilidad de reactivación de estructuras anteriores, así como la importancia (o no) de estas estructuras como las verdaderas responsables del entrapamiento.

Geología del petróleo

En otras disciplinas, la geología del petróleo abarcaría la geología económica. En este punto se pueden mencionar los elementos del sistema petrolero que se mantienen de la visión regional. Para ello se puede confeccionar un cuadro de eventos del sistema petrolero, como el de la figura 2.

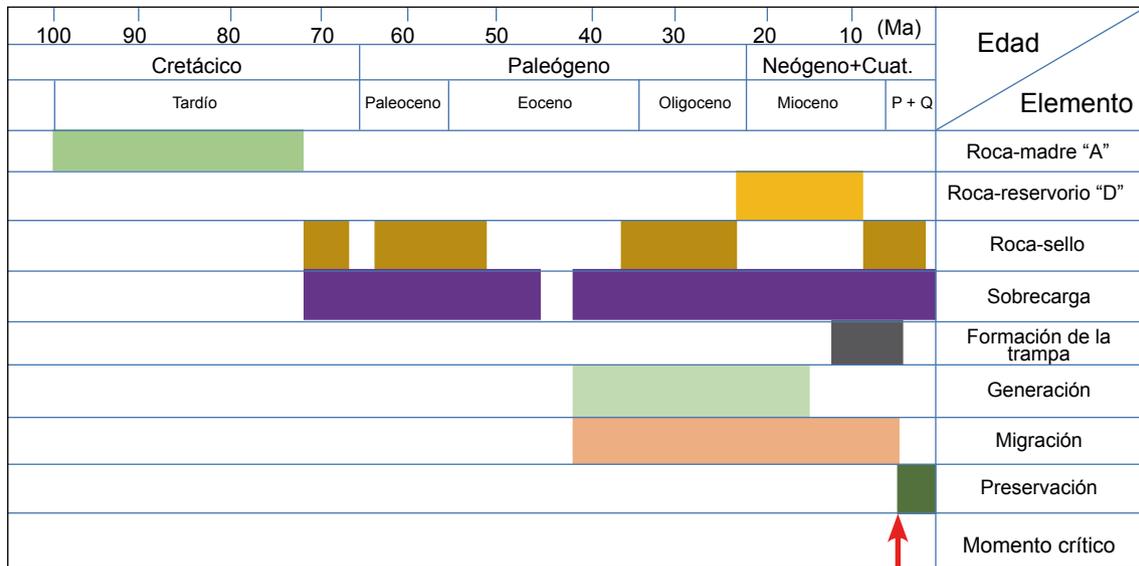


Figura 2. Carta de eventos del sistema petrolero para ilustrar las relaciones entre eventos y procesos (caso ficticio). La escala horizontal está en millones de años de derecha a izquierda, pero en este caso solo se considera el sistema petrolero A-D (!).

De manera similar a la escala de la geología regional, la escala horizontal está en tiempo geológico Ma (millones de años). En la carta se muestran ocho elementos: el primer elemento es la roca-madre (que puede estar o no presente en el propio campo o que se pudo haber generado a mucha distancia de este) y aquí se indica su rango de edad; el segundo, la roca-reservorio, la cual es la que se encuentra en el campo a estudiar (que puede ser diferente a las que aparecen regionalmente); el tercero, el sello, que igualmente se pudo haber depositado en épocas diferentes (a escala de campo, es común la presencia de pares arena-sello); al respecto, es muy importante separar verdadera-

mente las unidades que representan los sellos locales en el yacimiento; el cuarto, la cobertura de roca o la que específicamente carga para generar los hidrocarburos (esta parte pertenece a la escala regional, sobre todo si la generación fue a distancia del campo); el quinto, la formación de la trampa, que igualmente puede tener varias etapas en el tiempo (aunque todas las trampas se interpretan en el campo); los elementos sexto y séptimo son la generación-migración, la cual debe ocurrir al menos después de haber formado trampas que no se van a mover más o a moverse muy poco (esta interpretación es una combinación de la regional y la de trampas locales), y puede estar ligada a sobrecarga o a una elevación de la temperatura por el flujo de calor que la distancie de un momento específico relacionado con acumulación sedimentaria (lo que es igual a lo concluido regionalmente), y el octavo elemento es la preservación, cuyo inicio coincide aproximadamente con el momento crítico del sistema (véase Magoon y Dow, 1994). Vale la pena recordar que este cuadro debería referir al caso local del campo estudiado, como el sistema petrolero A-D en dicho campo. Una variante interesante a introducir es la columna-resumen (donde el tiempo es vertical), de forma similar a la columna descrita en el apartado “Estratigrafía regional”, pero ahora añadiendo:

- Los elementos del sistema petrolero del cuadro de eventos relacionados a intervalos de roca-madre (si los hay localmente), intervalos de roca-reservorio e intervalos de roca-sello.
- Momentos de estructuración para el campo (y, si es posible, un dibujo o *sketch* del tipo de estructura).
- Cualquier otra información relevante de tipo local que se quiera añadir y esté relacionada con el propósito principal del trabajo.

Gráficos importantes al respecto incluyen los llamados diagramas de soterramiento, los mapas y secciones estructurales del sistema petrolífero (véase Magoon y Dow, 1994).

Sumario a los aspectos geológicos

Este punto es de libre escogencia, pero es muy recomendado. Se trata de resumir los aspectos más relevantes de la geología (tanto regional como local) que pudieran controlar el tema que se trata de resolver en el trabajo. Esto podría incluir desde modelos cuantificados con tablas de datos genuinas, hasta datos estimados y, de alguna manera, conciliados o relacionados con variables estratigráficas, sedimentológicas, estructurales o reológicas o combinaciones de estas. Si todos los trabajos de yacimientos se hicieran así, al poco tiempo habría una base de datos extremadamente importante para poder modelar situaciones especiales o comunes en los campos petrolíferos, predecir problemas de comportamiento de pozos y yacimientos en base a analogías, recalcular reservas, mejorar sustancialmente métodos de recuperación, etc.

GLOSARIO

Ambiente sedimentario. De manera similar a lo que ha ocurrido con el término “facies sedimentaria”, se ha maltratado mucho el concepto original de ambiente sedimentario, el cual es, simplemente, el conjunto de características físicoquímicas que tiene el volumen de un sistema determinado y que frecuentemente se propone separar del resto del volumen que lo rodea. Esto no es tan sencillo de definir desde el punto de vista termodinámico si empleáramos la palabra “sistema” en este sentido. Desde el punto de vista geológico –llamémoslo así–, es posible que nuestro deseo sea el de tratar de separar lo que es un río (o sistema fluvial) de lo que es una playa (o sistema costero); este afán de separar lo que en la naturaleza está íntimamente ligado puede inducir a errores muy graves, no solo de concepto, sino desde el punto de vista práctico (por ejemplo, las arenas fluviales suelen continuar

hacia el mar y estar perfectamente comunicadas; tratar de separarlas arbitrariamente y colocar “límites” de propiedades entre ellas, no solo deforma la realidad, sino que induce errores en la estimación de propiedades, volúmenes, etc., que pueden ser definitivos en la tarea de planificación).

Carta estratigráfica. Es un dibujo conceptual en el que se colocan las unidades estratigráficas apiladas en tiempo y que muestran sus relaciones laterales (véase Krumbein y Sloss, 1969). Más recientemente (véase, por ejemplo, Emery y Myers, 1999), se ha empleado la proyección ortogonal de los reflectores sísmicos en una escala horizontal lineal, mientras que la vertical es la posición relativa a su sedimentación, que se la ha llamado carta cronoestratigráfica, en la que las relaciones de los sistemas encadenados secuenciales pueden interpretarse en la propia escala sísmica (aunque muy distanciados en el tiempo, los conceptos de Wheeler y Beesley [1948] y Wheeler [1958] fueron muy avanzados para su época y constituyen parte de la esencia que se intenta resolver cuando actualmente se confecciona una carta cronoestratigráfica con la sísmica). Inclusive, *softwares* especializados intentan solucionar este problema, pero solo para casos en los que la deformación de los estratos es muy simple y solo para terminaciones muy evidentes. Mucha sismoestratigrafía carecen de una buena interpretación sismoestratigráfica; esto no lo resuelven únicamente los *softwares* de computación, puesto que se requiere la intervención de intérpretes capacitados y con mucha experiencia en modelos sedimentarios.

Correlación/continuidad lateral. El concepto de correlación estratigráfica fue originalmente aplicado con respecto al tiempo: es decir, se correlacionan puntos o superficies (topes) que se suponen tienen en común una edad o un rango de edad (superficies diacrónicas) (véase Krumbein y Sloss, 1969). Cuando se dice que un paquete de areniscas es igual a otro paquete de areniscas, se estaría dentro del concepto de continuidad lateral o litocorrelación (véase Salvador, 2001); algo análogo sería en el caso de correlacionar biofacies (biocorrelación), y para el caso de tiempo, crono-correlación (véase Salvador, 2001). Debido a que los estratos suelen depositarse oblicuamente o imbricarse entre sí, es muy difícil decir que un “set de capas” (terminología propuesta por van Wagoner, Mitchum, Campion y Rahmanian, 1990) en un pozo sea el mismo en el siguiente, especialmente si los ángulos de reposo son de varios grados respecto al plano horizontal original (consecuencia de la estratificación cruzada de casi todos los depósitos sedimentarios). Esta característica nace desde los principios de la estratigrafía secuencial y sus sistemas encadenados (véase, por ejemplo, Vail, Mitchum y Sangree, 1977-1982; Van Wagoner et ál., 1990), hasta el detalle de cuerpos arenosos en ríos modernos (por ejemplo, Reesenk y Bridge, 2011; Colomera, Felletti, Mountney y McCaffrey, 2012a, 2012b; Lunt et ál., 2013).

Estilo estructural. El término se refiere especialmente a la identificación del tipo de mecanismo principal de deformación en una región determinada y a su representación mediante un mapa estructural y/o secciones estructurales que representen los tipos principales de fallas y pliegues (véase, por ejemplo, Bally 1983a, 1983b, 1983c).

Facies sedimentaria. El término “facies” es ampliamente usado tanto en petrología sedimentaria como en metamórfica. Para el caso de las rocas sedimentarias, una facies (definida originalmente por Gressly, 1838) se refiere a un conjunto de características que definen una asociación de capas determinada. Originalmente aplicado solo a litología (véase también Krumbein y Sloss, 1969), el término tiene actualmente una aplicación muy amplia, que tiene que ver con propiedades o características de muy diferentes orígenes (por ejemplo, facies porosa, facies permeable, facies fluvial, etc.; véase Salvador, 2001). El autor considera que es necesario evitar los términos que no se refieran estrictamente a la litología y así regresar a una aplicación más objetiva y menos ambigua (por ejemplo, decir facies arenosa en vez de facies porosa); en este sentido, la propia estratigrafía ha promulgado el empleo de términos más aceptados y cuya denominación ya implica una “orden” para su aplicación, como, por ejemplo, “litofacies” (sólo se refiere a la parte litológica) o “biofacies”

(sólo se refiere a una asociación paleontológica, normalmente asociada a una litofacies específica). A pesar de que existe la libertad de aplicar términos como facies arrecifal, facies fluvial, etc., no es aconsejable porque a fin de cuentas sería una especie de mezcla entre ambiente sedimentario o régimen hidrodinámico y litología. Si se trabaja a una escala detallada, vemos que hay litologías que pueden estar en ambientes diferentes, como, por ejemplo, areniscas (hay areniscas tanto en bancos arrecifales como en ambientes fluviales). El caso es que para poder diferenciar los distintos tipos litológicos habría que hacer también una selección de estructuras primarias y secundarias (inclusive, fósiles o ichnofacies) y combinarlas con geometría de capas, etc.; esto es precisamente el concepto inicial de facies, que ahora podemos extender como “litofacies” y que la condición ambiental no es estrictamente necesaria, ya que pueden existir en diferentes ambientes o regímenes. Debido a que se busca una aplicación práctica o utilidad práctica en estos términos, se recomienda ampliamente usar el concepto de facies sedimentaria en el sentido definido por la aplicación de litofacies o estrictamente litológico (también se puede utilizar el de proporciones litológicas, que sería el utilizado originalmente para los mapas de facies [véase Krumbein y Sloss, 1969]); las interpretaciones ambientales son posteriores. Dicho de otra manera: un conjunto de litofacies, que se usan para definir un ambiente en un volumen dado del subsuelo, no tiene la propiedad biyectiva, es decir, se puede hacer primero un volumen de ambiente y llegar después a las propiedades de facies. Un error conceptual que muchas veces se comete es “interpretar ambientes” con métodos indirectos, como los sísmicos, que no han sido alimentados con datos de inversión sísmica. Cada vez es más importante la evaluación de reservorios por medio de la herramienta sísmica (véase Brown, 1999; Rodríguez, 2011); todo ello debe ser conciliado con el modelo estratigráfico/de facies, el modelo estructural y, en general, el geológico.

Geotectónica. Los estudios referidos a la tectónica, cuando esta alcanza escala regional o mayor (Neuendorf, Mehl y Jackson, 2005).

Litoestratigrafía/litología distintiva. La litoestratigrafía se refiere a la descripción litológica o descripción de litofacies. Normalmente, la descripción de una unidad estratigráfica conlleva establecer cuál es su litología distintiva a la escala de interés (regional o local); por ejemplo, una formación puede tener una litología distintiva a escala regional de areniscas; sin embargo, en un campo determinado, la litología distintiva es de pares arena-sello o areniscas de espesor decimétrico intercaladas con lutitas también decimétricas. Muchas veces, la litología distintiva es sólo eso: la presencia de una litología que no hay en las formaciones suprayacentes o infrayacentes en el área o región, que puede hasta conformar menos del 50 % de la formación, por lo que es muy aconsejable tener en cuenta este detalle a la hora de consultar referencias; por ejemplo, esto ocurre frecuentemente con los miembros informales de la Formación Carbonera en la Cuenca de Llanos: en la litología distintiva a nivel regional los miembros “impares” deberían ser arenosos, y los “pares”, pelíticos; no obstante, lo aconsejable en cada campo es definir cada uno de ellos al menos como unidades operacionales locales. Cuando se garantiza la correlación sísmica adecuada entre campos adyacentes, sucede frecuentemente que las litologías o proporciones litológicas no son las mismas y hasta podrían invertirse las definiciones regionales.

Momento crítico. Se encuentra supeditado al intérprete, pero se ubica aproximadamente en el momento en que existe probabilísticamente la máxima acumulación de petróleo en las trampas y que al tiempo siguiente se considere que sus posibilidades de preservación son máximas (véase Magoon y Dow, 1994).

Nombre formal en estratigrafía. En los países donde hay una comisión de estratigrafía permanente o se adhieren a uno de los códigos internacionales de estratigrafía (por ejemplo, NASCN, 2005), se establecen las reglas de nomenclatura estratigráfica y se aceptan o rechazan los nombres de las unidades estratigráficas a escala nacional en compendios denominados léxicos estratigráficos. Por

lo general, los nombres formales serán aquellos cuya definición sigue las reglas propuestas por el código de nomenclatura que se haya escogido. Los léxicos deben revisarse con el paso de los años y verificar si la información nueva, adquirida a través de años de exploración petrolera o geocientífica, amerita dicha revisión.

Nombre informal en estratigrafía. Análogamente a lo dicho respecto a los nombres formales, si hay una nomenclatura que se emplea con fines prácticos, pero que no es rigurosamente definida por las normas vigentes de estratigrafía, se considera “informal”. Igualmente, si se considera que la nomenclatura no tiene ningún fin práctico, el concepto sería declarado término “inválido” y se recomendaría su no aplicación. Por ejemplo, los miembros informales de la Formación Carbonera C1 a C8 se deben considerar términos informales, pero con una aplicación práctica que amerita no invalidarlos hasta tanto no sean sustituidos por una nomenclatura formal.

Paleogeografía. Reconstrucción tentativa de la distribución de rasgos geográficos y/o ambientes sedimentarios en un tiempo geológico determinado para un área o región determinada.

Reología. Ciencia que estudia la deformación de los cuerpos de roca o el flujo de la materia y la relación entre deformación y esfuerzo (véase Neuendorf et ál., 2005).

Roca-madre. Es una roca que se origina a partir de un sedimento rico en materia orgánica (generalmente > 1 % carbono orgánico total) que es potencialmente capaz de generar hidrocarburos en su soterramiento.

Sección-tipo/estratotipo/holoestratotipo. Toda unidad estratigráfica formal del rango de formación o miembro debe tener una sección tipo por convención internacional (véase, por ejemplo, Salvador, 1994, 2001; NACSN, 2005), en la que se muestre la litología distintiva y todas las demás variables con las que se puede definir a una “unidad formal” en estratigrafía. Las “secciones-tipo” pueden ser de superficie o subsuelo; en este último caso debería existir un buen registro con núcleo(s), muestras de canal y registros (*logs*) o perfiles de pozo. Cuando existe una sección-tipo en un área, la definición puede extenderse a otra distante, por medio de la selección de “secciones de referencia” o en el caso del subsuelo “pozos de referencia”. Más específicamente, la sección-tipo recibe el nombre de estratotipo, y la de referencia, hipoestratotipo (por ejemplo, Salvador, 1994, 2001).

Sello. Típicamente referido a roca-sello, para no confundirse con el caso de los sellos asfálticos. Las rocas-sello son clásicamente litologías limo-arcillosas (pelitas) que se intercalan con las rocas-reservorio. Eventualmente, calizas sin fracturar, muy compactas, pueden fungir de sello; lo mismo ocurre con otras litologías competentes, como diques y *sills* ígneos, mantos de lava y, en general, cualquier cuerpo de roca con porosidad mínima. Las rocas-sello dependen mucho del tipo de hidrocarburo que migra; por ejemplo, una roca puede ser sello para un crudo pesado de molécula muy grande, pero que no pueda retener el gas (metano, por ejemplo).

Sismoestratigrafía. Término empleado para designar la interpretación estratigráfica que se puede hacer por medio de la sísmica; esta disciplina fue la base principal para desarrollar la estratigrafía secuencial (Vail et ál., 1977-1982); algunas veces se ha considerado un equivalente inválido de la segunda, pero su mejor acepción es aquella en la que indudablemente se usa para interpretar la continuidad lateral de las unidades estratigráficas secuenciales.

Sistema petrolífero. Es una porción o la totalidad de una cuenca sedimentaria donde se han dado las condiciones para que exista una roca-madre que genere hidrocarburos luego de una historia de enterramiento, para que luego estos hidrocarburos puedan migrar en forma primaria y/o secundaria y se entrapen definitivamente gracias a estructuras previamente formadas y/o a trampas estratigráficas. El momento crítico del sistema es aquel en el que se considera que ya están dadas las condiciones óptimas para el entrapamiento y preservación de los hidrocarburos hasta nuestros días. El sistema petrolero, así definido, también puede representarse en forma de una carta esquemática de elementos y procesos (carta del sistema petrolífero), por mapas conceptuales del sistema

petrolífero y su extensión geográfica, de una o varias secciones estructurales a escala regional y/o por una columna estratigráfica generalizada (en tiempo geológico), representativa de edades, litologías y elementos del sistema petrolífero (véase Magoon y Dow, 1994; Sanchez et ál., 2015, entre otros).

Trampa. Es un elemento del sistema petrolífero que se refiere a la estructura geológica que conforma la geometría de una roca-reservorio, capaz de retener el hidrocarburo que migra hacia las zonas de menor energía potencial. Las trampas pueden ser: estructurales (fallas y pliegues), estratigráficas (cambios laterales y verticales de facies, contactos abruptos con litología-sello) o mixtas (estructurales, combinadas con estratigráficas). Una falla no necesariamente produce un sello: el material que rellene la falla debe ser de grano muy fino (arcilloso), en cuyo caso el sello podría estar garantizado; en otros casos, la falla yuxtapone una litología porosa del reservorio contra una litología-sello, esto también garantiza que la falla es un límite de la trampa. Hay tipos especiales, como los llamados sellos asfálticos o cambios laterales en la gravedad del crudo debidos a oxidación y/o biodegradación, que producen verdaderos sellos que impiden avanzar en los bordes de cuenca al petróleo más liviano. Un ejemplo importante de estos sellos se da en el distrito Bolívar del lago de Maracaibo y en la faja bituminosa del Orinoco, ambos en Venezuela.

REFERENCIAS

- Bally, A. (1983a). *Seismic expression of structural styles: a picture and work atlas. Volume 1-The Layered Earth* (AAPG Studies in Geology n.º15). Tulsa, EE. UU.: American Association of Petroleum Geologists.
- Bally, A. (1983b). *Seismic expression of structural styles: a picture and work atlas. Volume 2-Tectonics of Extensional Province* (AAPG Studies in Geology n.º15). Tulsa, EE. UU.: American Association of Petroleum Geologists.
- Bally, A. (1983c). *Seismic expression of structural styles: a picture and work atlas. Volume 3-Tectonics of Compressional Provinces* (AAPG Studies in Geology n.º15). Tulsa, EE. UU.: American Association of Petroleum Geologists.
- Brown, A. (1999). *Interpretation of three-dimensional seismic* (5ª ed., Memoir 42, Investigations in Geophysics n.º9). Tulsa, EE. UU.: American Association of Petroleum Geologists and Society of Exploration Geophysicists.
- Colombera, L., Felletti, F., Mountney, N., y McCaffrey, D. (2012). A database approach for constraining stochastic simulations of the sedimentary heterogeneity of fluvial reservoirs. *American Association of Petroleum Geologists*, 96(11), 2143-2166.
- Colombera, L., Mountney, N., y McCaffrey, D. (2012). A relational database for the digitization of fluvial architecture: concepts and example applications. *Petroleum Geoscience*, 18(1), 129-140.
- Emery, D. y Myers, K. (Ed.). (1997). *Sequence Stratigraphy*. Oxford: Blackwell Science .
- García, D., dos Santos, E., y Penteadó, H. (2015) Controls on petroleum composition in the Llanos basin, Colombia: Implications for exploration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 99(8), 1503-1535.
- Gressly, A. (1838). *Observations géologiques sur le Jura soulois* (nouveau mémoire 2). Basel, Suiza: Société Helvétique des Sciences Naturelles.
- Krumbein, W., y Sloss, L. (1969) *Estratigrafía y Sedimentación* (1ª ed.), Buenos Aires: UTEHA.

- Lunt, I., Sambrook, G., Best, J., Ashworth, P., Lane, S., y Simpson, C. (2013) Deposits of the sandy braided South Saskatchewan River: Implications for the use of modern analogs in reconstructing channel dimensions in reservoir characterization. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 97(4), 553-576.
- Magoon, L., y Dow, W. (1994). The petroleum system. En L. Magoon y W. Dow (ed.), *The petroleum system- from source to trap* (pp. 3-24). EE. UU.: American Association of Petroleum Geologists.
- NACSN. (2005). North American stratigraphic code. *American Association of Petroleum Geologists*, 89(11), 1547-1591.
- Neuendorf, K., Mehl, J., y Jackson, J. (eds.). (2005). *Glossary of Geology* (5ª ed.). Alexandria, EE. UU.: American Geological Institute.
- Reesenk, A., y Bridge, J. (2011). Evidence of bedform superimposition and flow unsteadiness in unit-bar deposits, South Saskatchewan river, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 81(11), 814-840.
- Rodríguez, J. (2011) Seismic Applications. En *Guidelines for Application of the Petroleum Resources Management System* (pp. 23-34). EE. UU.: SPE, AAPG, WPC, SPEE, SEG.
- Salvador, A. (ed.). (1994) *International stratigraphic guide*. Boulder, EE. UU.: International Sub-commission on Stratigraphic Classification of IUGS International Commission on Stratigraphy, IUGS y GSA.
- Salvador, A. (ed.). (2001). *International stratigraphic guide*. Boulder, EE. UU.: International Sub-commission on Stratigraphic Classification of IUGS International Commission on Stratigraphy, IUGS y GSA.
- Sanchez, N., Mora, A., Parra, M., Garcia, D., Cortes, M., Shanahan, T., Ramirez, R., Llamasa, O., y Guzman, M. (2015). Petroleum System modelling in the Eastern Cordillera of Colombia using geochemistry and timing of thrusting and deformation. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 99(8): 1537-1556.
- Vail, P., Mitchum, R., y Sangree, J. (1977-1982). Part four: global cycles of relative changes of sea level. En C. Payton (eds.), *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration* (memoir 26, 1-5 ed., pp. 83-98). Tulsa, EE. UU.: American Association of Petroleum Geologists.
- Van Wagoner, J., Mitchum, R., Champion, K., y Rahmanian, V. (1990) *Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies* (Methods in Exploration Series, n.º 7). Tulsa, EE. UU.: American Association of Petroleum Geologists Methods in Exploration Series 7
- Wheeler, H. (1958) Time-stratigraphy. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 42(5), 1047-1063.
- Wheeler, H., y Beesley, E. (1948). Critique of the time-stratigraphic concept. *Geological Society of America Bulletin*, 59(1), 75-86.