

EL 40 ANIVERSARIO DE UN PARADIGMA EN EL ANÁLISIS DE CUENCAS SEDIMENTARIAS

POR GONZALO PARDO, ÁNGEL GONZÁLEZ
Y CONCEPCIÓN ARENAS

UTS T7

14,3 +/-0,14 Ma

UTS T6

16,2 +/-0,14 Ma

UTS T5

Las unidades genéticas (Unidades tectosedimentarias, UTS) establecidas en la Sierra de Alcubierre (Cuenca del Ebro), con edades de sus límites según Pérez-Rivarés (2016).

Imagen cedida por C. Arenas.

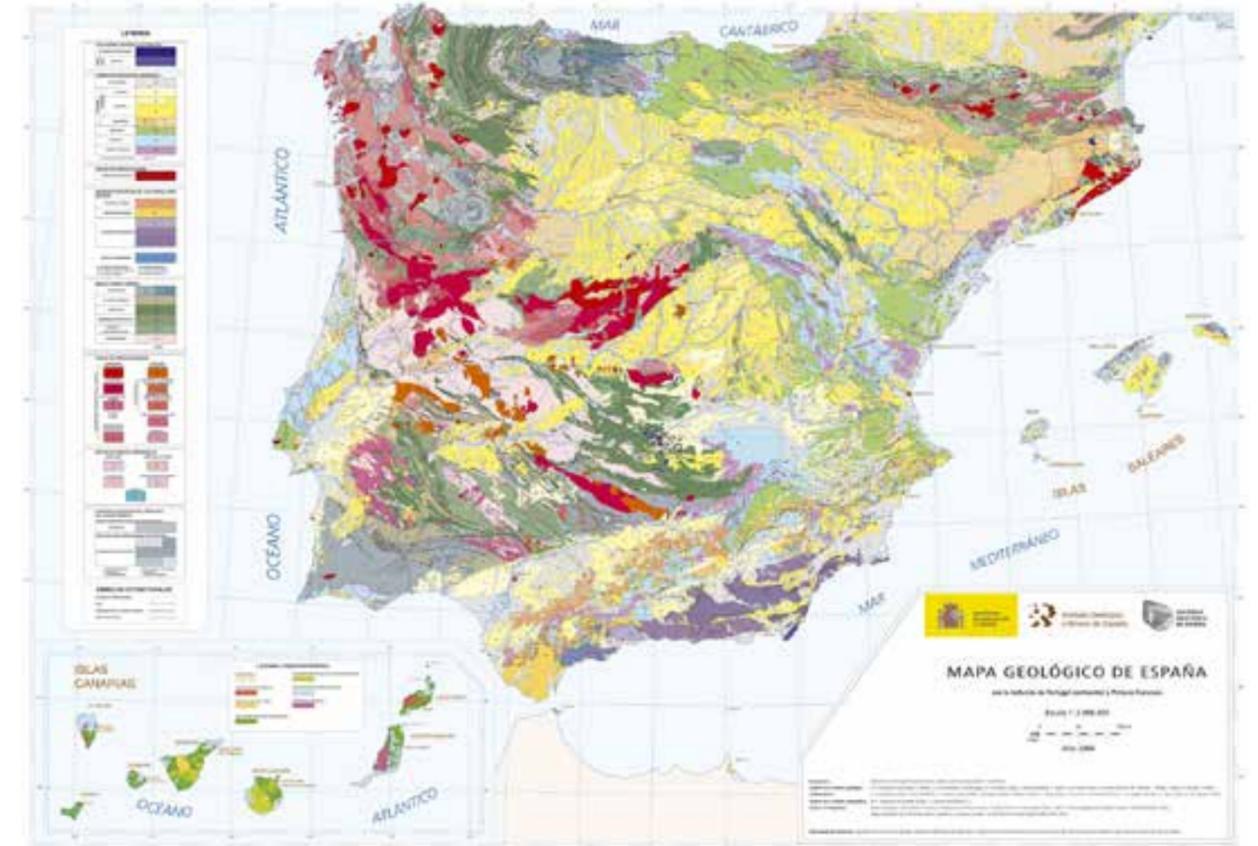


Cuencua sedimentaria de Aliaga (Teruel).
Imagen cedida por C. Arenas.

ALGUNAS DIVISIONES CLÁSICAS DEL REGISTRO GEOLÓGICO

La historia de la Tierra es larga y compleja. Como ente dinámico, su geografía ha experimentado múltiples cambios en la posición de las masas continentales, con varios ciclos de reunión, con formación de cordilleras, y fragmentación, con creación de nuevos océanos. De igual manera, su clima ha variado según ciclos de diferente duración. Sobre este cambiante sustrato físico tuvo lugar la no menos compleja evolución de los seres vivos.

La reconstrucción de esa historia, aún por completar y comprender en muchos aspectos, se hace a partir del *registro geológico*, formado por las rocas de la corteza terrestre. El registro geológico no es completo ni continuo en ninguna parte del planeta, sino que se encuentra repartido en fragmentos en cuencas sedimentarias antiguas o actuales, casi siempre desconectadas unas de otras. La Estratigrafía, desde sus comienzos, se empeñó en ordenar temporalmente el registro geológico de las rocas estratificadas, sean estas ígneas, metamórficas o sedimentarias, consolidadas o no. Pero además de estudiar las relaciones cronológicas de las rocas, analiza su geometría, composición litológica, contenido fósil, propiedades geoquímicas y geofísicas y otras características, propiedades y atributos que permiten interpretar su ambiente de formación y reconstruir su historia.



▲
**Mapa Geológico de España,
escala 1: 2.000.000,
donde los distintos
colores corresponden
esencialmente a la edad
de las rocas (unidades
cronoestratigráficas).**

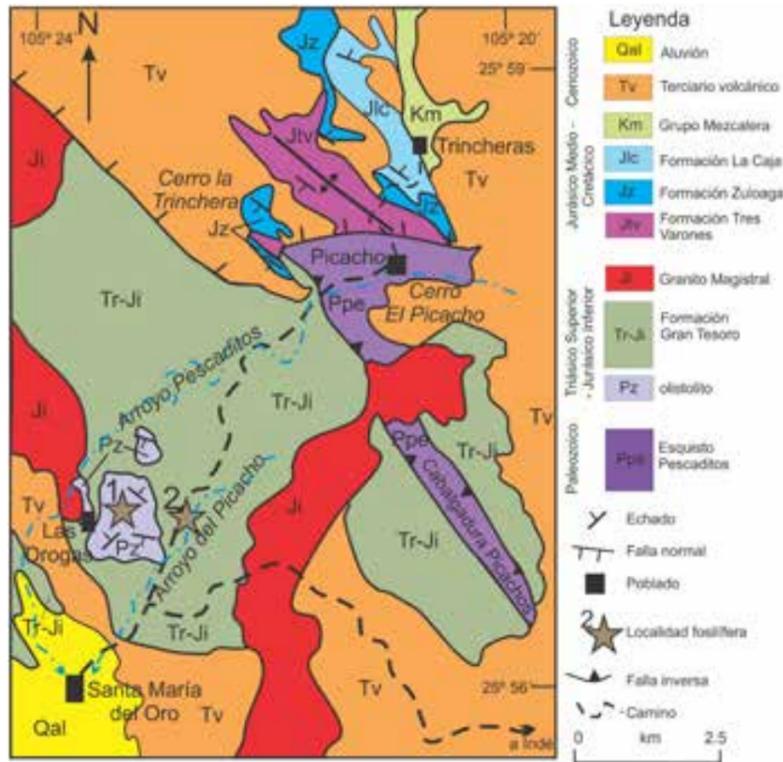
Instituto Geológico y Minero
de España, 2004.

Sin embargo, aun considerando una parte limitada del registro geológico, por ejemplo el existente en una única cuenca sedimentaria, como la Cuenca cenozoica del Ebro, la escala espacial y temporal hace que ese registro sea inabarcable como un todo. Así, su estudio requiere una división inicial en unidades rocosas diferenciables, que según la Guía Estratigráfica Internacional deben ser útiles y cartografiables. Ahora bien, son muchas las características de las rocas estratificadas que pueden utilizarse para establecer unidades, y los límites de una unidad definida según una determinada propiedad de las rocas no tienen por qué coincidir con los de las unidades establecidas mediante otras propiedades de las mismas rocas. Existen pues distintos tipos de unidades estratigráficas.

Veamos algunos ejemplos usuales: La característica más universal para definir unidades rocosas es su edad de formación. A estas unidades se les llama *cronoestratigráficas* (p.ej., Paleozoico, Jurásico, Cretácico, etc.). Tienen la ventaja de ser de uso global y, de hecho, si uno consulta mapas geológicos de síntesis, de escala 1:1.000.000 o menor, verá zonas o "manchas" con diferentes colores que, en la leyenda, corresponden a diferentes edades (ver figura). Por supuesto, cada una de estas unidades incluye litologías variadas.

Sin embargo, delimitar unidades cronoestratigráficas conlleva mucho trabajo, especialmente paleontológico; por ello, son poco prácticas en la exploración inicial de un área con vistas a infraestructuras, recursos o riesgos geológicos. En estos casos, cono-

“La Estratigrafía, desde sus comienzos, se empeñó en ordenar temporalmente el registro geológico de las rocas estratificadas”.



Mapa geológico del área de Santa María del Oro-Trincheras, estado de Durango, México, donde los colores corresponden a unidades litoestratigráficas (formaciones y grupos), cuya edad es solamente aproximada y de importancia secundaria.

boletinsgm.igeolcu.unam.mx



Imagen sísmica donde se aprecia que los reflectores más superficiales, casi horizontales, truncan a los subyacentes, inclinados hacia la derecha. El límite entre ambos conjuntos se utilizará para separar dos depositional sequences. Nótese que la escala

vertical es el mínimo tiempo de viaje de la onda sísmica, desde el foco emisor al reflector y vuelta a un geófono en superficie (two-way travelttime, TWT).

De Mitchum et al., en Payton (1977). basin.earth.ncu.edu

cer la edad de las rocas es un objetivo secundario. Para estas situaciones se utilizan las *unidades litoestratigráficas*: unidades cartográficas que se definen y diferencian de las contiguas exclusivamente por su litología. Los fósiles pueden ser un carácter más de la composición litológica, pero sin implicaciones de edad. Por ejemplo, unas calizas arrecifales pueden diferenciarse como unidad litoestratigráfica, siendo secundario que los corales sean del periodo Devónico o del periodo Jurásico.

Ahora bien, si en una cuenca sedimentaria se diferencian conjuntos de estratos por su contenido en taxones de organismos fósiles, con independencia de la composición litológica de esos estratos, tendremos las *unidades bioestratigráficas*. Como los organismos están sometidos a los procesos irreversibles de la evolución, las unidades bioestratigráficas están directamente relacionadas con la edad geológica y son indicativas de la misma.

EL PARADIGMA ACTUAL: LA ESTRATIGRAFÍA SECUENCIAL

Capítulo aparte tienen las cuencas no accesibles directamente por estar bajo el mar, o aquellas partes de una cuenca que quedan ocultas en el subsuelo. En estos casos, los testigos de sondeos (perforaciones verticales), de existir, pueden servir para diferenciar unidades estratigráficas. Generalmente, la extensión de las unidades así delimitadas es pequeña, salvo que se disponga de una red de sondeos de cierta densidad. Para tener un conocimiento más completo de la distribución espacial de las unidades del subsuelo se aplican otros métodos geofísicos.

“Un reflector sísmico no es un estrato, sino una superficie con propiedades acústicas especiales, prácticamente paralela a las superficies de estratificación”.

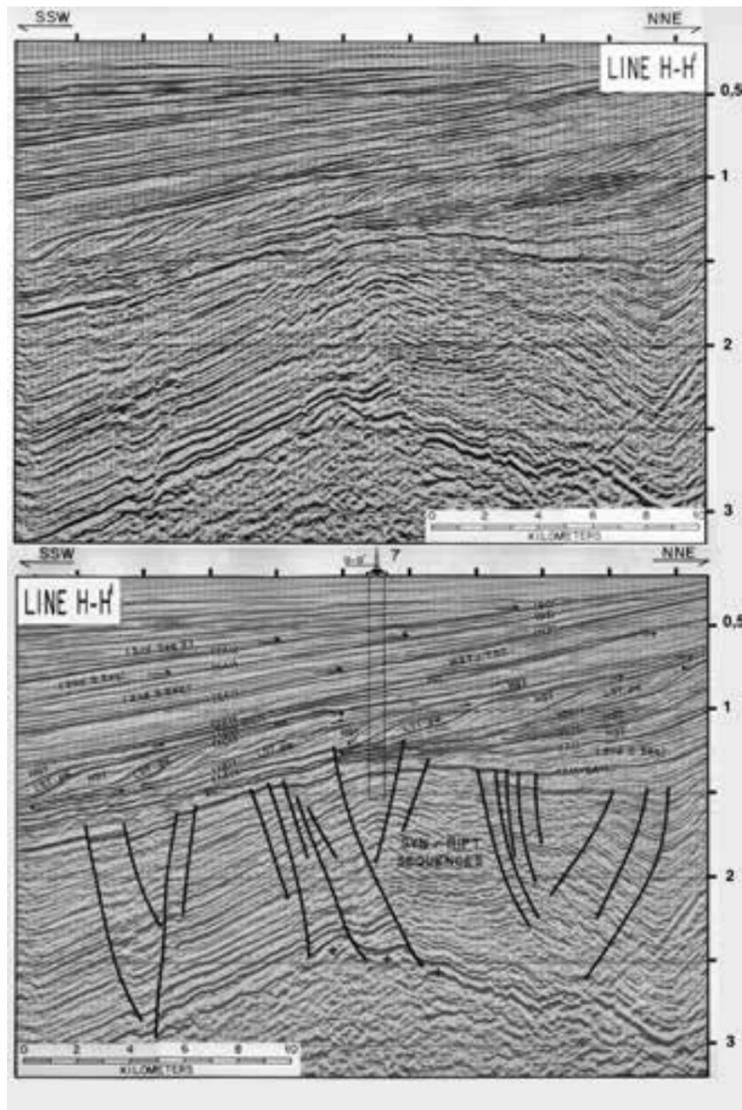
En esta línea, hace ahora 40 años, C.E. Payton editaba la Memoria nº 26 de la American Association of Petroleum Geologists (AAPG), cuyo título habla por sí solo: *Seismic stratigraphy- applications to hydrocarbon exploration*. Se recopilaban en este volumen los métodos con que los petroleros obtenían información geológica mediante la sísmica de reflexión. En esas fechas, las técnicas de adquisición y análisis de las reflexiones de ondas sísmicas generadas artificialmente (mediante explosiones, percusiones, etc.) habían avanzado notablemente y permitían reconocer con claridad *reflectores sísmicos* en materiales del subsuelo. Los reflectores podían trazarse en una extensión que dependía de las líneas de geófonos (o hidrófonos) establecidas en superficie (decenas de km), y hasta la profundidad a que las ondas sísmicas alcanzaban un basamento acústico, donde los reflectores presentaban un patrón caótico, perdiendo toda continuidad.

Un *reflector sísmico* no es un estrato, porque la longitud de la onda sísmica provocada artificialmente es siempre mucho mayor que el espesor de los estratos individuales, pero es una superficie con propiedades acústicas especiales, prácticamente paralela a las superficies de estratificación. En consecuencia, puede decirse que un reflector sísmico es una superficie isócrona con una aproximación de \pm media longitud de onda, lo que puede suponer algunas decenas de metros de espesor de materiales. Pero en definitiva, las relaciones entre reflectores son una imagen fiel de las relaciones geométricas (y temporales) entre grupos de estratos.

A partir de esto, en la memoria citada, un grupo de geólogos de la compañía Exxon, entre los que es ineludible destacar a P.R. Vail, R.M. Mitchum Jr. y S. Thompson III, desarrollaron una metodología de análisis de cuencas con la que, mediante el estudio de los reflectores sísmicos, dividían el relleno de una cuenca sedimentaria en unidades que denominaron *depositional sequences* (secuencias de depósito), y fundaban la Estratigrafía secuencial (*Sequence Stratigraphy*).

Estos autores trabajaban en las cuencas sedimentarias con mayor interés como posibles áreas de yacimientos de hidrocarburos, mayoritariamente las desarrolladas en plataformas marinas de márgenes continentales estables, de tipo atlántico. Como consecuencia lógica, relacionaron la geometría de las *depositional sequences*, que diferenciaban mediante sísmica, con cambios relativos del nivel del mar. Cada secuencia se genera durante un ascenso relativo del nivel del mar, y sus límites vienen dados por los momentos en que se producen caídas relativas del nivel. Esto implica que esas secuencias de depósito sean *unidades estratigráficas genéticas*, es decir, generadas por procesos que afectan a buena parte o toda la extensión de la cuenca. Así, pueden incluir desde ambientes continentales a marinos profundos. Por tanto, una secuencia de depósito englobará litologías (o unidades litoestratigráficas) diferentes.

Como disponían de la sísmica de numerosas cuencas donde había trabajado la compañía, correlacionaron secuencias de depósito de la misma edad en diferentes partes del globo. Par-

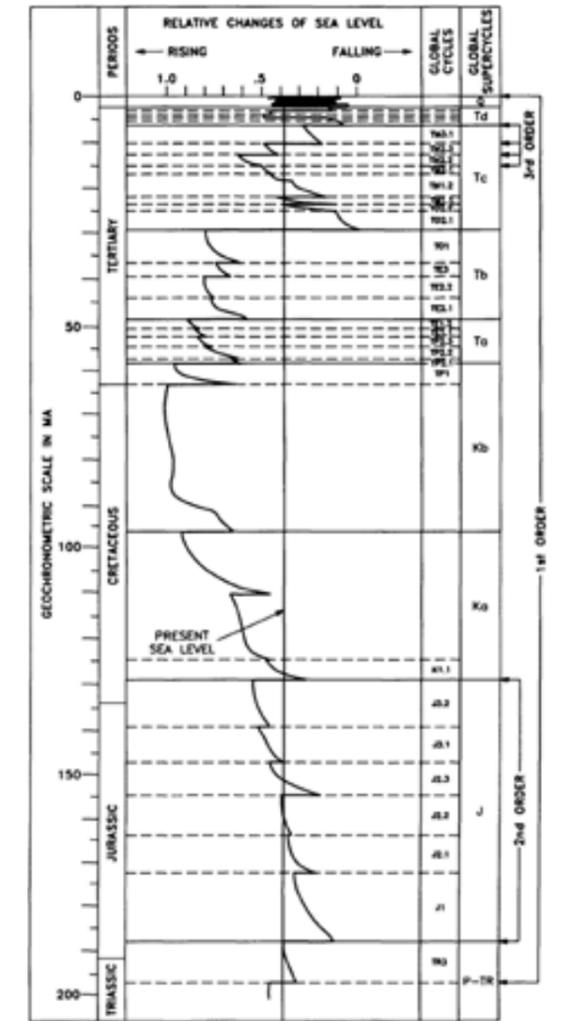


Arriba, imagen sísmica. Abajo, su interpretación según la metodología de la Estratigrafía secuencial, diferenciando las secuencias de depósito *post-rifting*, es decir, posteriores a la formación de las fallas, también trazadas a partir de la sísmica. En este caso se cuenta además con el apoyo de un sondeo. La escala vertical sigue referida al TWT.

crack.seismo.unr.edu

Escala relativa de las variaciones eustáticas durante el Mesozoico y el Cenozoico, según Vail et al., en Payton (1977). Nótese que en el Cretácico solo aparecen los ciclos de segundo orden (Ka y Kb); la razón es que la compañía Exxon no autorizó la publicación de los ciclos globales de tercer orden, como en el resto de ese tiempo. Puede sospecharse que esto ayudó a la credibilidad de la curva: si la compañía no permite revelar unos datos será por demasiado valiosos para facilitárselos a las empresas de la competencia.

Imagen cedida por los autores.



tieron de una premisa: si para una edad determinada un cambio relativo del nivel del mar se detecta en al menos tres cuencas distintas y distantes, tal cambio es de origen eustático, o sea, un cambio absoluto del nivel del mar. Sobre esta base, elaboraron una curva de ascensos y descensos eustáticos a lo largo del Fanerozoico (desde hace 542 Ma hasta la actualidad). Esta curva la refirieron a una escala relativa, que va desde cero, el nivel marino más bajo a lo largo del Fanerozoico, a uno, el nivel más alto. En tal escala el nivel del mar actual está en 0,38 aproximadamente.

Después graduaron esa escala con los datos de otros autores que evaluaban en metros la altura del nivel del mar, con respecto a su nivel actual, en momentos puntuales de la historia geológica. Transformaron así la escala relativa en una escala absoluta, con

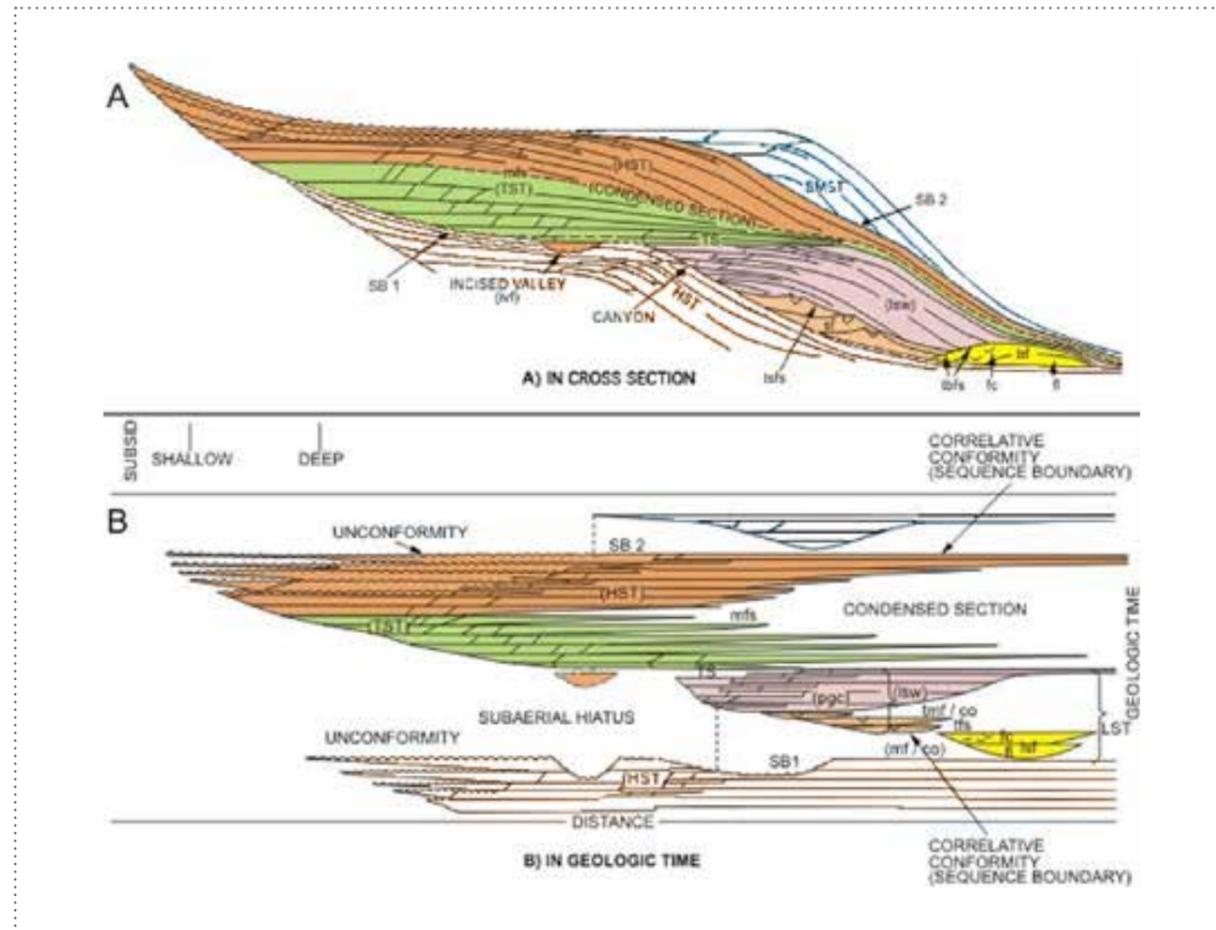
el nivel más bajo a unos -200 m, hace unos 30 Ma, y el más alto a unos +350 m, hace 87 Ma aproximadamente. La curva eustática resultante pasó a ser conocida como "curva Exxon". Fue un hito: de existir un Premio Nobel de Geología, los autores citados sin duda lo hubieran recibido. La comunidad geológica la consideró un logro sensacional, a pesar de que, salvo los autores, nadie sabe cómo se elaboró la escala de cambios eustáticos a partir de las secuencias de depósito locales: no existe el *supplementary material*, con todos los datos y el desarrollo seguido, como exigen las revistas científicas en ocasiones similares.

A partir de ese momento, numerosos trabajos geológicos, incluidos muchos realizados sobre materiales aflorantes, adoptaron el método de la Estratigrafía secuencial, estableciendo secuencias de depósito. Y, en muchas ocasiones, encontraron

coincidencias con la curva Exxon hasta en cuencas de márgenes tectónicamente activos. Tales coincidencias parecen improbables porque el trabajo de los geólogos Exxon se basaba, sobre todo, en cuencas de márgenes pasivos. Pero es normal, al quedar impresionado, apuntarse al equipo ganador.

En resumen, la Estratigrafía secuencial fue un gran avance en el análisis de cuencas sedimentarias, aceptado como paradigma por la comunidad geológica, y perfectamente aplicable al estudio de materiales aflorantes. Tuvo su perfeccionamiento y desarrollo conceptual diez años después (A.W. Wally, 1987), especialmente en aquello para lo que había nacido: su aplicación a la exploración de hidrocarburos y a la historia del cambio eustático, cuyos ascensos y caídas se evaluaron ya algo más moderados (p. ej., el nivel más alto sería de solo +250 m, hace 91,5 Ma).

“Fue un hito: de existir un Premio Nobel de Geología, los autores citados sin duda lo hubieran recibido”.



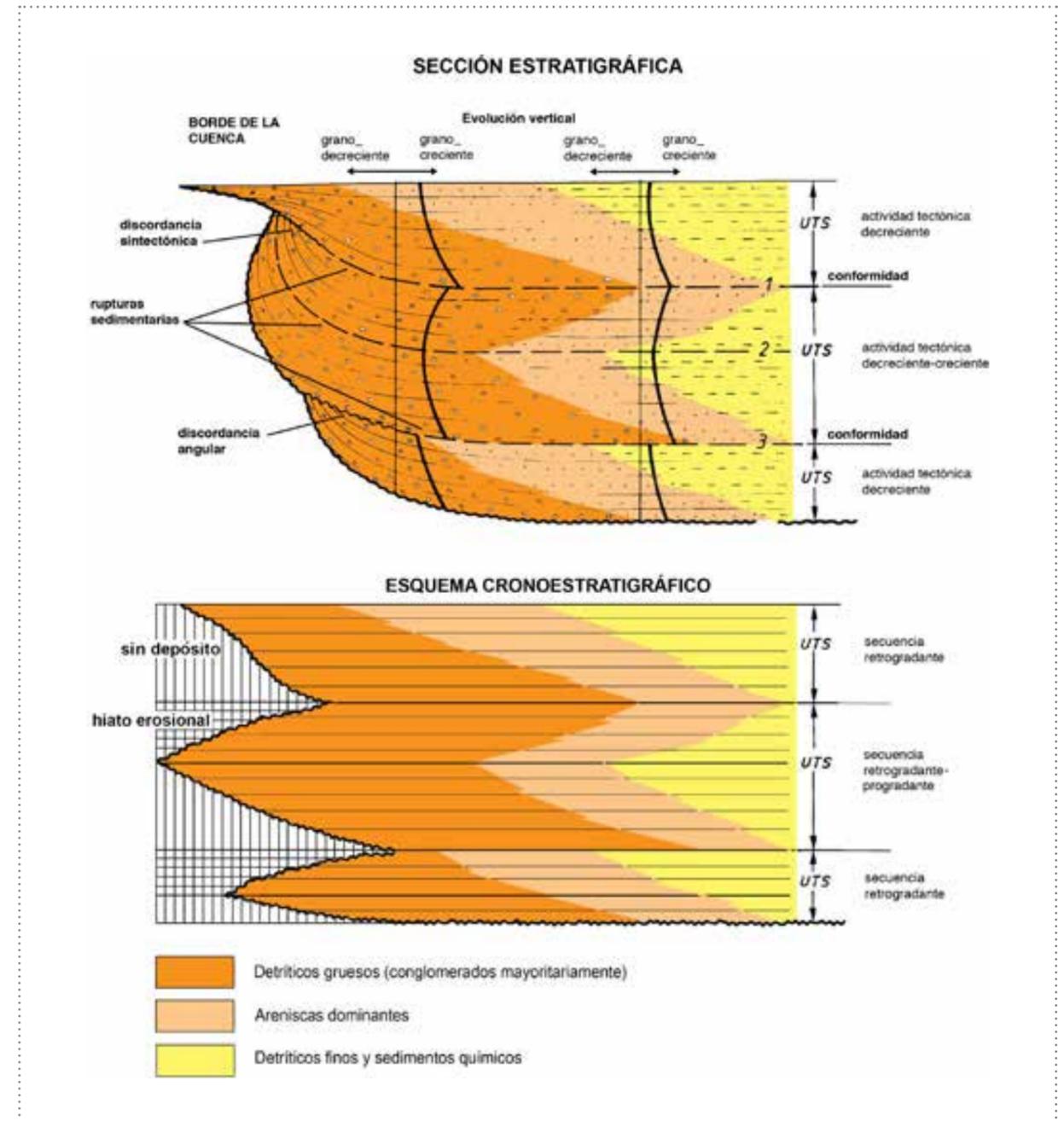
▲ Modelo conceptual de las *depositional sequences* a partir de 1987. SMST, y en color LST, TST y HST son los distintos "cortejos sedimentarios" (*system tracts*) en que puede dividirse una secuencia de depósito. Cada cortejo incluye diferentes litologías, originadas en ambientes sedimentarios distintos (continentales, transicionales y marinos) lateralmente relacionados. En blanco, el techo de la secuencia infrayacente y la base de la suprayacente. Nótese en B que una secuencia de depósito no puede compartir tiempo con ninguna otra. Esta es una propiedad de todas las unidades estratigráficas genéticas.

www.epgeology.com/gallery

UNA METODOLOGÍA ADELANTADA, PERO CON ESCASA REPERCUSIÓN: EL ANÁLISIS TECTOSEDIMENTARIO

Y ahora, una historia de aquí. **Alberto Garrido Megías** (1936-2006) fue un geólogo que trabajó en la Empresa Nacional de Petróleos de Aragón, S.A. (ENPASA) que, aunque parezca extraño por su nombre, tenía la concesión de exploración de todo el territorio nacional y del Sahara Occidental. Su sede estaba en Zaragoza, en los edificios que hoy ocupa Televisión Española en Aragón. Posteriormente, ENPASA, tras diversas fusiones, devino en Repsol Exploración S.A. Mientras permaneció en Aragón, Garrido trabajó sobre todo en la Cordillera Ibérica y en el Pirineo y fue, durante varios cursos, profesor ayudante de clases prácticas en el antiguo Departamento de Geología de la Universidad de Zaragoza. Leyó en 1973 su Tesis doctoral sobre la cuenca de antepaís surpirenaica, trabajo en el que desarrolló un método de análisis de cuencas denominado *Análisis tectosedimentario*, del que vamos a ocuparnos.

La metodología del Análisis tectosedimentario nació a partir de datos obtenidos exclusivamente mediante trabajo de campo (cartografía, estudio de las sucesiones de estratos y su correlación) sobre el registro geológico de una cuenca tectónicamente activa, sin contar con líneas sísmicas. Por eso, Garrido partió de la idea de que el relleno de la cuenca surpirenaica (su tesis doctoral) es la respuesta al ambiente tectónico a que se encontraba sometido.



▲ Concepto de *Unidad tectosedimentaria* (UTS). Obsérvese que una UTS engloba diferentes litologías y que los límites entre UTS son discordancias en el margen activo de la cuenca (efecto de la tectónica) y conformidades (paralelismo de las capas y continuidad sedimentaria) hacia el centro (hacia la derecha). El esquema cronoestratigráfico, donde los estratos se

restituyen como líneas de tiempo horizontales, muestra que dos UTS no comparten tiempo ni materiales, y que sus límites son líneas isócronas allí donde existe conformidad.

Modificado de González et al. (1988).



Discordancia entre las UTS T4 y T5. Cuenca sedimentaria de Aliaga (Teruel).

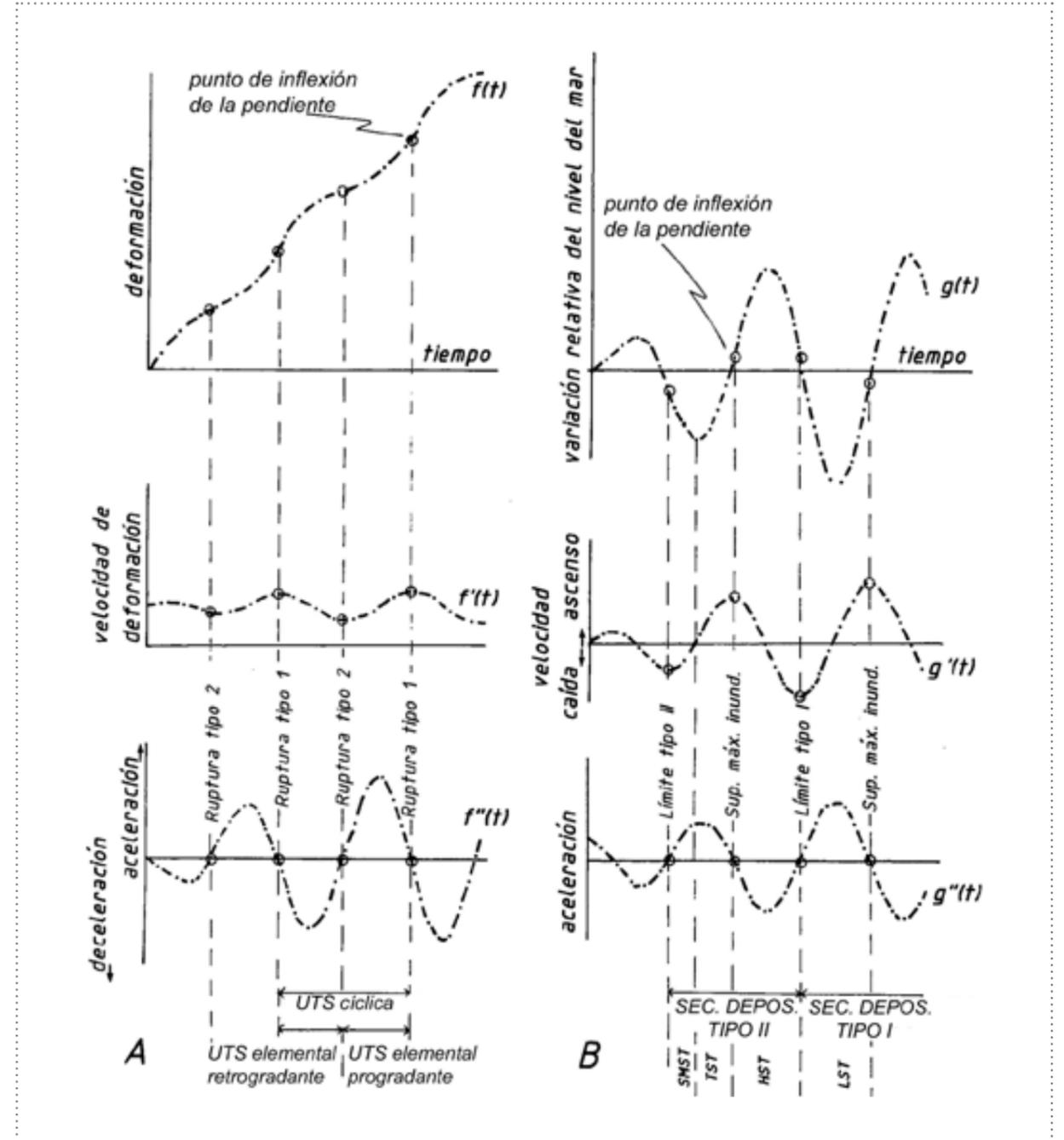
Imagen cedida por C. Arenas.

da. Dividió tal relleno en unas unidades formadas por conjuntos de estratos con una evolución sedimentaria vertical (temporal) característica, reconocible a escala de toda la cuenca. Dicha organización secuencial estaba controlada por la actividad tectónica en los relieves pirenaicos que limitaban la cuenca. Garrido denominó *Unidades tectosedimentarias* a las unidades de extensión "cuenca" establecidas con el Análisis tectosedimentario, y les asignó la sigla UTS. Según esto, las UTS son *unidades estratigráficas genéticas*, y los materiales que las constituyen son el registro de lo que se ha depositado en una cuenca entre dos momentos del tiempo geológico en que tienen lugar pulsaciones o fases tectónicas compresivas o distensivas. Por ello, los límites entre dos UTS, que denominó *rupturas sedimentarias*, serán *discordancias* en los márgenes de las cuencas, y *conformidades* en el centro. Tales límites se caracterizan por cambios de signo o saltos en la evolución secuencial a lo largo del tiempo (ver figura pag. 73). Por ejemplo, el momento de cambio entre el avance de un sistema sedimentario hacia el centro de la cuenca (secuencia de progradación) y su retroceso hacia el margen (secuencia de retrogradación). La progradación se asocia al incremento del relieve en margen de la cuenca que suministra los sedimentos, consiguiendo al aumento de actividad tectónica; la retrogradación se da con el decrecimiento o cese de la actividad tectónica y la consiguiente degradación del relieve debido a la omnipresente erosión. En 1977, Garrido y Villena ampliaron el concepto de *ruptura sedimentaria*, relacionándola con cambios o saltos notables en la evolución paleogeográfica de las cuencas.

El Análisis Tectosedimentario fue utilizado en los años 70 en la exploración del Neógeno marino mediterráneo que, como sabemos, resultó productivo en petróleo. En cuanto a sus aspectos conceptuales, fueron desarrollados posteriormente por el propio Garrido (firmando como A. G. Megías, 1982), por González et al.

(1988) y Pardo et al. (1989). En este último trabajo se demuestra el significado equivalente de los límites de las unidades de relleno que establecen el Análisis tectosedimentario y la Estratigrafía secuencial. En efecto, ambos tipos de unidades genéticas, por su escala "cuenca", además de comprender diferentes unidades litoestratigráficas, tienen una importante propiedad en cuanto a su edad: ninguna unidad genética comparte tiempo con otra; cada una se sitúa en un intervalo temporal invariable, representado tanto por materiales como por hiatos (ver figuras pag. 72 y 73). En resumen, las unidades genéticas son la herramienta idónea para el análisis paleogeográfico, y a través de ellas se tratará de establecer a qué factores de la dinámica terrestre está ligada la evolución de una cuenca.

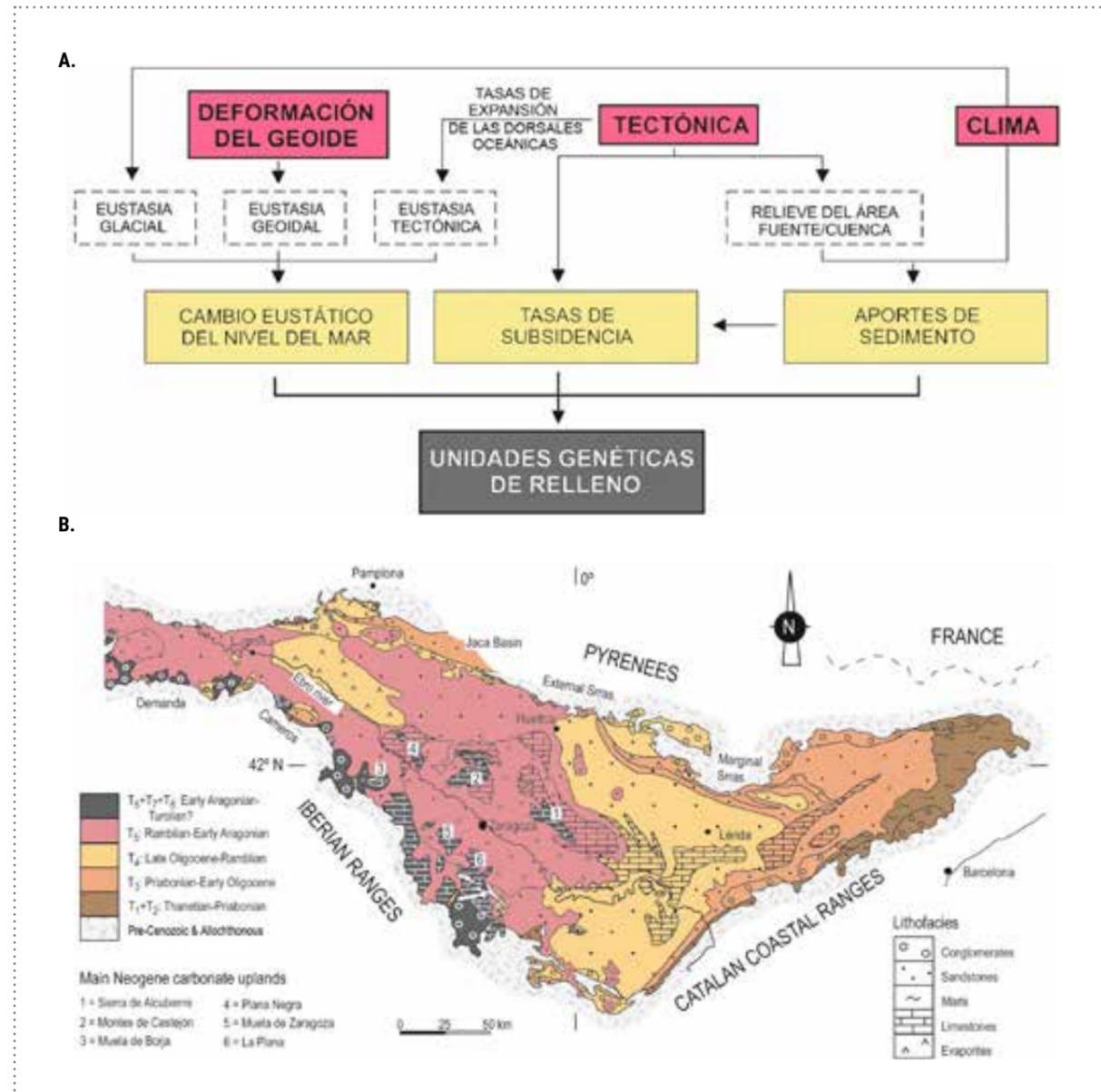
William E. Galloway, otro investigador de las unidades genéticas en el relleno de cuencas sedimentarias, elaboró en 1989 un esquema (ver figura pag. 76) donde se muestran los factores alogénicos que, con sus variaciones a lo largo del tiempo, dan lugar a la historia de depósito de cualquier cuenca: el cambio eustático, la subsidencia y la tasa de sedimentación son los factores próximos (en amarillo) que dan lugar a las unidades genéticas de relleno. Pero los factores primarios (en rojo), que controlan los factores próximos antes citados, son la tectónica, el clima y las deformaciones del geoide. Este esquema pone en evidencia que las relaciones entre causas primarias, factores próximos y unidades genéticas de relleno son complejas. La Estratigrafía secuencial de los geólogos de Exxon consideraba las tasas de subsidencia y sedimentación como factores prácticamente constantes en las cuencas de margen pasivo y, por tanto, de menor importancia frente al cambio eustático. No hacía alusión a la eustasia geoidal que, al contrario que la eustasia de origen tectónico o glacial, de estar presente supondría ascensos en unas áreas marinas y caídas simultáneas en otras: una amenaza para sus ciclos globales de variación del nivel del mar.



▲ **Semejanza de Unidades tectosedimentarias y depositional sequences. A, cuando la causa alogénica es la deformación originada por la tectónica (UTS); B, cuando la causa alogénica es la variación relativa del nivel del mar (secuencias de depósito). En ambos casos, los límites de las respectivas unidades genéticas que rellenan**

la cuenca se dan en los mínimos de la velocidad del factor alogénico, o lo que es igual, cuando su aceleración es cero.

Tomado de Pardo et al. (1989).



A) Variables que determinan la historia del depósito en una cuenca y la arquitectura de las unidades estratigráficas genéticas de relleno.

B) Mapa esquemático de la distribución de Unidades tectosedimentarias y facies en la Cuenca del Ebro.

Modificado de Galloway (1989) (A).
Modificado de Muñoz et al. (2002) (B).

En resumen, para cuencas en distinto contexto tectónico, los geólogos de Exxon, con geofísica sofisticada, y el geólogo de Enpasa, con la geología tradicional de campo, llegan a un mismo punto: la utilidad, la importancia y, en definitiva, el avance que supone dividir el relleno de las cuencas en *unidades genéticas*, ya sean las *depositional sequences* de los primeros o las *Unidades tectosedimentarias* del segundo.

Para nosotros este es el verdadero paradigma en el análisis de cuencas. Pero hay que dejar dos cosas claras: Garrido se anticipó cuatro años a los citados Vail, Mitchum y Thompson, aunque, como veremos, la aplicación de la metodología del Análisis tectosedimentario ha sido restringida. En el área de Estratigrafía del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza, con el impulso del profesor **Joaquín Villena Morales** (académico y miembro del Senatus), se viene utilizando desde los años 80, sin interrupción, al estudio de las cuencas cenozoicas de la Cordillera

Ibérica y de la Cuenca del Ebro. Se aplicó en varias tesis y en cinco tesis doctorales, lo que permitió una síntesis de la Cuenca del Ebro (ver figura, Muñoz et al., 2002) que supone un avance importante en el conocimiento de la Estratigrafía y de la evolución paleogeográfica del conjunto de esa cuenca.

En cuanto a la precisión del método del Análisis tectosedimentario, referida a las edades absolutas de los límites de UTS, se pueden aportar los resultados de la tesis doctoral de Pérez-Rivarés (2016). En ese trabajo se estudia la magnetoestratigrafía de 12 secciones (sin continuidad física entre ellas) del Mioceno de la Cuenca del Ebro, en las que diferentes investigadores ya habían situado previamente límites de Unidades tectosedimentarias. La magnetoestratigrafía revela que los límites establecidos para las UTS no son perfectamente isócronos. En millones de años, los límites de las unidades T4 a T7 se datan como sigue: T4/T5= 21,4 ± 0,1; T5/T6= 16,2 ± 0,14 y T6/T7= 14,3 ± 0,14. Esta heterocronía es pequeña en términos de tiempo geológico, y es comparable al error de media longitud de onda que tiene la Estratigrafía sísmica, en lo que respecta a la precisión de sus correlaciones.

Ahora bien, si uno busca "unidades tectosedimentarias" en Google obtiene menos de 2.000 entradas, pero si busca "depositional sequences" obtiene casi 90.000. Cabe preguntarse pues, para terminar, por la razón de la diferente acogida de lo que no son más que dos formas de una misma concepción del trabajo estratigráfico. La respuesta es simple: la forma de difusión de los conceptos y de la metodología, y el prestigio de la propia metodología.

En efecto, la Estratigrafía secuencial nace en inglés en uno de los medios de mayor difusión de una de las asociaciones geológicas más acreditadas, cuyo nombre, AAPG, va ligado a la industria petrolera, y además se fundamenta en la geofísica más avanzada que utiliza esa industria. El Análisis tectosedimentario nace en español, necesita del levantamiento de columnas estratigráficas en el campo y su correlación (es decir, tecnología tradicional de martillo, lupa, mapa, foto aérea) y los resultados se publican, años después de su concepción, en revistas y actas de congresos españoles o hispanoamericanos. Hasta avanzados los años 90 del siglo pasado no aparecen publicaciones en inglés en que se incluyan explicaciones, más bien sintéticas, de la metodología (véanse referencias a Villena et al., 1996, Muñoz y Casas, 1997 y Arenas et al., 2001, en Muñoz et al., 2002). Podría añadirse "que nos sirva de escarmiento", pero sería superfluo: los que conocimos a Garrido y seguimos su metodología en los años 80 ya no podemos volver atrás en el tiempo, y las actuales generaciones de geólogos españoles lo tienen muy claro.

Evocando a nuestros pioneros A. Garrido y J. Villena.

Gonzalo Pardo, Ángel González y Concepción Arenas.
Dpto. de Ciencias de la Tierra.
Facultad de Ciencias.
Universidad de Zaragoza.

“La Estratigrafía secuencial nace en inglés en uno de los medios de mayor difusión de una de las asociaciones geológicas más acreditadas”.

BIBLIOGRAFÍA:

- Galloway W.E. (1989). Genetic Stratigraphic Sequences in Basin Analysis I: Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. AAPG Bulletin, 73: 125-142.
- Garrido Megías A. (1973). Estudio geológico y relación entre tectónica y sedimentación del Secundario y Terciario de la vertiente meridional pirenaica en su zona central (provincias de Huesca y Lérida). Tesis doctoral, Universidad de Granada, 395 pp.
- Garrido A. y Villena J. (1977).- Evolución vertical y paleogeográfica del Trías germánico de España. Cuadernos de Geología Ibérica, 4: 37-56.
- González, A., Pardo, G. y Villena, J. (1988). El análisis tectosedimentario como instrumento de correlación entre cuencas. II Congreso Geológico de España, Simposios: 175-184.
- Megías A.G. (1982). Introducción al análisis tectosedimentario: aplicación al estudio dinámico de cuencas. Actas del V Congreso Latinoamericano de Geología (Argentina), 1: 385-402.
- Muñoz A., Arenas C., González A., Luzón A., Pardo G., Pérez A. y Villena J. (2002). Ebro basin (northeastern Spain). En: W. Gibbons y T. Moreno (Editores), The Geology of Spain. The Geological Society, Londres, pp. 301-309.
- Pardo G., Villena J. y González A. (1989). Contribución a los conceptos y a la aplicación del Análisis tectosedimentario. Rupturas y unidades tectosedimentarias como fundamento de correlaciones estratigráficas. Revista de la Sociedad Geológica de España, 2 (3-4): 199-221.
- Payton C.E., editor (1977). Seismic stratigraphy- applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir 26, Tulsa, Oklahoma, 516 pp.
- Pérez Rivarés F.J. (2016). Estudio magnetoestratigráfico del Mioceno del sector central de la Cuenca del Ebro: Cronología, correlación y análisis de la ciclicidad sedimentaria. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 281 pp.
- Wally A.W. editor (1987). Atlas of Seismic Stratigraphy. AAPG Studies in Geology, 27. Tulsa, Oklahoma, 125 pp.