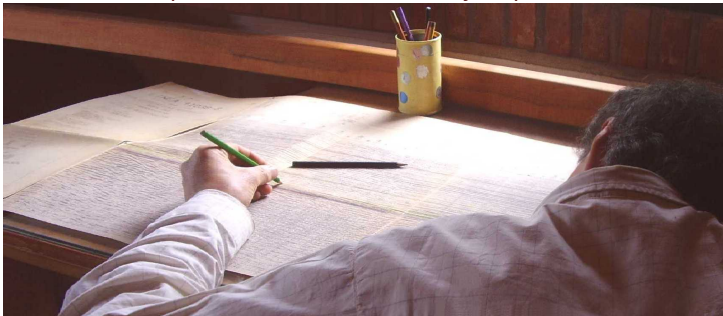


Interpretación sísmica en las viejas épocas.



“L’essentiel est invisible pour les yeux”

[“Lo esencial es invisible a los ojos”]

EL PRINCIPITO,

Antoine Marie Jean-Baptiste Roger de Saint-Exupéry (1943)

INTERPRETACIÓN SÍSMICA GENERAL

El *mare Nostrum* de los antiguos romanos ha sido navegado desde miles de años atrás, incluso desde antes de la cultura minoica de Creta (la del Minotauro que inspiró “La casa de Asterión” de Borges) devastada hacia el 1630 a.C. por un gran maremoto causado por el colapso de la caldera volcánica de Thera (hoy la paradisíaca Santorini), tragedia probablemente fundante del relato platónico de la Atlántida y de las narradas plagas bíblicas. Naves hundidas hubo miles a lo largo de la historia, ya desde época Fenicia, y las hay cada mes por el transporte ilegal de los desesperados migrantes expulsados por la invasión, masacres y saqueo que Estados Unidos y otras potencias perpetran en países islámicos, y la horrorosa reacción del deformado fundamentalismo de la Yihad.

Entre tantísimos otros, en el año 2000 fueron hallados los restos de una nave hundida a mil metros de la isla de Riou, 20 km al sureste de Marsella (la ciudad de la Costa Azul que bautizó la bellísima canción patria francesa, en verdad alumbrada en Estrasburgo). Pero no era ésta de las naves que habían surcado mares, como la hallada en Antikythera –o el Costa Concordia del impresentable capitano Schettino–, sino de las que supieron surcar cielos. Piloteada por un hombre que también los creó sublimes con su brillante pluma de humanista.

Antoine había nacido en el seno de una familia aristocrática de Lyon y fue el tercero de cinco hermanos. Era chico cuando murió su padre, pero igual tuvo una infancia dichosa en su castillo familiar, yendo fascinado al aeródromo cada vez que podía y siendo mal alumno pero incipiente poeta durante el secundario en los años de la Primera Guerra Mundial. Hasta que devino aviador en Estrasburgo (Alsacia) durante el servicio militar. Fue una de sus tres pasiones. De modo que poco después ya era pionero del rally Toulouse-Dakar –Senegal era colonia francesa– piloteando un aeroplano de la Compagnie Générale Aéropostale. Y para 1929 era piloto en la filial argentina (que en 1949 Perón fusionaría con otras tres empresas para formar la estatal Aerolíneas Argentinas) y volaba hasta la Tierra del Fuego.

En Buenos Aires conoció a Consuelo, la millonaria salvadoreña que fue su segunda pasión. *Courrier sud*, *Voile du nuit* y *Terre des hommes* fueron jalones de su tercera pasión, junto con el periodismo al que se dedicó desde 1932 de regreso en Francia, siendo enviado a Rusia, Vietnam y España (durante la guerra civil en la que, a diferencia de la mayoría, no ocultó sino que reportó las atrocidades franquistas). Además siguió piloteando y sus intentos de establecer nuevas marcas de vuelo le provocaron un accidente en el desierto egipcio (del que fue rescatado por un beduino) y otro en la selva guatemalteca.

Al comenzar la Segunda Guerra fue parte de una escuadrilla de reconocimiento aéreo, pero, tras la rendición resultante de la *blitzkrieg* del Tercer Reich y un breve apoyo al gobierno títere con capital en Vichy, dejó su país y viajó a Nueva York para pedir la colaboración de los Estados Unidos en la guerra. Fue allí donde escribió



Afiche (imagen Museo Aeroposta Argentina)

Le petit prince, pintándole sus propias acuarelas, el libro francés más leído en el mundo, en el que los baobabs simbolizaban al ejército nazi, el asteroide era el terreno a recuperar y, por supuesto, la rosa era su amada Consuelo –aunque parece que él le metió los cuernos alguna vez; *personne n’est parfait*... Y estaba de nuevo luchando *pour la liberté* cuando en 1944 su vuelo desde Cerdeña hacia Provenza acabó en el fondo del Mediterráneo, quizá abatido por un caza alemán o acaso debido a una falla mecánica.

Consuelo Suncín murió en 1979 y recién en 2000 sus familiares publicaron póstumamente su autobiografía *Memorias de la rosa*. Fue después de que el *mare Nostrum* devolviera el brazalete que había atesorado durante más de medio siglo bajo 70 metros de agua y que lleva grabados los nombres de Antoine y Consuelo.

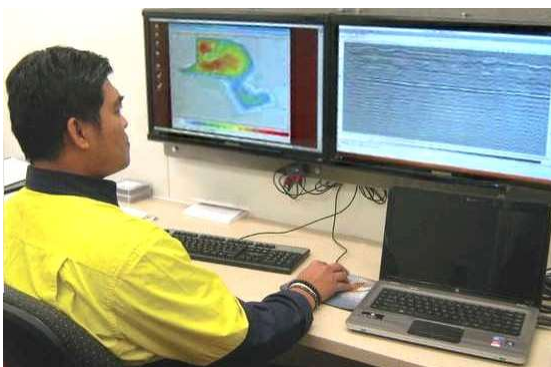
Saint Exupéry sobrevoló muchas veces la Patagonia durante los primeros tiempos de la exploración petrolera. Pero seguramente no pensaba en prospección sísmica cuando puso en boca del zorro su poética frase. Que sin embargo tiene enorme vigencia en la interpretación de secciones o volúmenes y es recordada una y otra vez por muchos intérpretes sísmicos, sobre todo si de los reservorios del Golfo San Jorge se trata.

Entre tantos intérpretes sobresalientes podemos citar a **Robert Sheriff**, nacido en 1922 en Mansfield (Ohio, Estados Unidos) y fallecido en 2014. También a **Alistair Brown** (Carlisle, Inglaterra, 1940, aún activo). Ambos han investigado mucho sobre la visualización de reservorios en 2 y 3D y han sido grandes educadores.

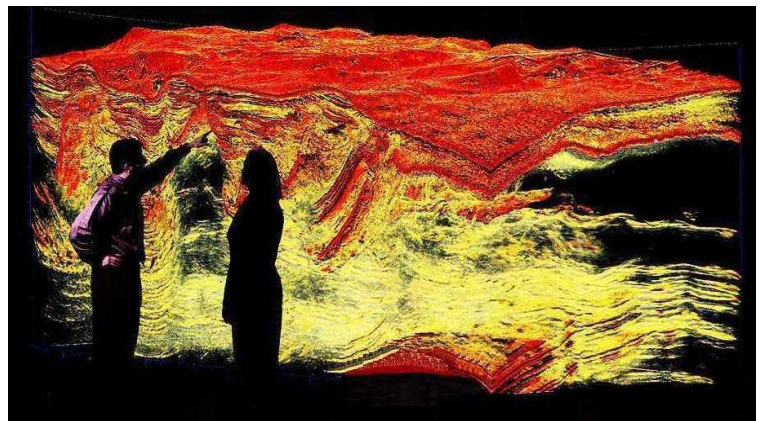
Escritos los pentagramas de la canción, llega la hora del intérprete. Registrada y procesada la partitura sísmica, también. Hasta 1990 se interpretaba con lápices de color sobre secciones impresas en blanco y negro o en los tonos gris o sepia de las copias heliográficas. Los mapas se hacían laboriosamente con tinta china y los informes se escribían en las nobles Lettera o Remington, sin errar una tecla para evitar el corrector. Tiempos heroicos en los que al final de una dura jornada uno se distendía saliendo a trotar con su cachorro de patagosaurio...

En suma, era como interpretar *a cappella* (como en la capilla, sólo vocalmente). Después llegaron las compus, preferentemente a doble pantalla, para interpretación interactiva de secciones o cubos en color. Con música estereofónica es otra cosa, como la misa Criolla que Patricia Sosa interpretó ante el papa Bergoglio en la basílica de San Pedro, monumental caja de resonancia –también en temas políticos–. De hecho el avance informático permitió el desarrollo de la sísmica 3D, que sólo fue viable cuando se dispuso de la ferretería y la librería computacional que hoy nos son familiares y hasta imprescindibles para todo tipo de tareas.

Las máquinas más potentes para interpretar son las estaciones de trabajo (*workstations*) que funcionan en red sobre sistema operativo Unix, de las que Sun (Oracle), Linux y Apple han sido las más usadas (foto izquierda), con paquetes de programas disponibles para alquilar en un mercado en permanente evolución. Pero también se puede disponer de licencias de *softwares* de varias empresas que los han desarrollado sobre PC, para sistemas operativos de Windows (sobre lenguajes C) y Mac, con capacidades algo menores, pero más amigables que los primeros y en muy rápido progreso.



Estación de trabajo y sala 3D (fotos Veritas)



En época más reciente se han construido salas de visualización tridimensional (foto derecha) conocidas como CAVE (*Computed Assisted Virtual Environment*), como las sombras proyectadas por la luz del fogón en las paredes de la caverna de **Platón** descrita en su obra “Πολιτεία” (Politeia), La República, en la Atenas del 380 a.C. Hay que saber interpretar las sombras también cuando se bucea dentro de un volumen sísmico. El principal uso, sin embargo, es el de presentar proyectos ante quienes no están familiarizados con la sísmica, ya que un intérprete con una mínima experiencia visualiza mentalmente las tres dimensiones de los prospectos abordados. Además todavía hoy suele recurrirse a secciones en papel, las más de las veces como un complemento práctico cuando se hace una interpretación de sísmica regional en dos dimensiones. Al observarlas se suele hacer suma visual mirando de costado sobre la sección, para percibir más apretada la escala horizontal y realzar rasgos estructurales o estratigráficos. Si se apoya la mejilla sobre el brazo y éste sobre el escritorio, la hora de la siesta

es más cómoda que con ambas manos en V bajo el mentón frente a un monitor...

CONCEPTOS BÁSICOS

Cualquiera sea el soporte de la información, las estrategias de interpretación no varían mucho. En áreas nuevas, sin pozos, asignar las interfaces reflectivas a determinados límites formacionales o secuenciales resulta sumamente especulativo: como en los espejismos, cuesta saber de dónde viene cada imagen. Es por esto que **resulta fundamental contar con datos de acústica y/o sísmica de pozo**, para posicionarse con certidumbre al menos en esa unidimensionalidad del sondeo, para después extenderse

con alguna confianza en el espacio bi o tridimensional que provee la sísmica disponible, como se ve acá arriba. Aun así, suele decirse que hay tantas interpretaciones como intérpretes, lo que en verdad no es correcto: hay más. Porque cada intérprete es capaz de dar más de una interpretación –más creativa tras un almuerzo acompañado por un vasito de tinto o birra, pero ¡uno!–. Sólo con mayor cantidad y mejor calidad de información geofísica, geológica, de pozos, ingeniería petrolera u otras podrá acotarse el espectro interpretativo (aplicar una suerte de filtro pasabanda mental). No obstante lo cual, haber eliminado posibles interpretaciones extremas no libera del ruido escondido dentro del rango aceptado, y debe convivirse con él. *Ergo*, nada garantiza que la más sólida de las interpretaciones no pueda acabar en pozo-papa (y no precisamente en honor a León XIV).

Pero, como los fracasos deben reciclarse en enseñanzas, tras el prospecto fallido se reinterpretará esta suerte de música *under* a partir de la nueva partitura que desde lo profundo arrojan los datos decepcionantemente descubiertos. Aunque, claro, también se aprende desde los éxitos, acaso menos, pero con mejor onda.

Interfaces Reflectoras

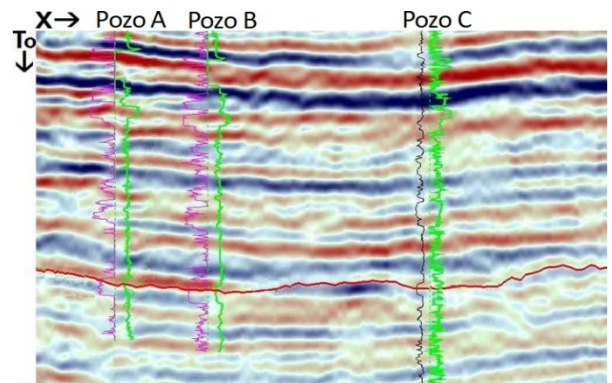
Como hemos referido, debe tenerse siempre presente que **los horizontes reflectores representan contrastes de impedancia acústica**, tanto mayores cuanto mayor sea la diferencia del producto entre la densidad y la velocidad de cada medio respecto al que se encuentra al otro lado de la interfaz, y en tal caso mayor será la amplitud resultante. Los cambios litológicos de toda índole casi siempre promueven contrastes en las impedancias, pero hay casos en que esto no sucede. También debe recordarse que, incluso en el mejor de los mundos, hay ruidos remanentes en las secciones o

cubos sísmicos que podrían propender a interpretaciones erróneas. Y debe recordarse que la escala vertical normalmente es de tiempos sísmicos, no de distancias z , y entre lo uno y lo otro no existe una relación lineal.

En las cuencas sedimentarias **los reflectores tienden a seguir líneas de tiempo geológico**, es decir superficies de sedimentación contemporánea y no necesariamente las líneas-roca que suelen interpretarse cuando se tienen datos puntuales de pozos, como se ve en la figura inmediata arriba. Si lateralmente cambia el tipo de roca –por cambios en las condiciones del ambiente sedimentario dentro de un mismo tiempo geológico–, cambiarán entonces lateralmente las impedancias acústicas y por ende la amplitud y en general el aspecto o **carácter de la reflexión**: su amplitud pero también quizá su frecuencia, y eventualmente el modo en que se interfiere con otras reflexiones supra o infrastantes. La **continuidad lateral** mayor o menor resultará de cuán extensas sean las condiciones sedimentarias en el tiempo geológico dado: un fondo marino con cañones por corrientes de turbidez, un talud con deltas intercalados, una plataforma con crecimientos arrecifales, un lago continental de fondo plano, un desierto con dunas en avance, una llanura aluvial cortada por canales, y muchos etcéteras.

Los **contrastos verticales**, a su vez, serán indicativos de los cambios en las condiciones de depositación a través del tiempo, sea con energía estable que resultará en reflexiones débiles por los bajos contrastes de impedancias acústicas, o bien energía cambiante en el medio sedimentario y consecuentemente reflectores fuertes (por ejemplo intercalación de arenas de cursos enérgicos con arcillas de planicies de inundación de baja energía del medio de transporte, en este caso el agua en movimiento).

Una superficie sísmica de reflexión (lo que llamamos **horizonte, nivel guía, reflector** o, en inglés, *marker*) en su expresión geológica actual expresa el resultado de unos rasgos de sedimentación originales más o menos



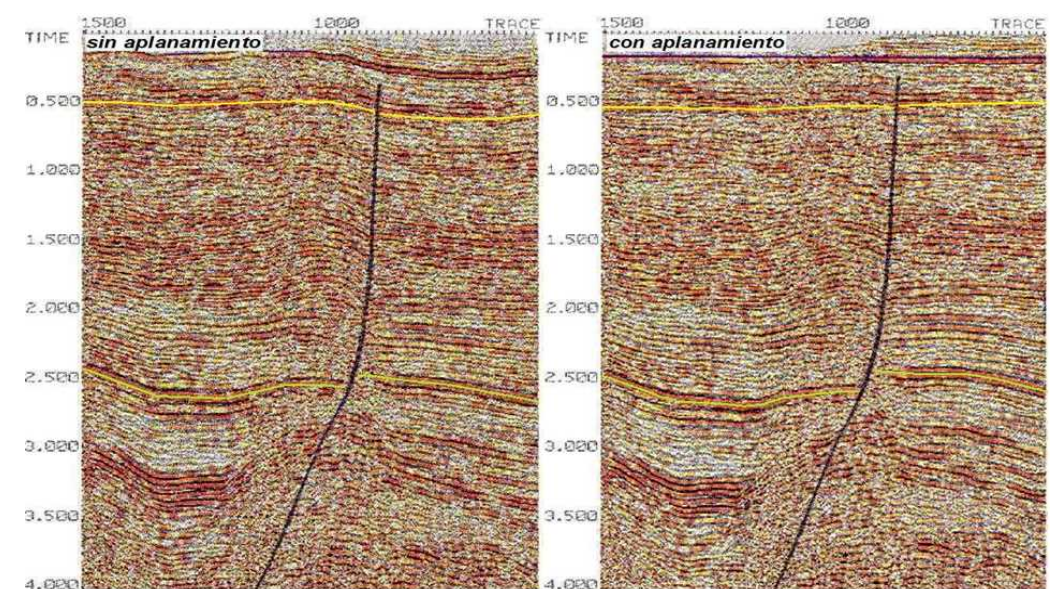
Sección sísmica; perfiles de pozo en lila, verde y negro.



Sección sísmica con perfiles de pozos donde se indica la diferencia entre línea-roca y línea-tiempo; ver texto.

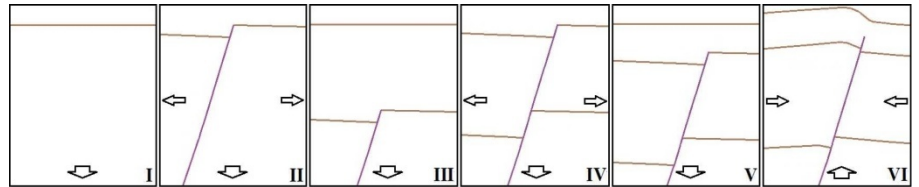
alterados por la tectónica posterior. De modo que mapear un reflector es echar luz sobre el final de una larga historia que está bueno intentar inferir. Es ver las líneas faciales de un anciano y deducir vivencias pasadas. Si se quisiera observar el paleorrelieve, a nivel de una definida interfaz reflectora, debería poder quitarse todos los efectos tectónicos posteriores con algún modelo razonablemente certero. Pero una forma de aproximarse a ese objetivo es aplanar un reflector suprayacente que se vea bien, es decir ponerlo perfectamente horizontal, técnica que se denomina **aplanamiento** (*flattening*). Es sólo un corrimiento de trazas que opera el programa y resulta válido siempre

que en el intervalo de tiempo entre ambos reflectores otro evento no haya modificado mucho la estructura, en cuyo caso habrá que aplanar más abajo. En el ejemplo adyacente (faja plegada en el norte de Santa Cruz), al aplanar un reflector somero, la estructura formada por **inversión tectónica** puede ser restituida a un tiempo previo a su origen, o por lo menos previo al de su última fase compresiva.

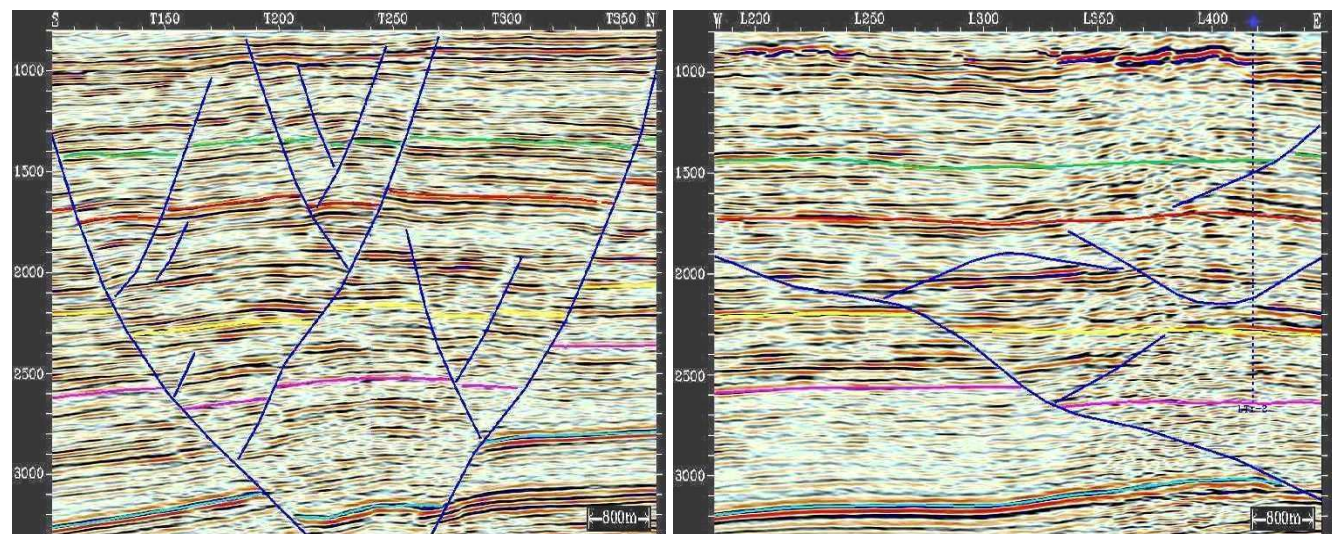


Arriba sección sísmica de la cuenca Golfo San Jorge sin y con aplanamiento al reflector amarillo; abajo la secuencia resumida de las etapas tectónicas de extensión y compresión.

Ahora bien, **muchas veces los reflectores no siguen líneas-tiempo**. Pueden corresponder a líneas-roca si hay particulares configuraciones estratigráficas, por ejemplo arenas no coetáneas pero amalgamadas en patrones de continuidad lateral o crecimientos arrecifales con pasaje a sedimentación clástica contigua. También serán reflectores extemporáneos los contactos con intrusiones ígneas o evaporíticas, los planos de falla subhorizontales y otros emplazamientos que atravesarán las líneas de tiempo geológico.



pero amalgamadas en patrones de continuidad lateral o crecimientos arrecifales con pasaje a sedimentación clástica contigua. También serán reflectores extemporáneos los contactos con intrusiones ígneas o evaporíticas, los planos de falla subhorizontales y otros emplazamientos que atravesarán las líneas de tiempo geológico.



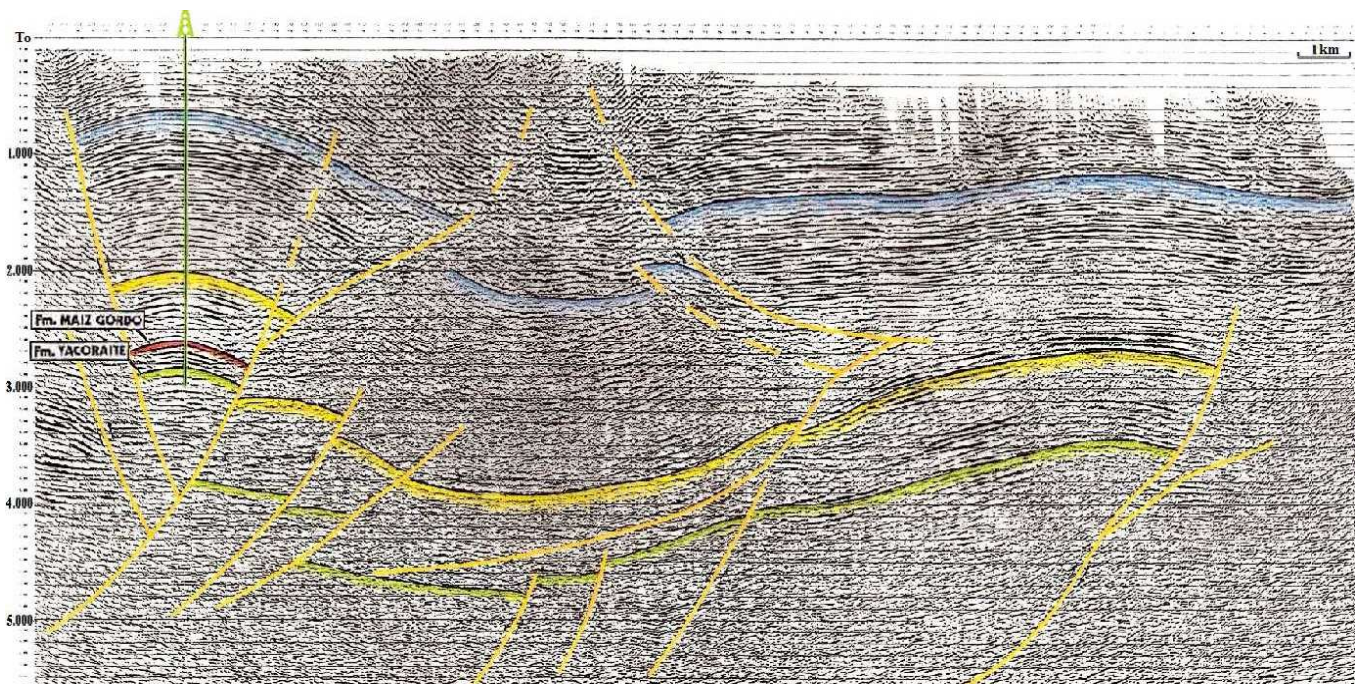
Secciones del flanco Norte de la cuenca Golfo San Jorge, la de la izquierda ortogonal a la tectónica extensional dominante, la de la derecha paralela a la misma (gentileza Tecpetrol)

Visualización Estructural

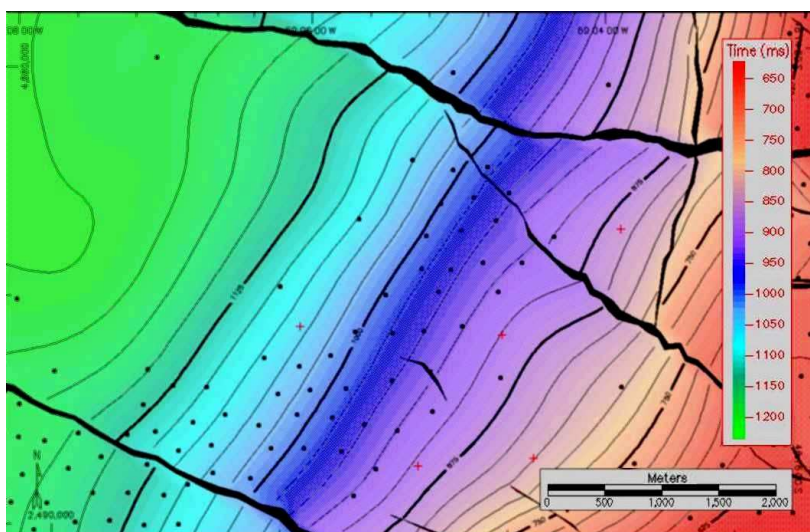
Las precedentes secciones sísmicas verticales se despliegan con orientación respectivamente ortogonal (S-N) y

paralela (W-E) al arrumbamiento tectónico general de esa área y se ve claramente la dificultad de interpretar las fallas e incluso los niveles guía en la segunda de ellas. Este es un aspecto a tener siempre presente: no es lo mismo mirar estratos, fallas, intrusiones u otras estructuras en forma perpendicular que paralelamente a su máxima inclinación (normal al rumbo). Y es indudable por cuál orientación conviene comenzar a interpretar. De hecho, en las secciones coincidentes con el rumbo el seguimiento de fallas u otras configuraciones de ángulo alto se termina ajustando habitualmente a partir de los puntos dados por la interpretación previa en las secciones ortogonales a ellas (cuyos puntos de cruce se marcan con el color previamente asignado).

A continuación vemos un ejemplo en otro ámbito geológico, la cuenca del Noroeste de Argentina, donde la presencia de algunas fallas inversas interpretadas con baja inclinación (pliegues por propagación de falla e incluso retrocorrimientos) se explica por la tectónica compresiva, ya que el azimut de la sección sísmica es este-oeste, o sea normal al rumbo dominante de las estructuras en esta comarca de las sierras Subandinas.



Sección interpretada en la cuenca Noroeste, ortogonal a la faja plegada; se señala un pozo (gentileza Tecpetrol)



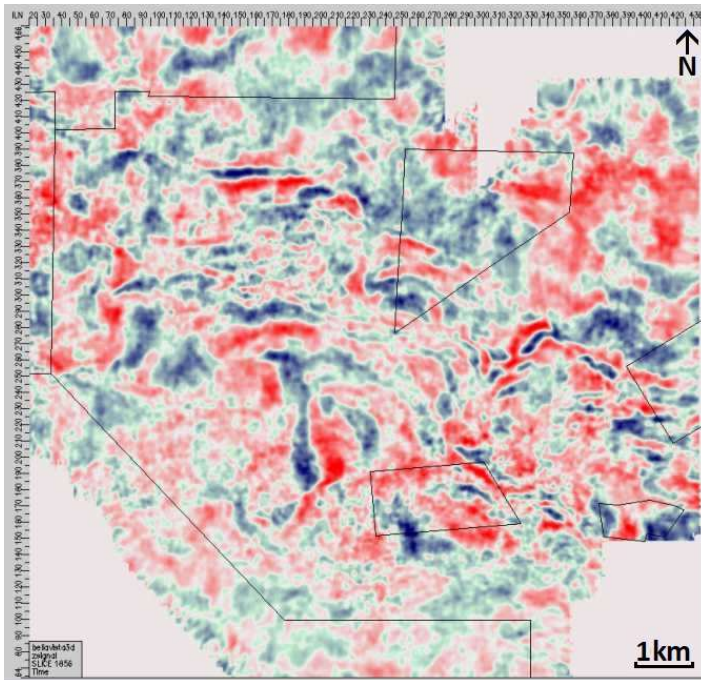
Mapa isócrono con fallas en trazo grueso negro y curvas en milisegundos bajo el plano de referencia sísmico; los puntos indican pozos (gentileza YPF)

Mapeo de Sísmica de Reflexión

El **mapa** sísmico básico es el **isócrono** (*isochron map*; del griego *ἴσος*, isos: igual; *χρονος*, cronos: tiempo), conformado por curvas de igual tiempo de ida y vuelta de las ondas sísmicas en sentido vertical (imagen izquierda). Insistimos, empero, con que siempre aparecen diversas distorsiones propias del método con respecto a lo que sería ver la imagen con una escala vertical de profundidades (metros o pies) en lugar de tiempos sísmicos (milisegundos).

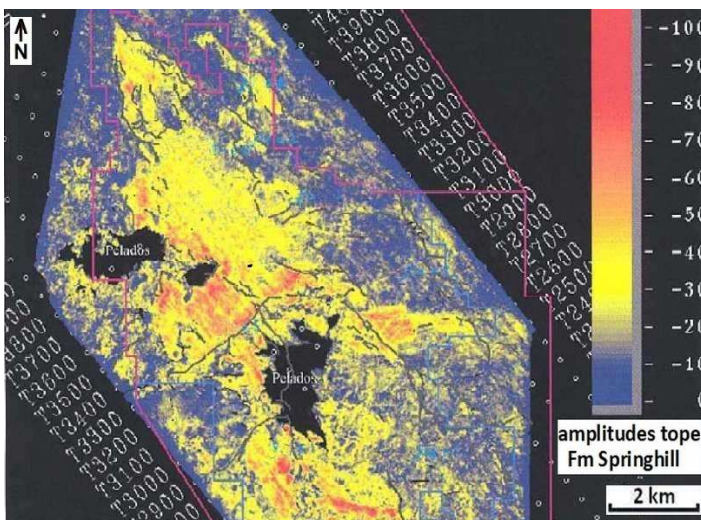
Otra posibilidad de mapeo es la de producir un **plano isocronopáquico** (*πάχος*, pacos: grueso), es decir el equivalente del mapa isopáquico (con curvas que conectan puntos de idéntico

espesor) pero en magnitud de tiempo sísmico de ida y vuelta, el cual se obtiene a partir de la operación de resta entre dos grillas correspondientes a dos isócronos previamente elaborados. Además se representa la traza de las fallas que resultan de la intersección del plano isócrono con los planos de falla. Que, dicho sea de paso, viene del latín *falla* (falta, defecto), relacionado con *fallax* (falaz, mentiroso), que esperemos no serlo al interpretar.

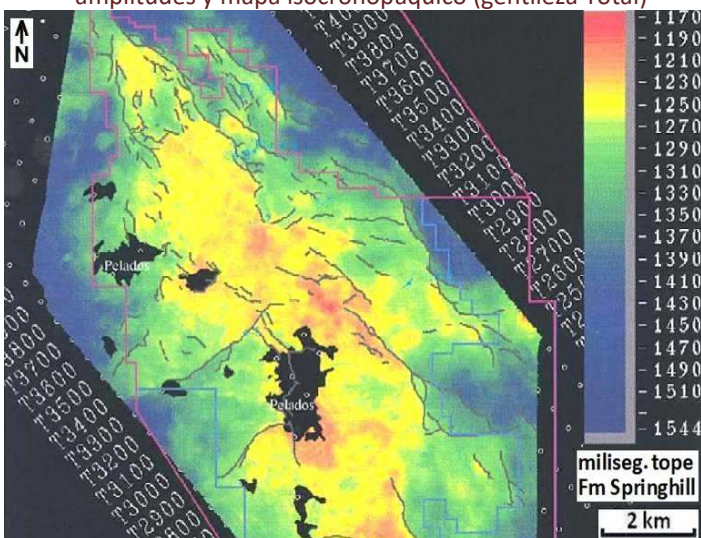


Sección horizontal, Flanco Norte del Golfo San Jorge (gentileza YPF)

La confiabilidad dada por un mapa isócrono o un isocronopáquico depende (además del intérprete que lo hizo...) de la dimensionalidad de la sísmica de reflexión y de otras variables. Como ya vimos, la **sísmica 2D**, por su menor costo, todavía suele emplearse cuando el presupuesto es bajo, con objetivos y escalas muy diversos. Pero también **en una etapa regional inicial de la exploración petrolera**, con mallados de entre 2 y 4 km (paralelo y ortogonal a la predominante estructuración del área). Aunque en etapas posteriores, una vez comprobado el potencial hidrocarburífero, o frente a la necesidad de un conocimiento preciso del subsuelo con diversos fines, se registra **sísmica 3D** que, además de la muy alta densidad de datos, **permite una mejor migración y la aplicación de técnicas especiales** no viables en sísmica bidimensional (Tema 18). Como sea, mapear desde una 2D significa interpolar valores dentro de cada rectángulo del mallado sísmico, mientras que mapear una 3D es seguir una imagen prácticamente continua de todo un volumen. Entre las ventajas más comunes de visualización que da una 3D están las secciones verticales tanto de **líneas (inlines)**, en la dirección de los receptores) como de **traversas (crosslines)**, líneas ortogonales a las anteriores, que en tierra suele ser la dirección de las fuentes de energía) o en **cualquier otro azimut** que se escoja, incluso trayectorias quebradas, por ejemplo pasando por pozos que se quiere correlacionar, a lo que se agrega la visualización de **secciones horizontales (time slices)** donde se representan las amplitudes sísmicas de las trazas de todo o parte del volumen a cualquier To específico de interés, como se ejemplifica en la figura de arriba.



Fm Springhill, cuenca marina Austral, Tierra del Fuego: mapa de amplitudes y mapa isocronopáquico (gentileza Total)

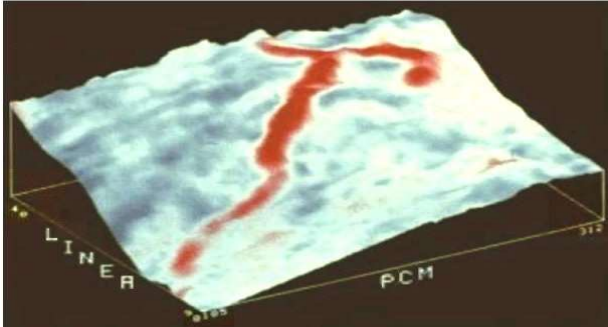


En cambio, un **mapa de amplitud (horizon slice o seiscop)**, por *seismic outcrop*, afloramiento sísmico) muestra la variación de amplitud de las trazas sobre una cierta superficie guía que éstas atraviesan, la cual ha debido ser previamente interpretada con máximo detalle sobre toda el área de interés en una 3D. Permite visualizar las variaciones sobre un nivel estratigráfico a través del cambio de sus amplitudes. Es el ejemplo de la figura central de esta página.

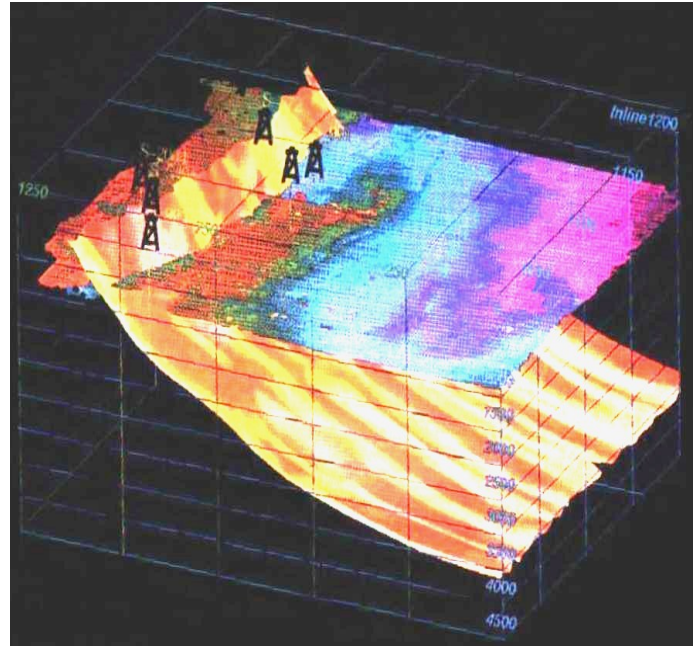
El **objetivo general de la interpretación** de sísmica de reflexión es producir un modelo geológico estructural y estratigráfico que sea confiable a los fines de la necesidad planteada.

En prospección y desarrollo hidrocarburíferos los objetivos principales se refieren a la posición estructural, morfología y distribución espacial de los reservorios. Pero también de la roca madre y

de las vías de migración del petróleo y el gas.
El empleo de aplicaciones de inteligencia artificial facilita las técnicas interpretativas en este y otros campos de la geofísica, pero el criterio profesional experimentado sigue siendo imprescindible.

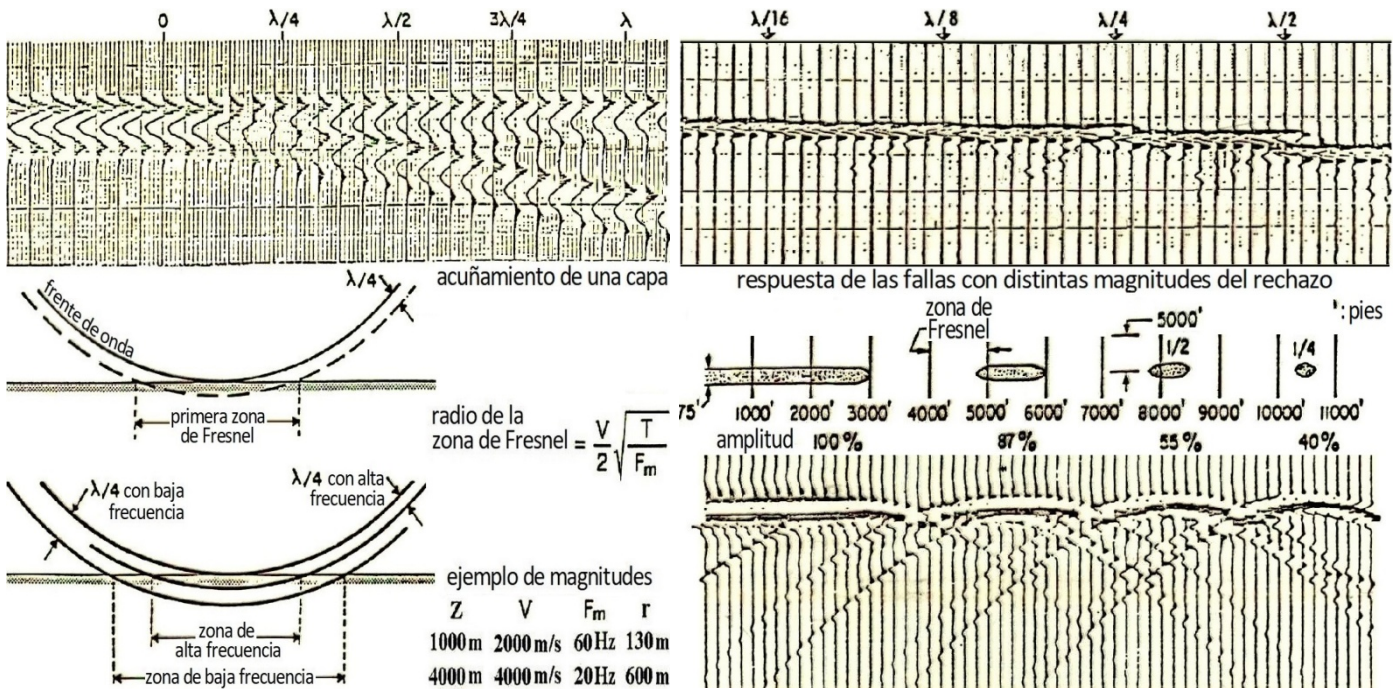


Visualizaciones 3D: arriba, mapa de amplitudes de relleno de canales, golfo de México (modificado de Brown, 1991); derecha, plano de falla e isócrono de un tope secuencial, flanco N, CGSJ (gentileza Tecpetrol)



RESOLUCIÓN SÍSMICA

La **resolución vertical** (establecida por el criterio de **Lord Raileigh** de 1879, inglés brillante en muchos temas, premio Nobel) es el **espesor geológico mínimo que podemos identificar y corresponde a un cuarto de la longitud de onda sísmica ($1/4 \lambda$)**, recordando que $\lambda = V / f$ (V es la velocidad y f la frecuencia a la profundidad considerada). En una sección sísmica basta contar cuántos ciclos completos entran en 100 ms y multiplicar por 10 para tener la frecuencia en Hz en el intervalo considerado. La velocidad puede leerse de la ley de velocidad de la corrección dinámica o de un perfil acústico o preferentemente sísmica registrada en algún pozo del área. El ancho mínimo resoluble o **resolución horizontal resulta de la zona o radio de Fresnel** (definido por el gran físico e ingeniero francés **Augustin Fresnel**, 1820) y es función del mismo $1/4 \lambda$, siendo: $r = V \cdot (T_o / 4f)^{1/2}$



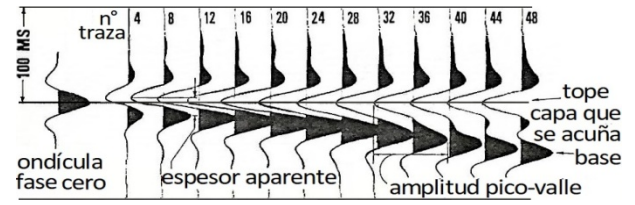
Resolución sísmica, modelos; ver texto (figuras modificadas de Sheriff, 1977 y de Neidell & Poggiagiolmi, 1977)

La figura de la izquierda ilustra arriba el concepto de la resolución vertical a partir de $1/4 \lambda$ y abajo el ancho de la resolución horizontal, con ejemplos numéricos. La figura de la derecha también muestra abajo la resolución horizontal de una sección esquemática no migrada, donde se observa que ya en $1/4 \lambda$ el horizonte reflector se confunde con la hipérbola de difracción y su amplitud ha disminuido sensiblemente, mientras que arriba puede

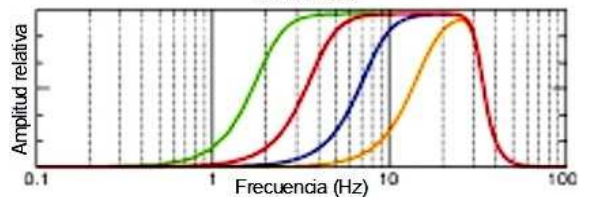
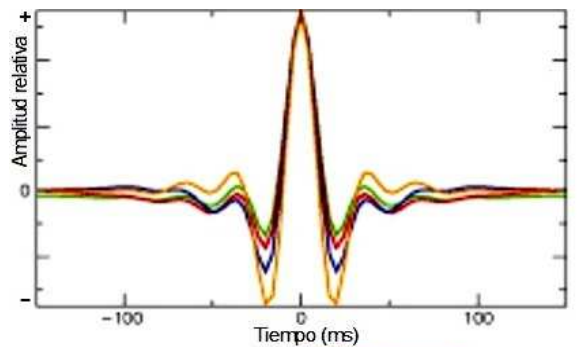
apreciarse que el rechazo vertical de una falla también resulta casi invisible cuando es menor a $1/4 \lambda$.

Un caso especial es el fenómeno de **resonancia o sintonía** (*tuning*) por interferencia constructiva de ondas entre la amplitud principal de la ondícula y los lóbulos laterales (figura inmediata). Suele consentir visualizar espesores menores a $1/4$ de la longitud de onda, hasta $1/8 \lambda$ e incluso algo menores, no porque puedan verse las respuestas separadas de techo y base, sino porque la fuerte amplitud lleva a inferir la presencia de la capa con un espesor menor a $\lambda/4$.

Si se adquirió sísmica de banda ancha (*broadband seismic*) su procesado permite lograr mejor resolución porque el registro contiene más bajas frecuencias. Éstas en principio son útiles para iluminar mejor a muy grandes profundidades y también para inversión de trazas (Tema 18, pág.460 y 486, respectivamente). Pero además para visualizar reflectores débiles porque la ondícula reduce sus lóbulos laterales por la incorporación de muy bajas frecuencias (figura adyacente). Sin lóbulos laterales grandes en los reflectores fuertes se logra evitar que pasen desapercibidos los lóbulos centrales de los reflectores débiles en contacto arriba y abajo, logrando así un mejor enfoque.



Sintonía; ver texto (modific. de Meckel & Nath, 1977)



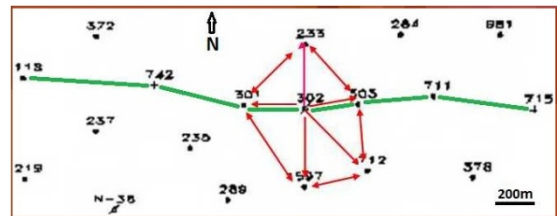
Mejora de la ondícula con el registro de más bajas frecuencias (modificado de Ten Kroode *et al.*, 2013)

INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

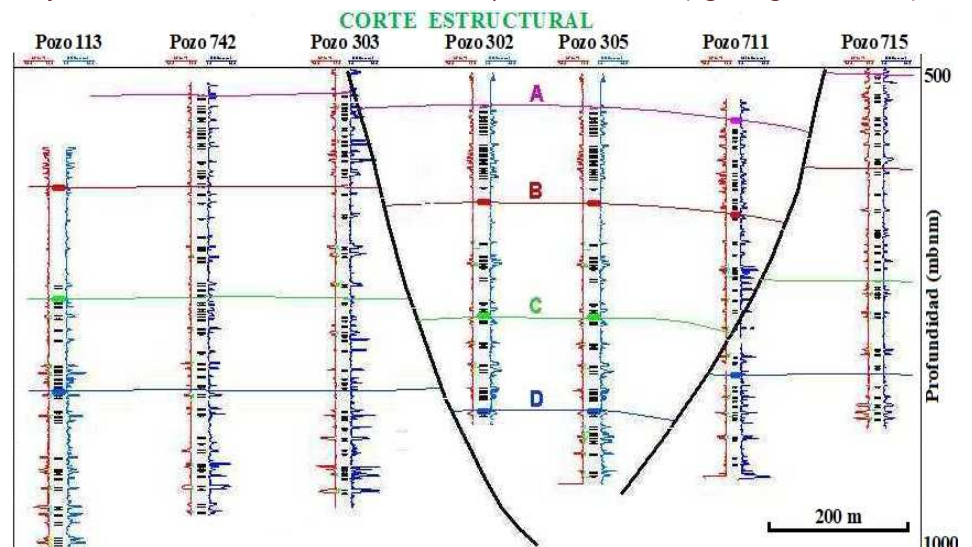
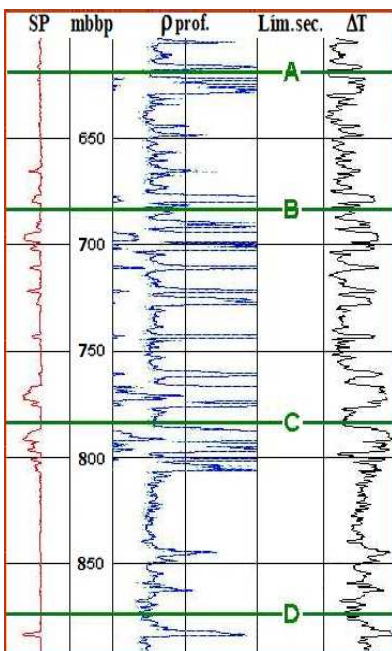
Evaluación Geológica General

Si en el área ya hay pozos, puede hacerse un primer abordaje para definir el modelo estructural. **La identificación de tramos estratigráficos faltantes o repetidos posibilita localizar fallas directas o inversas, respectivamente.**

Así podrán delimitarse bloques a estudiar luego con detalle. Es muy importante determinar si la tectónica ejerció control sobre los procesos sedimentarios, es decir si fueron coetáneos y consecuentemente la ubicación de los reservorios ha sido condicionada por la estructura. O bien si la totalidad o alguna fase de la geología estructural fue posterior. Y **comparar esta cronología tectónica aproximada con el momento en que los hidrocarburos estuvieron cocidos y salieron hacia el comedor.** ¿Ya estaban puestas las mesas? ¿O para cuando al fin fueron puestas ya el menú había ido a parar a la basura?



Arriba, mapa de pozos, línea de correlación zonal en verde y polígono de detalle en rojo; a la izquierda, definición de límites de secuencias en base a perfiles de pozo; abajo, corte de correlación estructural zonal por la línea verde (figuras gentileza YPF)

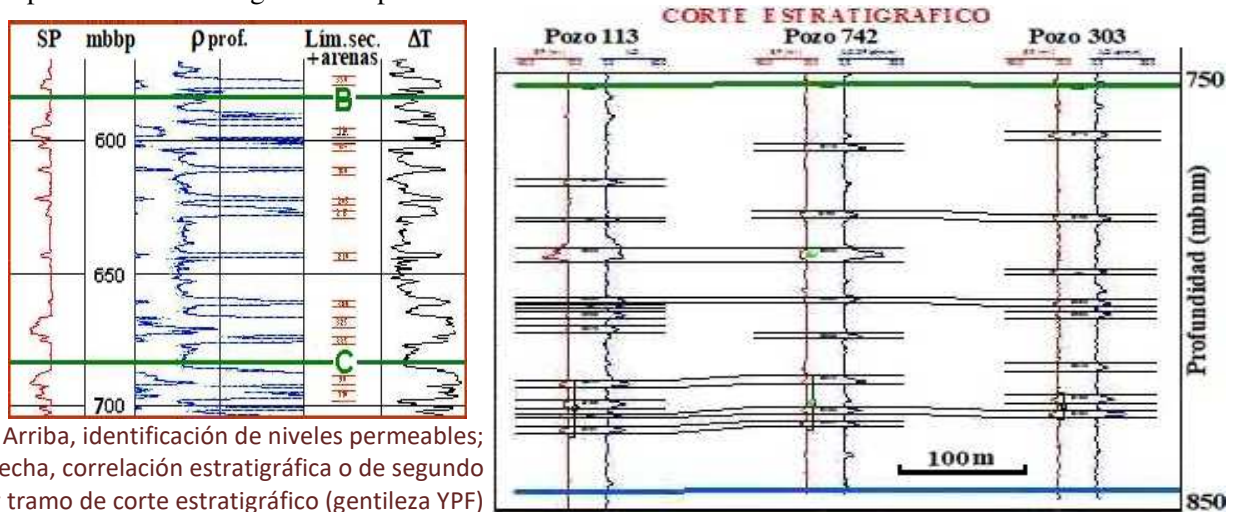


Correlación Zonal o Regional de Pozos

- Primero los geólogos de subsuelo correlacionan los niveles-guía o marcadores (*markers*) y definen en los pozos la posición de las fallas que permitirán delimitar los bloques principales y su modelo evolutivo profundo.
- Luego se procede a la confección de cortes (*cross-sections*) zonales o regionales, tanto longitudinales como transversales a las principales estructuras reconocidas en el área (figura al final de la página anterior).

Correlación Estratigráfica de Pozos

- Los geólogos eligen los bloques a estudiar y secuencias a interpretar mediante la correlación estratigráfica de todas las arenas, en películas en escala 1:1.000 o en pantalla, seleccionando como control una serie de horizontes guía locales más otros regionales. Esta correlación se realiza por grillas con pozos nodales y control de cierre.
- A continuación se construyen nuevos cortes estructurales ya a escala de detalle.
- Luego se elaboran cortes estratigráficos (capa a capa), como se aprecia en la figura de la derecha.
- Al final pueden hacerse diagramas de paneles ilustrativos.



Arriba, identificación de niveles permeables; a la derecha, correlación estratigráfica o de segundo orden y tramo de corte estratigráfico (gentileza YPF)

Esta evaluación geológica inicial puede ser realizada parcial o totalmente junto con las primeras etapas de la interpretación sísmica, de manera interactiva, modo que resulta más enriquecedor y efectivo. Pero hay casos en los que se adelanta alguna porción de estas tareas geológicas mientras se espera disponer de los datos sísmicos.

Carga de Datos

Es una etapa imprescindible antes de la interpretación sísmica. Incluye la carga de:

- planimetría de sísmica y de pozos
- archivos SEG Y de la sísmica procesada, incluyendo sísmica de pozo (*los VSP también en formato SEG Y*)
- archivos de perfiles geológicos de pozo
- datos geológicos, de los cuales los relevantes son: topes y bases de capas (en metros bajo boca pozo y metros bajo nivel mar), espesores útiles y permeables, valores de porosidad medidos por perfil, puntos de corte de fallas en cada pozo en mbbp (metros bajo boca de pozo) y en mbnm (metros bajo nivel del mar)
- datos de ingeniería de perforación y de terminación, etc.

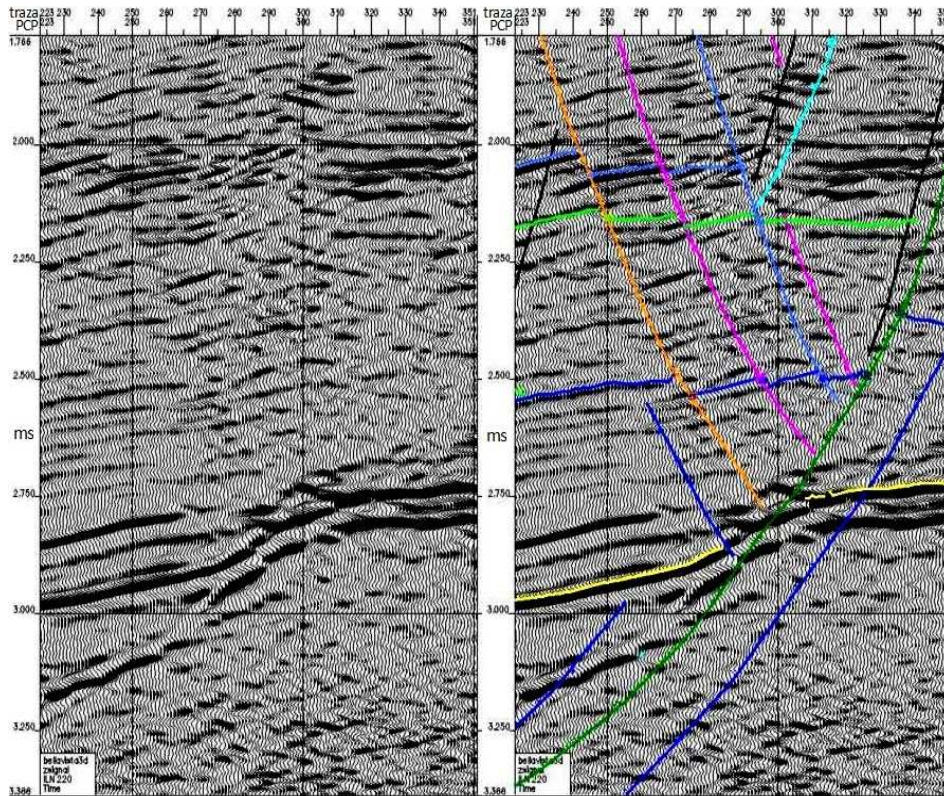
Adicionalmente, se deben *confeccionar los sismogramas sintéticos* que hagan falta.

Pautas de la Interpretación Sísmica

Lo más recomendable es *partir del punto con mejores datos de correlación sísmico-geológica*, por ejemplo un pozo con VSP o prueba de velocidad convencional y/o sismograma sintético. Ahí *elegir dos o tres reflectores continuos* con importante significación geológica y/o prospectiva e iniciar el *picado o rayado de los reflectores*, con colores y nombres distintivos, yendo en dirección a otro pozo con atado de datos entre sísmica y geología, si lo hay. *Se usan las dos pantallas*: para ver mapa base y una sección, o para secciones contiguas en cada una. En el mapa base se iluminan automáticamente los tramos de horizonte interpretado con escala *arcoíris* de To.

Durante este avance *es oportuno ir interpretando las fallas*, trazando al menos las de mayor rechazo en una primera etapa, en general sin asignarles nombres o números identificativos o haciéndolo sólo tentativamente, salvo que se tenga pronta certeza de cuál es cuál entre línea y línea.

En la sísmica 2D este progresivo avance del rayado es aconsejable hacerlo *cerrando rectángulos de la malla*, para ir con mayor certidumbre, debido a que, si al terminar la vuelta se llega un reflector arriba o abajo respecto al punto de partida, significa que habrá que revisar hacia atrás hasta encontrar dónde se ha cometido el error.



Sección sísmica sin y con interpretación de horizontes y fallas (gentileza YPF)

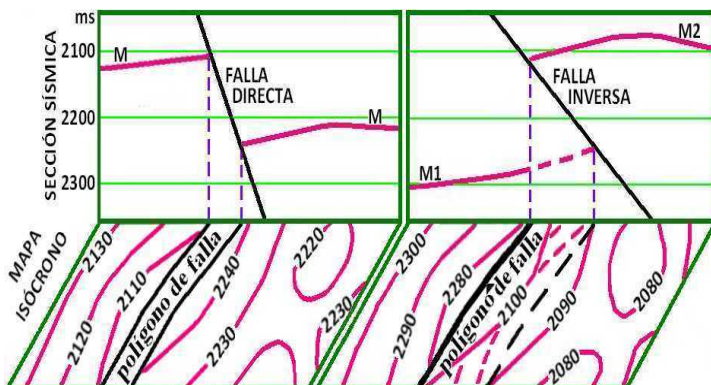
En cambio, *en la sísmica 3D conviene ir interpretando las líneas (inlines) paralelas y cercanas*, cada dos o cuatro líneas, por comparación de cada una con la siguiente, y en simultáneo se va controlando con traversas que cruzan en sectores estratégicos. Por ejemplo en el bloque alto y el bloque bajo de una falla importante perpendicular a las líneas que están siendo rayadas. También es posible controlar mediante secciones horizontales y visualizaciones en perspectiva. Las líneas intermedias pueden dejarse para completar en una etapa posterior con alguna *opción de seguimiento automático de los horizontes (autotrack, autohuellar)*, el cual en casos favorables es recomendable emplear desde el principio de

la interpretación, aunque siempre se deben controlar sus resultados y corregir eventuales saltos incorrectos. Hay que ir revisando la trama para evitar errores tardíos que hagan perder después mucho tiempo de arreglo; tampoco pasársela tejiendo y destejiendo como cuentan que hacía Penélope esperando a su amado Odiseo.

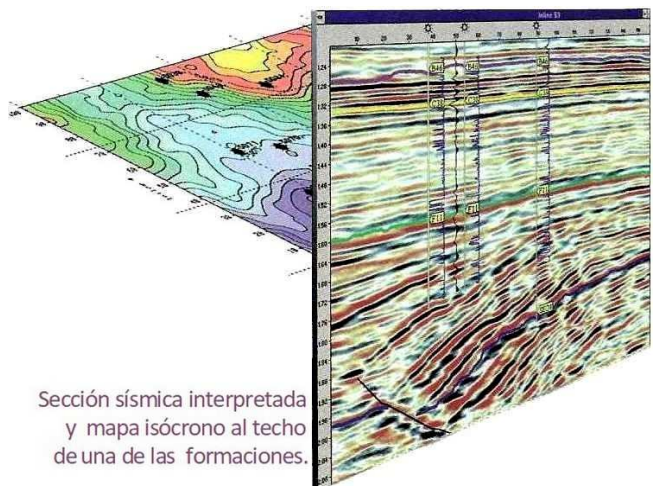
Con el avance de la interpretación se podrá nominar las fallas, agregar las más pequeñas, rayar reflectores adicionales y eventualmente recurrir al cálculo y visualización de atributos sísmicos, etc.

Por último, o en forma progresiva, se podrá hacer el *grillado y curveo de mapas isócronos y otros*. Para ello *deben dibujarse previamente los polígonos de falla en planta*, para cada nivel guía que se desee mapear, de modo que las curvas o contornos luego se ajustarán al esquema de bloques geológicos interpretado.

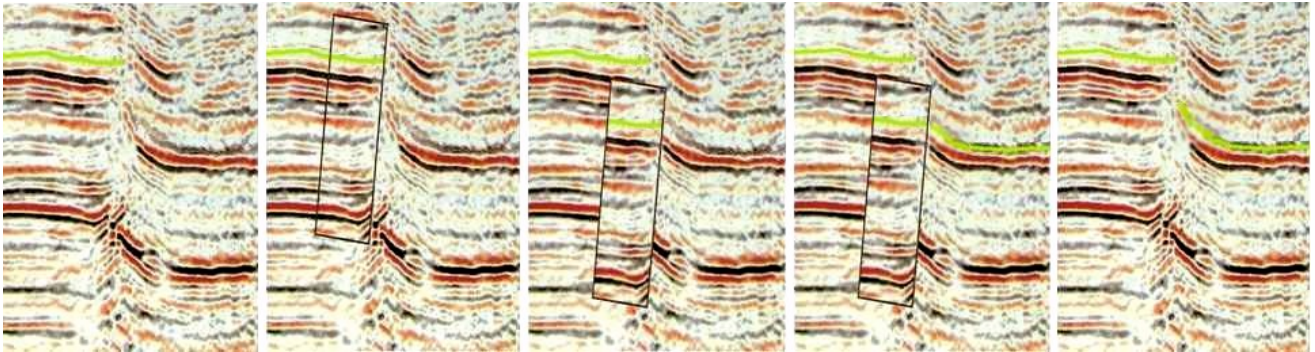
Como puede verse en la figura abajo, *las fallas directas dejan una franja* (polígono alargado) donde no existe el nivel M mapeado (si es un reservorio delgado, ahí un pozo no lo hallará). En cambio *las fallas inversas causan superposición*, la capa se repite y casi siempre se elige mapear la parte superior (con mayor interés prospectivo) porque los programas no permiten duplicar el marcador (arriba y abajo a la vez) y el polígono de falla se estrecha hasta ser una línea gruesa. Queda sin rayar el tramo de marcador bajo el plano de falla y su contacto con la misma (acá esbozados en trazos a fines didácticos). La alternativa es mapear cada bloque por separado (con distinto nombre de marcador para cada sector, tipo M1, M2, etc.) y luego combinar los varios mapas, resultando de este modo la superposición de los contactos de las fallas inversas en los límites entre ellos.



Fallas en sección y sus polígonos en el mapa; ver texto.

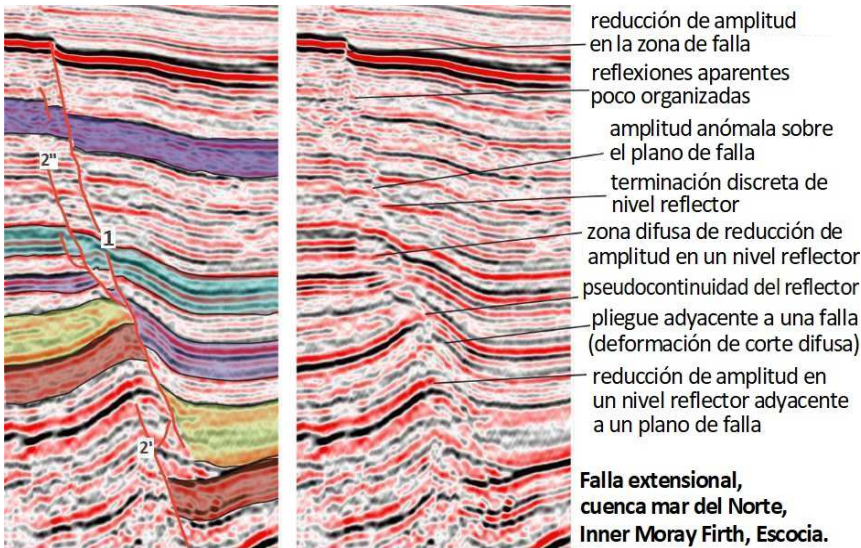


Sección sísmica interpretada y mapa isócrono al techo de una de las formaciones.



Sección mostrando de izquierda a derecha las sucesivas etapas de empleo de un polígono de correlación: se raya el nivel verde hasta la falla, se crea y desplaza el polígono, se ve la correlación y se continúa con el nivel verde en el otro bloque.

El polígono de correlación (aquí arriba) puede dibujarse en forma irregular y es un auxiliar informático útil para ver los rechazos a lo largo de fallas y la correspondencia entre reflectores o conjuntos de ellos.



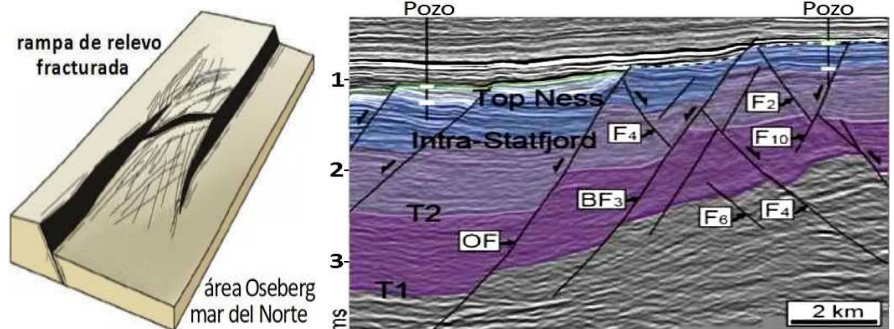
Sección con falla compleja (modificado de Rob Butler, Virtual Seismic Atlas)

La interpretación de planos de falla no siempre es sencilla. Suele haber dudas sobre el lugar preciso donde cortan, si se trata de uno o varios planos cercanos, e incluso a veces es dudosa su orientación. La figura contigua indica observaciones que pueden realizarse para decidir dónde deben ser rayados. Suelen ser muy complejas (Iacopini *et al.*, 2016).

Se denomina **carácter** o **firma** (*character* o *signature*) de cada reflector a su aspecto (continuidad, amplitud, frecuencia) que puede variar a lo ancho del área en estudio y es un elemento distintivo a tener en consideración tanto en abordajes estructurales como estratigráficos.

Las rampas de relevo (*relay ramps*) son zonas de transferencia de rechazos entre fallas (de cualquier escala) en dirección horizontal (normal al rumbo) y a veces en la vertical –podría suceder que en secciones paralelas hacia la derecha de la precedente se agrande la falla 1 y desaparezca la 2, y que hacia la izquierda ocurra lo contrario–. Estas interpretaciones en ocasiones no son fáciles, dependiendo de la calidad de la sísmica 3D. En 2D se las puede inferir, pero no es fácil al no tener la continuidad de datos transversal a cada línea (salvo una cada tanto). A veces las rampas horizontales están rotas con fallas menores (bosquejo abajo). También recuérdese que con la persistencia del esfuerzo tectónico, un tren de fallas separadas tiende a coalescer a través del tiempo geológico. Las fallas en X (sección sísmica a la derecha) también complican la interpretación, debiéndose observar su evolución a lo largo del rumbo.

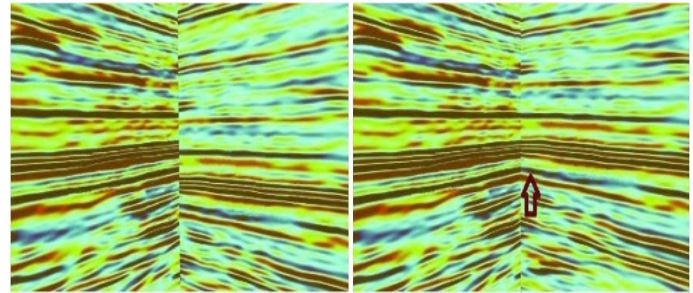
Cuando son interpretados datos combinados de sísmica 2D de diferentes épocas de adquisición, o cubos adyacentes con parámetros de registro distintos, o información mezclada 2D-3D, se debe proceder al ajuste de los planos de referencia entre unos y otros, a los efectos de homogeneizarlos, para cuyo fin se pueden hacer los corrimientos en tiempo relativos (primera figura de



Reactivación de fallas en un *rifting* multifase (modificado de Deng *et al.*, 2017)

la página siguiente) o recurrirse a programas de **atado diferencial** (*mistie*) si las diferencias no son de tiempos constantes. También *podría ser necesario invertir la polaridad de una sísmica para igualarla a la otra vecina*

–recuérdese que en la convención americana un incremento de impedancia acústica hacia abajo corresponde a un pico y una disminución da un valle, siendo opuesta la convención europea–. Y no olvidar que *siempre habrá corrimiento de fase de la ondícula entre datos de fuentes impulsivas y vibratorias*. Por estas razones *a veces conviene reprocesar homogéneamente las prospecciones sísmicas aledañas*, si bien el costo es mayor.



Cruce de secciones 2D, atado corregido subiendo a la derecha.

Caracterización Final de los Bloques

Es la comparación y ajuste del modelo estructural previo –si existiese– o la creación del mismo a partir de la interpretación hecha desde un mallado de sísmica 2D, o bien de una 3D, *pudiendo desplegarse isócronos y planos de falla en perspectiva con un programa de visualización en computadora*. Se cotejan interpretaciones de líneas 2D de rumbos apropiados, o bien de secciones en **líneas (inlines)** y **traversas (crosslines)** de la 3D con los cortes creados por correlación de pozos. Podrán entonces corregirse correlaciones y mapas estructurales hechos únicamente a partir de datos de pozos, o bien construirse estructurales nuevos a partir de los mapas isócronos, siempre que se cuente con adecuados controles de velocidad (relación tiempo–profundidad) en varios pozos estratégicamente situados en el área mapeada. En este escenario lo más oportuno es construir un **mapa de isovelocidades** a cada nivel de interés (Tema 18, pág.458) y luego proceder en cada caso a la operación de producto entre grillas: valores de velocidad multiplicados por valores de tiempo darán valores de profundidad, que entonces se mapearán como un estructural.

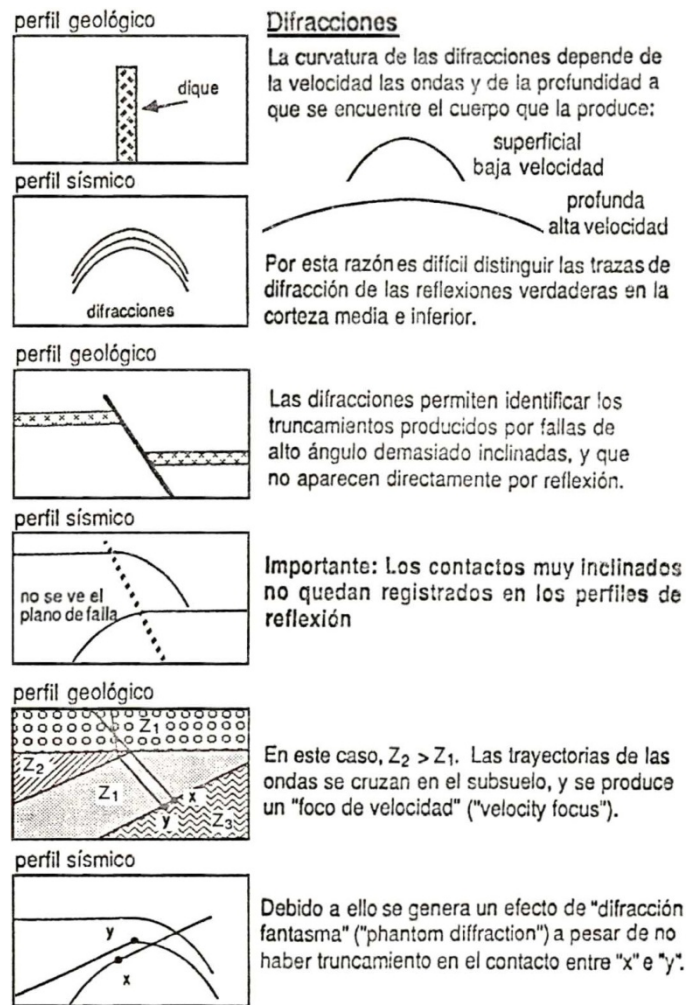
ENGAÑOS SÍSMICOS (pitfalls)

La interpretación de secciones de reflexión (incluso en sus versiones horizontales de 3D) debe partir de la premisa de que *las imágenes sísmicas que se perciben no son cortes geológicos, ni los isócronos son mapas estructurales*, sino sólo aproximaciones a éstos. Las consecuencias de ignorarlo son las metidas de pata en las trampas sísmicas, que no son precisamente hidrocarburíferas...

Cuando se observa una sección vertical procesada *pueden aparecer considerables problemas si ésta no ha sido migrada*, sobre todo si se trabaja en un área de medios o altos buzamientos: los reflectores sísmicos no estarán en su verdadera posición relativa y además habrá difracciones sobre planos de falla y en toda geología que presente variaciones laterales bruscas (intrusiones, diapiros, arrecifes, lentes arenosas, etc.), como muestra la figura colindante, en cuyo caso se deberá ser cauto y eventualmente intentar unas pocas migraciones manuales de los reflectores de mayor interés.

Ya prácticamente no existe sísmica sin migrar para ser interpretada porque los costos han disminuido mucho y hasta la sísmica vieja se reprocessa para poder verla migrada –salvo cuando se hace alguna rápida evaluación de un área antigua–. Pero *en casos de geología complicada* (faja plegada, intrusiones de complejo emplazamiento, etc.) *una migración convencional puede no ser suficiente* y únicamente se tendrá alguna certeza de una correcta interpretación cuando el proceso de migración se haya realizado antes de apilamiento (*pre-stack*). A su vez,

como ya vimos, existe diferencia según sea el algoritmo utilizado (Kirchhoff, ecuación de onda, trazado de rayos, etc.) y esto es también válido para las etapas previas del procesado sísmico: recuperación de amplitudes,

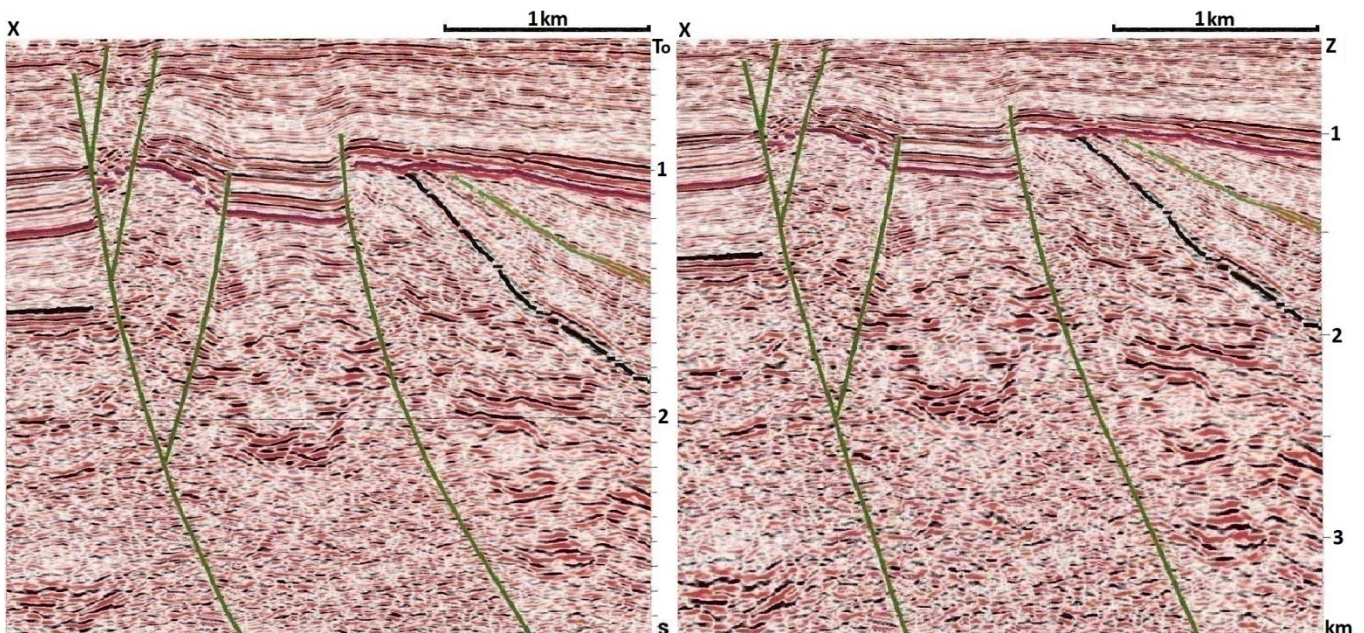
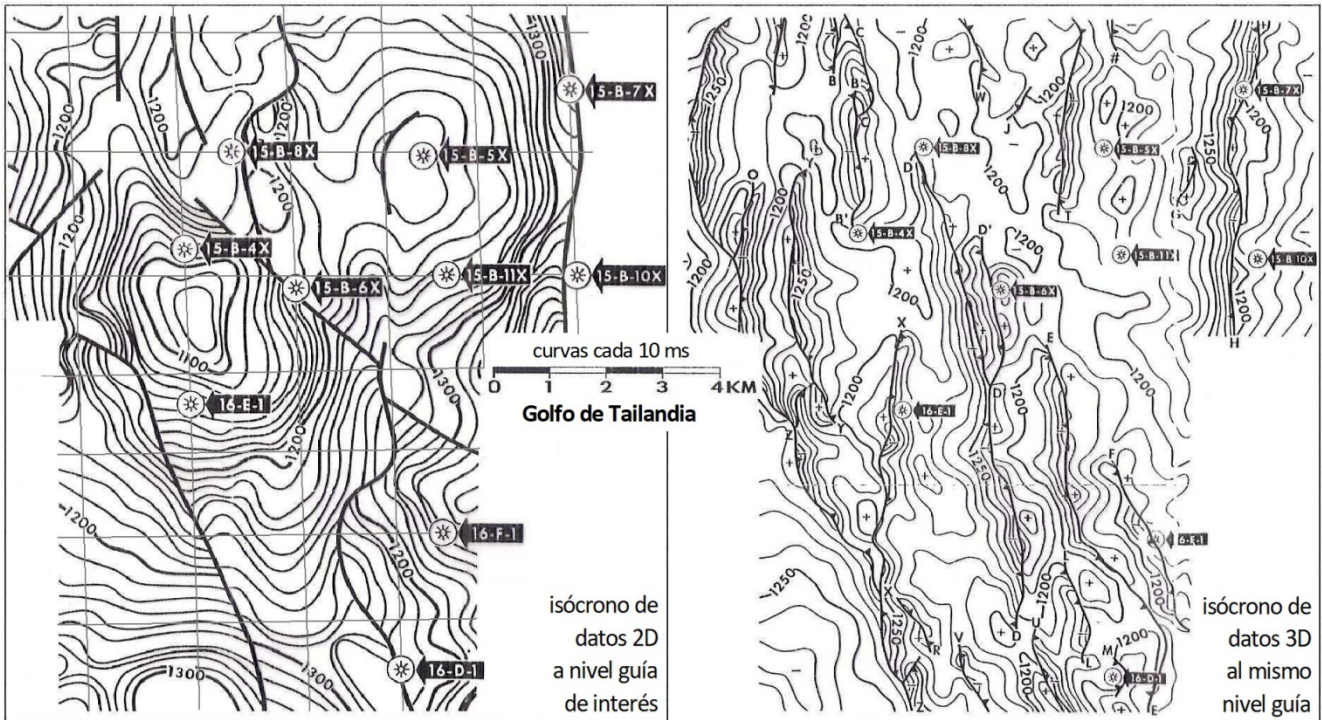


(modificado de Geofísica Exploración Y.P.F.)

estáticas, dinámicas, deconvolución, filtrados y otras, que pueden ser implementadas con distintos criterios y variables márgenes de error, lo cual redundará en el producto final.

Recordemos también, como se comentó antes, que no es lo mismo un mallado 2D que una sísmica 3D. La interpretación permitirá arribar a un resultado mucho más preciso y exacto en el segundo caso, tal cual queda evidenciado en la comparación de los siguientes mapas isócronos.

(modificado de Texas Pacific Oil Co.)



Sección sísmica convencional (escala vertical de T_0) y convertida a profundidad (escala vertical espacial Z).

Ahora bien, incluso si todo hubiese sido realizado del modo más atinado –que casi siempre tiene como condición necesaria, aunque no suficiente, un presupuesto generoso–, no se tiene que olvidar que **la sísmica normalmente está representada en escala de tiempos, no de profundidades**. De modo que **la imagen resultante es función de las variaciones de velocidad**, en general crecientes con la profundidad. Una sección sísmica refleja la geología como un espejo deformante refleja a una persona parada frente a él: piernas cortas, cabeza alargada. Este efecto hace que **siempre las fallas parezcan más lítricas (tipo cuchara) de lo que son**, tendiendo a ser más horizontales con la profundidad, como se ve en la última figura de la página precedente.

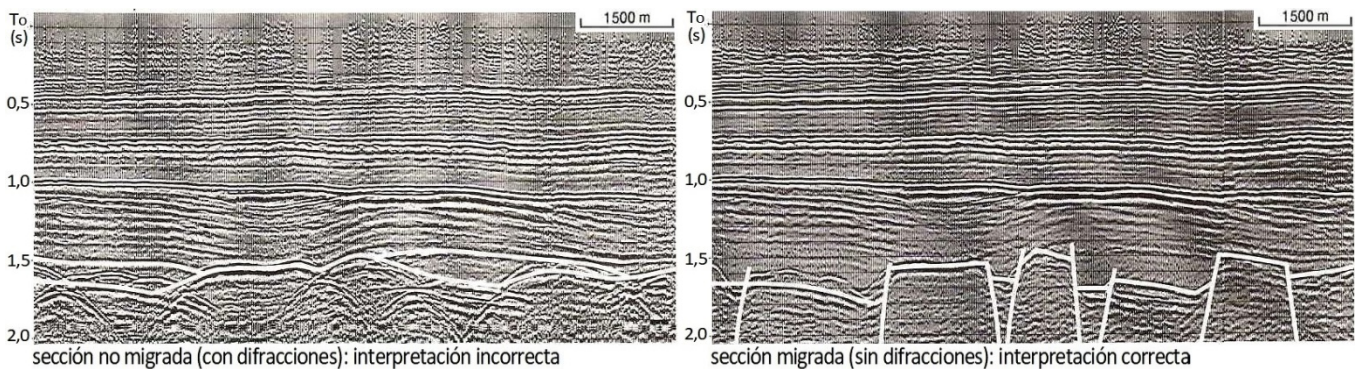
Pero incluso más, porque podríamos ver distorsiones –como sería el caso de un brazo más gordo que el otro– porque **las velocidades también varían lateralmente** según sea la geología iluminada por las ondas. Y lo mismo ocurrirá con las secciones horizontales y con los mapas o cualquier otra información interpretada. Sólo si la sísmica ha sido pasada a profundidad por un método muy sólido, por ejemplo abundantes y representativos datos de sísmica de pozo, o bien una consistente migración por trazado de rayos, entonces se podrá tener una cierta confianza en la equivalencia entre imagen sísmica e imagen geológica, pero incluso en estos casos hay que estar prevenido porque algunas deformaciones estructurales, aunque sutiles, estarán todavía presentes.

Tampoco debe olvidarse que **la sísmica no puede ver nada que se aproxime a la vertical**. Todo aquello que incline más de 45° será prácticamente invisible –los rayos rebotados emergerán casi todos muy lejos del área de trabajo–. A lo sumo, si el espesor de tales eventos subverticales es significativo, se podrá ver una zona de ruido que alertará sobre algo que existe pero no se puede ver. Otras veces, cuando los espesores son de pocas decenas de metros, ni siquiera podrá intuirse que tales emplazamientos existen.

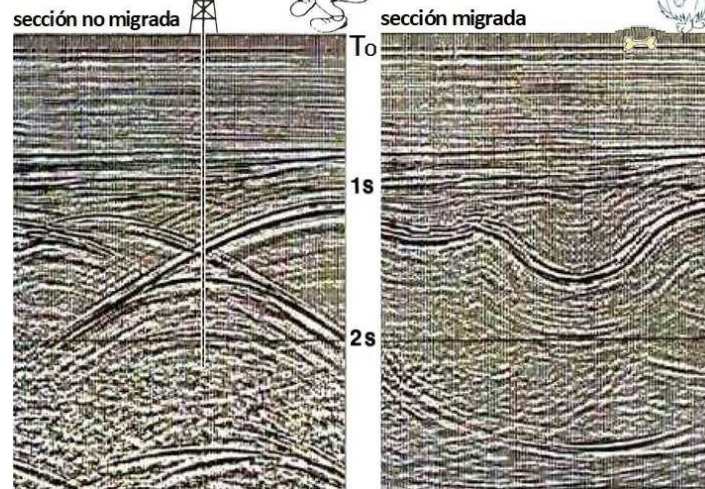
Y, por si todo esto fuese poco, la **limitación en cuanto a la resolución sísmica** de intervalos delgados es otro de los significativos problemas de visualización, como se ha explicado antes.

Trampas Sísmicas Frecuentes

Existe variedad de ellas urdidas para tender una celada a todo aquel que se atreva a internarse en el enmarañado terreno de la sísmica de reflexión. Veamos cuáles son las que intentan hacernos caer más a menudo.



Problemas interpretativos causados por la carencia de migración (figuras modificadas de Tucker, 1973 y 1982)



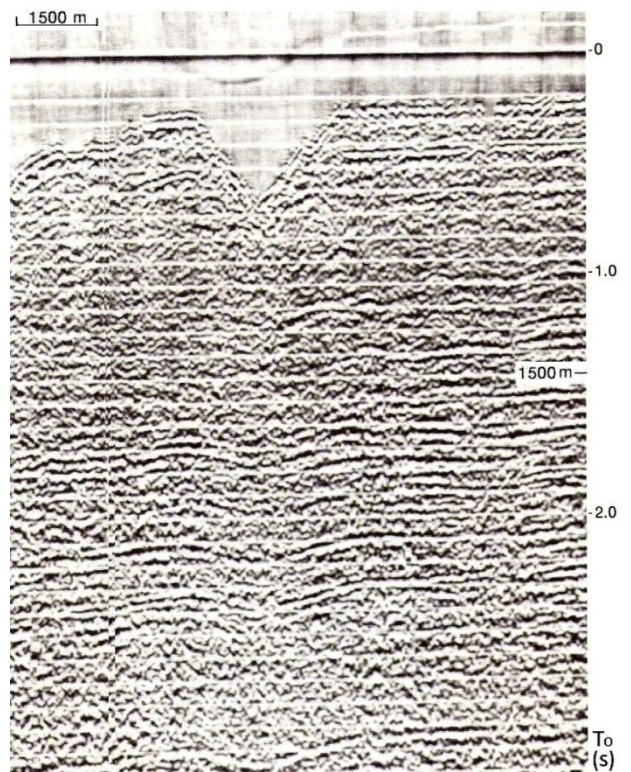
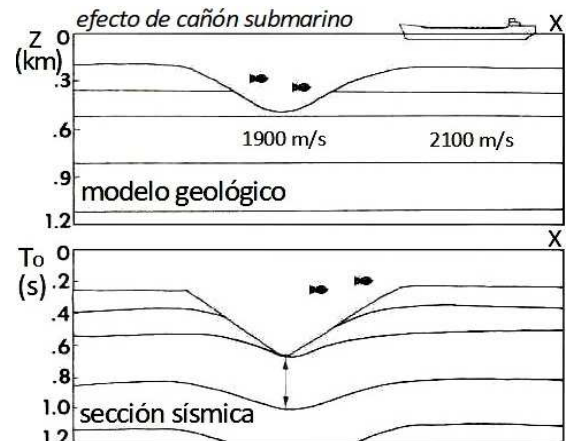
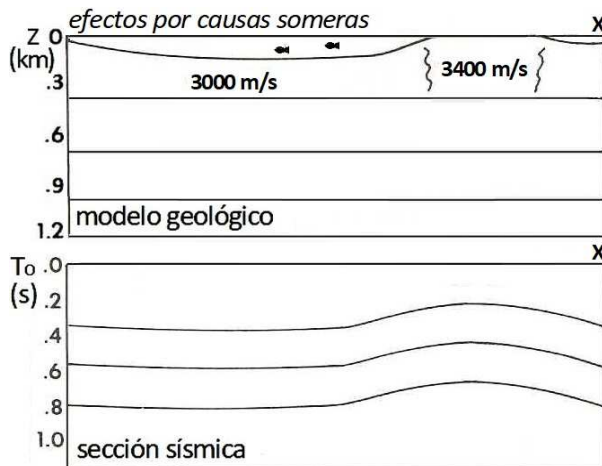
-Falta de migración o migración inadecuada, que puede generar buzamientos erróneos, falsas estructuras, difracciones y cambios laterales de velocidad no corregidos. En la figura precedente, un ejemplo en el que en la sección no migrada (izquierda) las difracciones llevan a interpretar erróneamente, que cambia en la sección migrada (derecha) incorporando fallas para un esquema de pilares (*horsts*) y bloques hundidos (*grabens*). Y abajo el ya citado efecto de foco enterrado.

-Recuperación de amplitudes excesiva, donde la tendencia a equalizar (igualar amplitudes) en exceso hace indistinguibles secuencias de bajos contrastes internos respecto a otras con altos contrastes acústicos. Aun en un proceso de rutina es algo que debe cuidarse para poder interpretar bien después, no siendo necesario recuperar **verdadera amplitud**. Esta última se requiere para

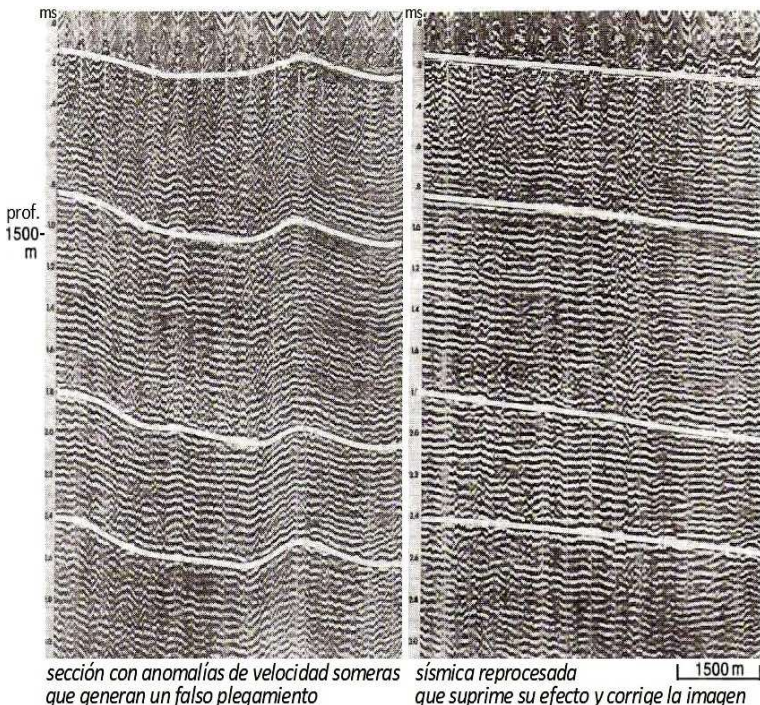
interpretaciones estratigráficas muy específicas, aplicar inversión de trazas o método AVO (Tema 18, pág.467).

-Estáticas imprecisas, que pueden dar tirones o empujones de velocidad (*pull up, push down*) resultantes de emplear velocidades o espesores por exceso o por defecto para la capa meteorizada. Resultan entonces intervalos temporales respectivamente por defecto o por exceso para dicha capa superficial, que a su vez levanta o hunde las trazas generando falsos anticlinales o sinclinales a todo lo alto de la sísmica.

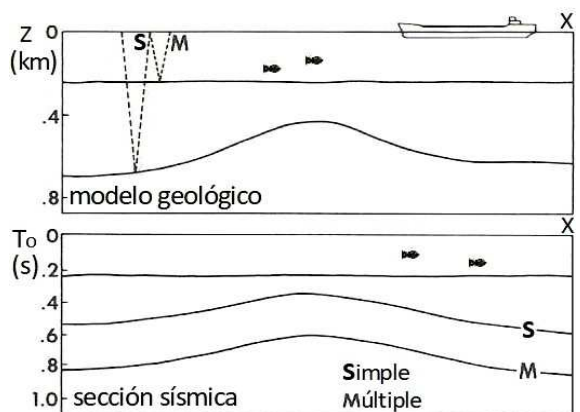
En las siguientes figuras se esquematizan y ejemplifican casos reales de falsas estructuras por problemas no corregidos a causa de velocidades subsuperficiales lateralmente cambiantes. A la izquierda forma anticlinal y a la derecha sinclinal, ambas con preservación de la curvatura a lo largo del tiempo T_0 (o sea el alto de la sección sísmica). Imágenes reales parecidas sólo son raramente generadas por fallas de desplazamiento lateral más extensión (transtensivas) o compresión (transpresivas). En estos casos hay que revisar y eventualmente volver a registrar datos para estáticas de campo, y luego reprocesar la sísmica.



sección sísmica donde se ve un empujón de velocidad (falso sinclinal) a causa de un cañón submarino; debe reprocesarse. Distintos posibles problemas de correcciones estáticas (figuras modificadas de Tucker, 1973)

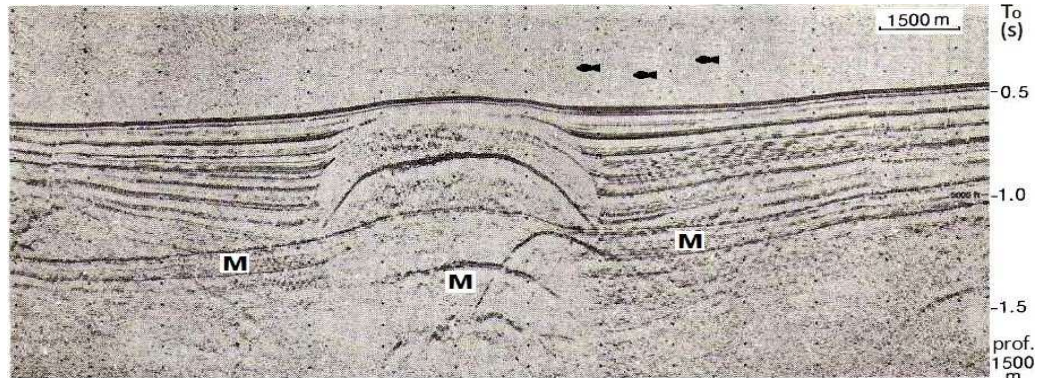


-Ruidos en general, que no pudieron removerse durante la adquisición ni tampoco en el procesamiento de los datos, que por tanto pueden dificultar el entendimiento de la geología e incluso generar falsas interpretaciones. Las reflexiones múltiples son un caso típico de replicación viral cuando no se ha recurrido a toda la batería de pesticidas disponible para su erradicación. En la figura a la derecha vemos el modelo geológico con su correspondiente imagen sísmica.



Origen de un reflector múltiple por reverberación en el fondo marino (modificado de Tucker, 1973)

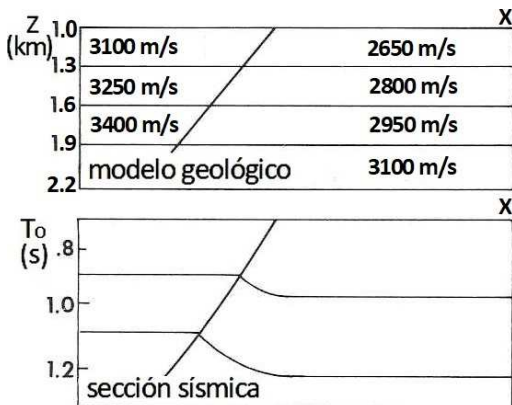
A la derecha, caso real de una sección sísmica en la que se presentan reflexiones múltiples por reverberación en el fondo marino. Se produce la repetición del reflector del lecho marino, así como un reflector fuerte dentro de la antiforma de origen arrecifal.



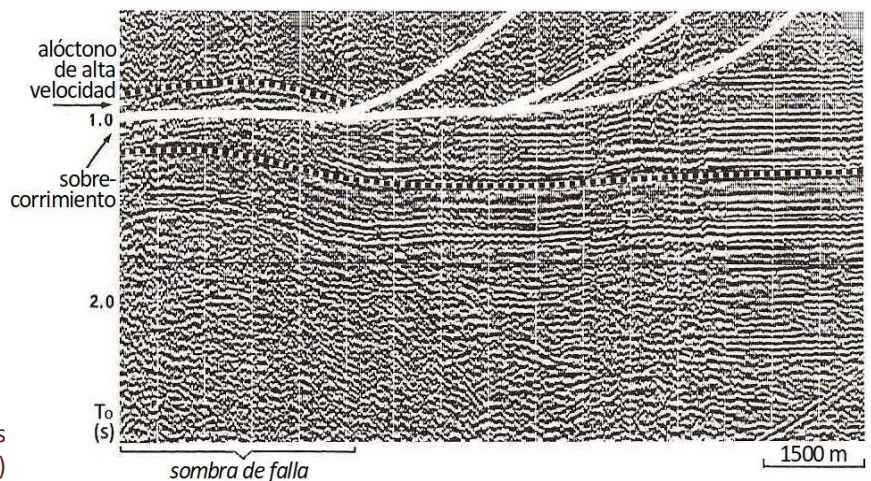
Sección sísmica donde se indican algunas múltiples (M) por reverberación en el fondo marino (modificado de Tucker, 1973)

-Variaciones laterales de velocidad (a similar profundidad actual),

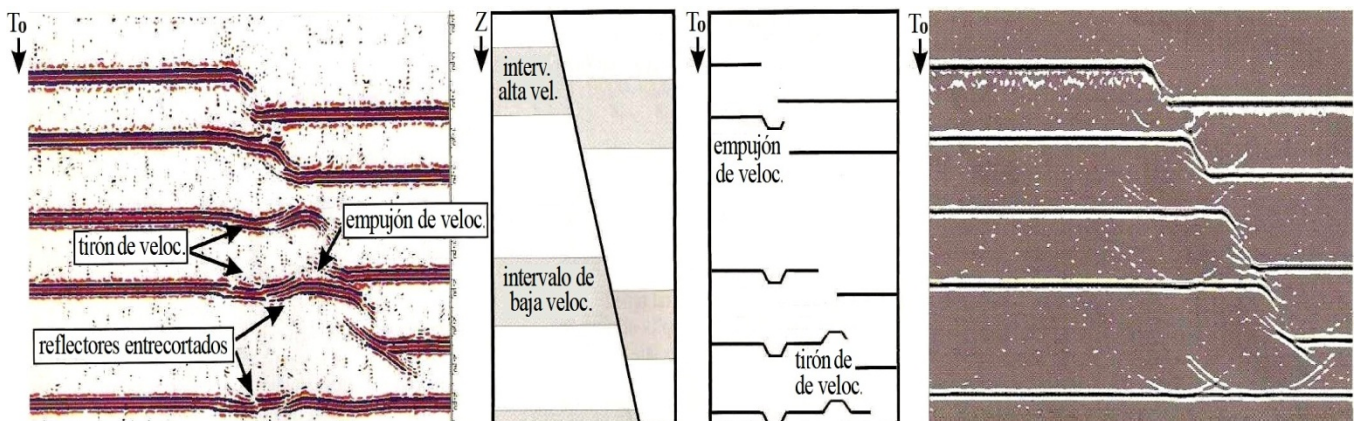
generadas sobre todo por cuestiones estructurales (sobrecorrimientos, fallas gravitacionales o transcurrentes, pliegues por inversión tectónica, diapirismo, intrusiones ígneas u otras muchas posibilidades) como en menor medida también por motivos estratigráficos (crecimientos arrecifales, lentes arenosas, etc.). El resultado es similar al de las estáticas erróneas (tirones y empujones de velocidad), aunque en estos casos no hay nada que sea posible corregir en el proceso convencional. Si el fenómeno ocurre bajo una superficie de falla recibe el nombre alternativo de **sombra de falla** (*fault shadow*), que se grafica a continuación.



Efecto de sombra de falla, inversa en estos casos (figuras modificadas de Tucker, 1973)

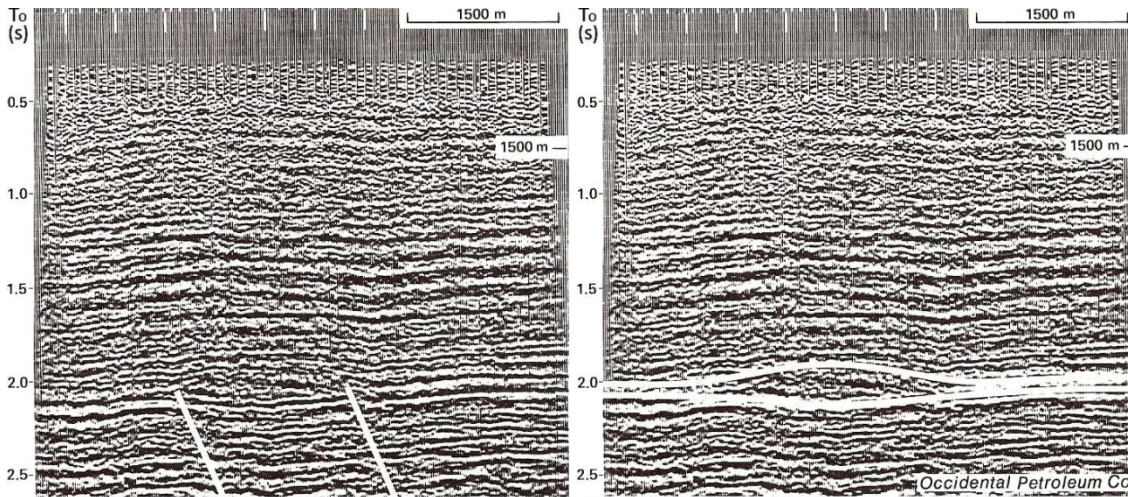


En ocasiones la sombra de falla produce una sucesión de estrechos anticlinales y sinclinales. Sólo se puede entender este tipo de problemas haciendo modelos de sísmica sintética hasta encontrar la probable geología causante de tales levantamientos o hundimientos en la imagen, o bien pueden ser corregidos, al menos parcialmente, con **migración por trazado de rayos**, preferentemente antes de suma, tal como aquí se ilustra.



A la izquierda una sección sintética –de modelo– con migración post-apilamiento con tirones y empujones de velocidad alineados subverticalmente, luego esquemas geológico y sísmico de estos efectos que deforman los reflectores, y a la derecha la misma sección sintética pero ahora corregida mediante migración pre-apilamiento (modificado de Fagin, 1996)

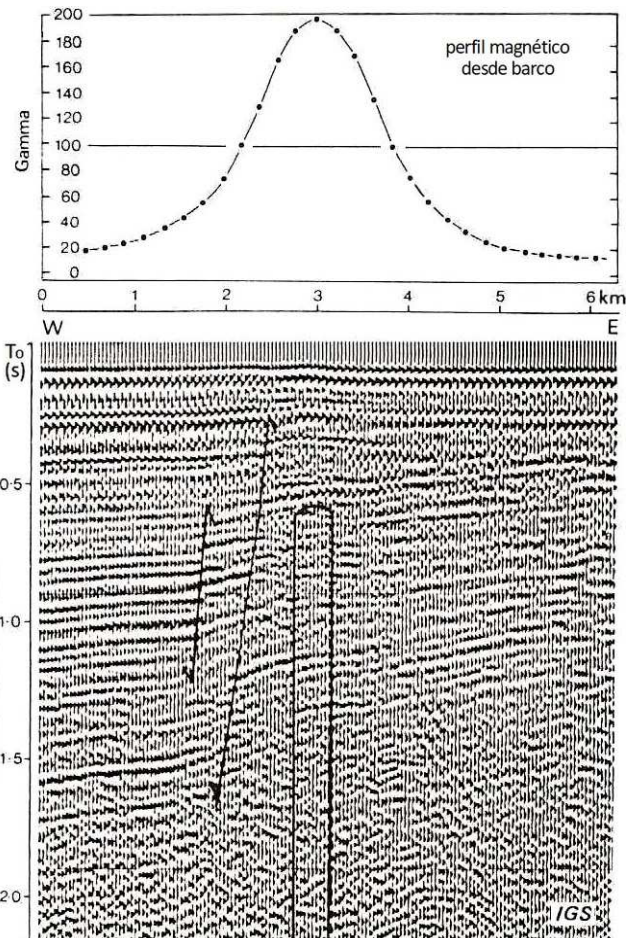
-**Deconvolución, filtrados o procesos cosiméticos variados**, que pueden alterar, a veces marcadamente, la forma con que se visualizan rasgos sutiles de la sísmica. Un **cambio lateral de carácter** (no de humor sino de aspecto de la reflexión), como el ilustrado abajo, puede modificarse con las distintas opciones a las que se recurra durante el procesamiento. En este caso ambas secciones tienen igual proceso: lo que varía es la interpretación realizada.



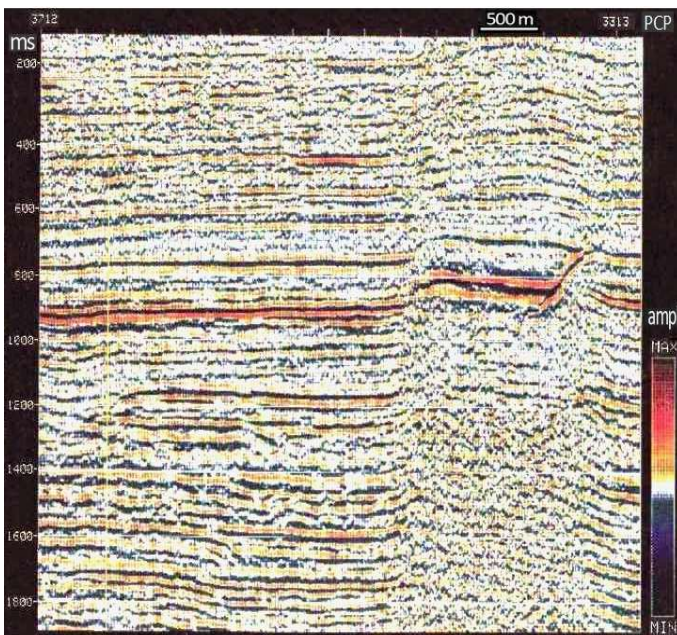
Cambio lateral de carácter de las reflexiones: interpretaciones alternativas de la misma sección, incorrecta a la izquierda, correcta a la derecha (modificado de Tucker, 1973)

-**Zonas poco iluminadas** por los frentes de onda, que pueden responder al alto buzamiento de las capas, como en la figura de la derecha, en la que un dique ígneo denunciado por el perfil magnético prácticamente no se ve en la información sísmica, excepto por muy sutiles indicios.

Además zonas poco iluminadas tienen lugar en capas bajo fuertes contrastes de impedancia acústica (gran amplitud) que ofician de espejo bajo los cuales poca energía logra pasar. Se da si hay diapirismo evaporítico, carbón (con o sin gas producible) o lentes gasíferas (areniscas, etc.), en este último caso sólo si se registran ondas P, ya que **las S son indiferentes al fluido poral**. También bajo intrusiones ígneas, como el filón de la sección de abajo, con un tirón de velocidad combinado con poca energía en los estratos infrastantes y un combamiento anticlinal real por encima de la intrusión, causado por inyección forzada.



Comparación de un perfil magnético con la sección sísmica coincidente en Minch, mar del Norte, Escocia; se deduce el emplazamiento de un dique intrusivo y un par de fallas con difracciones por tratarse de una 2D no migrada (modificado de McQuillin *et al.*, 1985)



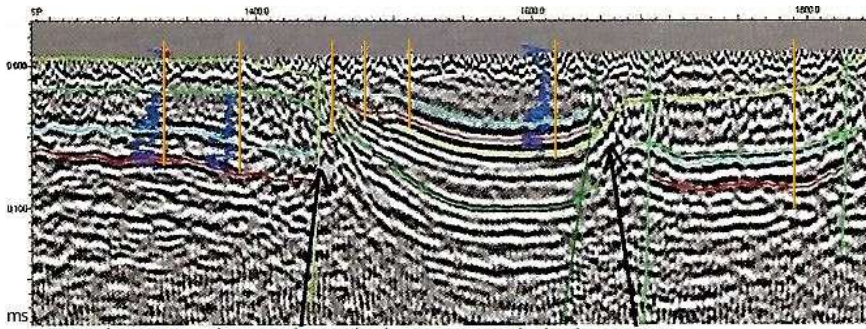
Sección sísmica con intrusión ígnea concordante en el Terciario basal del sur de Santa Cruz, cuenca Austral (gentileza Y.P.F.)

GLOSAS DE GEOFÍSICA

Tema 17: Interpretación Sísmica de Reflexión

Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M., Ledesma Vallvè, M., Costantino, D., Cid de la Paz, M., Guerra, G., 2025.

Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.



las líneas naranjas verticales son pozos perforados; en azul algunos perfiles

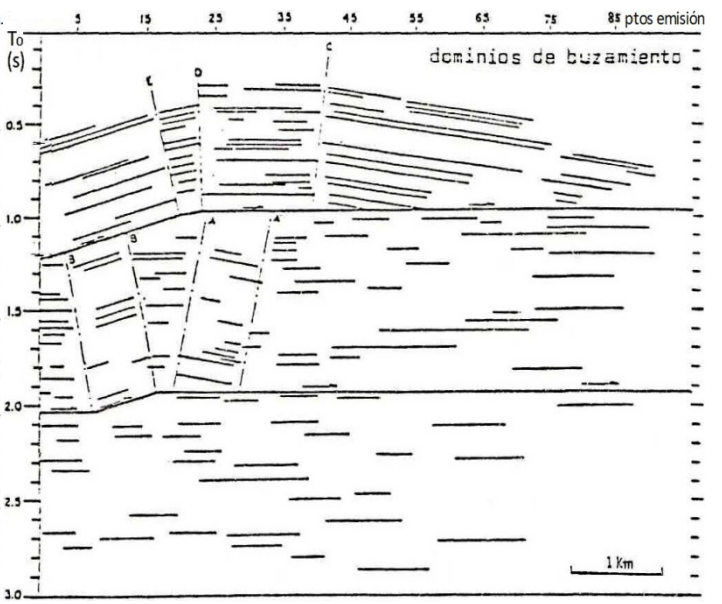
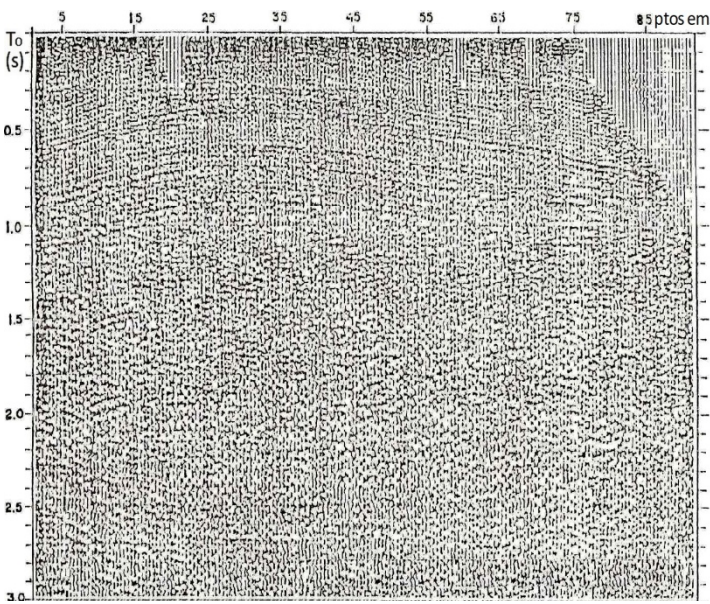
Diques ígneos no evidentes en la sección sísmica provocando desplazamientos verticales de unos 50 m y atravesando mantos de carbón (fuertes amplitudes)

Sísmica de reflexión vs magnetometría (modific. de Gibson, 2011)

RASTREO SÍSMICO (seismic tracing)

Si se dispone de secciones o cubos sísmicos –o sectores de ellos– con baja relación señal/ruido, puede recurrirse a una técnica de **rastreo de reflectores** consistente en remarcar y conectar sobre la sísmica los segmentos de reflexión más visibles (en papel transparente o con un programa de digitalización en pantalla) para después interpretar el modelo geológico, tanto sea referido a aspectos estructurales como estratigráficos.

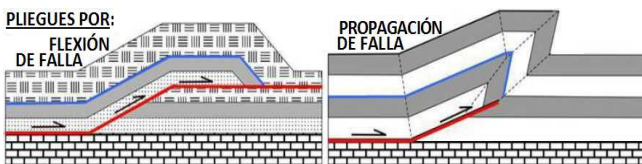
Puede observarse a la izquierda la sección sísmica de muy pobre calidad del oeste de la isla principal de Taiwán –a la que hacia 1600 los portugueses llamaron *ilha Formosa*, hermosa–. A la derecha el correspondiente rastreo.



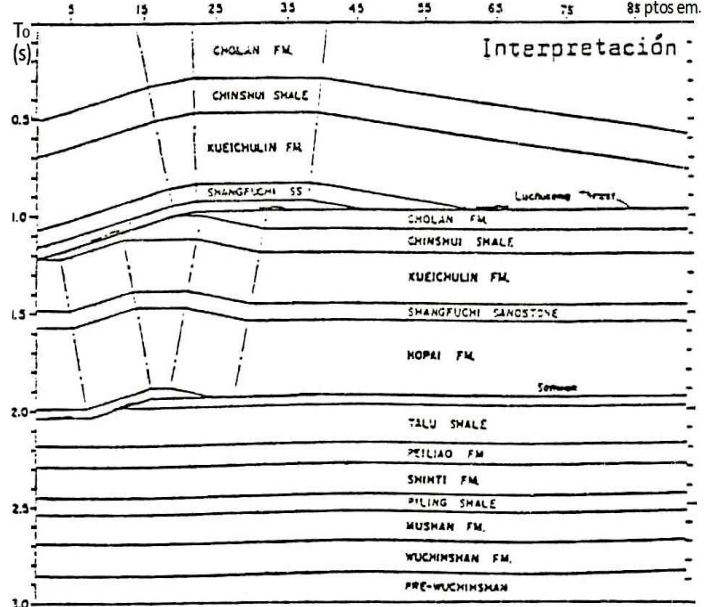
Rastreo sísmico en una estructura de Sanwán, faja plegada del oeste de Taiwán (modificado de Suppe & Chang, 1983)

ESTRUCTURAS COMPLEJAS

Existen diversas técnicas de construcción de modelos estructurales a partir de la información sísmica en 2 ó 3 dimensiones. Uno de los más conocidos es el **método de John Suppe** (estadounidense) **para zonas plegadas por flexión o por propagación de falla**. A la derecha aplicación de este método sobre la sección sísmica rastreada más arriba, con presencia de plegamiento mediante flexión de falla.

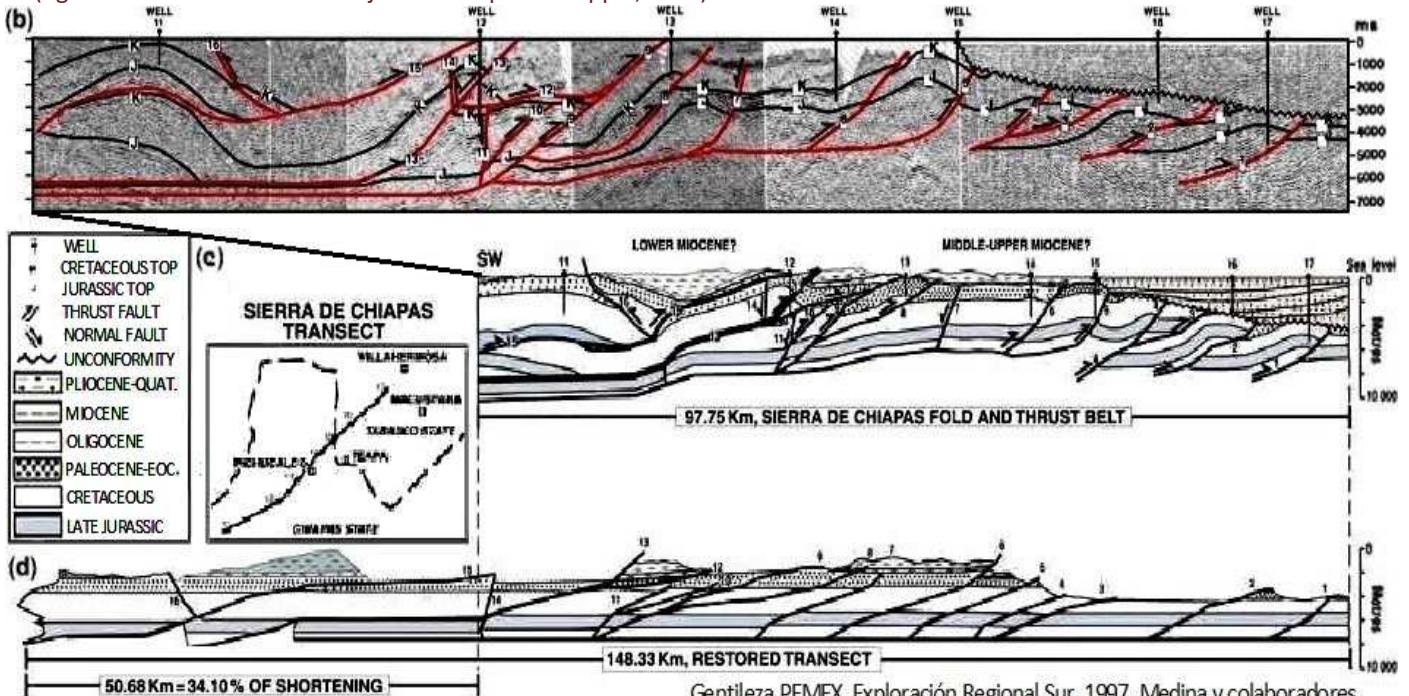
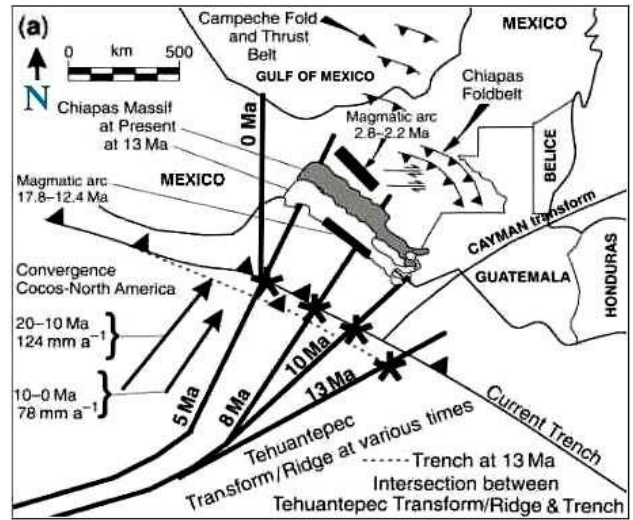


Esquemas de pliegues básicos de faja plegada y corrida.



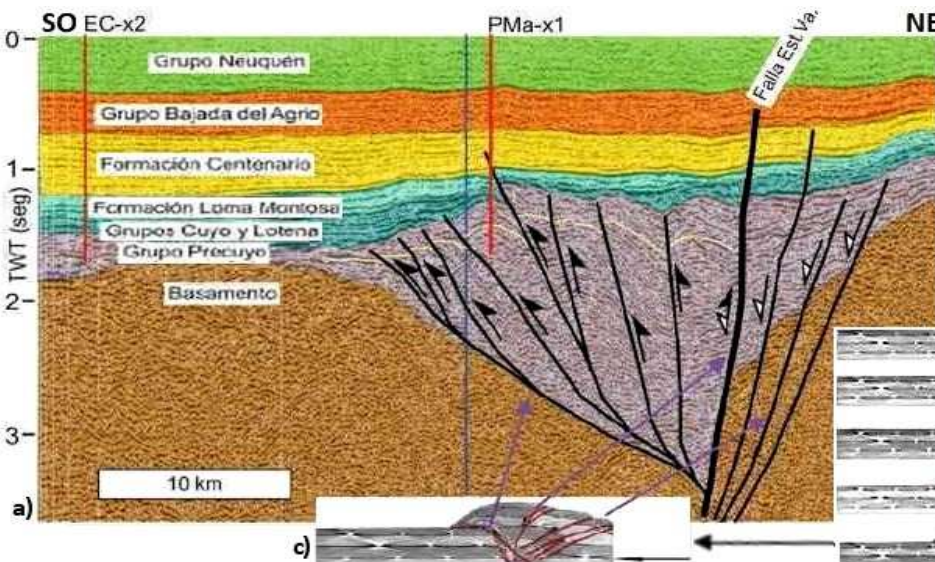
También pueden ser aplicadas técnicas de balanceo estructural sobre datos sísmicos convertidos a escala vertical de profundidad métrica, como el ejemplo del área graficada a la derecha en Centroamérica, justo al sur del istmo de Tehuantepec (del náhuatl, colina de la fiera cruel) que convencionalmente es el confín geográfico con Norteamérica. Es una región cuya complejidad geotectónica causa terremotos como el trágico de septiembre de 2017 (8,1 Mw) y que a su vez propaga hacia el norte estructuras compresivas que offician de trampas hidrocarburíferas sobre todo en el golfo de México. Acá podemos ver una transecta y más abajo la restitución balanceada de los bloques a su posición previa a la compresión

(figuras modificadas de Mandujano-Velásquez & Keppie, 2009)



Gentileza PEMEX, Exploración Regional Sur, 1997, Medina y colaboradores.

Sierra de Chiapas: a) mapa de ubicación, b) ensamble de secciones sísmicas interpretadas, c) interpretación geológica, d) corte estructural balanceado.

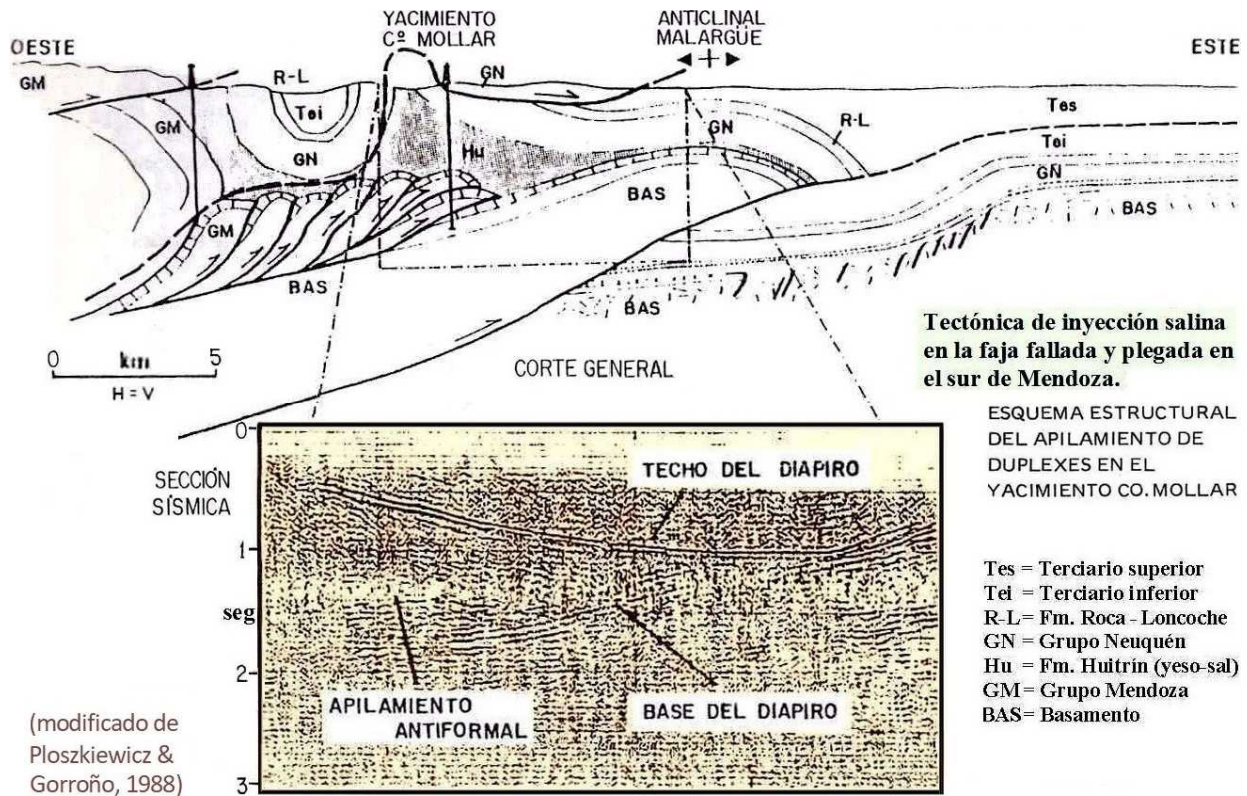


a) Sección sísmica donde se ven fallas inversas E-O desarrolladas en hemigrabens, en muchos casos despegadas en la base del Precuyano; b) y c) cotejo con un modelo análogo de Panien et al. (2005) que muestra las etapas de extrusión del relleno de hemigraben por compresión.

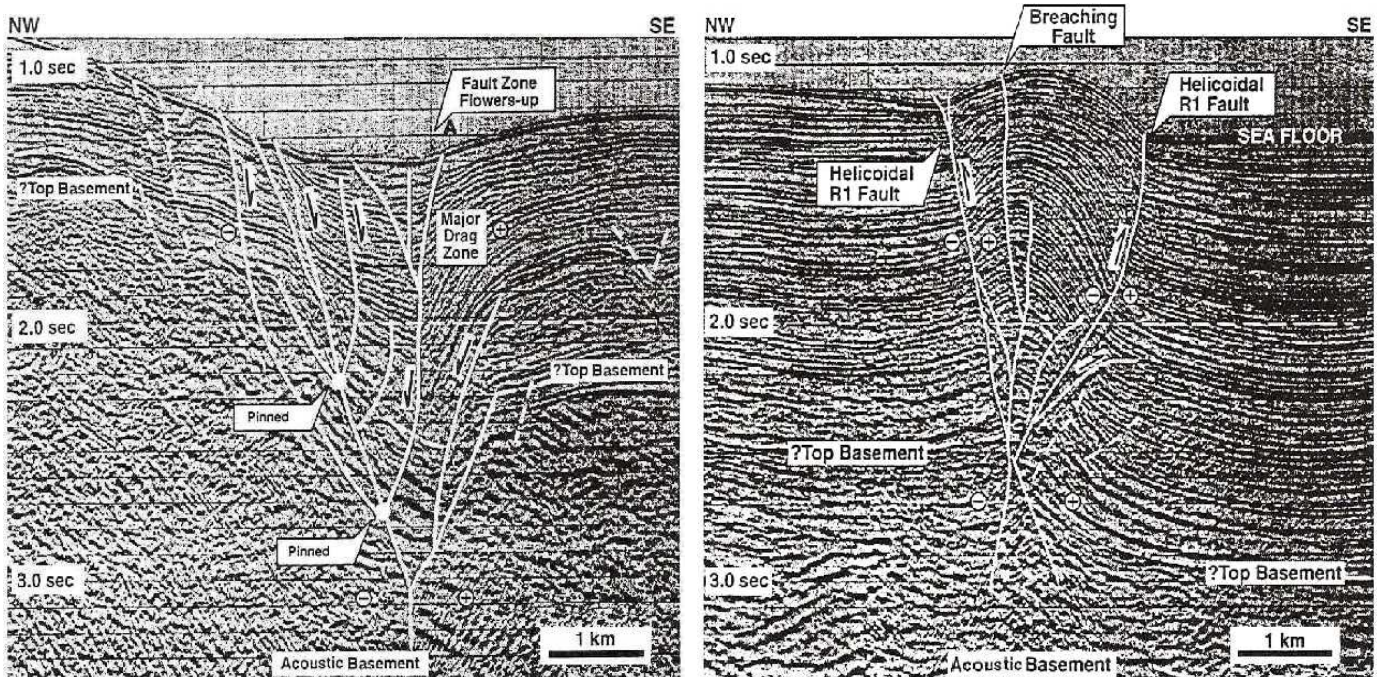
Cuenca Neuquina

(modificado de Crilliani et al., 2009)

Al pie de la página anterior se ve otro ejemplo de evolución de una estructura compleja, en la cuenca Neuquina. Y seguidamente se exhibe otro caso de la misma cuenca que evidencia la dificultad de interpretar sísmica allí donde además se presenta diapirismo tectocinético. Las informaciones de afloramientos, pozos y otros métodos geofísicos permiten trabajar sobre un modelo razonablemente confiable. En esta geología es particularmente útil la gravimetría para detectar la caída de aceleración por presencia de una masa salina (muy baja densidad).



Adicionalmente vemos estas secciones que atraviesan el sistema de fallas de desplazamiento lateral dextrógiro que más al este se continúa en la zona del estrecho de los Dardanelos y después entre Anatolia y el mar Negro. A la izquierda un sector predominantemente transtensivo y a la derecha uno transpresivo, condición que varía según la curvatura del tren de fallas del Egeo y los esfuerzos en juego entre las placas tectónicas en contacto.



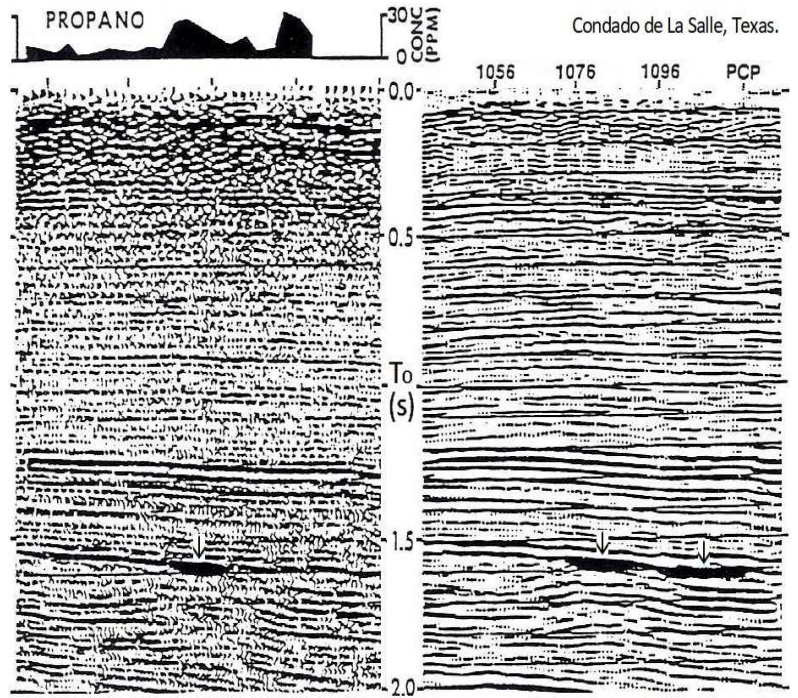
Dos diferentes secciones de la falla transcurrente Athos, norte del mar Egeo, Grecia (modif. de Roussos & Lyssimachou, 1991)

COTEJO CON DATOS GEOQUÍMICOS

Siempre es enriquecedor complementar la interpretación sísmica con información de pozos, afloramientos, otros métodos geofísicos, prospección geoquímica, etc., y en numerosos casos resulta crítico para la búsqueda de resultados en términos económicos. Ya vimos comparaciones con datos magnetométricos, geotérmicos y de pozo. Suelen ser muy útiles los registros gradiométricos de gravedad y magnetismo (véase por ejemplo Wold & Cooper, 1989). Y para hidrogeología la sísmica va bien con SEVs y registros EM en el dominio del tiempo (ver Meeks & van Will, 1991).

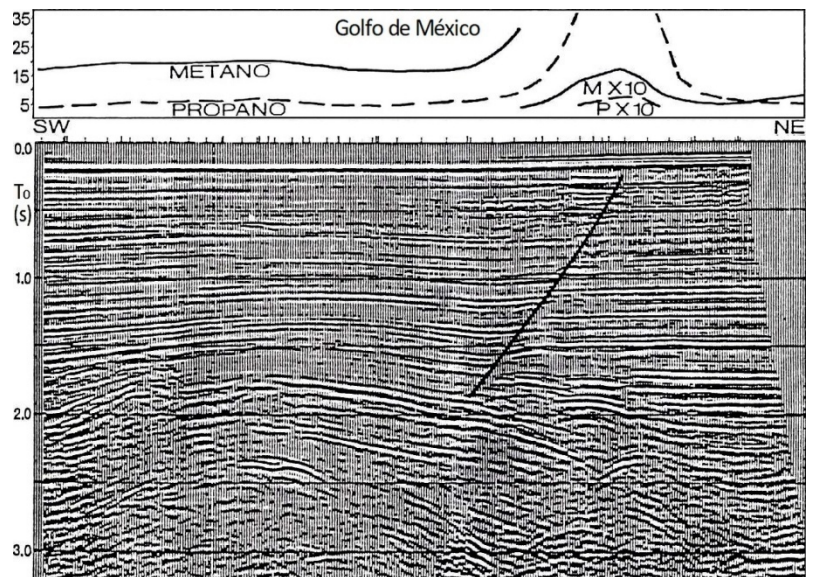
Mostramos ahora brevemente casos del cotejo con datos geoquímicos.

A la derecha puede verse un ejemplo de anomalías de amplitud sísmicas (manchas brillantes o *bright spots*) por la presencia de gas en reservorios profundos. El gas disminuye la densidad y la velocidad respecto al agua o el petróleo y eso causa el aumento del contraste de impedancia acústica con la roca sello y por tanto la amplitud reflejada. Y vemos su correlación con el registro de un perfil de propano que emana desde la superficie, el cual se deduce que fuga a través de microfracturas subverticales donde la resolución sísmica no alcanza para visualizar en profundidad. Debajo del anterior, este otro ejemplo con registro de un perfil de metano y propano que manifiesta un pico muy notable sobre el área en la que casi emerge una falla que



Sección sísmica sin migrar: se ve una anomalía de amplitud causada por la presencia de un reservorio gasífero (flechita) Sección migrada: ahora se observan dos anomalías, que correlacionan con máximos en el perfil de propano en superficie

(modificado de Rice, 1989)



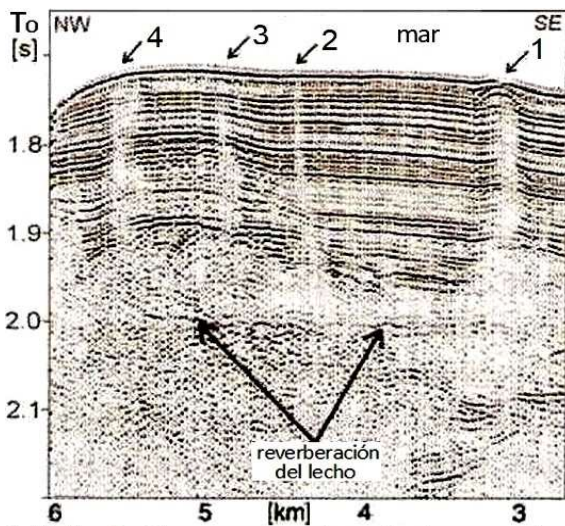
Prospección marina de hidrocarburos por cromatografía de muestras de gas donde se ve un sector anómalo que coincide con una zona de falla observable en una sección sísmica

Sísmica de reflexión versus geoquímica de hidrocarburos

(modificado de Exploration Technologies Inc.)

estaría oficiando de vía preferencial de migración del gas que viene de reservorios profundos, en este caso emplazados más al sudoeste ya que su ascenso sigue el ángulo de la falla.

Finalmente, acá a la izquierda se observa otra sección sísmica, que en este caso evidencia cuatro chimeneas de gas (franjas verticales de pérdida de amplitudes) causadas por el lento y continuado ascenso de metano proveniente de reservorios profundos, que luego se acumula en el lecho marino bajo la forma de hidratos. Los correspondientes perfiles geoelectrónico y

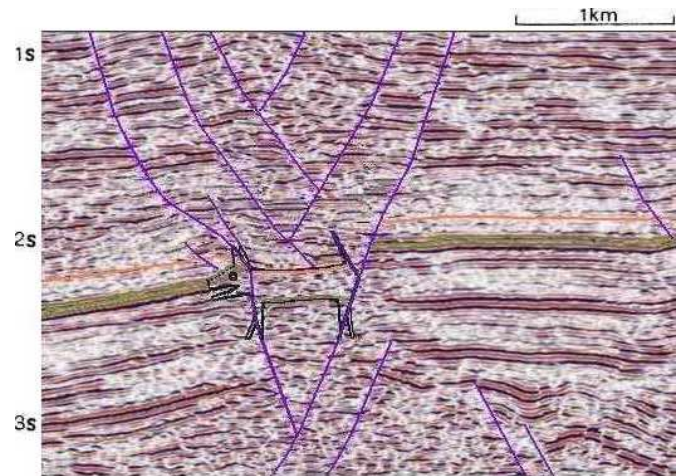


1, 2, 3 y 4: chimeneas de metano desde reservorios profundos, que alimentan hidratos del fondo marino.

(modificado de Schwalenberg et al., 2005)

geoquímico (que hemos presentado en el Tema 06, pág.141) muestran una gran coincidencia causal.

Más allá de todas estas técnicas y resguardos de la interpretación de la sísmica de reflexión, para los geólogos e ingenieros que sean clientes de un intérprete geofísico, como en toda compra (en el restaurante, la tienda, la política, o al adquirir una pintura al óleo), hay que estar atento para no dejarse meter el perro...



Attenti al cane!

CUESTIONARIO BÁSICO

- Definir resolución sísmica horizontal y vertical.
- ¿Qué es la sintonía sísmica y qué beneficio ofrece?
- ¿Cuáles son los posibles significados de las interfaces reflectivas?
- Definir mapa isócrono e isocronopáquico, ¿qué utilidad tienen?
- Explicar la aplicación de la técnica de aplanamiento de reflectores.
- Citar la información previa necesaria para una interpretación sísmica estructural.
- ¿Qué pasos sucesivos se deben seguir en la interpretación?
- ¿Qué tipos de estructuras puede mostrar la sísmica?
- ¿Qué diferentes tipos de problemas puede ocasionar la falta de migración?
- ¿Qué otros tipos de engaños sísmicos pueden presentarse?
- ¿Qué tipo de información nos dan las secciones horizontales y los mapas de amplitud?
- ¿Cuáles son las ventajas de la sísmica 3D sobre la 2D? ¿Y desventajas?
- Referir técnicas de interpretación de estructuras complejas.
- Comentar sobre la vinculación práctica entre sísmica y muestreos geoquímicos.

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Burger, H., 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface (p 225-240). Prentice-Hall.
- Brown, A., 1991. Interpretation of three dimensional seismic data (p 2-5, 12-90, 167-178). American Association of Petroleum Geologists, Memoir 42.
- Coffeen, J., 1984. Interpreting seismic data (p 1-61, 79-261). PennWell.
- Chelotti, L., 1997. Evolución tectónica de la cuenca Golfo San Jorge en el Cretácico y Terciario: algunas observaciones desde la interpretación sísmica. Boletín de Informaciones Petroleras, N°49 (p 62-82).
- Chelotti, L., Czeplowodzki, R., Fortunato G., Cersósimo S. y Trincheró E., 1999. Tectónica del Flanco Norte de la cuenca Golfo San Jorge, Argentina: el yacimiento El Tordillo desde la sísmica 3D. XIV Congreso Geológico Argentino, Actas 1 (p 235-238).
- Chelotti, L. & Trincheró, E., 1991. Cuerpos intrusivos en cuenca Austral: nuevos estudios. Boletín de Informaciones Petroleras, N°25 (p 39-51).
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. & Zambrano, O., 2009. Controles pre-cuyanos en la estructura de la cuenca Neuquina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, V.65 N°2 (p 248-264).
- Deng, C., Fossen, H., Gawthorpe, R., Rotevatn, A., Jackson, C. & Fazlikhani, H., 2017. Influence of fault reactivation during multiphase rifting: the Oseberg area, northern North Sea rift. Marine and Petroleum Geology, V.86 (p 1252-1272).
- Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 254-274). McGraw-Hill.

- Fagin, S., 1996. The fault shadow problem: its nature and elimination. *The Leading Edge*, V.15 N°9 (p 1005-1013).
- Gibson, M., 2011. Application of seismic to mineral deposit exploration and evaluation. *The Leading Edge*, V.30 N°6 (p 616-620).
- Iacopini, D., Butler, R., Purves, S., McArdle, N. & De Freslon, N., 2016. Exploring the seismic expression of fault zones in 3D seismic volumes. *Journal of Structural Geology*, V.89 (p 54-73).
- Li, D. & Qi, L., 2022. Full wave seismic exploration technology. *Petroleum Exploration and Development*, V.49 N°3 (p 586-595).
- Mandujano-Velázquez, J. & Keppie, D., 2009. Middle Miocene Chiapas fold and thrust belt of México: a result of collision of the Tehuantepec transform/ridge with the Middle America trench. *Geological Society of London*, sp.Publ.327 (p 55-69).
- McQuillin, R., Bacon, M. & Barclay, W., 1985. An introduction to seismic interpretation (p 70-90, 107-119). Gulf Publishing.
- Meckel, L. & Nath, A., 1977. Geologic considerations for stratigraphic modeling and interpretation. En *Seismic stratigraphy, applications to hydrocarbon exploration* (p 417-438); Payton, C. Ed. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26.
- Meekes, J. & Van Will, M., 1991. Comparison of seismic reflection and combined TEM/VES methods for hydrogeological mapping. *First Break*, V.9 N°12 (543-551).
- Marfurt, K. & Alves, T., 2015. Pitfalls and limitations in seismic attribute interpretation of tectonic features. *Interpretation*, V.3 N°1 (p A5-A15).
- Neidell, N. & Poggiagliolmi, E., 1977. Stratigraphic modelling and interpretation; geophysical principles and techniques. En *Seismic stratigraphy, applications to hydrocarbon exploration* (p 389-416); Payton, C. Ed. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26.
- Ploszkiewicz, J. & Gorroño, R., 1988. Tectónica de inyección salina en la faja fallada y plegada del Sur de Mendoza. *Boletín de Informaciones Petroleras*, N°14 (p 29-34).
- Rice, G., 1989, Exploration enhancement by integrating near-surface geochemical and seismic methods. *Oil & Gas Journal*, V.87 N°14 (p 66-71).
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. Basic exploration geophysics (p 199-220). John Wiley & Sons.
- Roussos, N. & Lyssimachou, T., 1991. Structure of the central north Aegean trough: an active strike-slip deformation zone. *Basin Research*, V.3 N°1 (p 37-46).
- Schultz, P., 1999. The seismic velocity model as an interpretation asset (234 p). Distinguished Instructor Series N°2. Society of Exploration Geophysicists.
- Sheriff, R., 1977. Limitations on resolution of seismic reflections and geologic detail deliverable from them. En *Seismic stratigraphy, applications to hydrocarbon exploration* (p 3-14); Payton, C. Ed. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26.
- Sheriff, R., 1985. Aspects of seismic resolution. En *Seismic stratigraphy II* (p 1-10). American Association of Petroleum Geologists.
- Sheriff, R. & Geldart, L., 1995. *Exploration seismology* (p 172-177, 349-389, 393-397, 459-470). Cambridge University Press.
- Sheriff, R., 1991. *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics* (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Schwalenberg, K., Willoughby, E., Mir, R. & Edwards, N., 2005. Marine gas hydrate electromagnetic signatures in Cascadia and their correlation with seismic blank zones. *First Break*, V 23 (p 57-63).
- Suppe, J. & Chang, Y., 1983. Kink method applied to structural interpretation of seismic sections, western Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, V.19 (p 29-49).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. *Applied geophysics* (p 396-414). Cambridge University Press.
- Ten Kroode, F., Bergler, S., Corsten, C., De Maag, J., Strijbos, F. & Tijhof; H., 2013. Broadband seismic data - The importance of low frequencies. *Geophysics*, V.78 N°2 (p 3-14).
- Tucker, P., 1973. Pitfalls in seismic interpretation (50 p). Society of Exploration Geophysicists, Monograph 2.

- Tucker, P., 1982. Pitfalls revisited (19 p). Society of Exploration Geophysicists, Monograph 3.
- Wold, R. & Cooper, A., 1989. Marine magnetic gradiometer; a tool for the seismic interpreter. The Leading Edge, V.8 N°8 (p 22-27).

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.

«والعقل الشيء □ ان التوافق المعرفة»

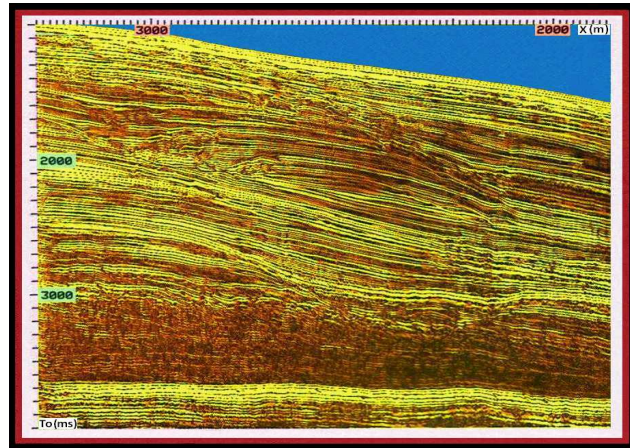
[“El conocimiento es la conformidad del objeto y del intelecto”]

Abū-Walīd Muhammad ibn Ahmad ibn

Muhammad ibn Rushd [Averroes]

(circa 1160)

Abanico submarino en sección sísmica.



INTERPRETACIÓN SISMOESTRATIGRÁFICA

Abūl nació en Córdoba (Al-Ándalus) en 1126. Para los hablantes de lenguas romances citar su nombre y apellido en árabe... no daba –y aún menos leerlo con esos caracteres y de derecha a izquierda–. Así que tras su muerte lo fueron simplificando hasta mandarle **Averroes**. Quien fue matemático, astrónomo, médico, filósofo y, como su abuelo, ofició como cadí (máximo magistrado judicial, obvio que de leyes islámicas) en Sevilla. Tuvo al menos cuatro hijos. Junto al río Guadalquivir escribió, entre otras, una enciclopedia médica, comentarios sobre “Πολιτεία” (Politeia), La República (de **Platón**), y su obra más conocida, “تهافت التهافت” (Tahafut al-tahafut), La refutación de la refutación, con la que tapó el intento de enceste del persa Al-Ghazali –que rechazaba por contraria a la Sharia toda la filosofía racionalista iniciada en la relativamente progre Bagdad del siglo VIII por **Abu al-Kindi** y otros, como **al-Khwarizmi**–. Averroes abordaba allí el camino hacia el saber, reclamando que la filosofía de **Aristóteles** era compatible con el Islam. La cita inicial aplica a la sismoestratigrafía que Abūl



Mezquita de Córdoba, Andalucía (foto andalucia.org)

no conoció y a las muchas otras ramas del saber que supo cultivar en la España mora. Tras la conquista de los almohades (de origen bereber), los integristas islámicos lo expulsaron de Sevilla y prohibieron sus obras, consideradas apostasías. Falleció en Marrakech (ciudad del actual Marruecos), meses después de haber sido reivindicado y vuelto a asignar a una corte, a los setenta y dos años. Y fue enterrado en su Córdoba natal por los mismos días en que un tal **Fibonacci** preparaba en Pisa la estrategia de

venta de un nuevo número, el cero, que había importado desde la costa africana del viejo *mare Nostrum*.

(“La busca de Averroes” es un cuento de Jorge Luis Borges que, al igual que “La casa de Asterión”, forma parte del libro “El aleph” –que incluye al cuento epónimo–, genialidad literaria bautizada con la primera letra de los alfabetos persa, árabe y hebreo, que para la cábala o *kabbalah* es el sopro primigenio).

Bien, dejemos de ir por las ramas y vayamos a las fotos sísmicas de los sedimentos donde enraizó esta cháchara.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

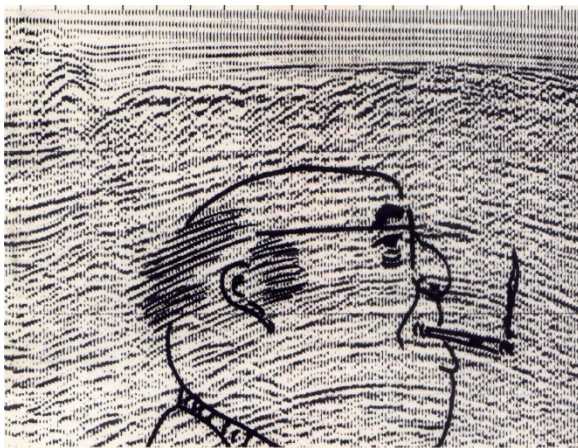
La interpretación sísmica primordial es siempre la de naturaleza estructural, empero muchas veces de gran complejidad. La estratigráfica es una etapa habitualmente posterior de la interpretación. Sólo en áreas que han sido tectónicamente estables puede comenzarse, de una, con el análisis sismoestratigráfico, sin una previa elaboración del marco estructural. También hay que decir que *la interpretación estratigráfica es más sencilla si la tectónica es simple* (ejemplo, áreas de plataforma) y *resulta más claramente distinguible si el ambiente*

deposicional ha sido marino. En casi todos los casos *un recurso empleado es comprimir mucho la escala horizontal para realzar los buzamientos* y, consecuentemente, las geometrías sedimentarias. Si bien esto es también muy útil en la interpretación estructural, en sismoestratigrafía suele ser imperativo.

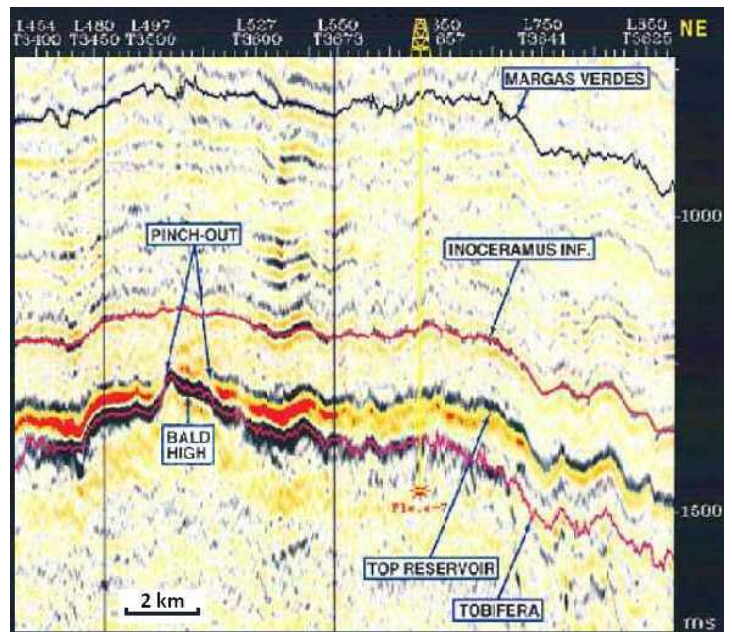
En este tipo de estudios se toman como base los conceptos geológicos evolucionados largamente desde que el danés **Niels Stensen** (o Steno) en 1669 observó que fósiles más recientes yacen en estratos por arriba de los más antiguos. Y que **James Hutton** (nacido en Edimburgo, Escocia, como otro **James: Maxwell**) en 1788 comprendió el significado geodinámico de las areniscas rojas del Devónico yaciendo en discordancia sobre las grauvacas del Silúrico que afloran verticales en Siccar Point, en la costa oriental escocesa, sobre el hoy muy petrolero mar del Norte.



Discordancia angular en Siccar Point, Escocia (foto Dave Souza)



Los reservorios están donde hay pelo, no donde falta... (imagen de Tucker, 1982)

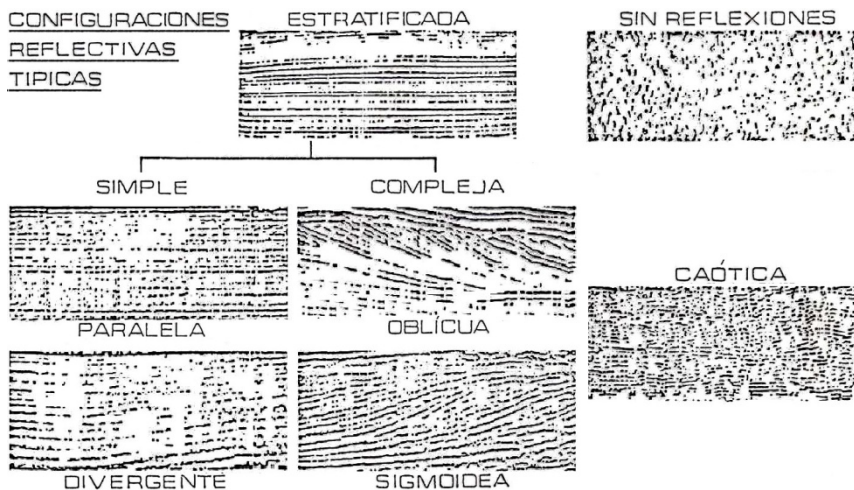


Cuenca Austral, terminaciones o *pinch-outs* del reservorio (Fm. Springhill) contra el alto pelado o *bald high* (gentileza Total)

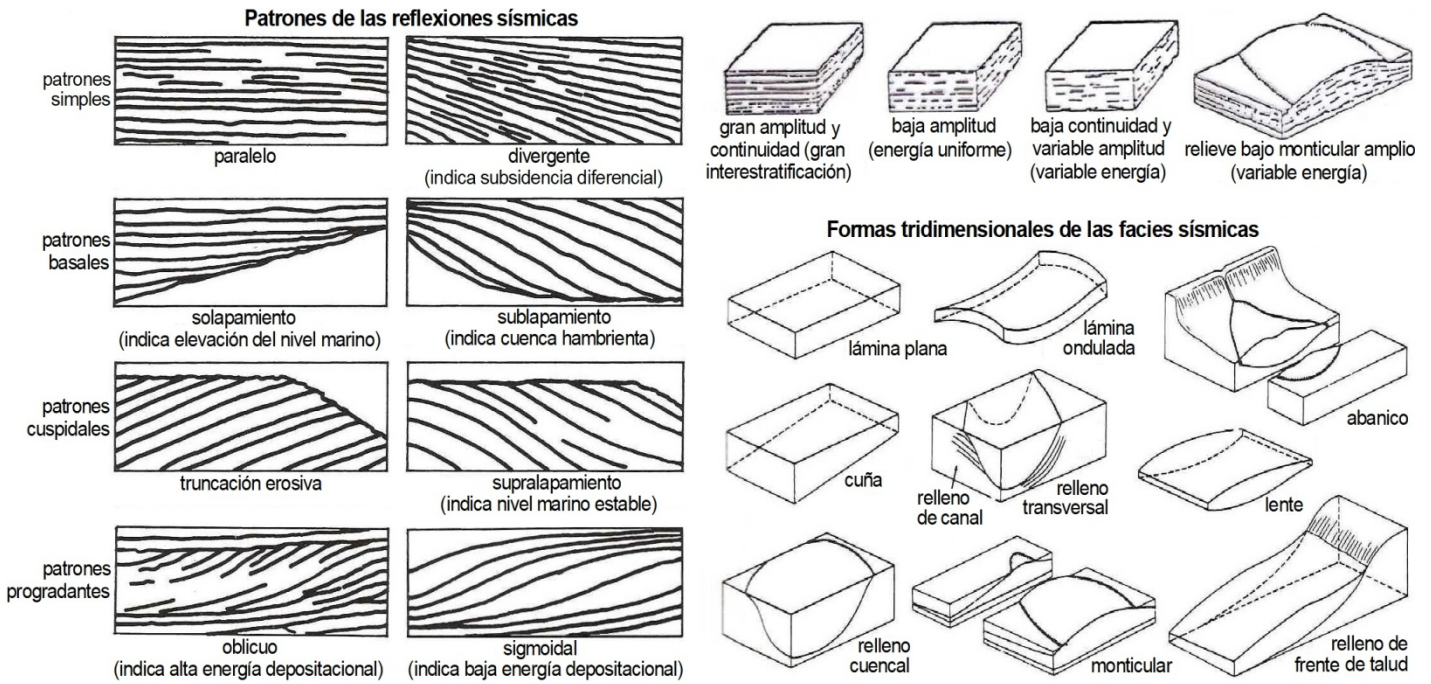
Las dos secciones sísmicas precedentes son evidencia de la importancia práctica de poder interpretar la evolución tectosedimentaria en tanto ésta gobierna las geometrías de reservorios y trampas. Y para otros muy variados fines en geociencias.

Las **relaciones estratigráficas** pueden ser diversas, sea paralelas que divergentes o con formas progradacionales sigmoides u oblicuas, configuraciones monticulares, en abanico, valles cavados, truncación erosiva y distintos tipos de traslapeo (solapo u *onlap*, sublapo o *downlap*, topelepo o *toplap*, etc.), con variados tipos de terminación

(*pinch-out*), que se ilustran en la página siguiente. Pero también podrán ser identificadas diferentes **relaciones de amplitud**, sea entre reflectores individuales como entre secuencias sísmicas: con o sin reflexiones internas, con reflexiones de aspecto caótico o estratificado, con amplitud reflectiva fuerte o débil, con continuidad lateral grande o pequeña, con sucesión de reflexiones de alto o de *bajo contraste* (que casi siempre corresponden a *apilamientos arcillosos*), etc., como se esquematiza en la figura de la izquierda y en la página sucesiva.



(modificado de Sangree & Vidmier, 1979)

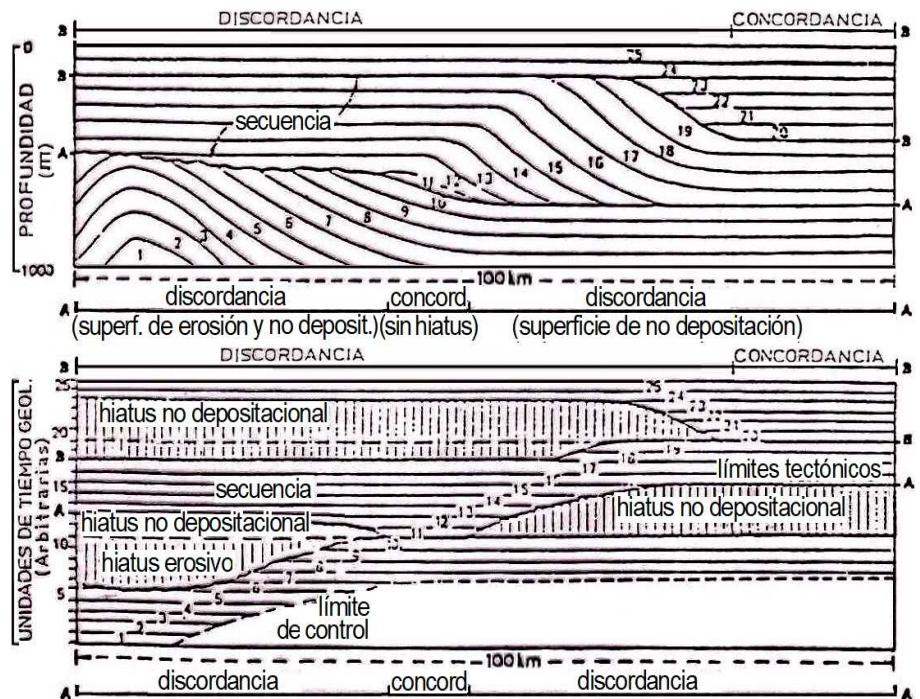


(figuras modificadas de Sangree & Vidmier, 1979)

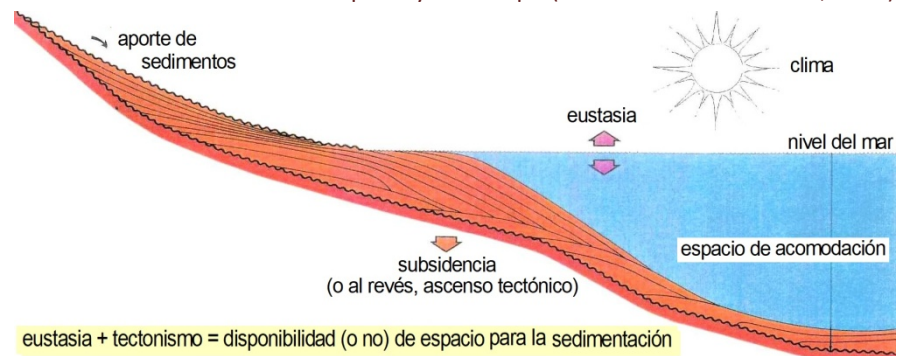
Avanzar hacia la interpretación de la **sismoestratigrafía secuencial** deviene mucho más factible en cuencas de génesis marina, o por lo menos si son continentales con vinculación al mar, que en cuencas cerradas o endorreicas donde las variaciones de nivel oceánico no hayan ejercido influencia en su nivel de base. El conocimiento preciso de ese control mundial es un gran auxilio para la definición de los cortejos sedimentarios sucesivos. Cuando los controles son solamente locales, suelen ser difíciles de precisar.

El otro factor importante es la tectónica, esencialmente la tasa de subsidencia o algún pulso de levantamiento capaz de predisponer procesos erosivos. A la derecha se aprecia la relación entre un registro sedimentario idealizado y la sucesión temporal de eventos que le podría dar origen, incluyendo interrupciones (hiatus), ya sean éstos erosionales o sólo por un período carente de depositación. El bosquejo acá contiguo sintetiza las causas del espacio de acomodación, es decir disponible para la sedimentación.

En cuanto concierne al nivel eustático, sabemos que éste fluctúa

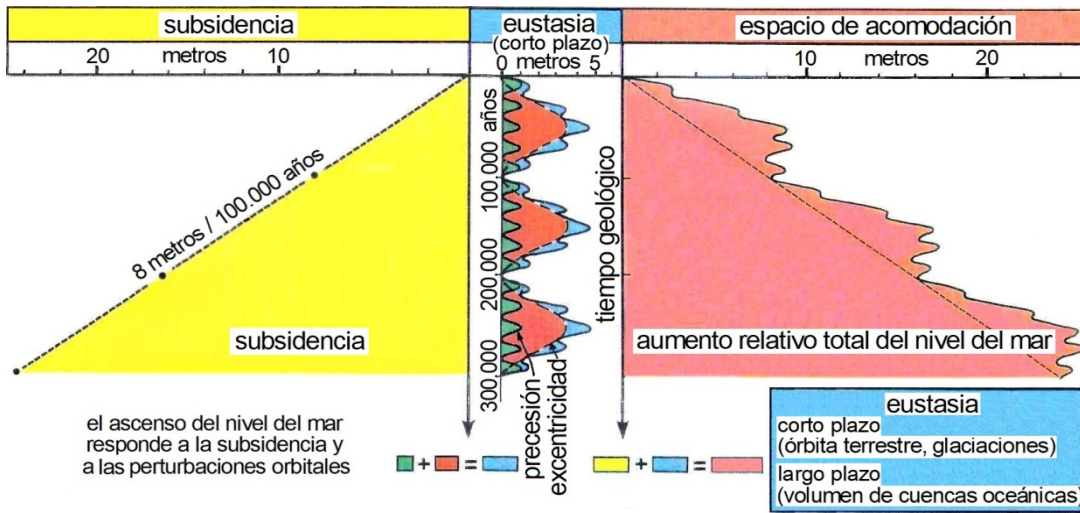


Secuencias sedimentarias en espacio y en tiempo (modificado de Vail et al., 1977)



Parámetros de control de la sedimentación (modificado de Vail & Cramez, 1990)

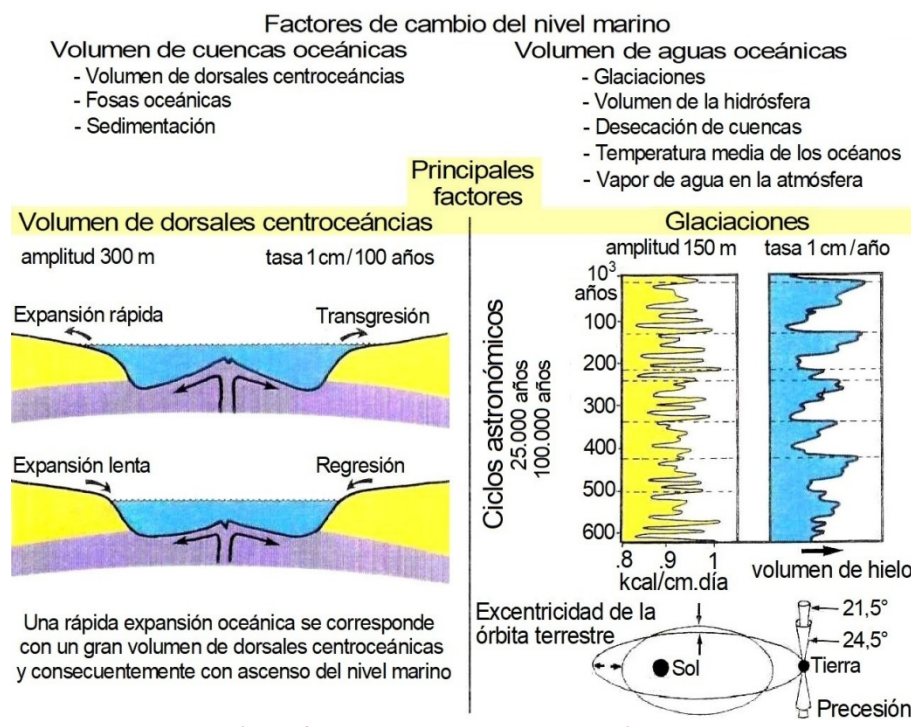
en función inversa de la cantidad total de hielo acumulado en el planeta (*ergo*, glaciaciones versus efecto invernadero, natural o irresponsablemente acelerado). En el caso de ser natural, responde en cortos períodos geológicos a la variación de parámetros orbitales de la Tierra: precesión del eje de rotación en ciclos de 25.800 años, variación de su inclinación (21,5 a 24,5° cada unos 41.000 años), variación en el grado de excentricidad o elipticidad de la órbita (1 a 11% cada 95.800 años por la interferencia gravitacional de Venus y Júpiter) y giro del plano orbital en intervalos de 22.000 años. Esto se ilustra en la siguiente figura (excepto la inclinación y el giro orbital), y fue pioneramente estudiado por el serbio **Milutin Milanković** en la década de 1930.



Causas de la disponibilidad de espacio para la sedimentación (modificado de Vail & Cramez, 1990)

Ahora bien, en largos períodos la eustasia está controlada por el volumen total de cuencas abisales en los océanos, cuya variación es función funda-

mentalmente de la magnitud total de las dorsales oceánicas, en parte compensadas por las fosas y los influjos sedimentarios desde los continentes. Pero existen asimismo otras variables glaciológicas de largo término, como la eventual presencia de masas continentales en las regiones polares (como hoy la Antártida y mucho menos Groenlandia), algo que acontece a intervalos muy largos e irregulares e incrementa significativamente la acumulación de hielo y la consecuente caída del nivel marino global. También son elementos condicionantes la variable disposición global de corrientes marinas, eventuales fluctuaciones de la actividad solar, etc.



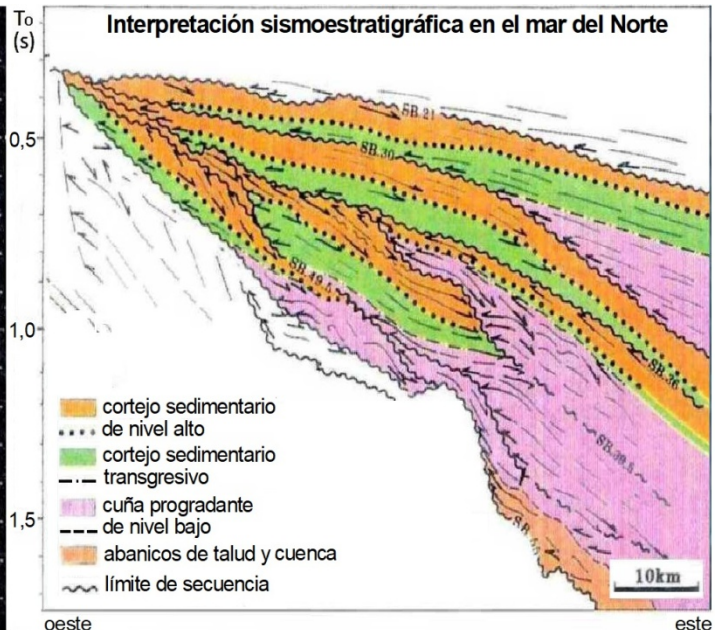
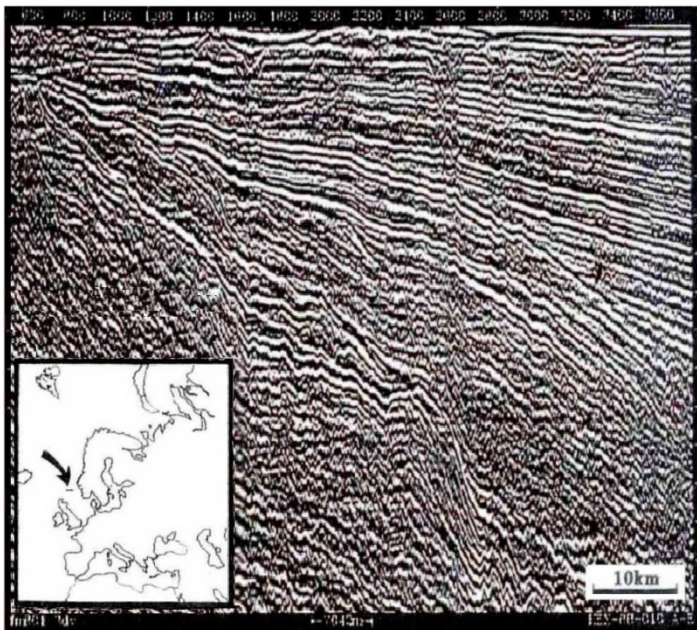
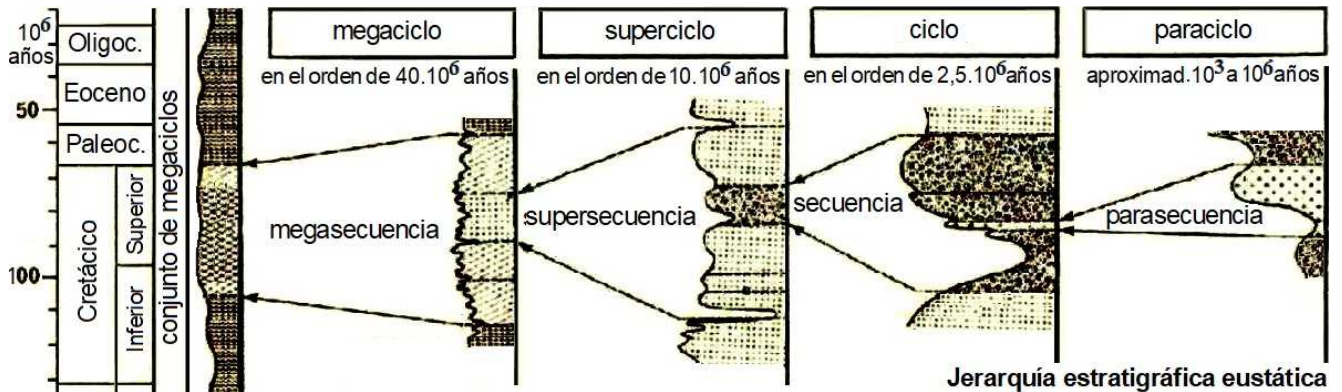
(modificado de Vail & Cramez, 1990)

Durante la conformación de supercontinentes, como Pangea hace alrededor de 230 millones de años y Pannotia en torno a los 560 m.a. atrás, el nivel relativo del mar fue más bajo, mientras que en épocas de fragmentación continental lo ha sido más alto por inundación de mucha mayor superficie de las plataformas epicontinentales: habiendo más continentes, más plataformas hay. Éstas son áreas que tienden a subsidir –no así las proas en la dirección de la deriva en las que hay subducción de la placa oceánica (y fosa) y orogénesis en el borde continental–.

Como bien saben los geólogos, una **secuencia** (definición de **Laurence Sloss** y colaboradores 1949-1963 en Estados Unidos) es la unidad fundamental de la

estratigrafía secuencial, **corresponde al registro sedimentario de un ciclo** (del orden de unos 2,5 m.a.), está delimitada por discordancias o sus correlativas concordancias y **es subdivisible en cortejos sedimentarios** (**system tracts**, arreglos de nivel bajo, transgresivos, de nivel alto), y a su vez en parasecuencias (relativas a

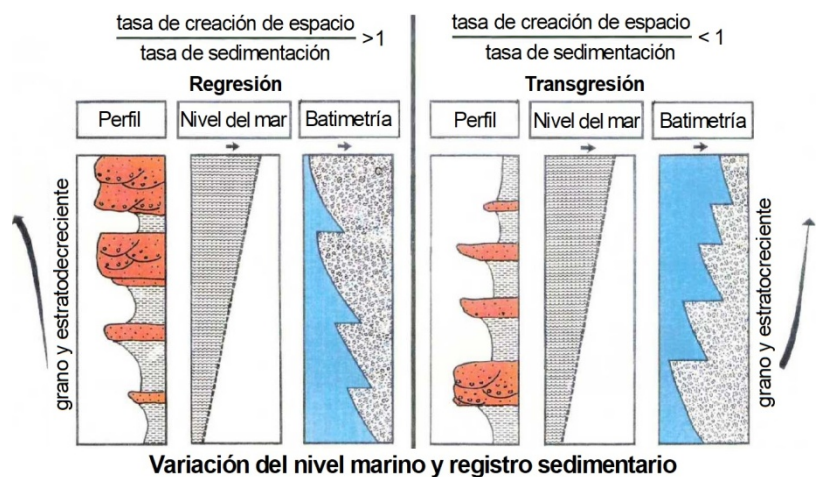
paraciclos de menos de un millón de años) limitadas por superficies de erosión o de inundación, según sea la escuela tomada como referencia (la de Peter Vail et al., 1977, o la de William Galloway et al., 1989, ambos estadounidenses). Las secuencias se agrupan en supersecuencias (que corresponden al tiempo de un superciclo) y éstas a su vez en megasecuencias (registro de megaciclos, de más de 40 m.a.). Son bien conocidas las cartas cronoestratigráficas globales publicadas por el paquistaní Bilal Haq y colaboradores en 1987 y 2008, entre otras. También las importantes contribuciones del inglés Andrew Miall. *No deben hacerse simplificaciones globales, sino evaluar con datos de la específica región abordada.*



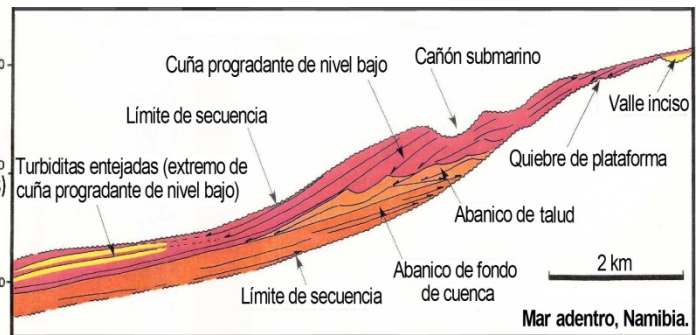
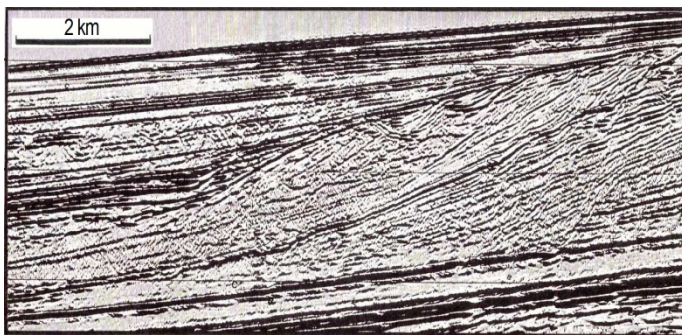
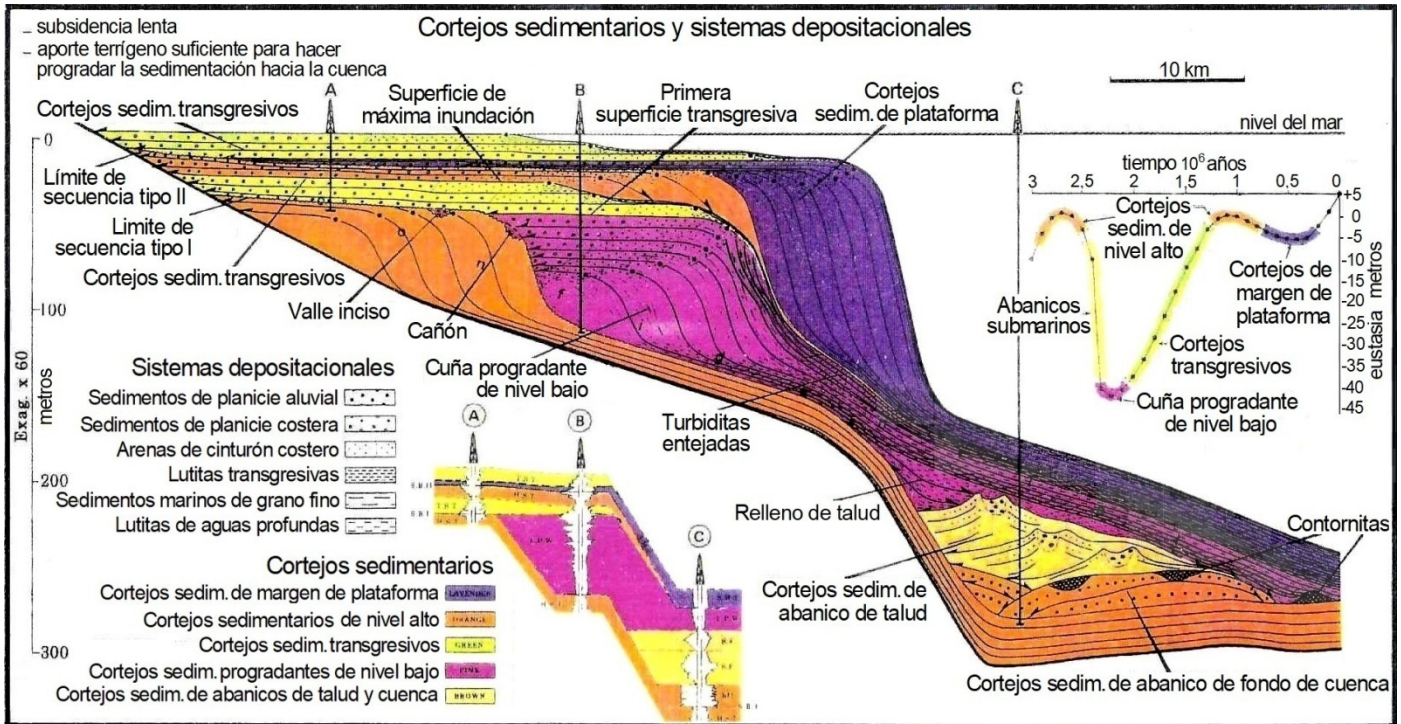
(figuras modificadas de Vail & Cramez, 1990)

La interpretación debe hacerse a la escala más regional posible (kilómetros) para que las geometrías se evidencien mejor, tal como se muestra en la figura arriba que ilustra cortejos sedimentarios en el Mar del Norte.

Recordando siempre el concepto de líneas-tiempo inherente a los niveles reflectores al interior de las cuencas sedimentarias, pueden entonces buscarse superficies de máxima inundación o de máxima erosión, más los arreglos sedimentarios internos de cada secuencia que permitirán definir cortejos sedimentarios transgresivos, de nivel alto o de nivel bajo, así como los del talud de la plataforma y de cuencas oceánicas, referidos a ciclos de distinto orden de acuerdo con la particular historia tectosedimentaria acaecida en la zona estudiada.



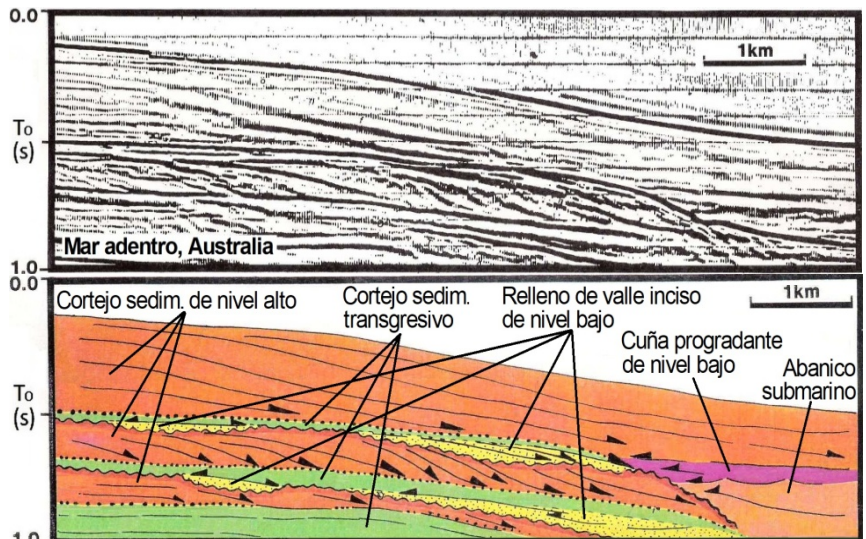
La figura precedente muestra los arreglos característicos que podrían verse en afloramientos o en pozos en situaciones de transgresión o de regresión marina, en este último caso verificable tanto durante un nivel alto –debido al avance de la sedimentación desde posiciones proximales hacia distales– como durante una efectiva caída eustática hasta llegar a un registro de nivel del mar bajo. (La raíz gresión viene de *gradior* –dar pasos–, de ahí grado, grada, ingreso, etc.). Acá un modelo general de los cortejos sedimentarios y sistemas depositacionales.

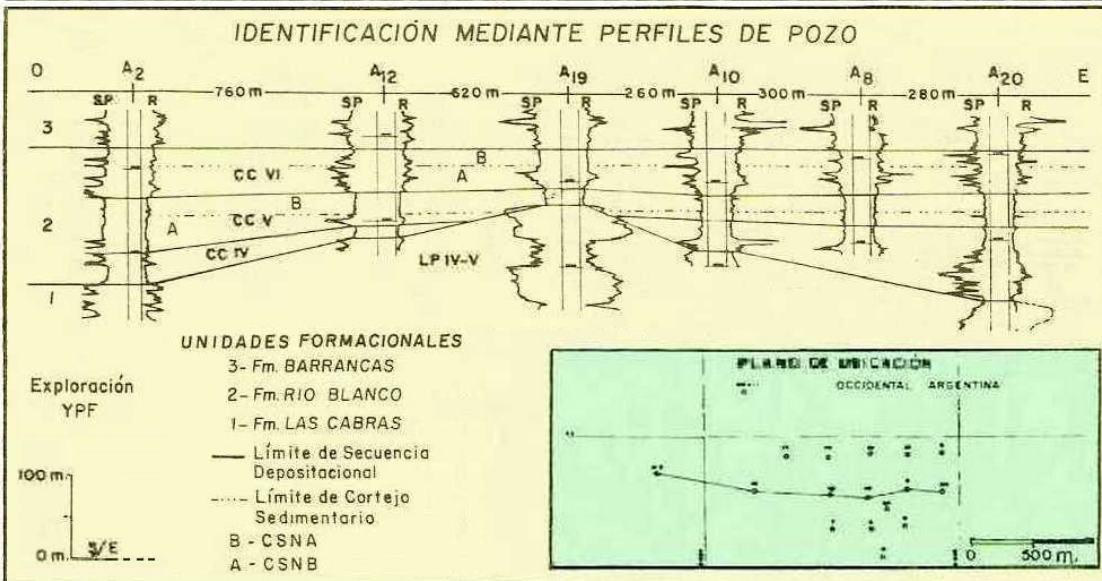
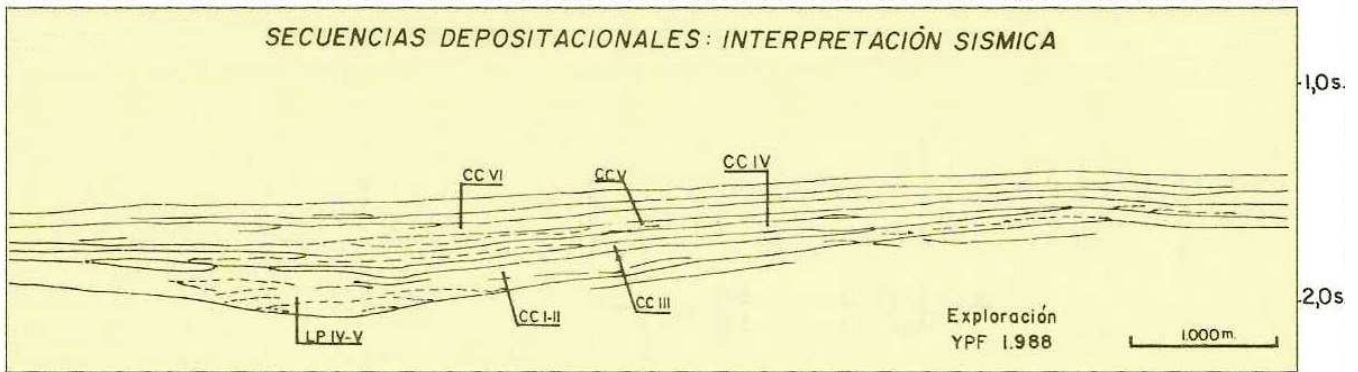
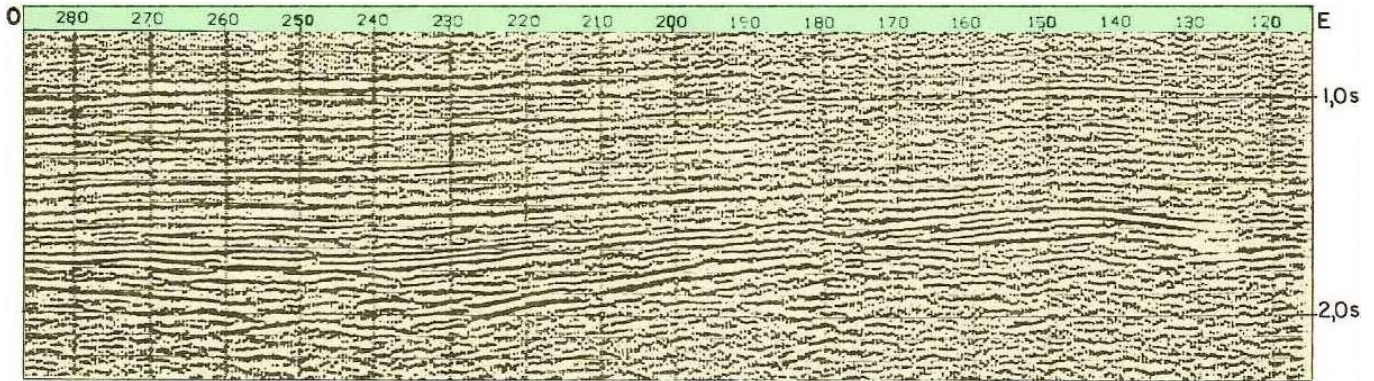


Las dos figuras aquí arriba, de exploración en Namibia, constituyen un ejemplo de sísmica marina con su interpretación, donde se puede apreciar la intercalación de los cortejos sedimentarios transgresivo y de nivel alto, así como un registro de nivel bajo (cuña progradante) y un abanico de talud en la parte centro-derecha.

La figura acá a la derecha muestra también sísmica mar adentro (de Australia) con su interpretación abajo: un cortejo sedimentario de nivel bajo suprayaciendo a uno de nivel del mar alto e infrayaciendo a otro con carácter transgresivo.

(figuras modificadas de Vail & Cramez, 1990)





(figuras modif. de Mancilla et al., 1989)

Estas figuras, a diferencia de las anteriores, muestran un ejemplo con interpretación de una sísmica estratigráfica en una cuenca genéticamente continental, la Cuyana, con carácter fluvio-lacustre, donde

las geometrías de las secuencias son menos evidentes y es importantísima la contribución de la información de pozos para el armado de un esquema secuencial que amerite una mínima confiabilidad.

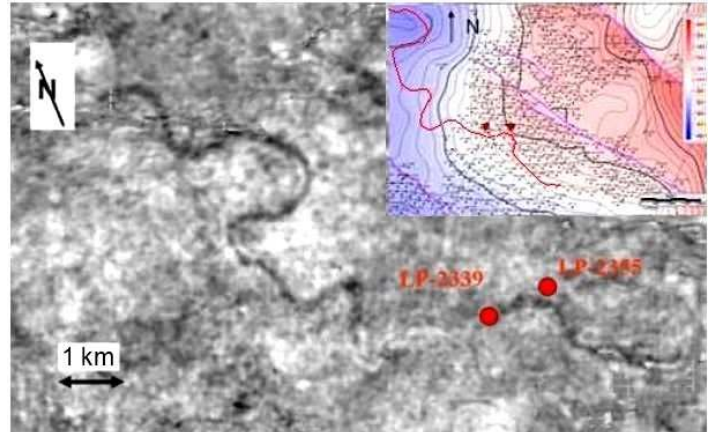
INSTRUMENTOS Y CASOS APLICADOS

Una herramienta práctica cuando se trabaja en áreas con variables inclinaciones estructurales es el **aplanamiento** (*flattening*) que fue ilustrado en el Tema 17. Su aplicación posibilita independizarse de los buzamientos de origen tectónico y la observación de los cambios de potencia resulta entonces más fácilmente interpretable en términos secuenciales. La elaboración de mapas isopáquicos es otro modo de **ver gráficamente las variaciones de espesor estratigráfico**. En cualquier caso, siempre es aconsejable definir primero el marco estructural, para después poder avanzar con mayor certeza sobre la interpretación estratigráfica.

Ahora bien, siendo la sísmica de reflexión en la gran mayoría de los casos el mejor método geofísico para visualizar cuencas sedimentarias, existe no obstante una limitación concreta ya explicada: la resolución sísmica. **No es posible ver capas de menor espesor que un cuarto de la longitud de onda** presente a la profundidad de interés. Con la excepción de tener resonancia sísmica o capas de alto contraste acústico que, aunque delgadas, podrían detectarse en razón de su fuerte amplitud, aunque sin poder conocerse su exacto espesor, siempre a

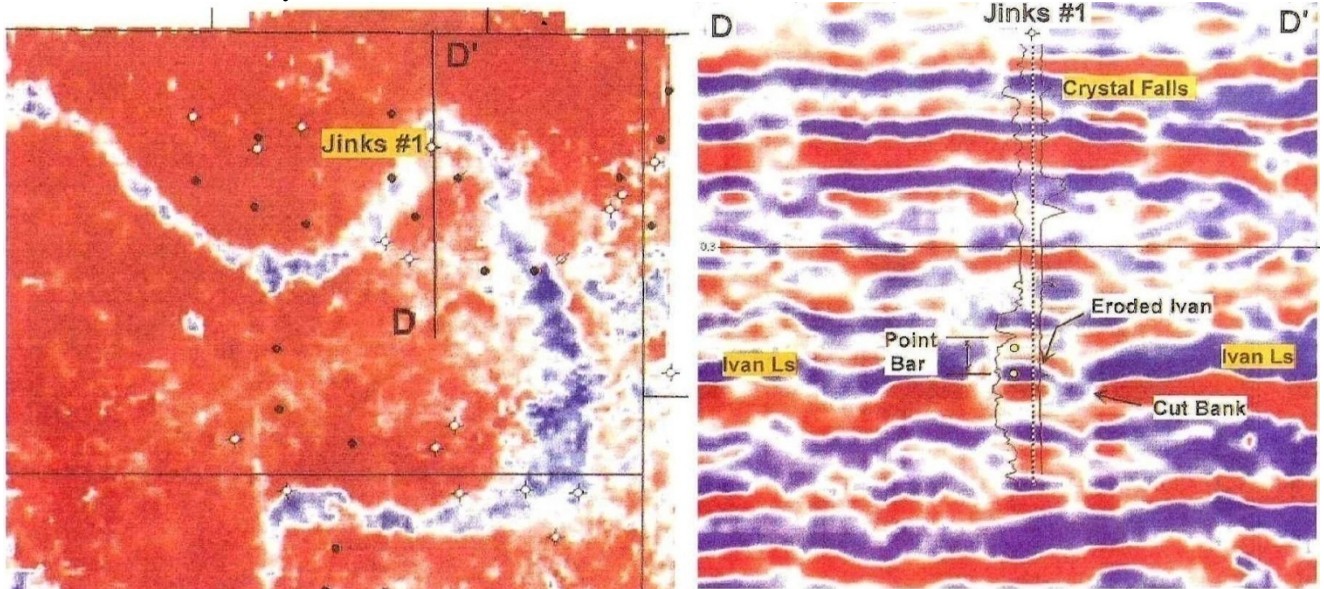
condición de que se haya podido aseverar la existencia de tales capas mediante el descarte de otras posibles causas de sus amplitudes.

Cuando se dispone de sísmica 3D, las **secciones horizontales** (*time slices*) o, mejor aún, los **mapas de amplitud** (*horizon slices* o *seiscrops*) resultan recursos prácticos **para ver los cambios sobre un nivel estratigráfico** gracias a la variación de las amplitudes o cualquier otro atributo sísmico que muestre diferencias interpretables en términos geológicos –o eventualmente incluso petroleros–. Ejemplos usuales son el seguimiento de canales, abanicos, variaciones de fluidos y otros, como se ejemplifica en la figura a la derecha, del centro-oeste de la cuenca del Golfo San Jorge, así como en las figuras acá abajo (de Estados Unidos), donde se ilustran los rasgos en forma comparativa entre la sección vertical y la horizontal.

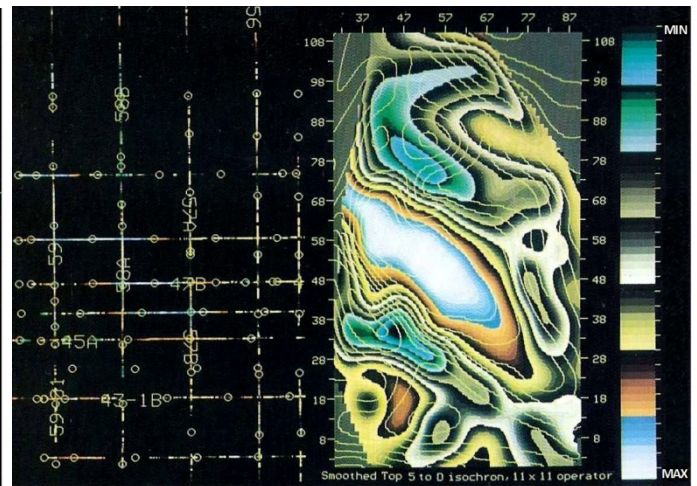
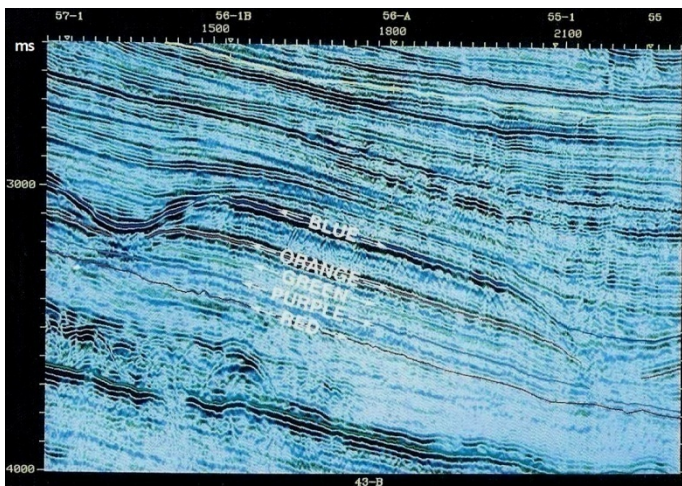


Sección sísmica horizontal con el registro sedimentario de los meandros de un río y dos pozos perforados en este reservorio de la cuenca Golfo San Jorge. En el ángulo superior derecho se ve el mapa isócrono al techo de la Fm Castillo; en rojo el trazado del curso meandroso; los puntos negros y rojos indican pozos.

(modificado de Foster & Iovine, 2007)



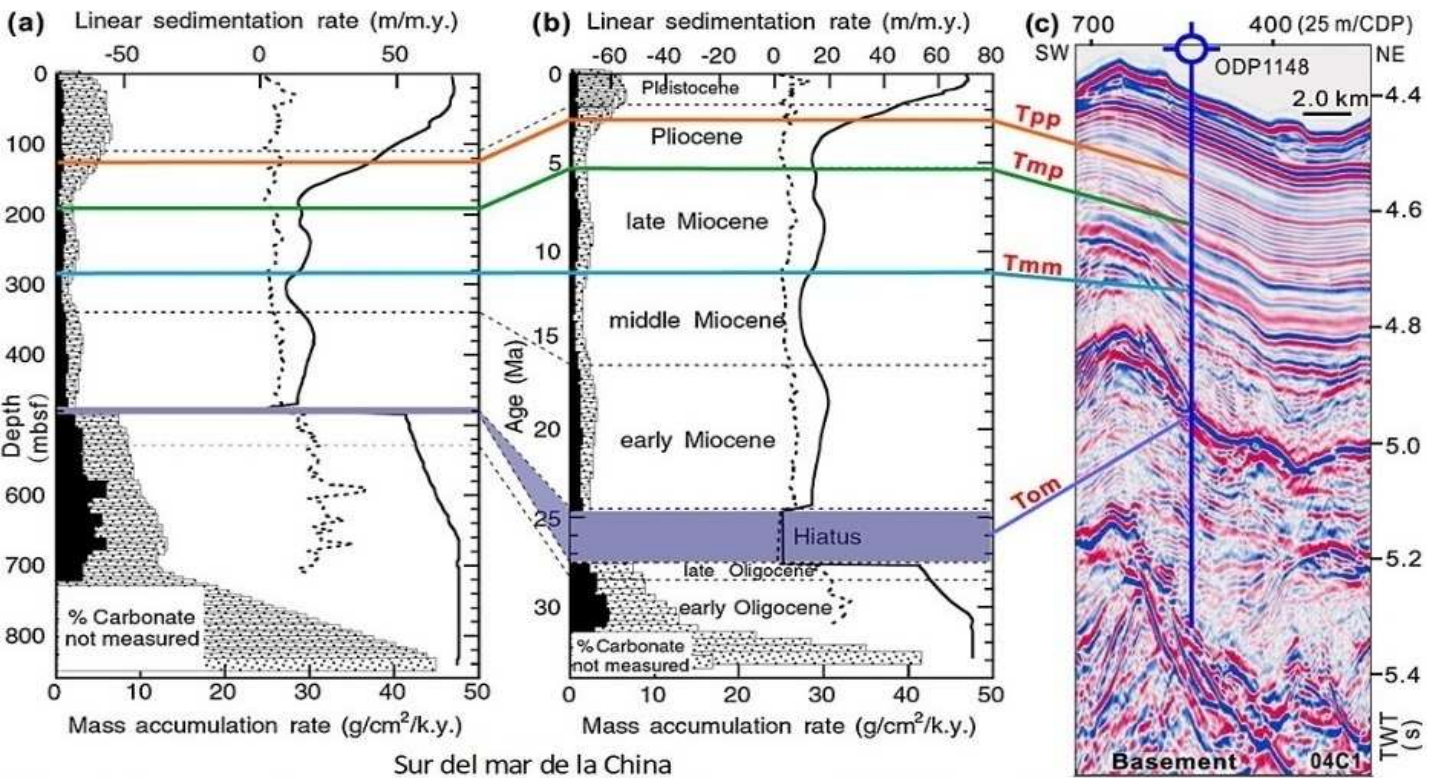
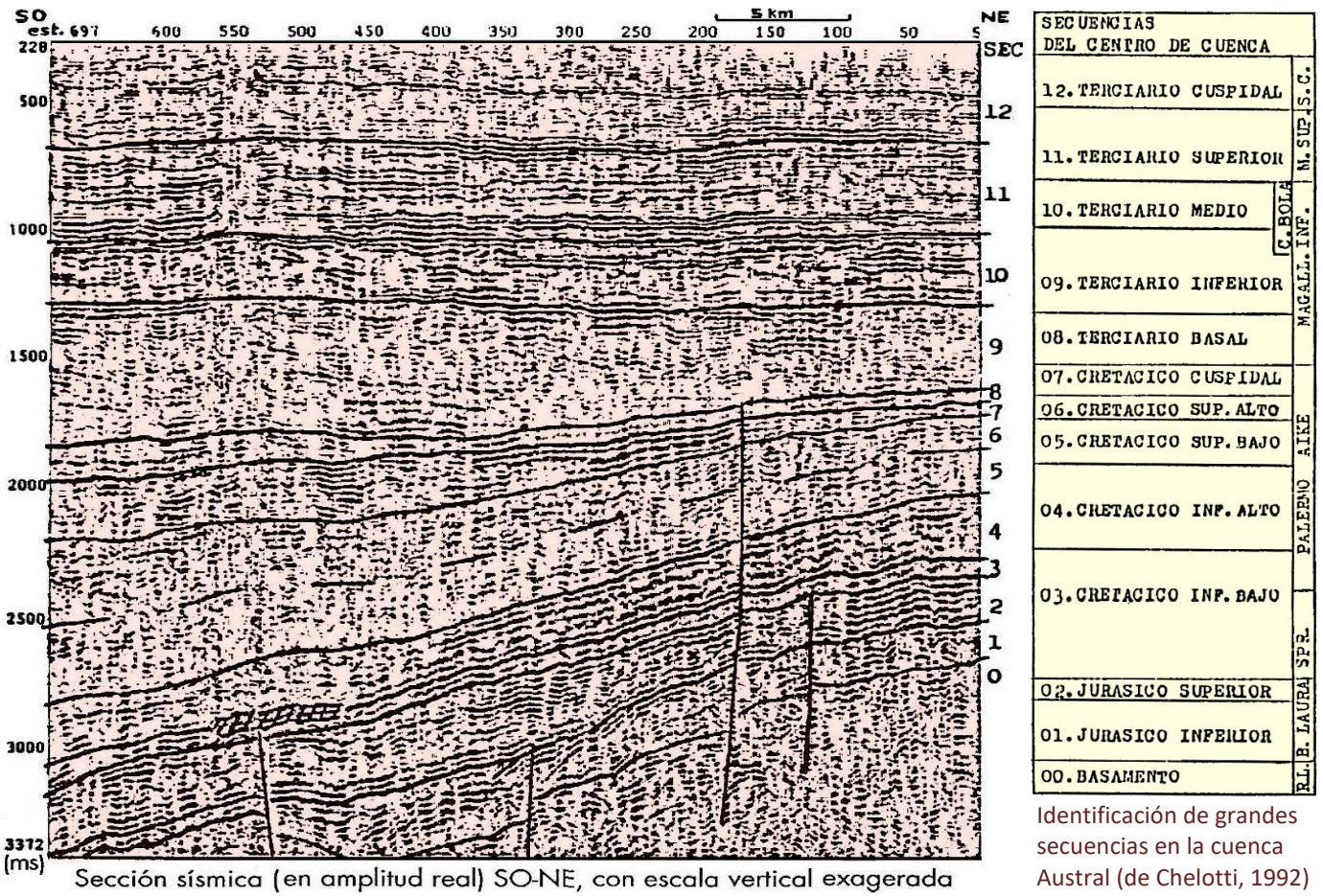
Registro sedimentario de un curso fluvial en secciones vertical y horizontal, centro-oeste de Texas (modif. de Burnett, 1996)



Irlanda, cuenca marina Porcupine. Sección sísmica E-O perpendicular al abanico Clontarf. En rojo el nivel guía al techo del Eoceno. Los otros colores indican topes de distintas secuencias. verde-gris los menores, más curvas superpuestas de espesor total del abanico sedimentario.

(figuras modificadas de Bradford Macurda & Roice Nelson Jr., 1987)

Acá un abanico submarino visto con sísmica 2D (sector oeste) y 3D (sector este) bajo el mar al SO de Irlanda.



Calibración de horizontes sísmicos a partir del muestreo de sedimentos del pozo ODP 1148 en el talud continental. Profundidad en metros bajo el fondo marino (mbsf, meters below sea floor) que se halla a unos 3300 m bajo el pelo de agua. Gráficos de tasa de sedimentación en m/10³ años y de acumulación de masa en g/cm²/10³ años. Las curvas enteras en los gráficos a y b representan sedimentos totales y las curvas punteadas sólo los carbonatos, en tanto la columna en gris indica sedimentos totales y la negra únicamente carbonatos. c, sección sísmica.

(modificado de Li et al., 2015)

En la página anterior, arriba una sección de la cuenca Austral o Magallánica, en el centro-sur de la provincia de Santa Cruz. Puede verse el variable espesor de la secuencia 1 (de ruptura o *rift* temprano), luego el relleno del *rift* tardío (2), la primera transgresión marina (3) como parte de los depósitos de subsidencia termal (*sag*, hasta la secuencia 7), después la discordancia cretácico-terciaria (entre 7 y 8) y los depósitos de antepaís (*foreland*, de 8 a 12), destacándose las cliniformas sigmoidales de la secuencia 9 originada por el generoso aporte sedimentario desde la creciente faja andina emplazada al suroeste. Un abordaje de mayor detalle para el Paleógeno (Terciario Inferior) puede consultarse en Piana *et al.*, 1991.

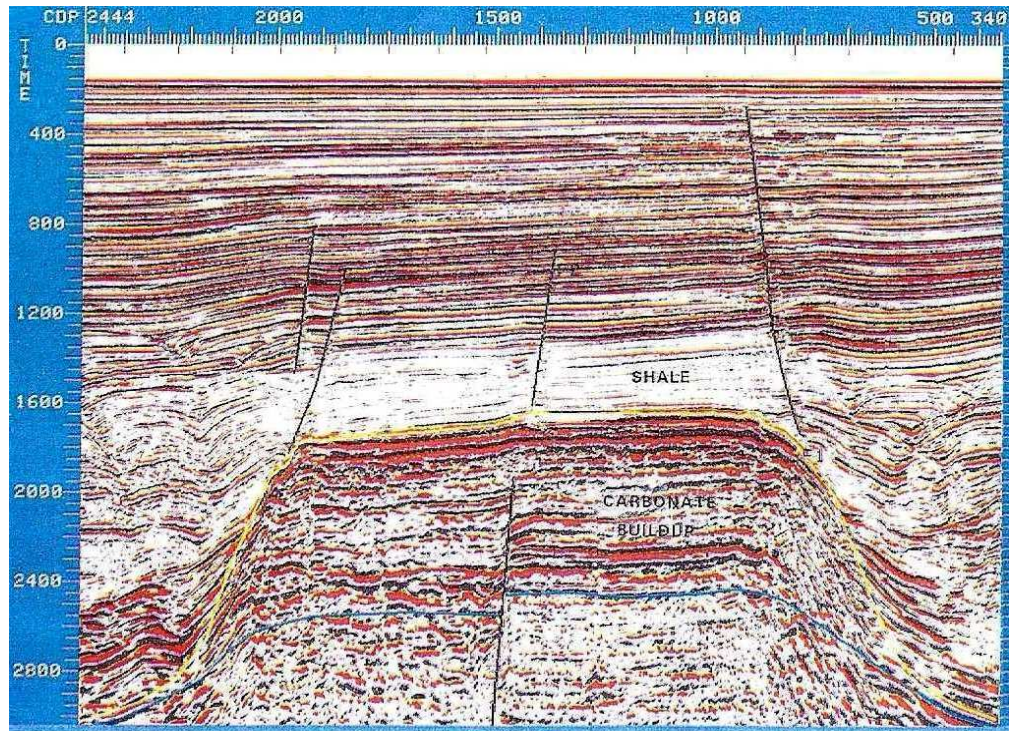
Y en la página previa al pie se ilustra una prospección en aguas ultraprofundas del talud del mar de la China meridional, donde fue perforado un pozo que documentó espesores de sedimentación terciaria con fuerte contribución carbonática en algunas secuencias.

Los atributos sísmicos usualmente disponibles en las estaciones de trabajo (la amplitud, el espesor temporal de un pico o valle de la traza sísmica, la frecuencia, la fase, la velocidad y otros) pueden ser un importante auxilio en la interpretación de rasgos sismoestratigráficos en

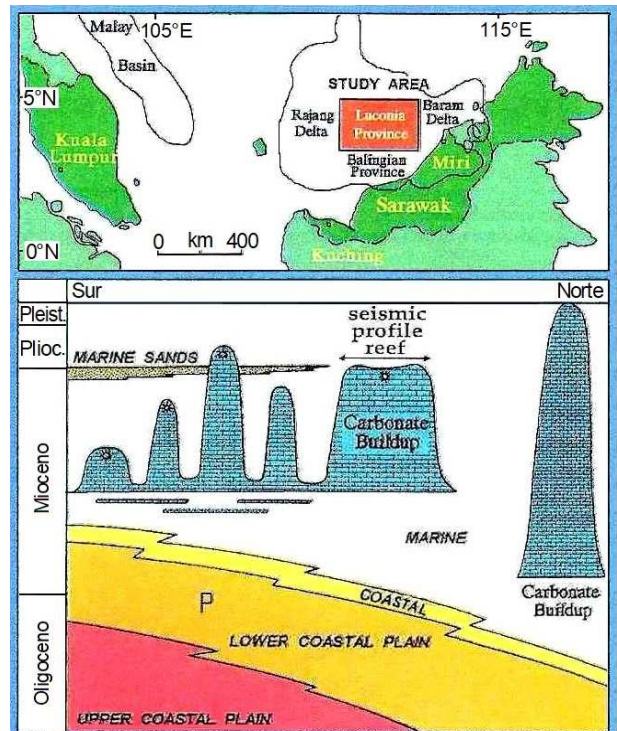
relación con cambios sedimentológicos, así como para *visualizar geometrías depositacionales con objetivos geocientíficos diversos, que en el caso petrolero es el de localizar cuerpos que oficien de potenciales reservorios*. Recuérdese que el 95% de las rocas sedimentarias (que rellenan las cuencas) son clásticas (15% areniscas y 80% arcillitas, en ambas granometrías con sus variantes, incluyendo las de naturaleza tobácea como en el Golfo San Jorge) y el restante 5% del total incluye evaporitas, calizas, etc.

Vemos arriba una sección sísmica de una cuenca marina en Malasia, y abajo el mapa y esquema estratigráfico del área. Se destaca en la porción central un potente crecimiento de carbonatos arrecifales con presencia de gas, que ha promovido fallamientos menores como consecuencia de su compactación diferencial.

A los fines de la interpretación sismoestratigráfica puede asimismo recurrirse al auxilio de métodos específicos de sísmica de reflexión –en caso de considerarse útiles para la resolución de cuestiones geológicas, petroleras u otras– ya sea **procesos o registros especiales**, que abordaremos en el Tema 18.

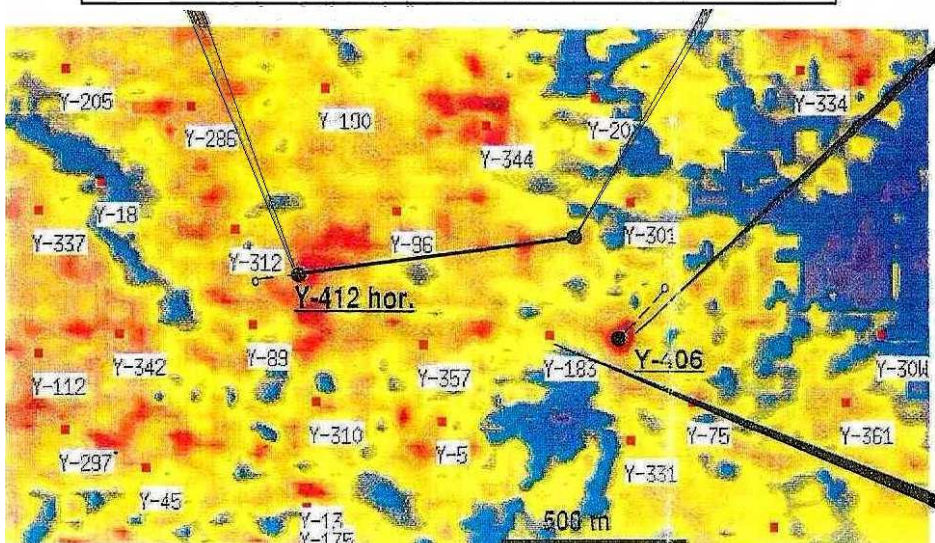
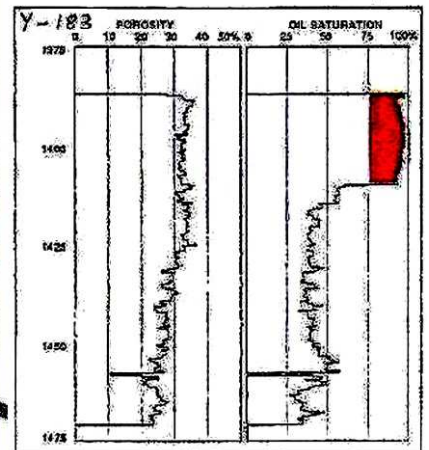
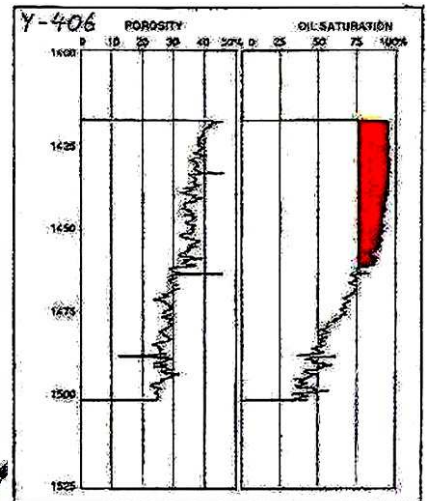
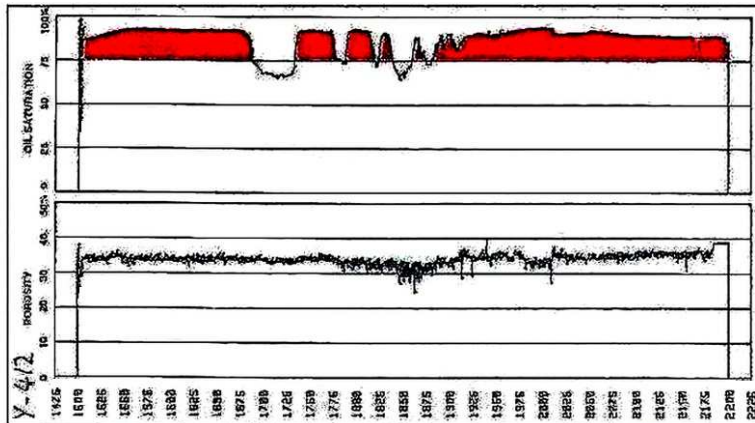


Sección sísmica mostrando un fuerte reflector (marcado en amarillo) que corresponde al techo de un crecimiento arrecifal, por encima del cual yace un intervalo de lutitas de bajas amplitudes. En azul la interpretación de su base.



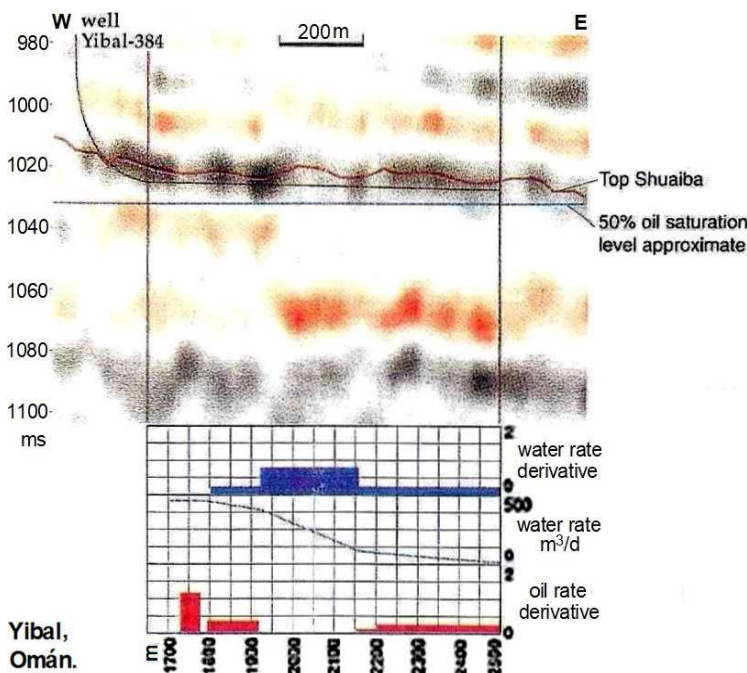
Mapa de ubicación y diagrama que muestra la distribución de las litofacias del Terciario en la cuenca marina Sarawak, Malasia.

(figuras modificadas de San & Mohamad, 1996)



Mapa de amplitudes al tope del reservorio (en rojo valores más altos, en azul los más bajos), graficándose además los datos de porosidad y saturación de petróleo en tres pozos. Y-406 fue dirigido hacia una anomalía de velocidad sísmica (sweet spot, mancha dulce) con mayor amplitud en una posición estructural favorable y halló 60 m de espesor permeable. En cambio Y-183 halló 30 m, pero en ambos pozos se documentó una porosidad de entre 50 y 75 %. El tercero es Y-412, pozo horizontal que viajó 3 a 5 m bajo el tope del reservorio, conectando dos sectores de anomalía de velocidad sísmica.

(figuras modificadas de Skaloud, 1996)



Parte de una sección sísmica donde se indica la trayectoria de un pozo horizontal y datos del reservorio Shuaiba. Abajo se grafica la producción de petróleo y agua; se ve una disminución de amplitud del reflector al tope de Shuaiba donde aumenta el agua.

El gran explorador marroquí Ibn Battuta en 1325 partió en peregrinación a La Meca, se emocionó y llegó a China, tras recorrer gran parte de Asia, y después España y mucho de África, hasta 1354. En 1327 se asomó al golfo Pérsico. No imaginó que había tanto petróleo ni que sería imán de futuras avaricias imperiales. Abajo a la izquierda, lupa sobre una sección vertical de Omán por donde pasa un pozo horizontal al techo de un reservorio espeso, resaltándose el nivel sobre el que hay más del 50% de petróleo. Arriba un mapa de amplitud del reflector sísmico del techo del reservorio y los perfiles de porosidad y saturación de petróleo de tres pozos, dos verticales y uno horizontal. Fuertes reflectividades, en rojo, corresponden a los sectores con mayor porosidad de un intervalo productivo de varias decenas de metros. Afortunados ellos,

أكبر (Allah 'Akbar) Alá es Grande.



Equipo de perforación en Arabia Saudita, al sur de la cuenca Golfo Pérsico (foto de Drilling Contractor, Katie Mazerov, 2014)

Estratificación entrecruzada en el Neógeno de los montes Zagros, Irán, faja plegada al norte de la cuenca Golfo Pérsico (foto de Pirouz *et al.*, 2011)

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué condiciones geológicas y sísmicas favorecen la interpretación estratigráfica?
- ¿Qué tipos de geometrías bi o tridimensionales pueden buscarse a los fines sismoestratigráficos?
- Citar y explicar el posible origen de los distintos tipos de aspecto sísmico de las reflexiones.
- Dar la definición de secuencia y cortejos sedimentarios y comentar los factores que influyen en sus registros.
- ¿En qué se diferencian las interpretaciones secuenciales entre cuencas de origen marino y continental?
- Justificar la importancia del empleo de datos de pozos cuando los hay.
- ¿Cómo afecta la tectónica sobre la tarea de interpretar en términos estratigráficos y cómo conviene proceder?
- ¿Cómo se visualizan en sísmica los depósitos de canales?, ¿y los arrecifes carbonáticos?



BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Al-Masgary, A., Elsaadany, M., Latiff, A., Siddiqui, M., Hermana, M., Imran, Q., Babikir, I. & Adeleke, T., 2021. A guideline for seismic sequence stratigraphy interpretation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, V.16 N°2 (p 165-183).
- Barron, E., 1992. Paleoclimatology. En *Understanding the Earth* (p 484-505); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Bradford Macurda, D. & Roice Nelson Jr., H., 1987. Interactive interpretation of a submarine fan, offshore Ireland: a case history. *The Leading Edge*, V.7 N°10 (p 28-34).
- Brown, A., 1985. The role of horizontal seismic sections in stratigraphic interpretation. En *Seismic stratigraphy II* (p 37-47, 91-136); Berg, O. y Woolverton, D. Eds. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 39.
- Brown, A., 1991. Interpretation of three dimensional seismic data (p 91-136). American Association of Petroleum Geologists, Memoir 42.

- Burnett, M., 1996. 3-D seismic expression of a shallow fluvial system in West Central Texas. En Applications of 3-D seismic data to exploration and production (p 45-55); Weimar P. & Davis, L. Eds. A.A.P.G. Studies in Geology N°42; S.E.G. Geophysical Developments Series N°5.
- Catuneanu, O., 2022. Principles of sequence stratigraphy. Elsevier (490 p).
- Chelotti, L., 1992. Interpretación de las secuencias sismoestratigráficas en un sector central de la cuenca Austral, Argentina. IV Reunión Argentina de Sedimentología, Actas 3 (p 25-32).
- Davies, T., 1987. Seismic facies analysis: pitfalls and applications in cratonic basins. The Leading Edge, V.6 N°7 (p 18-23).
- Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 275-291). McGraw-Hill.
- Dobrin, M., 1977. Seismic exploration for stratigraphic traps. En Seismic stratigraphy, applications to hydrocarbon exploration (p 329-352); Payton, C. Ed. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26.
- Foster, M. & Iovine, G., 2007. Development of deep thin reservoirs through meandering morphologies imaged in seismic data; a case study in San Jorge Basin, Argentina. SPE 110028 (6 p).
- Galloway, W., 1989. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis II: application to northwest Gulf of Mexico Cenozoic basin. A.A.P.G. Bulletin, V.73 N°2 (p 143-154).
- Haq, B., Hardenbol, J. & Vail, P., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. Science, V.235 (p 1156-1167).
- Haq, B. & Schutter, S., 2008. A Chronology of Paleozoic sea-level changes. Science, V.322 (p 64-68).
- Li, C-F., Li, J., Ding, W., Franke, D., Yao, Y., Shi, H., Pang, X., Cao, Y., Lin, J., Kulhanek, D. *et al.*, 2015. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, V.120 N°3 (p 1377-1399).
- Lunine, J., 1999. Evolution of a habitable world (p 240-254). Cambridge University Press.
- Mancilla, O., Arce, L. & Corsico Picollini, N., 1989. Análisis estratigráfico secuencial en el subsuelo de la cuenca Cuyana, provincia de Mendoza, Argentina. I Congreso Nacional de Hidrocarburos, Actas 2 (p 715-737).
- Miall, A., 1991. Stratigraphic sequences and their chronostratigraphic correlation. Journal of Sedimentary Research, V.61 N°4 (p 497-505).
- Piana, H., Trincherro, E. & Chelotti, L., 1991. Estratigrafía del Terciario Inferior en un sector de la cuenca Austral. Boletín de Informaciones Petroleras, N°27 (p 30-47).
- Pirouz, M., Simpson, G., Bahroudi, A. & Azhdaria, A., 2011. Neogene sediments and modern depositional environments of the Zagros foreland basin system. Geological Magazine, V.148 N°5-6 (p 838-853).
- San, N. & Mohamad, M., 1996. A quantitative analysis of seismic reflection in a gas-bearing carbonate buildup, Offshore Malaysia. En Applications of 3-D seismic data to exploration and production; Weimer P. & Davies, T. Eds (p 219-224). A.A.P.G. Studies in Geology N°42; S.E.G. Geophysical Development Series N°5.
- Sangree, J. & Widimier, J., 1979. Interpretation of depositional facies from seismic data. Geophysics, V.44, sp. Section, Geothermal (p 131-160).
- Skaloud, D., 1996. The use of 3-D seismic data as a tool to increase ultimate recovery from the Yibal Shuaiba reservoir, Oman. En Applications of 3-D seismic data to exploration and production; Weimer P. & Davies, T. Eds (p 211-218). A.A.P.G. Studies in Geology N°42; S.E.G. Geophysical Development Series N°5.
- Sheriff, R. & Geldart, L., 1995. Exploration seismology (p 398-417). Cambridge University Press.
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Tucker, P., 1982. Pitfalls revisited (19 p). Society of Exploration Geophysicists, Monograph 3.
- Vail, P., Mitchum, R., Todd, R., Widimier, J., Thompson III, S., Sangree, J., Bubba, J. & Hatlelid, W., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. En Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration, Section 2 (p 49-212); Payton, C. Ed. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26.
- Vail, P. & Cramez, C., 1990. Sequence stratigraphy interpretation course (334 p). Total C.F.P.
- Van Andel, T., 1991. New views on an old planet (p 54-82, 106-192). Cambridge University Press.
- Van Wagoner, J., Mitchum, R., Campion, K. & Rahmanian, V., 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, core, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies. A.A.P.G. Methods in Exploration Series N°7 (55 p).

- Watts, T., 1992. The formation of sedimentary basins. En Understanding the Earth (p 301-324); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Wilson, C., 1992. Sequence stratigraphy: an introduction. En Understanding the Earth (p 389-414); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.