

# Comentarios al método sísmico de reflexión en sus aplicaciones en el ámbito de la geotecnia y la hidrogeología

Ángel GRANDA SANZ, Ing. de Minas. INTERNATIONAL GEOPHYSICAL TECHNOLOGY, S.A. (IGT).  
José C. CAMBERO CALZADA, Ing. de Minas. INTERNATIONAL GEOPHYSICAL TECHNOLOGY, S.A. (IGT)

Palabras clave: IMPEDANCIA ACÚSTICA, RESOLUCIÓN VERTICAL, COMMON DEPTH POINT, OFFSET, COBERTURA, SECCIÓN SÍSMICA, FUENTE DE ENERGÍA, PROCESADO.

El método *Sísmico de Reflexión* en su variante *shallow* constituye una herramienta geofísica de gran capacidad resolutive para el estudio del subsuelo en el rango comprendido entre algunas decenas y varios centenares de metros de profundidad. Pese a su notable capacidad resolutive, no es aplicable en cualquier ámbito geológico de forma general, sino que específicamente resulta efectivo en la detección de discontinuidades horizontales o subhorizontales en medios estratificados y no es adecuado para el estudio de discontinuidades subverticales. El resultado final que se obtiene de un estudio mediante este método es básicamente una sección distancia-tiempo en la que se ponen de manifiesto los diferentes reflectores existentes en el subsuelo dentro del ámbito de profundidad estudiado. Para una mejor comprensión de las características y capacidad resolutive de este método geofísico, en esta comunicación se describen los aspectos más significativos relativos a la toma de datos y al procesado de los registros. Para ello se revisan algunos conceptos básicos que se considera conveniente conocer por parte de los posibles usuarios de este método geofísico para que así puedan evaluar tanto la conveniencia de su empleo como la calidad de los resultados que se obtengan de su aplicación en cada caso.

**S**e entiende como una obligación de los profesionales de la *Geofísica Aplicada* promover la divulgación de las diversas técnicas agrupadas en esta especialidad de las ciencias para el estudio del subsuelo, con el fin de contribuir a que se haga el mejor uso de cada una de ellas en base al conocimiento de su capacidad resolutive y de sus limitaciones.

En lo que respecta a esta comunicación se

pretende que tenga un carácter eminentemente práctico ya que va dirigida de forma exclusiva a los posibles usuarios del método *Sísmico de Reflexión* en los ámbitos de la *Geotecnia* y de la *Hidrogeología*.

Aquí, se establece ya una primera acotación en lo que se refiere al rango de profundidad a estudiar que se sitúa entre algunas decenas y algunos centenares de metros. Nos referimos pues al método *Sísmico de Reflexión* en su variante superficial, *sha-*

*llow* en las referencia bibliográficas anglosajonas, diferenciada en muchos aspectos de las aplicaciones convencionales en el campo de la prospección petrolífera.

El objetivo es exponer de forma ordenada una serie de conceptos básicos que permitan a los posibles usuarios de este método geofísico planificar adecuadamente su utilización y controlar la calidad de los datos y resultados. Para ello se hará un breve repaso de algunos conceptos básicos relati-

vos a los mecanismos de transmisión de las ondas volumétricas en el medio rocoso y de las diversas técnicas para su estudio. Este primer apartado permitirá establecer de forma implícita cuáles son los modelos geológicos en que es aplicable el método *Sísmico de Reflexión* y que tipo de información del subsuelo puede proporcionar.

Desde este punto, se enlazará con la explicación de los aspectos relativos a las operaciones de campo para el registro de las señales sísmicas y su posterior procesado, haciendo hincapié en cuáles deben ser los documentos resultantes necesariamente de un estudio de este tipo.

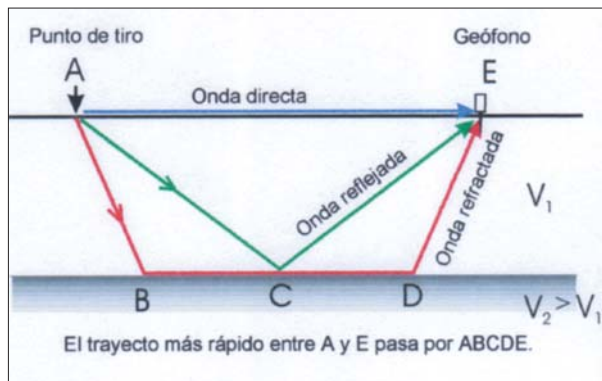
Asimismo, se presentarán los resultados de algunos estudios que se consideran representativos para poner de manifiesto la capacidad resolutive del método comentado.

A lo largo de esta exposición se incluyen diversos vocablos ingleses que son de uso habitual en la jerga geofísica. La divulgación de estos términos es un objetivo secundario de esta comunicación porque se considera conveniente el conocer su significado ya que en muchos casos se utilizan tal cual, sin traducción.

## Algunos conceptos básicos

La liberación instantánea de un pulso de energía mecánica en un punto de la superficie del terreno genera una serie de ondas de diferentes tipos con diferentes modos y velocidades de propagación. En lo que respecta a su influencia o a su utilización por las técnicas de prospección geofísica son tres los grupos de ondas a considerar:

- **Ondas de compresión (P).** Se transmiten a través del macizo rocoso produciendo una vibración paralela a la dirección de propagación. Su velocidad de transmisión es la más alta de todas.
- **Ondas de Cizalla (S).** También son ondas volumétricas que producen una vibración perpendicular a la dirección de propagación. Se propagan únicamente en medios sólidos, con una velocidad menor que las ondas de compresión ( $V_p/V_s \approx 1.6$  a 2).
- **Ondas superficiales.** A diferencia de los grupos anteriores que se transmiten a través del subsuelo, las ondas superficiales se propagan por la superficie



**Fig. 1.- Trayectos de las ondas sísmicas de compresión.**

del terreno y tienen como característica dominante su gran amplitud. En este grupo se incluyen las ondas *Love* y las ondas *Rayleigh* cuya velocidad de propagación es aproximadamente  $0,9 V_s$ .

Además de las ondas mencionadas, la liberación del pulso de energía produce una señal acústica que se transmite por el aire (onda aérea) a una velocidad de 360 m/s. Esta señal también se manifiesta en los registros geofísicos y tiene influencia en la planificación y ejecución de los estudios sísmicos de reflexión.

Tanto las ondas *P* como las ondas *S* en su tránsito por el subsuelo sufren modificaciones condicionadas por algunas características físicas tales como su velocidad ( $V_p/V_s$ ) de transmisión por el subsuelo, la densidad y grado de integridad del macizo rocoso y especialmente por sus discontinuidades más relevantes: Contactos entre diferentes unidades litológicas, zonas de falla, etc.

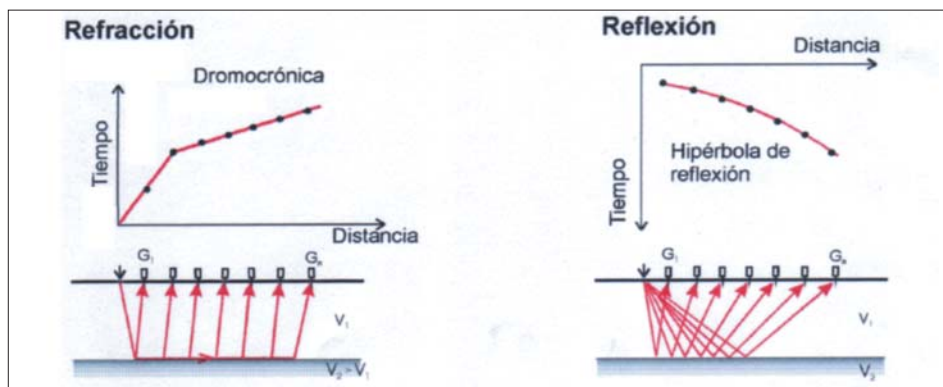
En lo que respecta al estudio de las ondas

de compresión (**Fig. 1**), las dos transformaciones principales a tener en cuenta para los fines de este documento son la *Refracción* y la *Reflexión* (**Fig.2**). Ambos procesos se gobiernan por las leyes de la Óptica. También las ondas de cizalla están sometidas a iguales procesos físicos y, por ello, los mismos conceptos son aplicables a su estudio. El registro de uno u otro tipo de ondas se diferencia básicamente en el tipo de sensores utilizados en cada caso. El hecho de trabajar en los estudios sísmicos de reflexión principalmente con ondas de compresión se debe a la mayor sencillez operativa de su registro.

Limitándonos pues al estudio de las ondas de compresión, el registro sísmico obtenido con un determinado sensor (*geófono*) acoplado al terreno durante un intervalo de tiempo suficientemente largo a partir del instante de generación de la señal acústica manifiesta la llegada de una serie de ondas que pueden incluir todos o algunos de los siguientes tipos: Llegadas directas de ondas de compresión, ondas de compresión refractadas, diferentes series de ondas de compresión reflejadas en diversos reflectores y ruido constituido por las ondas superficiales y por la onda aérea, etc.

Esta complejidad de los registros sísmicos lleva a una primera consideración a tener en cuenta: en los sismogramas de un estudio sísmico de reflexión no se manifiestan exclusivamente las ondas de compresión reflejadas sino que también se registran todas las demás ondas mencionadas. De aquí, nace la dificultad de este método para registrar fiablemente las ondas que interesan, para identificarlas y para aislarlas de forma fiable del resto de las señales.

Esta complejidad de los registros sísmicos lleva a una primera consideración a tener en cuenta: en los sismogramas de un estudio sísmico de reflexión no se manifiestan exclusivamente las ondas de compresión reflejadas sino que también se registran todas las demás ondas mencionadas. De aquí, nace la dificultad de este método para registrar fiablemente las ondas que interesan, para identificarlas y para aislarlas de forma fiable del resto de las señales.



**Fig.2.- Refracción Reflexión. Esquema básico**

Las reflexiones de las ondas de compresión se producen en las interfases del subsuelo donde existe suficiente contraste en los valores de la *impedancia acústica*, definida como el producto de la velocidad  $V$  por la densidad del medio rocoso. De acuerdo con las leyes de la Óptica, el coeficiente de reflexión entre dos medios 1 y 2 viene determinado por la expresión:

$$T_{1-2} = (V_2 x d_2 - V_1 x d_1) / (V_2 x d_2 + V_1 x d_1)$$

Esta fórmula pone de manifiesto una característica específica del método *Sísmico de Reflexión*. Este método puede ver cualquier interfase o contacto entre dos unidades del subsuelo entre las que exista suficiente contraste en sus valores de la impedancia acústica sin que necesariamente los valores de  $V_p$  sean crecientes con la profundidad tal como ocurre en el método *Sísmico de Refracción*.

Otro concepto importante desde el punto de vista práctico es la *resolución vertical* del método *Sísmico de Reflexión* o, dicho en otros términos, su capacidad para manifestar de forma individualizada las reflexiones producidas por discontinuidades del subsuelo muy próximas entre sí (**Fig.3**). Para las reflexiones que provienen del techo y del muro de una determinada capa existe una distancia límite por debajo de la cual es imposible identificar ambos contactos como dos reflexiones independientes. Esta distancia definida como *resolución vertical* ( $x$  o  $\lambda/4$ ) es función de la frecuencia de la onda de compresión y de la velocidad característica del medio rocoso (**Fig. 4**).

$$x(m) = V/4xf$$

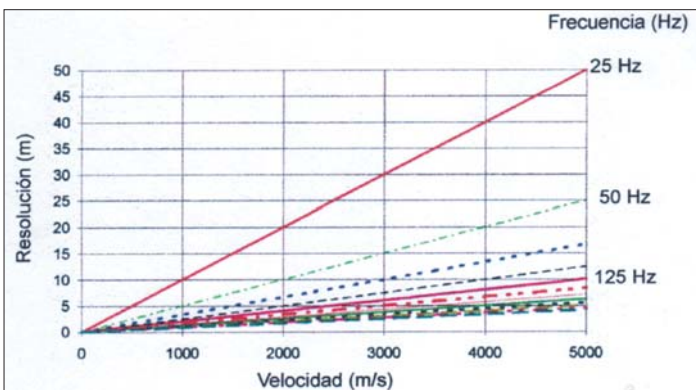


Fig. 4.- Resolución vertical.

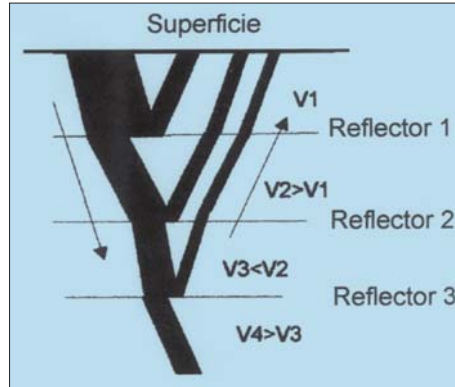


Fig. 3.- Atenuación de la señal sísmica.

La dependencia entre la resolución vertical  $x(m)$  y la frecuencia de la onda de compresión pone de manifiesto la importancia de algunos aspectos de la señal sísmica que no sólo debe ser suficientemente intensa sino que también debe incluir en su espectro altas frecuencias para aumentar la resolución vertical.

Finalmente, en lo que concierne a este apartado de conceptos básicos es necesario hacer referencia al de *velocidad de transmisión* de las ondas de compresión en sísmica de reflexión puesto que no existe una definición única al respecto. Entre las definiciones más habituales conviene conocer las siguientes:

- Velocidad instantánea a una profundidad  $P$ ;  $V = \Delta P / \Delta t$ .
- Velocidad media a una profundidad  $P$ ;  $V = P/t$ .
- Velocidad media cuadrática;  $V_{RMS} = \sqrt{(\sum v_i^2 x_{ii} / \sum x_{ii})}$ .
- Velocidad de intervalo;  $V_{int} = \Delta P / \Delta t$ .
- Velocidad aparente. Corresponde a la

velocidad de desplazamiento del frente de onda a lo largo de la línea de geófonos. Es la inversa de la pendiente de las dromocrónicas en *Sísmica de Refracción* o la derivada del análisis de la curvatura de las hipérbolas de reflexión.

En un medio homogéneo se cumple que:

$$V_{inst} < V_{RMS} < V_{aparente}$$

El problema de la determinación de la velocidad es complejo. Por el momento conviene aclarar que en las secciones sísmicas no es habitual caracterizar bloques, zonas o capas mediante valores de velocidad sino que lo correcto es expresar en forma de tablas los valores de  $V_{RMS}$  y velocidad de intervalo en diversos puntos de la sección, para determinados intervalos de tiempo.

## Obtención de los registros sísmicos

### Medidas según la técnica Common Depth Point

El dispositivo de trabajo más utilizado para la obtención de los registros en los estudios *Sísmicos de Reflexión* superficial o *shallow* (**Fig. 5**), es el conocido como *CDP* (*Common Depth Point*). Su particularidad se basa en registrar las señales sísmicas provenientes de un mismo punto de un reflector del subsuelo para diversas combinaciones entre los puntos de tiro y los geófonos. Con este procedimiento es factible sumar en la fase de procesado de los datos todos los registros que tienen el mencionado punto

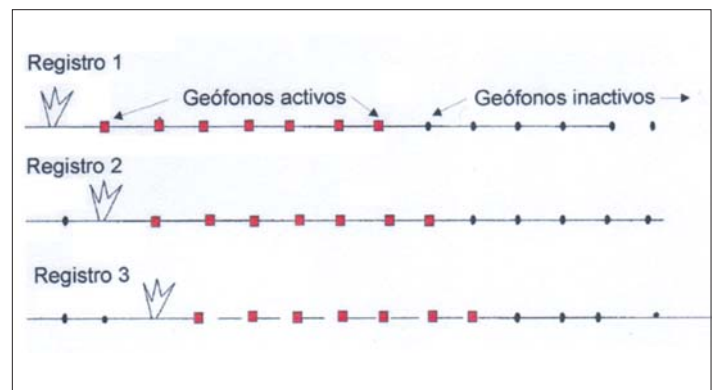


Fig. 5.- Dispositivo de registro CDP.

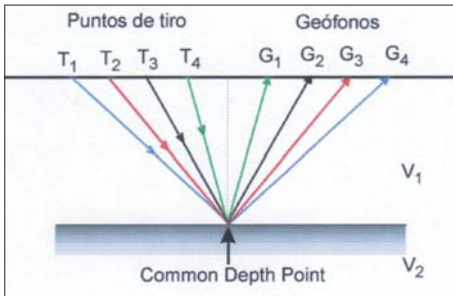


Fig. 6.- Esquema de operación CDP.

reflector común y así mejorar la relación señal/ruido en la sección sísmica resultante del estudio. Cuanto mayor sea el número de trazas que se adicionan mejor será la mencionada relación.

El modo operativo según la técnica CDP (Fig. 6), consiste en registrar mediante un dispositivo lineal de geófonos situados sobre el terreno las señales correspondientes a un determinado punto de tiro situado alineado con los geófonos y a una cierta distancia (*offset*) de uno de los geófonos extremos. Es habitual disponer sobre el terreno un número de geófonos del orden del doble al de canales del sismógrafo utilizado para hacer los registros. Todos ellos se conectan a un sistema multicable que, a su vez, se conecta al sismógrafo. Una vez efectuado el registro correspondiente a un punto de tiro determinado, mediante un conmutador múltiple (*roll along switch*) se avanzan los geófonos activos una posición y se repite el proceso de registro desplazando igualmente el punto de tiro. Utilizando por ejemplo un sismógrafo de 48 canales, si para el tiro 1 los geófonos activos son los números del 1 al 48, en el tiro 2 serán desde el 2 al 49 y así sucesivamente.

De acuerdo con este procedimiento y si el desplazamiento entre puntos de tiro es igual al intervalo entre geófonos, el número de trazas sísmicas que tienen un punto reflector común y que, por lo tanto, pueden sumarse es 12, 24 o 48 dependiendo de que se empleen sismógrafos de 24, 48 o 96 canales respectivamente. A este parámetro se le llama *cobertura (fold)*.

Es obvio el interés de que la cobertura sea lo más alta posible para aumentar la relación señal/ruido en las secciones sísmicas resultantes del procesamiento de los registros, y ello lleva a una primera conclusión importante en lo que respecta a la toma de datos: la conveniencia de utilizar sismógrafos con

el mayor número de canales posible, como mínimo 24 y preferiblemente 48 (Fig. 7) ó 96 canales.

**Posición del punto de tiro**

La distancia (*offset*) entre el punto de tiro y el primer geófono activo del dispositivo de registro es un factor de fundamental importancia en la fase de trabajo de campo y debe determinarse en cada caso en función de la profundidad a investigar, velocidad de las capas del subsuelo, longitud del dispositivo de medida y espaciado entre geófonos. En todo caso, la determinación del *offset* ha de hacerse mediante ensayos de campo al inicio de los trabajos, seleccionando un valor con el que se evite la superposición del ruido (ondas superficiales o *ground roll* y onda aérea) con las reflexiones significativas de las ondas de compresión.

Es necesario insistir en la importancia de una adecuada selección del *offset* para cada estudio mediante ensayos al inicio de los trabajos. De este modo se pueden distribuir los geófonos activos en la posición que permita la mejor visualización de las reflexiones. Obsérvese en los esquemas de la Fig. 8 la diferencia entre un registro con *offset* muy pequeño y, por tanto, inadecuado y otro con un *offset* adecuado para registrar las reflexiones de interés. En este último son claramente visibles reflexiones casi inexistentes en el primero al estar enmascaradas por la onda aérea y por las ondas superficiales (Fig. 9).

**Producción de la señal sísmica/ fuente de energía**

En su tránsito por el subsuelo las ondas de compresión sufren una atenuación que redu-

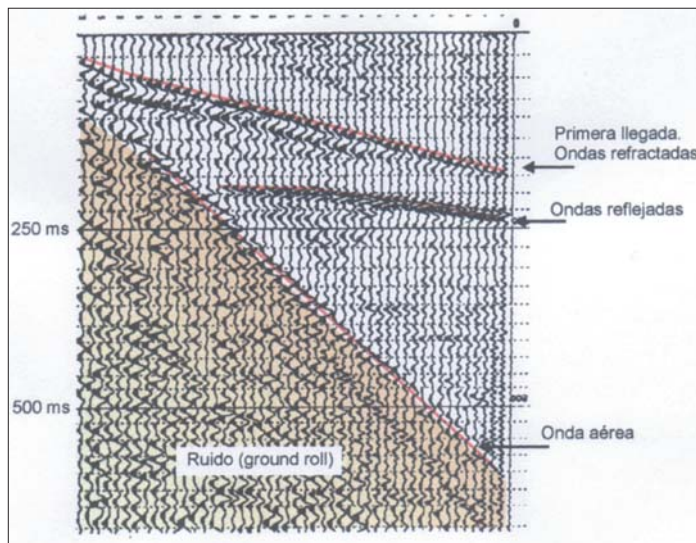
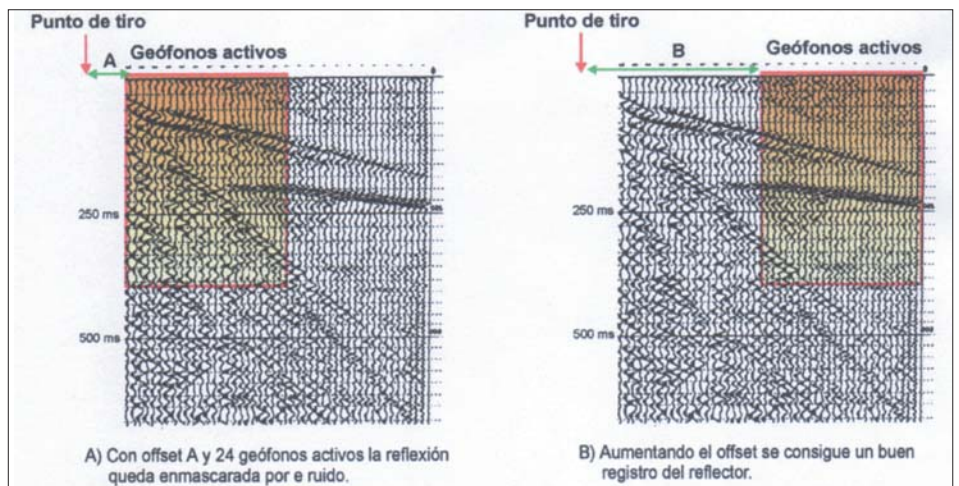


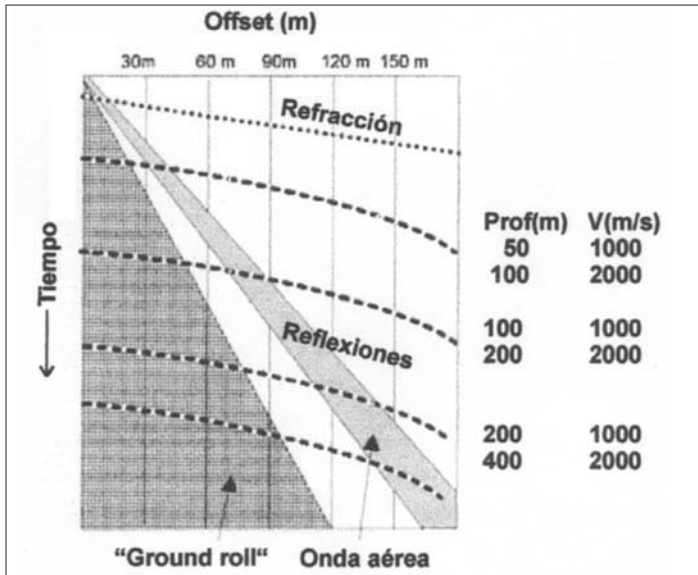
Fig. 7.- Elementos típicos de un registro sísmico de 48 canales.

Fig. 8.- Importancia de una correcta selección de *offset*.



A) Con *offset* A y 24 geófonos activos la reflexión queda enmascarada por e ruido.

B) Aumentando el *offset* se consigue un buen registro del reflector.



**Fig. 9.- Zona útil y zona de ruido en los registros sísmicos. Importancia de la correcta selección del offset en la detección de reflexiones significativas.**

señal juegan un papel relevante las condiciones del subsuelo que actúa no sólo atenuando la señal sino también como un filtro pasabajos eliminando selectivamente las altas frecuencias, lo cual reduce la resolución vertical de los registros. La eficacia de tal filtrado y la atenuación de la señal sísmica es máxima en terrenos secos y por ello la situación ideal para la realización de estudios sísmicos de reflexión es aquella en que la zona superficial está constituida por materiales granulares saturados.

**Recomendaciones respecto a los trabajos de campo**

Para finalizar el apartado relativo a la toma de datos, se ha de concluir que la obtención de buenos registros es condición necesaria para el éxito del estudio, y que depende exclusivamente de una selección juiciosa de los parámetros de adquisición, dando por sentado que se utilizara la instrumentación adecuada, aspecto al que no se va a dedicar atención en esta comunicación. Los tratamientos posteriores no son mágicos y nunca pueden producir una sección sísmica fiable a partir de datos de mala calidad. En la bibliografía anglosajona existe una forma muy acertada que no hace falta traducir, para expresar la idea anterior: *garbage in, garbage out*.

A modo de guía para potenciales usuarios del método *Sísmico de Reflexión* se remarca que conseguir buenos datos de campo requiere la ejecución de una serie de ensayos previos y el seguimiento de algunas normas de sentido común tales como:

ce progresivamente su amplitud. En consecuencia la profundidad de investigación que se puede alcanzar en un estudio sísmico de reflexión está obviamente condicionada por la atenuación de la señal. Tal hecho lleva de inmediato a constatar la importancia de la amplitud de la señal original, es decir la importancia de la fuente de energía.

Para el rango de profundidad a investigar mediante el método *Sísmico de Reflexión shallow* existen diversas alternativas en lo relativo a las fuentes de energía que se emplean habitualmente. Entre las más comunes cabe citar las siguientes:

- Impacto manual de un martillo de 6-8 kg sobre el terreno.
- Detonación de cartuchos especiales en pequeños sondeos (0,5 m). Por ejemplo, el sistema *SISSY* con cartuchos tipo *Dynergit* desarrollado por *Dynamit Nobel*, el *Betsy gun*, etc.
- Caída de masas aceleradas. En este grupo se incluyen por ejemplo los sistemas *EWG*, de la marca *Bison Instr.*
- Pequeñas cargas explosivas detonadas en el fondo de sondeos de poca profundidad (1-2 m).
- Vibradores.

Mejor que comentar las particularidades de cada una de las fuentes de energía mencionadas (*Tabla I*), se considera pertinente remarcar cuáles son las condiciones ideales de generación y aplicación de las señales sísmicas. Éstas son:

- Que la señal sea de la mayor intensidad

posible y, en este aspecto, es obvio que el orden de preferencia sería: explosivo, masas aceleradas, cartuchos especiales, etc.

- Que la señal sísmica tenga un espectro con un notable contenido en *altas frecuencias* para aumentar la resolución vertical de los registros.
- Minimizar el efecto de las *ondas superficiales* y de la *onda aérea* produciendo la señal en el fondo de pequeños sondeos y focalizando la energía hacia abajo. En este sentido, los explosivos detonados en sondeos bien retacados son los más ventajosos, seguidos de los cartuchos especiales.
- Además de la propia fuente de energía, en la *transmisión y modificación de la*

	Martillo 7 kg	Cartuchos Dynergit	Caída de peso 30 kg/3 m	Explosivo 100-200 g	Explosivos especiales tipo pirotécnico 50-100 g
<b>Energía (J)</b>	100	80.000	900	340.000	100.000
<b>Prof. investigada</b>	Hasta 70-80 m	Hasta 200 m	Hasta 200 m	Hasta 500 m	Hasta 400 m
<b>Frecuencia</b>	5-50 Hz	60-150 Hz	10-70 Hz	5-200 Hz	10-150 Hz
<b>Observaciones</b>	Únicamente para estudios muy superficiales en condiciones favorables.	Efectivo pero caro por el coste de los cartuchos.	Exige poder llegar con vehículo a todos los puntos de tiro. Rápido y eficaz al operar por suma de golpes ( <i>stacking</i> ).	Muy eficaz. Difícil de conseguir los preceptivos permisos.	Fácil de conseguir y utilizar. Seguro. Muy eficaz. Barato. Posibilidad de <i>stacking</i> .

**TABLA I.- Particularidades de algunas de las fuentes de energía habitualmente utilizadas en estudios sísmicos de reflexión shallow.**

- a) Determinar la geometría del dispositivo de medida, distancia entre trazas y *offset* en función de los objetivos a resolver.
- b) Localización cuidadosa de los perfiles sísmicos para evitar en la medida de lo posible las interferencias de tipo *cultural*.
- c) Selección de la fuente de energía y su modalidad de empleo determinando parámetros tales como número de golpes por punto de tiro cuando se opera por suma de golpes (*stacking*), cantidad de explosivo, profundidad de enterramiento del explosivo, etc.
- d) Parámetros de registro de los datos tales como longitud de los registros en tiempo, filtros, frecuencia de muestreo, etc.

## Procesado de los registros sísmicos

### Esquema general del procesado

No es objetivo de esta comunicación hacer una descripción pormenorizada de las diferentes fases del tratamiento de los datos sísmicos que lleva desde los registros brutos hasta la sección sísmica. Es un proceso relativamente sencillo en sus conceptos pero complejo en su ejecución aunque normalmente se lleva a cabo en un PC mediante programas comerciales de coste razonable. Tampoco en esto hay magia ni se requiere el empleo de potentes sistemas informáticos.

En todo caso el *resultado final* de un estudio sísmico de reflexión es una *sección sísmica* en la que se puedan observar los diversos reflectores del subsuelo. Se trata de una sección *en el dominio distancia-tiempo* obtenida al agrupar las trazas *CDP* a lo largo del perfil de medida y cuya interpretación en términos geológicos constituye una tarea aparte que necesariamente requiere su transformación a una sección *distancia-profundidad*.

Una secuencia típica de procesado de los registros en un estudio sísmico de reflexión es la siguiente:

- Lectura y ordenación de los ficheros que contienen los registros digitales de campo, con especial cuidado en la descripción detallada de la geometría del dispositivo de medida, coordenadas de

los puntos de tiro y geófonos, etc. Esta fase es importante para el correcto agrupamiento posterior de todas las trazas *CDP*.

- Aplicación de un filtro pasabanda para eliminar cierto ruido de los registros. Principalmente se trata de eliminar la componente de baja frecuencia.
- Eliminación de trazas problemáticas o defectuosas debidas a fallos en el sistema de registro o afectadas por ruido puntual particularmente intenso.
- Agrupación de trazas *CDP*, es decir de todas las correspondientes a un mismo punto del reflector para diversas combinaciones entre puntos de tiro y geófono con una bisectriz común.
- Análisis de velocidad y corrección NMO (*normal move out*).
- Suma de trazas *CDP* para obtener una traza única por grupo
- Agrupamiento de las trazas suma resultantes de cada grupo para conformar la sección sísmica distancia-tiempo.
- Migración y/o deconvolución
- Filtrado *FK*, promediado de trazas, etc.

Cada una de estas operaciones es importante y su correcto desarrollo requiere la intervención de especialistas experimentados que decidan en cada caso la forma más eficaz de conseguir el resultado final que se pretende: que en la sección sísmica sean visibles las reflexiones de interés eliminando en la medida de lo posible el resto de las señales inútiles que puedan oscurecerlas (*ground roll*, onda aérea, difracciones, refracciones, etc).

Para conseguir este propósito se dispone de una herramienta fundamental, los orde-

nadores PC de gran potencia de cálculo y programas muy precisos. Sin embargo, no debe olvidarse que las decisiones corresponden al técnico y que de su acierto dependerá en parte la bondad de los resultados finales.

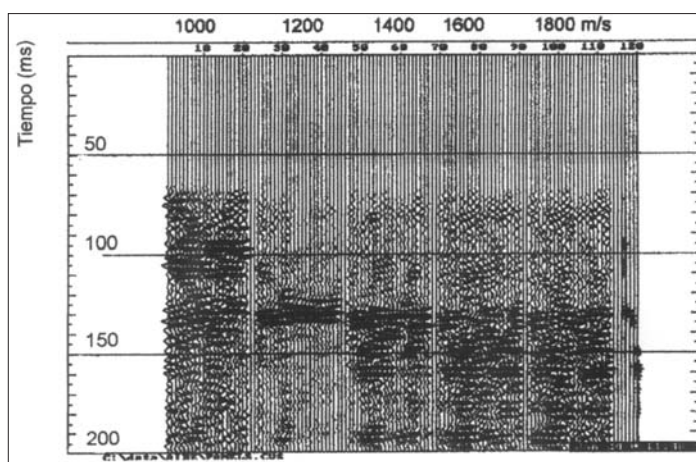
Aunque no se van a describir cada uno de los pasos del procesado, si se pretende remarcar la importancia de algunos de ellos mediante un breve comentario en los epígrafes que siguen.

### Determinación de la velocidad

La velocidad de transmisión de las ondas de compresión por el subsuelo constituye la mayor indeterminación del método *Sísmico de Reflexión*. Sin embargo, el cálculo de la velocidad es importante no solamente para poder pasar de la sección sísmica (distancia-tiempo) a una sección distancia-profundidad interpretable en términos geológicos sino, también para realizar la corrección *NMO* (*normal move out*) que es fundamental en el proceso de agrupamiento y suma de trazas. Las técnicas para determinación de la velocidad van desde la *Sísmica de Refracción* para los niveles superficiales, a los ensayos de paneles de velocidad (*Fig. 10*), agrupando las trazas para diferentes valores de velocidad, análisis de la curvatura de las hipérbolas envolventes de las reflexiones en los registros brutos, registros sísmicos en sondeos, etc.

### Agrupación y suma de trazas CDP

Esta fase constituye la esencia del tratamiento de los registros sísmicos de reflexión. Se lleva a cabo ordenando todos los registros de campo y posicionándolos co-



**Fig. 10.-** Determinación de la velocidad por suma de trazas a velocidad constante (paneles de velocidad). En este ejemplo es obvio que la velocidad correcta para el material situado por encima del reflector localizado a 130 ms es 1.200 m/s.

rectamente en función de la situación de cada punto de tiro y cada geófono del dispositivo de medida para agrupar todas las trazas que tengan un punto reflector común. Si se opera con un dispositivo de 48 canales el número de trazas que cumplen esta condición es 24 por cada registro. La cobertura es pues de 24, o de 12 si se opera registrando con 24 canales activos en cada tiro. Cuanto más alta sea la cobertura mejor será la relación señal/ruido al sumar todas las trazas de cada grupo una vez realizada la corrección *NMO*, (Fig. 11).

**Tratamientos posteriores a la suma de trazas CDP**

Mediante la representación conjunta de todas las trazas *CDP* correctamente posicionadas se obtiene una sección sísmica bruta. Para mejorar su apariencia es habitual someterla a algunos procesos de tipo *cosmético*. Conviene conocer cuáles son los más habituales y, por ello, se relacionan a continuación someramente.

- **Filtrado.** Tiene por objeto eliminar las bajas frecuencias que oscurecen al aspecto general de la sección sísmica.
- **Control Automático de Ganancia (AGC).** Su correcta aplicación permite aumentar la amplitud de las reflexiones más profundos de la sección sísmica que, normalmente, serán muy débiles en relación con las más superficiales.
- **Promedio de trazas contiguas.** Refuerza la señal de los reflectores y reduce el ruido de la sección.
- **Filtro FK.** Permite eliminar falsas reflexiones de aspecto lineal que a veces se generan durante el tratamiento de los datos. Su empleo es delicado porque puede eliminar reflexiones reales.
- **Correcciones estáticas.** Se efectúan para eliminar los efectos asociados a las variaciones de altitud a lo largo del perfil así como las variaciones de velocidad y de espesor de la zona superficial meteorizada.
- **Migración.** En presencia de contactos o de reflectores inclinados una señal reflejada no proviene necesariamente de la vertical de cada geófono sino del punto más próximo del reflector

en cualquier dirección. Mediante la migración se corrige la posición e inclinación de los reflectores inclinados.

Asimismo la migración hace desaparecer las hipérbolas de difracción que se producen por el efecto de reflectores puntuales.

**Ámbitos de aplicación y algunos ejemplos**

Todos los conceptos expuestos hasta este punto han venido esbozando de forma implícita las características de los modelos geológicos en los que resulta aplicable el método *Sísmico de Reflexión* en su variante *shallow*. Procede, no obstante, resumir de forma explícita cuáles son los ámbitos geológicos donde es adecuado aplicar este método y cuáles los objetivos que puede resolver.

Tanto sus fundamentos teóricos como la experiencia demuestran que el método *Sísmico de Reflexión* es efectivo y adecuado para el estudio de discontinuidades horizontales o subhorizontales (30-35°) entre unidades litológicas del subsuelo siempre que entre ellas exista suficiente contraste entre sus valores de la impedancia acústica.

Asimismo, es importante que en el medio rocoso no existan reflectores o discontinuidades subverticales porque su efecto se tra-

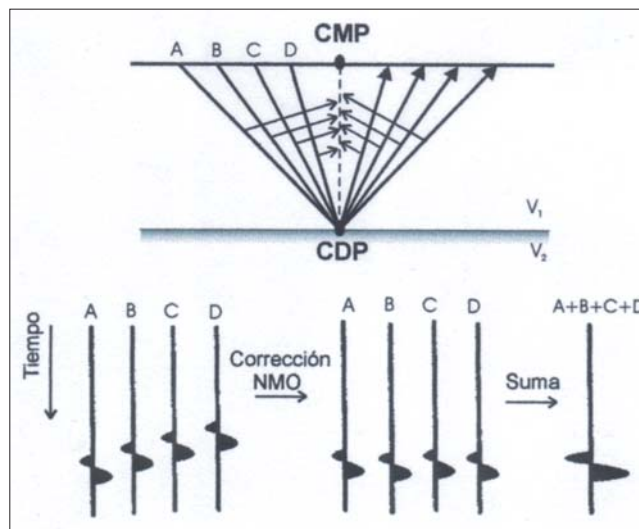
duce en ruido en los registros sísmicos, que dificulta o hace imposible la identificación de las otras reflexiones de interés. Los medios sedimentarios que no estén afectados por plegamientos apretados son los que mejor cumplen estas condiciones. Por contra, los medios metamórficos afectados por fuertes plegamientos y fallas subverticales o los medios ígneos, constituyen modelos geológicos donde este método es raramente aplicable.

Por su importancia en los proyectos geotécnicos la caracterización de las zonas de falla constituye un problema del mayor interés. A este respecto, es conveniente aclarar cual es la información que puede proporcionar el método *Sísmico de Reflexión* y con que precisión.

Cuando se trata de zonas de falla en disposición subhorizontal y tienen suficiente espesor este método puede *a priori* identificarlas y determinar su localización y su geometría de forma fiable. Sin embargo, en lo que respecta a las zonas de falla subverticales (>45°) el método *Sísmico de Reflexión* permite únicamente identificar su existencia en términos cualitativos pero en ningún caso puede caracterizarlas determinando su buzamiento con el grado de precisión requerido en este tipo de proyectos. Las fallas subverticales se manifiestan en las secciones sísmicas como interrupciones y desplazamientos verticales en determinados reflectores y también como zonas de sombra originadas por la reflexiones de la propia falla en las que se pierde la continuidad de los reflectores subhorizontales.

En relación con esto, el primer ejemplo que se presenta es muy simple y a la vez muy ilustrativo. Se trata de un estudio para el reconocimiento de la traza de un túnel de la Autovía de circunvalación de Gijón. En este caso, el objetivo del estudio fue determinar la posición y geometría del contacto entre una unidad de conglomerados cretácicos con muy bajo grado de consolidación y un substrato de calizas jurásicas. El interés de tal estudio vino motivado porque se había proyectado la construcción de un túnel

en esa zona y era importante conocer la posición del mencionado contacto para evitar la perforación del túnel en la unidad de conglomerados. El estudio se llevó a cabo



**Fig. 11.- Explicación de los conceptos de agrupamiento y suma de trazas para un caso simple de cobertura 4. Normalmente se opera con cobertura 12, 24 ó 48.**

con un sismógrafo de 24 canales utilizando un martillo manual de 8 kg como fuente de energía, *offset* de 15 metros y espaciado de 4 metros entre geófonos.

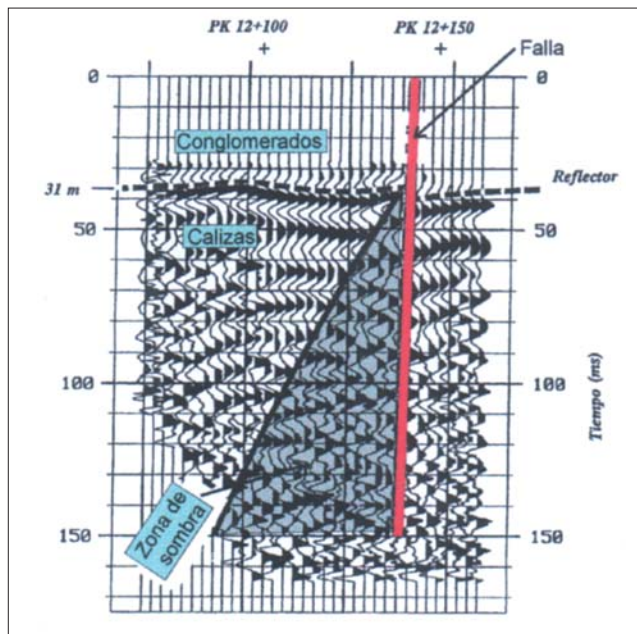
La sección sísmica obtenida en uno de los perfiles estudiados (*Fig. 12*), permite apreciar que los resultados de este trabajo cubrieron perfectamente los objetivos del estudio al determinar no sólo el contacto entre conglomerados y calizas a una profundidad de 30-32 metros, sino también el identificar accidentes tales como una falla que provoca un considerable desplazamiento vertical del techo de las calizas. También se observan otros reflectores más profundos, presumiblemente debidos a intercalaciones margosas. Llamamos la atención respecto a la interrupción de estas reflexiones secundarias en la zona de ruido (sombra) asociada a la falla mencionada.

El segundo ejemplo presentado (*Fig. 13*), publicado por J.A. Hunter y S.E. Pullan en el *Symposium on the Application of the Geophysics to Engineering and Environmental Problems -SAGEEP'89-*, pone de manifiesto la capacidad del método sísmico de reflexión para determinar el espesor de rellenos poco consolidados sobre un substrato metamórfico, con definición precisa de la geometría del contacto entre ambas unidades.

Adicionalmente, también se observa la diferenciación de niveles distribuidos horizontalmente dentro del Terciario y la ausencia de información dentro del basamento metamórfico. Este estudio se llevó a cabo mediante un sismógrafo de 48 canales con espaciado de 5 metros entre trazas, *offset* de 25 metros y cartuchos especiales (*Betsy gun*) como fuente de energía.

A propósito de este ejemplo, es de remarcar que los resultados que se presentan no son una interpretación geológica de los datos geofísicos sino una sección sísmica distancia-tiempo. Este es el documento donde se deben observar los accidentes relevantes del subsuelo de forma inequívoca para que la interpretación geológica sea fiable.

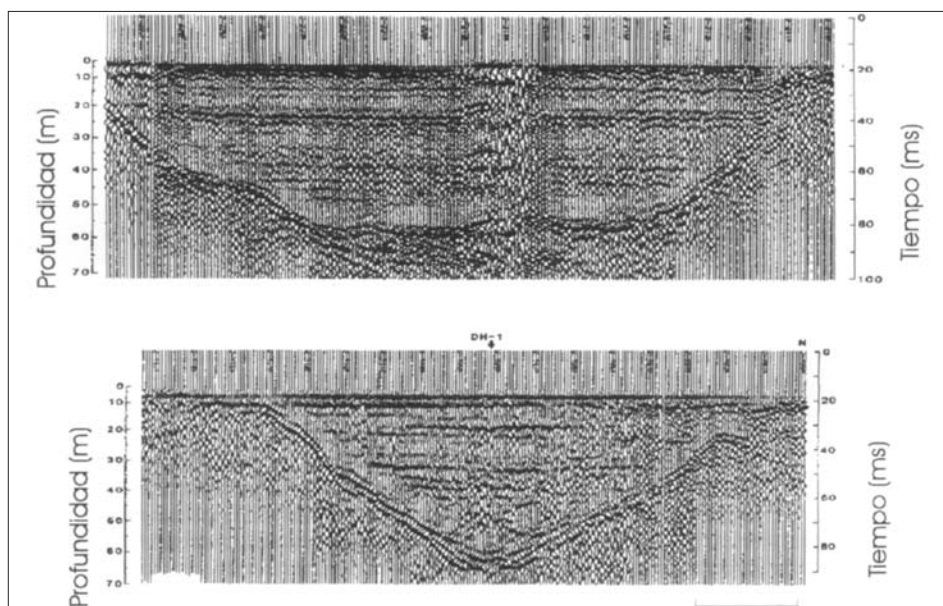
Finalmente, el tercer ejemplo corresponde a un estudio realizado en la zona centro-norte de Asturias utilizando un sismógrafo de 24 canales, espaciado de 5 metros y *offset* de 100 metros. Como fuente de energía se empleó explosivo pirotécnico detonado en el fondo de sondeos de 1 metro de profundidad. Los resultados (*Fig. 14*), se presentan en forma de sección distancia-tiempo



**Fig. 12.-** Ejemplo nº 1. Estudio de un contacto conglomerados/calizas para el proyecto de un túnel.

interpretada, indicando la ley de velocidades en una serie de puntos a lo largo de la misma para permitir el cálculo de profundidades en cada uno de ellos. En este caso, el estudio se realizó con el objetivo de definir el techo y muro de una formación Triásica en el ámbito de algunos centenares de m de profundidad. Por el momento estos resultados están pendientes de comprobación mediante sondeos.

Un comentario general respecto a los resultados de un estudio de este tipo es que las secciones sísmicas y las secciones geológicas, derivadas de su interpretación, son tanto más fiables cuanto más sencillas sean. Una sección interpretada con multitud de fallas y compartimentada en muchos bloques con diferentes velocidades sólo puede clasificarse como dudosa, porque si el subsuelo fuera realmente así, o al menos parecido,



**Fig. 13.-** Ejemplo nº 2. Estudio de rellenos terciarios sobre un paleorrelieve metamórfico con objetivos de tipo hidrogeológico.

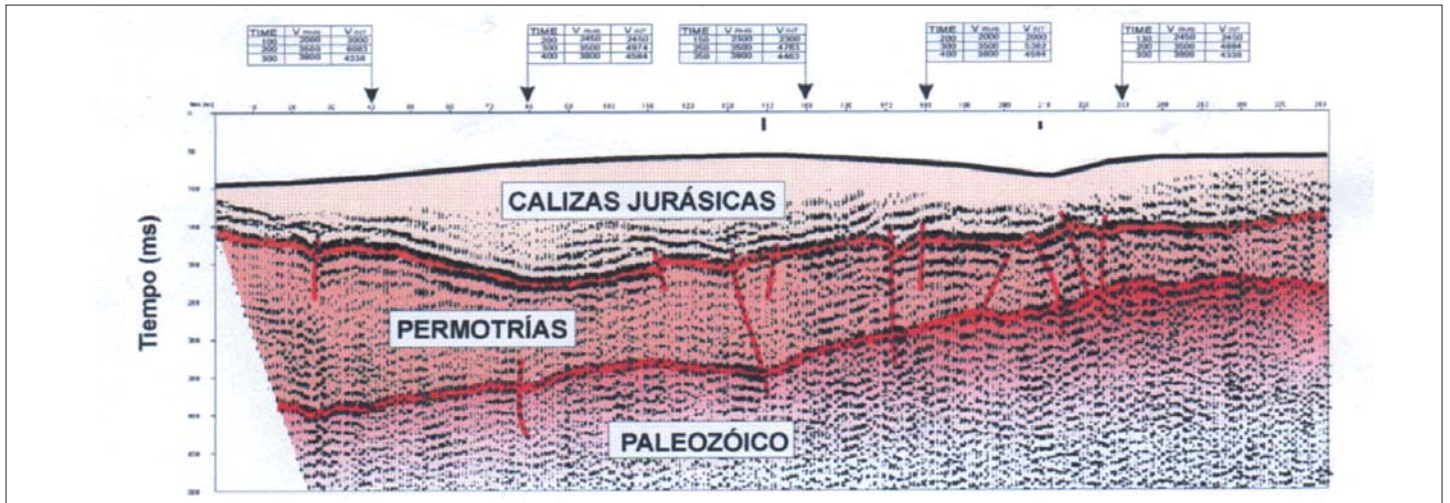


Fig. 14.- Ejemplo nº 3. Estudio del Permotriás bajo una potente cobertura de calizas.

los registros sísmicos presentarían tal complejidad que serían ininterpretables.

### Consideraciones finales

Aún en el caso más favorable de que a la finalización del procesado los resultados sean *vistosos*, porque se obtenga una sección sísmica con reflectores bien definidos, no es recomendable caer en la tentación de considerar que, necesariamente, tal sección sea una manifestación paralela y precisa de las características del subsuelo porque puede no ser así. El método *Sísmico de Reflexión* también tiene sus limitaciones y fuentes de error y una muy importante es la transformación de la sección sísmica (distancia-tiempo) en una sección distancia-profundidad comprensible en términos geológicos. Este proceso puede llevar a resultados erróneos por tres causas principales:

- El tratamiento de los datos sísmicos se realiza asumiendo un medio rocoso bidimensional cuando, en realidad, las reflexiones de las ondas de compresión se producen en un medio tridimensional. En consecuencia, no siempre sucede que las reflexiones provengan de puntos situados en la vertical de los geófonos, ya que también pueden producirse en puntos localizados lateralmente.
- Las variaciones laterales de velocidad a lo largo de cualquiera de las unidades

del subsuelo llevan a determinaciones falsas en su espesor al calcular la sección distancia-profundidad.

- No todas las reflexiones visibles en las secciones sísmicas corresponden a reflexiones reales, sino que algunas se generan de forma artificial durante el tratamiento matemático de los datos (artefactos de cálculo).

Pese a estas limitaciones, el método *Sísmico de Reflexión* es una herramienta geofísica capaz de aportar información muy detallada del subsuelo cuando se utiliza correctamente en la resolución de los problemas adecuados a sus fundamentos teóricos y condiciones operativas. Este uso correcto del método implica:

- Planificación de la campaña en función de las características geológicas de la zona de trabajo y objetivos a resolver.
- Empleo de la instrumentación adecuada a los objetivos del estudio.
- Selección justificada de la metodología de trabajo (número de canales, espaciados, *offset*, fuente de energía, etc) para cada caso.
- Los resultados de cualquier estudio deben incluir siempre la sección sísmica (distancia-tiempo) como documento básico. Además, se pueden añadir todas las interpretaciones geológicas que se considere pertinente, pero debe cumplirse en todo caso que los accidentes y unidades del subsuelo que se presenten

en la sección interpretada deben ser visibles sin ninguna ambigüedad en la sección sísmica. En caso contrario, tal interpretación es cuando menos cuestionable.

### Referencias

- Jacques JENNY. **Bases pratiques de la sismique reflexion haute résolution.** Agosto-97. Documento interno de la Sociedad GÉOLOGIE-GÉOPHYSIQUE.
- Society of Exploration Geophysicists. **GEOPHYSICS. Volumen 63, nº 4. Julio-Agosto 1998. Special Section. Shallow Seismic Reflection Papers.**
- J.A. HUNTER y S.E. PULLAN. **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. SAGEEPS'98.**
- Don W. STTEPLES. **Practical Aspects of shallow seismic reflection. Notes of a short course presented in London U.K. December-91.**