

PROSPECCION SISMICA EN TRES DIMENSIONES

Jorge García Marra

Buenos Aires, República Argentina

RESUMEN

Los renovados esfuerzos puestos en práctica en la década del setenta para la exploración de hidrocarburos, promovidos por el creciente valor de esas materias primas y hecho posible por el importante desarrollo producido en diversas ramas de la tecnología, particularmente la de las computadoras, dio lugar a la puesta en práctica de nuevos métodos de exploración. Uno de ellos es la prospección en tres dimensiones, en el cual en vez de registrarse a lo largo de una única línea sísmica, como tradicionalmente se procede, se registra a lo largo de varias líneas simultáneamente, efectuándose de hecho, una registración areal. Este procedimiento produce un conjunto de datos tridimensional o volumétrico que, apropiadamente procesado, permite superar algunas de las limitaciones del método sísmico convencional. El presente trabajo consiste en una breve descripción de la prospección en tres dimensiones y en la presentación de algunos resultados gráficos comparativos obtenidos por modelado y simulación digital.

ABSTRACT

The renewed efforts to search for oil and gas which began in the seventies primarily due to the increasing prices of these raw materials and made possible by important technological advances, particularly in the field of digital computing, produced various new exploration methods and techniques. One of these is the three-dimensional prospecting. In it, instead of the regular shooting along a line, a whole area is shot at the same time. This procedure produces data which has to be describe by three coordinates: time and two of position. After appropriate processing this kind of data allows to improve the conventional seismic shooting in various different circumstances. The present paper is a brief description of the 3D seismic shooting together with some illustrations produced by modelling and digital simulation which can give an idea of the kind of improvements one can expect 3D shooting to produce over the conventional one.

INTRODUCCION

Es habitual en ingeniería que los métodos empleados para resolver un problema particular sean el resultado de un equilibrio dinámico entre una variedad de factores, tales como el grado de desarrollo tecnológico disponible, el costo de operaciones a realizar, el grado de precisión deseado, etc.

La exploración sísmica como rama de la ingeniería no escapa a esa ley; lo que se pretende no es obtener una respuesta totalmente precisa sino, solamente, una respuesta satisfactoria, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Esta ley de adopción de métodos o técnicas adaptadas a las posibilidades tecnológicas y a las condiciones económicas conduce habitualmente, en la raíz científica de esas técnicas, a considerar concepciones más o menos simplificadas de la realidad.

En lo que concierne a la prospección sísmica de hidrocarburos se produjeron en la década del setenta dos variaciones importantes que dieron como resultado la introducción de una serie de métodos novedosos y relativamente más caros. Una de estas alteraciones, de índole económica, consistió en la brusca modificación de las condiciones de oferta de petróleo ocurridas a partir de 1973 y que dió como resultado un incremento muy importante en el precio de esa materia prima y promovió la necesidad de refinar las técnicas de exploración empleadas en los grandes centros consumidores de petróleo y gas. La segunda variación fué de índole tecnológica y consistió en la rapidísima evolución de los computadores digitales que adquirieron en pocos años una versatilidad y capacidad de cálculo y de manejo de información previamente insospechados.

Una de las varias técnicas introducidas como corolario ha sido, justamente, la prospección sísmica en tres dimensiones.

SIMPLIFICACIONES DE LA REGISTRACION CONVENCIONAL

Convencionalmente en sísmica se trabaja efectuando una registraci3n a lo largo de un tendido lineal de receptores. En el caso en que la geometría del subsuelo no varíe en sentido perpendicular a la línea de registraci3n obtendremos una respuesta sísmica exacta porque los receptores sólo registrarán arribos sísmicos con trayectorias contenidas en un plano vertical que pasa por la línea. El procesamiento convencional, basado en la suposición de arribos exclusivamente con trayectorias contenidas en ese plano vertical, podrá reconstruir adecuadamente la sección de profundidad. En la medida que esta hipótesis de invariancia de la estructura en sentido perpendicular pierde validez se producirán arribos a los receptores cuyas trayectorias no están necesariamente contenidas en el plano vertical. El procesamiento convencional no puede detectar qué arribos son laterales y cuales no lo son; de esta manera, la señales de procedencia lateral, que contienen informaci3n genuina del subsuelo son consideradas como alg3n tipo de ruido.

Una manera formalmente más elegante de justificar estos argumentos es la

siguiente: La explosión generada al detonar una carga o al producir una vibración con generadores mecánicos de energía produce un frente de onda que es rigurosamente tridimensional, esto es, su generación, propagación y reflexión se desenvuelve a lo largo de las tres dimensiones del espacio físico del subsuelo. La recepción de ese frente en superficie por medio de los receptores puede considerarse como un muestreo de la onda ya que ella afecta a todos y cada uno de los puntos de la superficie y, sin embargo, no se registra en todos ellos sino en un número discreto de puntos separados una distancia entre sí. Si la distancia entre los receptores es d , podemos hablar de una frecuencia espacial de Nyquist f_N , dada por: $f_N = 1/2d$; la inversa de esta frecuencia será la mínima longitud de onda que se puede definir con ese intervalo de grupo:

$$\lambda_m = 2d \quad 1.1$$

Cada interfase geológica que produce una respuesta sísmica se la puede idealizar como una superficie geométrica, si bien, desde luego, la transición geológica real de un tipo de roca a otro demanda una cierta distancia. Por otra parte, teniendo en cuenta que el pulso sísmico es de banda limitada y la resolución vertical depende de la frecuencia, el espesor mínimo detectable es siempre de varios metros. Desde el punto de vista sísmico, entonces, una interfase de variación de impedancias acústicas no es una zona de variación abrupta sino que, por el contrario, es una zona de transición gradual. La idealización que hacemos de suponer la interfase como una superficie geométrica definida es para simplificar su descripción. Esta interfase, ahora como superficie geométrica, se la podrá representar por una ecuación del tipo $z=f(x,y)$ en el espacio de tres dimensiones. Esta superficie, como función de dos variables tendrá una transformada de Fourier (en la medida que cumpla ciertas condiciones que, de hecho, suponemos que las cumple), expresable en la forma:

$$f(k_x, k_y) = \iint f(x,y) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy \quad 1.2$$

Las longitudes de onda en cada dirección se relacionan con los respectivos números de onda según la relación habitual $\lambda = 2\pi/k$. Como ya vimos previamente, la mínima longitud de onda que podemos representar está relacionada con el intervalo de grupo según la relación 1.1; esto quiere decir que aquellas estructuras que varíen tan rápidamente que su desarrollo de Fourier contenga términos con longitudes de onda menores que $2d$ no van a poder ser apropiadamente representadas por esa prospección sísmica, o, lo que es lo mismo, la resolución depende del intervalo de grupo.

La prospección en tres dimensiones se basa en un muestreo areal o completo del frente de onda, no exclusivamente a lo largo de una línea como ocurre en sísmica convencional. En este último caso la manera de registración podemos visualizarla como un caso límite de la registración areal, en la cual la separación d_y entre grupos de receptores en la dirección perpendicular a la línea es infinita: $d_y = \infty$, (vale decir, no hay receptores) y, consecuentemente, la correspondiente fre-

cuencia espacial máxima es nula. La estructura, entonces debe ser invariable en esa dirección.

En la práctica, la condición estricta de invariabilidad en el sentido perpendicular a la línea de registraci6n, condici6n que, desde luego, nunca es encontrada, se reemplaza por el siguiente criterio: que la estructura sea relativamente invariante en el sentido perpendicular en una distancia del orden de varias longitudes de onda de la se1al sismica a la frecuencia predominante. En las zonas en que esta 6ltima condici6n no se cumpla podremos esperar que la prospecci6n en tres dimensiones produzca mejores resultados que la convencional.

ASPECTOS BASICOS DE LA PROSPECCION 3D

Una registraci6n lineal produce un conjunto de datos que podemos describir como bidimensional, ya que un registro, por ejemplo, queda descrito por las coordenadas de posici6n y tiempo de arribo. Una prospecci6n 3D produce un conjunto volumétrico de datos, es decir, informaci6n de amplitud sismica caracterizada por tres coordenadas: tiempo de arribo y las dos de posici6n. En el caso convencional con recubrimiento múltiple a cada estaca le corresponde un n6mero de trazas, cada una con un desplazamiento distinto. En 3D a cada estaca tambi6n le corresponden varias trazas pero con distintos desplazamientos tanto en la direcci6n x como en la y. De esta manera vamos a tener dos velocidades aparentes con que la informaci6n sismica recorre el tendido: una en la direcci6n de cada coordenada. Los pasos de procesamiento son en general hom6logos de los correspondientes a 2D. La geometría de la línea presenta la dificultad práctica de tener que manejar dos coordenadas superficiales. Un aspecto interesante lo presenta la manera como se ubica la informaci6n que corresponde a una reflexi6n sismica en un conjunto de trazas correspondientes a un PCP (un "gather"). En 2D la reflexi6n aparece con la forma aproximada de una hipérbola cuya ecuaci6n es $t(x)^2 = t(0)^2 + x^2/v^2$, en 3D la se1al de reflexi6n se va a ubicar sobre un hiperboloide como muestra la Fig.1 y cuya ecuaci6n ser6 del tipo:

$$t(x)^2 = t(0)^2 + x^2/v_x^2 + y^2/v_y^2 \quad 1.3$$

si bien en la práctica se toma $v_x = v_y$ resultando entonces un hiperboloide de revoluci6n. La correcci6n din6mica se calcula a partir de ese hiperboloide, enderezando las reflexiones de manera que se ubiquen sobre el plano tangente al hiperboloide en su vértice superior. Los análisis de velocidad se realizan en una malla que cubra toda el área de registraci6n, la velocidad apropiada para cada PCP se determina mediante una interpolaci6n lineal areal entre los muestreos más cercanos a ese PCP.

La migraci6n de un conjunto volumétrico de datos es una de las etapas de procesamiento que evidencia diferencias significativas con respecto al procesamiento de informaci6n convencional. Conceptualmente en uno y otro caso los programas est6n basados en los mismos principios, sin embargo, la posibilidad de poder in-

cluir información lateral conduce a una diferencia cualitativa importante entre el procesamiento 2D y el 3D. La migración puede considerarse en cualquier caso un proceso inverso del modelado. Como es sabido en la interpretación que se hace de una sección es muy difícil saber con total certeza si las conclusiones obtenidas son coincidentes con la realidad geológica, en otros términos, no hay posibilidad de convalidar los resultados obtenidos. Por esa razón, para poder efectivamente tener un control de los resultados de interpretación se utiliza el modelado de secciones sísmicas.

CONSTRUCCION DE MODELOS Y PROSPECCION 3D

Nos parece conveniente presentar algunos ejemplos de modelos de secciones sísmicas porque son, justamente por su naturaleza que permite conocer el punto de partida, los que mejor pueden ilustrar visualmente las diferencias entre la prospección 2D y 3D. Podemos, en general, hablar de dos tipos de construcción de secciones sintéticas: la técnica de modelos a escala y la simulación digital. En ambas se parte de una cierta configuración propuesta para el subsuelo y se obtiene una sección sísmica. En el caso de modelos a escala la manera de hacerlo es física, vale decir, ocurre una verdadera propagación de ondas pero, en vez de hacerlo en la tierra, ocurre en el recinto de un modelo a escala cuyas dimensiones son tales que cabe en un laboratorio. En la Fig. 2 hemos detallado los elementos principales para llevar a cabo uno de estos experimentos. Sobre una mesa se ubica una plataforma que es deslizable por un mecanismo de correa operado por una manivela. En la plataforma se coloca el modelo a escala de interés, construido con cartón y madera. Suspendidos sobre la mesa se coloca un generador de chispa acústica y un micrófono. La forma de operación es la siguiente: se produce una chispa y se obtiene un registro, luego, se mueve la plataforma con el modelo a escala una distancia prefijada, se obtiene otro registro y se continúa hasta que la plataforma haya efectuado todo su recorrido. Las distintas trazas para cada posición se compaginan luego en forma de registro sísmico. El proceso es similar al real, solo que en vez de mover la línea lo que se mueve es la estructura. La chispa produce una onda acústica en el aire que se refleja sobre la estructura a escala, la onda reflejada es recogida por un micrófono situado muy próximo al generador de chispa.

Para que el proceso ondulatorio del modelo a escala sea efectivamente un símil del real es preciso que las dimensiones relativas de la estructura respecto de la longitud de onda sean las mismas, esto es, si λ_R y λ_M son las longitudes de onda en la realidad y en el modelo y d_R y d_M las dimensiones características en las estructuras respectivas, necesitamos que:

$$d_R / \lambda_R = d_M / \lambda_M \quad 1.4$$

para estar seguros que el proceso ondulatorio en el modelo a escala es homólogo del real.

Si, por ejemplo, tomamos como valores representativos para el caso real un

modelo que posee una velocidad de propagación $c_R = 3000$ m/seg y una frecuencia $f_R = 300$ Hz la longitud de onda correspondiente será $\lambda_R = 100$ m; por otra parte, si tomamos como dimensión característica $d_R = 800$ m (para un anticlinal, por ejemplo) vamos a obtener la relación:

$$d_R / \lambda_R = 800\text{m}/100\text{m} = 8$$

En el modelo a escala el anticlinal tiene una dimensión de unos 10 cm, entonces:

$$d_M / \lambda_M = 8$$

de donde concluimos que $\lambda_M = 1,25$ cm. Como la onda se propaga en el aire cuya el módulo es $c_M = 330$ m/seg y su frecuencia:

$$f_M = c_M / \lambda_M = 26.400\text{Hz}$$

De manera que las frecuencias involucradas en el modelo a escala son del orden de Hz: 26000. Por otro lado, si T_R y T_M son los periodos de las ondas que se propagan en el subsuelo y en el modelo respectivamente, tenemos:

$$T_R / T_M = f_M / f_R = 30000/300 = 1000$$

es decir, las escalas de tiempo van a ser distintas; si el tiempo real es del orden de los ms, en el modelo su orden de magnitud será de los μ seg. Hilterman (4) ha utilizado como factores de escala 12000 para las longitudes y 1000 para los tiempos.

La manera que se utiliza para registrar cada traza es la habitual para estos casos que, básicamente, consiste en lo siguiente: La señal del micrófono es debidamente amplificada y enviada a la entrada vertical de un osciloscopio. El barrido horizontal, por su parte, se ajusta de manera tal que el tiempo que demora el haz en atravesar la pantalla sea un poquito superior que el que media entre el disparo de la chispa y la llegada de la última parte de la infonación. El barrido se sincroniza con la emisión de la chispa. En el frente de la pantalla está colocada una película fotográfica, herméticamente adosada y con el obturador abierto; esta disposición permite obtener una fotografía de la traza completa en todo el lapso de tiempo de interés.

La técnica de modelos a escala comenzó a utilizarse tempranamente en la exploración geofísica. Ya Nieber en 1937, (5) adaptó una técnica utilizada por arquitectos en la construcción de recintos acústicos para analizar la respuesta sísmica de superficies que presentaban fallas o plegamientos. En sí mismo, el método consistía en crear un frente de onda abrupto mediante la descarga de una chispa en aire, esperar lo suficiente como para que el frente se reflejara en un contorno sólido que semejaba una superficie con fallas o plegamientos y entonces producir un destello luminoso que, luego de atravesar el campo reflejado caía sobre una placa fotográfica. La imagen obtenida mostraba la posición del frente de onda reflejado. La formación de la imagen se basaba en la refracción experimentada por el rayo luminoso al atravesar zonas de aire de distinta densidad, estando la diferencia de densidades causada justamente por el peso del frente de onda. Otros autores que han empleado esta técnica han sido Anyina (1) que construye modelos a escala con co-

nes, etc., como para producir una sección en profundidad. En modelado, como acabamos de ver, se procede al revés, se parte de una sección de profundidad y se trata de generar una sección de tiempo. Conceptualmente migración y modelado se basan en una misma descripción matemática a partir de la ecuación de ondas en general.

Otro aspecto que incide preponderantemente en la simulación digital de secciones y que aparece como una variable del problema es el número de dimensiones de la estructura que nos proponemos simular. Podemos considerar a la estructura de partida, en grado creciente de complejidad, como unidimensional, bidimensional o tridimensional. La simulación unidimensional fué introducida por Peterson en 1955 y se conoce con el nombre de sismograma sintético.

Nos interesaba presentar estos elementos de construcción de secciones sintéticas para mostrar, gráficamente, algunas diferencias que produce la consideración de la tercera dimensión. Ya sea mediante la utilización de modelos a escala o por simulación digital podemos obtener secciones sintéticas razonablemente representativas del fenómeno sísmico real pero con la ventaja de conocer la estructura de partida.

Las Fig. 3 a 7 muestran la estructura que oficia de modelo y los resultados de migrar en forma convencional y en forma 3D, teniendo en cuenta la información lateral, un conjunto volumétrico de datos obtenidos a partir simulación digital en el dominio de la frecuencia; resultados éstos obtenidos por A. Herman et al, (3).

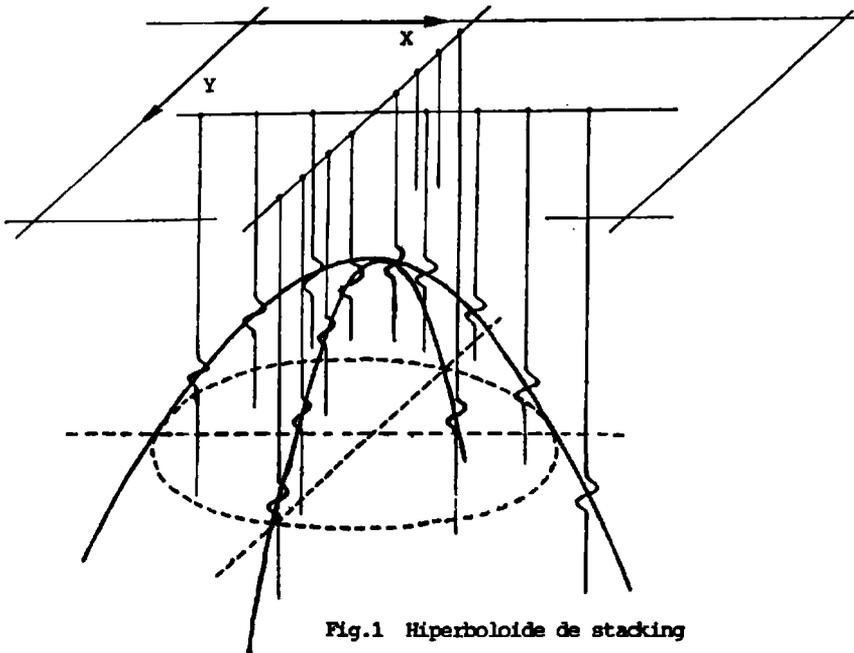


Fig.1 Hiperboloide de stacking

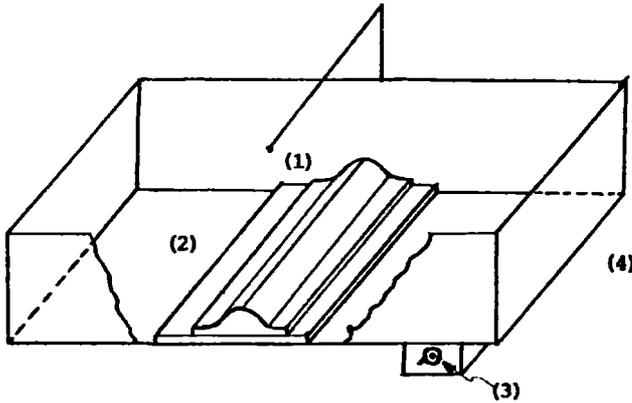
bre y acero y plexiglas; Woods (6) que ensaya un modelo acústico de tipo unidimensional constituido por un caño de dos pulgadas de espesor y 100m de largo con un parlante y un micrófono en un extremo. La impedancia acústica, en este caso, es función del área del tubo de manera que variando apropiadamente esa área simula los distintos coeficientes de reflexión. W. French (2), utilizó un modelo de tipo marino y produjo excelentes resultados en cuanto a la comparación de los modos 2D y 3D de prospección.

Las figuras 8 a 11 muestran un ejemplo de resultados obtenidos mediante la utilización de modelos a escala. El modelo a escala utilizado es de tipo marino, vale decir, los materiales que ofician de estructura para generar las reflexiones se encuentran sumergidos en un tanque con agua. La figura 11 muestra una vista desde arriba-en planta-, y un corte vertical que permiten apreciar la forma geométrica de la estructura utilizada. A poca distancia de la superficie del agua se generan ondas acústicas que se reciben también en el agua, tratando que el dispositivo semeje la disposición que se adopta en la sísmica real. Los factores de escala utilizados han sido de 5000 para los tiempos y 12000 para las distancias. La figura 8 muestra el resultado de registrar a lo largo de la línea 26, en la que pueden notarse las complicaciones propias de una estructura como la utilizada; la figura 9 es una reproducción de una migración convencional utilizando solamente información dentro de la línea, es decir, migración 2D. Como puede verse la reconstrucción de los eventos es incompleta. La última figura, la 10, muestra una migración 3D en la que puede apreciarse la mucho mejor definición de los eventos y un mejor posicionamiento de los mismos. Este modelo a escala fue desarrollado por Horizon Exploration Ltd. y en el breve espacio que permite este trabajo no podemos lamentablemente, extendernos a una consideración más detallada de la manera en que fueron realizadas las experiencias, que creemos sumamente interesantes por las posibilidades de penetrar en la comprensión del fenómeno sísmico que brindan.

La otra manera de generar secciones sintéticas es mediante la simulación digital. Como su nombre lo indica es un proceso de simulación, no hay ninguna propagación ondulatoria real. Lo que se hace es partir de una descripción matemática del fenómeno ondulatorio, basada habitualmente en la ecuación de ondas y proceder a calcular numéricamente una solución de ese problema matemático con el concurso de una computadora digital. El nivel de complejidad que encontramos en esa descripción matemática es variable, en un rango que abarca desde el concepto geométrico de rayo en el caso más sencillo hasta la utilización completa de la ecuación de ondas. En simulación digital, entonces, se propone una estructura o sección en profundidad y se construye una sección de tiempo a partir de la resolución numérica de un sistema de ecuaciones.

El modelado de secciones sintéticas por simulación digital puede considerarse un proceso inverso de la migración; en efecto, en ésta última se parte de una sección sísmica de tiempo y se pretende reubicar los eventos, eliminar difraccio-

Fig.2 Esquema del dispositivo utilizado por Hilterman.



- (1) Micrófono y generador de chispa
- (2) Mesa deslizable con modelo
- (3) Manivela para deslizar modelo
- (4) Protección de vidrio

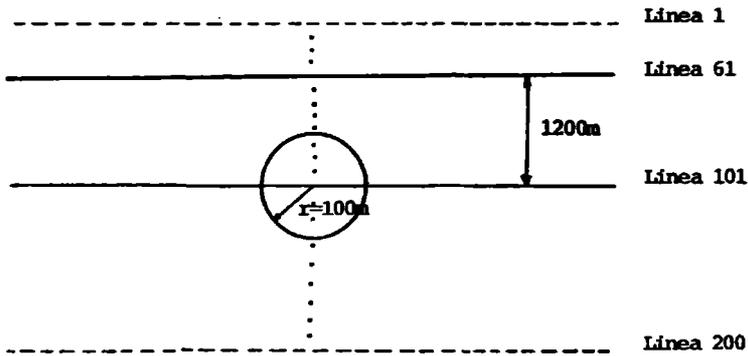


Fig.3 Vista en planta de la estructura para simulación.

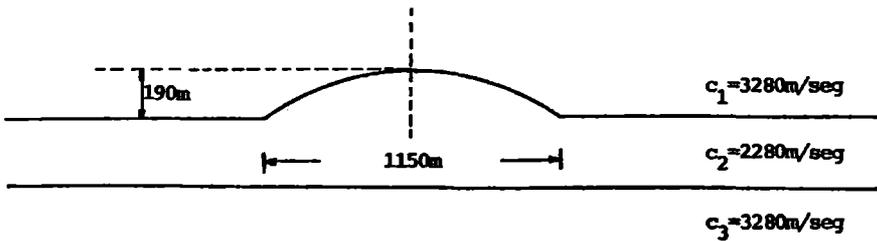


Fig.4 Vista en corte de la estructura para simulación

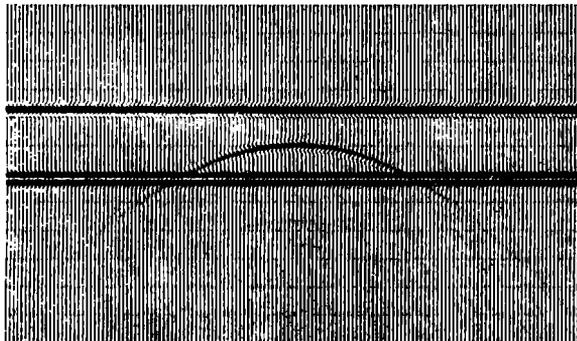


Fig.5 Linea 61 obtenida por simulación digital.

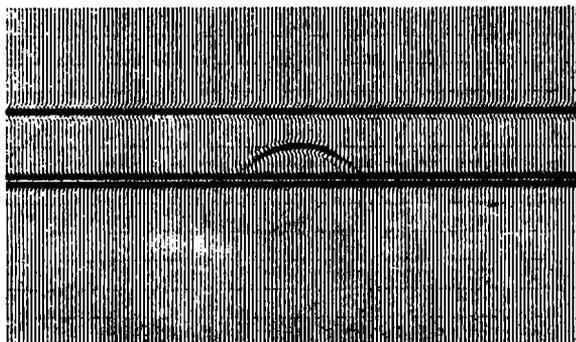
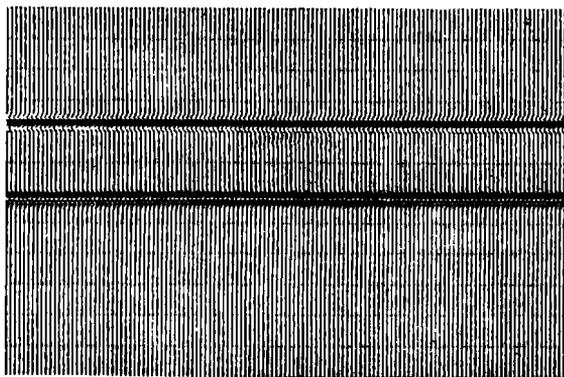


Fig.6 Linea 61 migrada 2D. Obsérvese la presencia de información lateral.



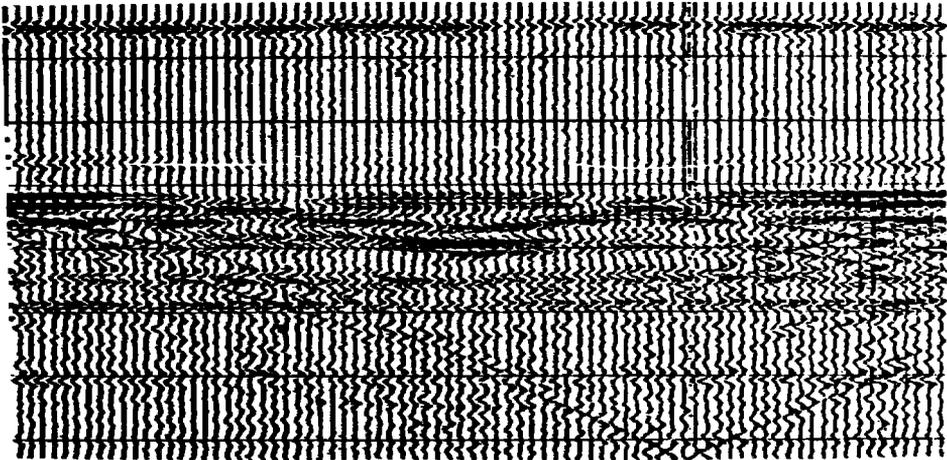


Fig. 8 Registración a lo largo de la línea 26

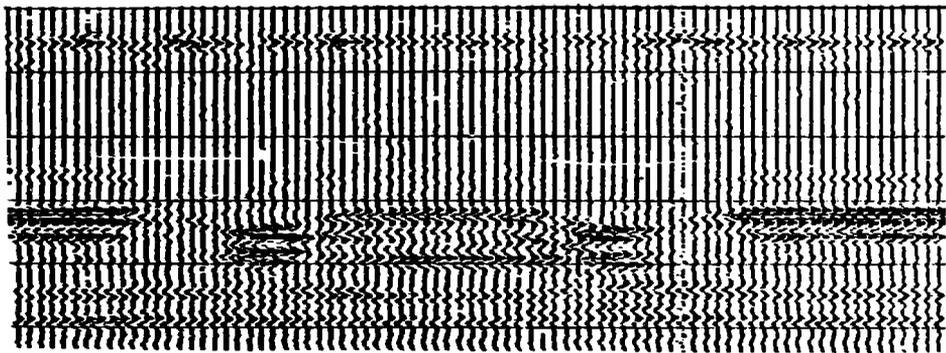


Fig. 9 Migración 2D de la anterior.

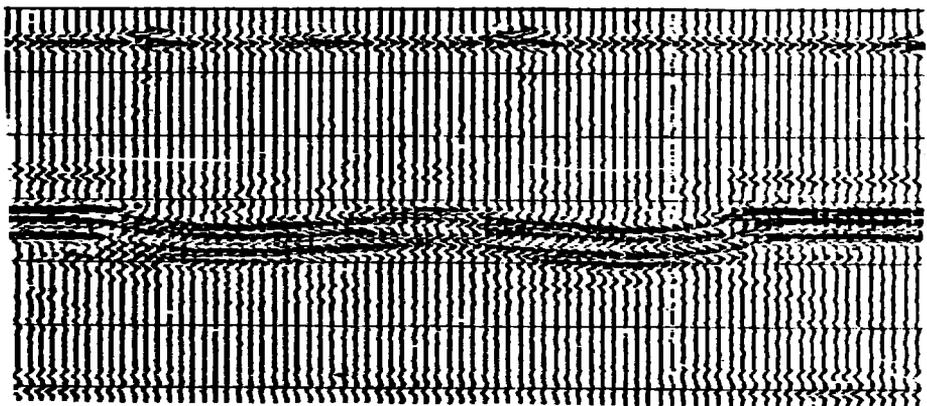


Fig. 10 Migración 3D de la línea 26.

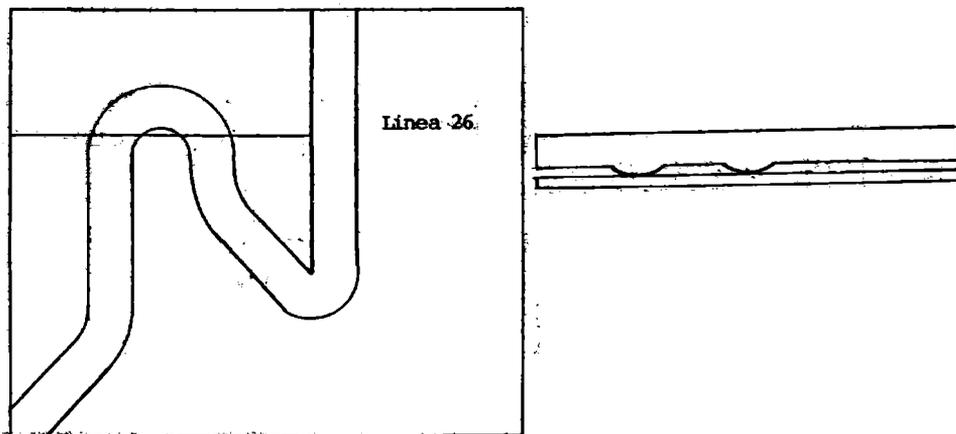


Fig.11 Vista en planta y corte del modelo.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Angona F., Two Dimensional Modelling and its Applications, Geo. Vol. 25, N°2, p. 468
- (2) French W., Two Dimensional and Three Dimensional Migration, Geo. Vol. 39, N°3, p. 265
- (3) Herman A. et al., A Fast 3D Modelling Technique and Fundamentals of 3D Frequency Domain Migration. Trabajo presentado en la 48 reunión de la SEG.
- (4) Hildebrand F., Three Dimensional Seismic Modelling, Geo. Vol. 35, N°6, p. 1020
- (5) Rieber F., Visual Presentation of Elastic Wave Patterns Geo. Vol. 1, N°2, p. 196
- (6) Woods J.P., A Seismic Model Using Sound Waves in Air Geo. Vol. 40, N°4, p. 593