



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ING.

**Algunos Aspectos del Procesado Digital de Datos
Sismicos de Reflexión**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A N:

Rodolfo Gabriel Camacho Velázquez

José Luis Sánchez Bujanos

24
3

MEXICO, D. F.

1979



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE :

	págs.
I. INTRODUCCION .	..... 1
II. PROCESO PREVIO.	
II.1. Editado	..... 4
II.2. Preparación de la Información	..... 7
II.3. Cálculo de Correcciones Estáticas	..... 8
III. DECONVOLUCION.	
III.1. Ruido	..... 12
III.2. Filtros	..... 16
III.3. Desarrollo Matemático	..... 19
IV. ANALISIS DE VELOCIDAD, CORRECCIONES DINAMICAS Y APILAMIENTO.	
IV.1. Análisis de Velocidad	..... 39
IV.2. Correcciones Dinámicas	..... 56
IV.3. Apilamiento	..... 58
V. CORRECCIONES ESTATICAS RESIDUALES .	
V.1. Estimación de Tiempos de Desviación de Estáticas	..... 67
V.2. Evaluación de Estáticas	..... 70
V.3. Aplicación de Estáticas Residuales	..... 76

	págs.
VI. FILTRADO EN FRECUENCIA .	..... 78
VII. MIGRACION .	..... 93
VII.1. Migración en el dominio del tiempo	..... 96
VII.2. Migración en el dominio de la frecuencia	..... 116
VIII. CONCLUSIONES .	..... 125

I. INTRODUCCION .

La exploración de petróleo y gas, una actividad vital de la industria petrolera, depende esencialmente del proceso sísmico que proporciona los datos básicos, de los cuales las formas, posiciones y relaciones estructurales de las pequeñas de roca del subsuelo son determinadas.

El método sísmico de exploración tiene sus bases en la teoría de comunicaciones, la cual fue desarrollada para resolver algunos problemas de teléfono, radio, radar y comunicación sonar. Cada uno de estos sistemas consiste básicamente de una fuente de información, un medio de transmisión y un receptor. En una forma similar el método sísmico puede ser considerado como un proceso de comunicación. Una señal creada por una explosión de dinamita ó por un impacto es transmitida a través de la tierra (medio), en muchas trayectorias y con muchos cambios de amplitud y fase, y es finalmente detectada por un sísmodetector (receptor). En los sistemas de teléfono y radio la señal de importancia es la forma de esta, mientras que en el radar, sonar y sistema sísmico lo más importante es el tiempo de viaje de la señal. Sin embargo, como en todos los sistemas, antes que el tiempo de viaje pueda ser determinado, la señal debe ser identificada dentro del ruido. El ruido es todo aquello que no es señal deseada, es decir todo aquello que se encuentra mezclado con la señal, y que no está representando estructuras del subsuelo, este es : a).- todo aquello que está generado por la fuente sísmica,

y que viaja por trayectorias que no son las deseadas, b).- todo aquello generado por otras fuentes, y c).- todo aquello que es adherido a la señal sísmica durante la detección, grabación y procesamiento de los datos.

El problema ahora es identificar las señales deseadas en presencia de ruido. Esto es conseguido mediante operaciones que maximizan la relación señal a ruido.

Existen básicamente dos maneras de hacerlo : (a) dirigiendo las operaciones de campo de forma que un mínimo de ruido sea generado, ó cancelando el ruido generado durante el proceso de grabación, y (b) procesando los datos grabados para eliminar ó reducir el ruido existente en las grabaciones.

Con el advenimiento de la grabación magnética, ha sido posible reproducir las señales sísmicas grabadas así como lograr una mayor flexibilidad en el procesamiento. El procesamiento incluye : composición de punto de reflejo común, deconvolución, filtrado en frecuencia, etc., todas estas técnicas ayudan a mejorar la relación señal a ruido, y auxilian al intérprete a obtener más información de los datos sísmicos.

Existen dos maneras de obtener y representar las datos sísmicos :

- 1.- Como una curva continua representando la amplitud de la señal en función del tiempo (forma analógica), ó
- 2.- Como una serie de números, cada uno de los cuales representa la amplitud de la señal a un valor específico de tiempo (forma digital).

En este trabajo se tratará únicamente con señales digitales, lo

cual no implica una limitación para el procesamiento de datos que hayan sido grabados en campo en forma analógica, puesto que estas señales pueden ser digitalizadas para su proceso.

Desde el punto de vista de este escrito, el procesamiento digital es considerado como la aplicación de ciertas operaciones matemáticas al procesamiento de datos sísmicos. Entre estas operaciones es de vital importancia el filtrado, el cual es más efectivo en el mejoramiento de la relación señal a ruido que los filtros sísmicos analógicos convencionales.

En sismología de reflexión, el producto final del procesamiento de datos es una sección sísmica que es análoga a una sección geológica. Las horizontes reflectores son visibles sobre la sección sísmica y el intérprete puede más fácilmente observar las estructuras geológicas del subsuelo.

II. PROCESO PREVIO.

Los datos edicionales de campo consisten de reportes del observador, notas de topografía, mapas, etc. Los reportes del observador dan información acerca de las trazas síncricas, como son trazas muertas e invertidas, puntos de tiro desplazados y puntos no fijos, etc. Esta información junto con los datos topográficos es necesario para hacer un arreglo adecuado de la información básica de campo mediante procesos previos como son el editado, preparación de la información y correcciones estadísticas.

II.1. Editado.

Debido a la carencia de memoria de los equipos de grabación, los cintas de campo están en forma multiplexada, esto es, vienen grabadas primeramente las primeras muestras de todas las trazas, posteriormente las segundas muestras y así sucesivamente. El proceso de editado desmultiplexa la información, lo cual se refiere al ordenamiento de las muestras de la traza uno, posteriormente el ordenamiento de las muestras de la traza dos y así hasta completar las N trazas que componen el punto de tiro. Este ordenamiento es necesario para tratar la información en procesos posteriores.

Otra parte importante de este proceso es la normalización de la amplitud de las trazas síncricas debido al decaimiento exponencial

que estas sufren en función del tiempo por efectos de absorción de la tierra y de dispersión de la energía sísmica. Tal normalización se efectúa multiplicando las muestras de la traza por la curva inversa de decaimiento. La curva de decaimiento exponencial es obtenida mediante una aproximación funcional (exponencial) de los picos de amplitud de la traza. El proceso de normalización de las trazas es ilustrado en la figura N.1.1.

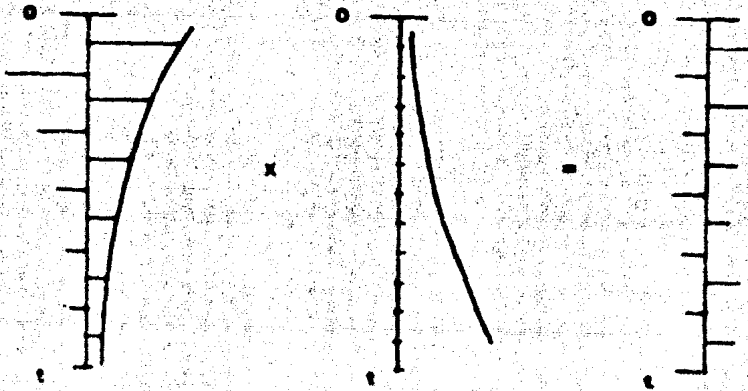


Fig. N.1.1

Además de las dos funciones anteriores, el proceso de editado suma algebraicamente (muestra a muestra) trazas en el caso de trabajo marino. La suma de trazas es efectuada con la finalidad de reforzar la señal, ya que el agua presenta gran absorción de la energía sísmica y es poca la que penetra al interior del fondo marino.

En trabajo terrestre esta suma es requerida únicamente cuando se utilizan fuentes como vibratoris ó dinamos. En el caso de vibratoris la suma requerida no es simplemente algebraica, sino que involucra la correlación (concepto que se trata en el capítulo III), ya que los vibratoris trabajan con un hazido de frecuencias. Cabe hacer notar que en este tipo de trabajo terrestre, las fuentes (vibratoris ó dinamos) no son lo suficientemente potentes como para que con un solo vibrado (hazido de frecuencias), ó con un solo impacto (dinamos) se obtengan registros de buena calidad.

Para lograr una suma de trazas más efectiva ó más representativa, las trazas a sumar son pesadas mediante la siguiente expresión: (*)

$$W_j = \frac{\sum_{i=1}^N T_{ij}^2}{N} \dots\dots\dots(II.1.1)$$

donde: T_{ij} es el valor de la muestra i de la traza j ,
 N es el número de muestras, y
 W_j es el peso de la traza j .

Una vez obtenidas las pesos se efectúa la multiplicación de cada traza por su peso y estas son sumadas. La traza resultante es dividida por el promedio de los pesos, y así se logra que la traza que tenga mayor peso tenga mayor influencia sobre la traza resultante.

* Ref. 1.

II.2. Preparación de la información.

Este proceso se efectúa como una continuación del editado, ya que también realiza operaciones encaminadas a la preparación ó arreglo de la información de campo para que esta pueda ser procesada en los sistemas digitales. Solo que en este caso se trata de edicionar información que será requerida posteriormente.

Dentro de los procedimientos que aquí se ejecutan están el arreglo geométrico del tendido, cálculo de distancias de punto de tiro a receptores y distancias entre estos, así como las elevaciones de las estaciones. Además ayuda a volver a su posición exacta las trazas invertidas y cura las trazas muertas. Parte de esta información es utilizada posteriormente en el cálculo de correcciones estáticas y dinámicas.

Un aspecto no menos importante en el arreglo de la información es el agrupamiento de trazas dentro de familias de punto de reflejo común (FRC), lo cual se refiere al arreglo consecutivo en grupos de trazas que hayan registrado un mismo punto en el subsuelo, aunque sus trayectorias hayan sido diferentes. Esta técnica de agrupar y posteriormente sumar trazas de FRC ha evolucionado notablemente el procesamiento de datos sísmicos, pues con ello se logra reforzar las señales deseadas y eliminar el efecto de señales provocadas por ruido aleatorio.

El número de veces que se registra un punto en el subsuelo depende de la posición del punto de tiro y receptores, y de la frecuencia de -

los puntos de tiro con respecto a las estaciones, como se ilustra en la fig. 11.2.1.

11.3. Cálculo de Correcciones Estáticas .

Antes de que las trazas de PRC sean apiladas deben ser corregidas por cambios en tiempo causados por diferencias en elevación de la superficie y por diferencias en espesor y velocidad de la capa intemperizada (capa de baja velocidad). Tales correcciones son llamadas "estáticas" a causa de que el cambio en tiempo aplicado es constante para la traza entera. La traza como un todo es movida hacia arriba ó hacia abajo en tiempo. Los datos deben ser corregidos también por diferencias en tiempo causadas por diferencias en las distancias entre la fuente y receptores. Tales correcciones son llamadas "dinámicas" y serán analizadas posteriormente .

La técnica básica para las correcciones estáticas es reducir los datos a un nivel de referencia cambiando los tiempos de viaje calculados de la fuente al nivel de referencia y del receptor al mismo.

La figura 11.3.1 muestra una exploración con dinamita donde las trazas son grabadas cada estación con puntos de tiro cada cuatro estaciones. En la figura se observa la capa de intemperismo (capa cercana a la superficie), cuya velocidad está típicamente entre 600 m/seg. y 1700 m/seg. y cuyo espesor generalmente está comprendido entre los 3 m y 150 m. Para este mismo caso el tiempo de pozo (t_p) es registrado dando una medida direc

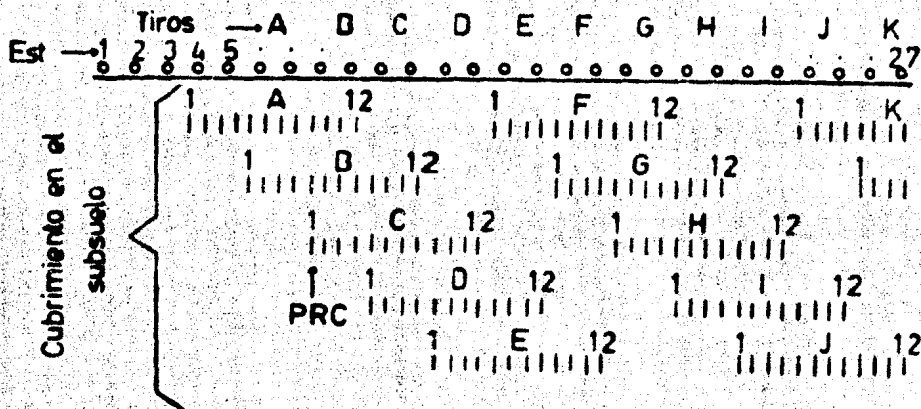


Fig. II.2.1.

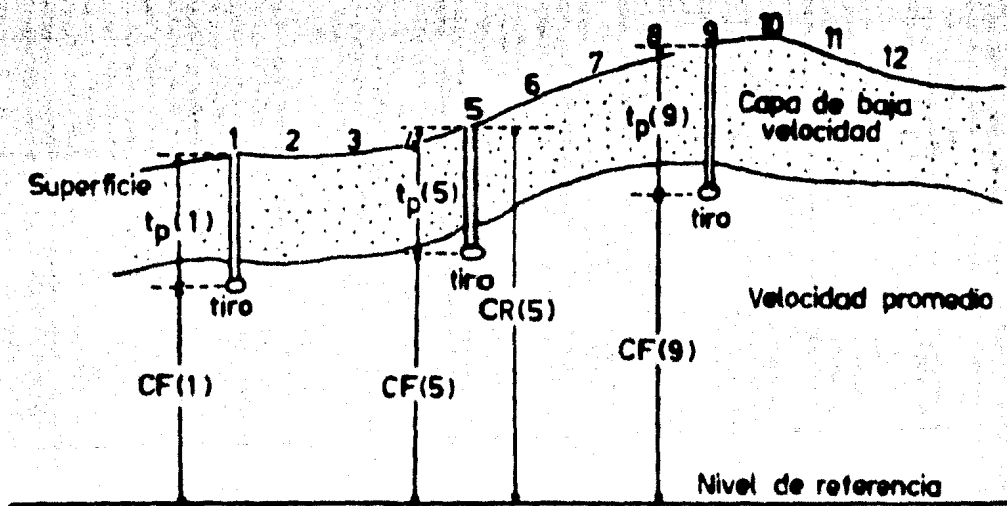


Fig. II.3.1.

te del tiempo de viaje cerca de la superficie.

La corrección estática consta de dos partes: la corrección de la fuente (CF) y la corrección del receptor (CR). La corrección de la fuente ó tiro no es efectiva por la capa de baja velocidad porque la carga está enterrada debajo de esta. Para un tiro en la estación 1, la corrección es:

$$CF(1) = \frac{\text{Elevación Nivel de Referencia} - \text{Elevación del tiro (en 1)}}{\text{Velocidad promedio al nivel de referencia}}$$

donde la elevación del tiro en 1 es la elevación de la estación en 1 menos la profundidad del pozo.

La corrección del receptor (CR) para un arreglo en la estación 5 es el tiempo de viaje total de la superficie al nivel de referencia.

De la misma manera que la CF, la CR puede ser también negativa ó positiva dependiendo de si el nivel de referencia está abajo ó arriba del tiro. Si adaptamos la corrección que el tiempo de pozo (t_p) es un número negativo, entonces:

$$CR(5) = CF(5) + t_p(5)$$

y la corrección estática total (CT) para una traza tirada en la estación (1) y grabada en la estación 5 es:

$$CT(1-5) = CF(1) + (CF(5) + t_p(5)) = CF(1) + CR(5)$$

En general entonces para una traza tirada en la estación X y grabada en la estación Y, la corrección total CT (X-Y) es:

$$CT (X-Y) = CF (X) + CR (Y)$$

Para las tramas grabadas entre tiros, la corrección de gaf fono debe ser interpolada. Esto se efectúa interpolando profundidades de pozo para calcular una CF hipotética para esa estación e interpolando tiempos de - pozo. Esto, en efecto crea un tiro interpolado en la estación. Por lo tanto, la corrección de gaffono en la estación Z localizada entre tiros es :

$$CR (Z) = CF (Z) + t_p (Z)$$

dado :

$$CR (Z) = \frac{\text{Elev. nivel de Ref.} - (\text{Elev. de la Est. (Z)} - \text{Prof. de pozo (Z)})}{\text{Velocidad promedio}}$$

La corrección total, CT, es entonces dada por :

$$CT (X-Z) = CF (X) + CR (Z)$$

III. DECONVOLUCION.

En el proceso sísmico las vibraciones que son grabadas, arriban de diferentes fuentes y bajo diferentes trayectorias. Algunas de estas vibraciones son consideradas como señal y algunas como ruido. El problema surge al tratar de diferenciarlas para separarlas.

III.1. Ruido.

El ruido que se halla generalmente en los registros sísmicos puede considerarse compuesto por :

a).- Ondas elásticas que viajan por la superficie del terreno ó muy cerca de ella, y a veces ondas propagadas por el aire.

b).- Reflexiones múltiples ; que se presentan en los casos en que existen discontinuidades elásticas planas separando capas geológicas con importantes diferencias de impedancia acústica (cambios de velocidad y densidad fuertes).

El número de reflexiones múltiples posibles está dado por : (*)

$$\text{Número de múltiples} = \frac{\pi}{2e} - 1$$

Siendo e el ancho de la discontinuidad. Así si e tiende a cero, teóricamente crecería al infinito el número de múltiples como se muestra en la figura III.1.1.

* Ref. 2.

Tipo de Trayectoria :

- 1.- Rayo Directo.
- 2.- Reflejo Primario.
- 3.- Reflexión Múltiple de Primer Orden.
- 4.- Reflejo Múltiple de Segundo Orden.

$$\text{Coef. de Reflexión} = \frac{\rho_1 v_1 - \rho v}{\rho_1 v_1 + \rho v}$$

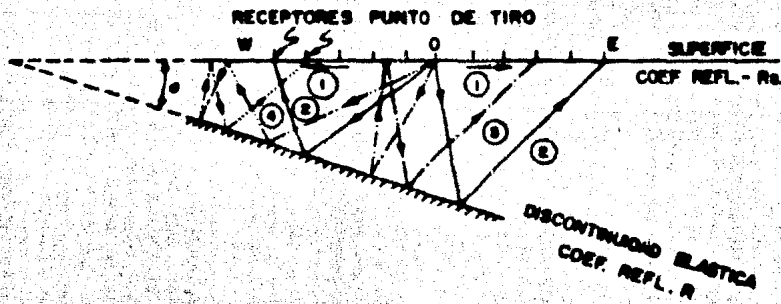


Fig. NI.1.1.

Las características de las reflexiones múltiples simples son

las siguientes :

- 1.- Tiempo de aparición :

$$T_n = \frac{\sin((n+1)\theta)}{\sin(\theta)} T_p$$

donde :

T_n = tiempo del n éximo múltiple.

T_p = tiempo del reflejo primario.

n = orden del múltiple.

Nota: Si θ tiende a 0 T_n tiende a $(n+1) \cdot T_p$

2.- Polaridad y Amplitud.

orden del reflejo.	Amplitud.
Primario.	RA
Múltiple 1.	$-R^2 R_s A$
Múltiple 2.	$R^2 R_s^2 A$
⋮	⋮
Múltiple n.	$R^{n+1} (-1)^n R_s^n A$

dadas:

A = amplitud del impulso.

R = coeficiente de reflexión de la discontinuidad.

$-R_s$ = coeficiente de reflexión de la superficie (ó base de la capa de intertemperismo)

3.- Velocidad Aparente.- En el caso de incidencia normal se cumple la siguiente relación :

$$\frac{V_n \sin(\theta)}{V_p \sin((n+1)\theta)}$$

dadas:

V_n = Velocidad aparente del múltiple.

V_p = Velocidad aparente del reflejo primario.

Como casos especiales de reflejos múltiples se encuentran los fantasmas, que son las reflexiones que se originan en alguna discontinuidad elástica situada arriba del nivel del tiro, y que siguen muy de cerca en el sísmograma a los reflejos primarios, interfiriendo con ellos y modificando su carácter.

ter. Los reflejos fantasmas son causados por la energía que el tiro emite hacia arriba, y son por esto un caso especial de los reflejos múltiples. La figura siguiente (III.1.2) muestra un reflejo fantasma.

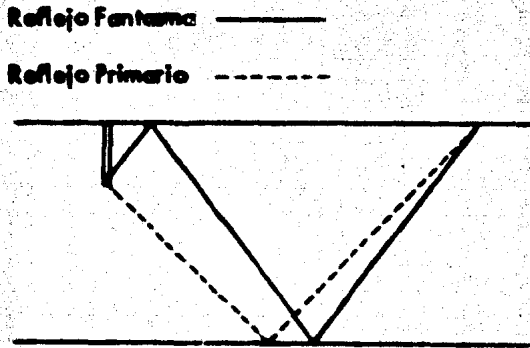


Fig. III.1.2

Por otra parte, existen también las reverberaciones marinas que son un tipo de ruido causado por las reflexiones múltiples que se originan entre los contactos aire-agua y agua-fondo marino, debido a que ambas discontinuidades presentan altos coeficientes de reflexión. Estos múltiples se caracterizan por ser de período corto.

c).- Reflexiones desde discontinuidades de pequeña extensión.

d).- Refracciones múltiples; pueden originarse entre la superficie del terreno ó la base de la capa interperizada y alguna capa de alta velocidad cercana a la superficie.

Una técnica utilizada en la atenuación o eliminación de ruido es el proceso de filtrado.

III.2. Filtrado.

Existen principalmente dos categorías de filtros :

1).- Filtros de frecuencia y

2).- Filtros óptimos.

En la información sónica parte del ruido grabado, tal como el ruido del viento y tren superficial, tienen componentes de alta frecuencia. Este tipo de ruido puede ser fuertemente eliminado sobre las bases del contenido de frecuencias. Sin embargo, los filtros de frecuencia son de valor relativamente limitado dado el ruido y la señal tienen sustancialmente el mismo contenido de frecuencias. En este caso, la separación debe ser realizada con referencia en otras características. Para este caso, la separación se lleva a cabo por medio de un filtro generalmente llamado filtro óptimo, el cual como su nombre lo indica, se diseña sobre las bases de optimización.

En los filtros óptimos, el operador del filtro (respuesta del filtro al impulso unitario) puede ser diseñado de acuerdo con el carácter de la señal y ruido en cada una de las trazas de la grabación. En otras palabras, antes de que una traza sea filtrada, el carácter del ruido puede ser determinado, y el filtro óptimo ser diseñado para quitar ruido de ese carácter particular de esa traza.

Un tipo de filtro óptimo, es el filtro Wiener, el cual es diseñado de acuerdo a las características de la señal de entrada y la señal deseada de salida para tener un ajuste óptimo entre la señal de salida y la señal

desada de salida, según el criterio de error mínimo cuadrado.

Los filtros Wiener forman una amplia clase de filtros digitales, estando bajo esta designación general aquellas diseñadas por procesos específicos, las cuales son frecuentemente identificadas por nombres especiales, tales como : filtros quita fantasmas, filtros de apilamiento horizontal, deconvolución, etc.

Por deconvolución en el sentido sísmico se entiende la eliminación ó atenuación de una porción de los efectos de filtrado del sistema de grabación y del medio a través del cual un impulso sísmico ha pasado. Una traza sísmica completamente deconvolucionada consistirá de una serie de impulsos localizados en posiciones que corresponderían a los tiempos de reflexión de los eventos sísmicos.

Si un pulso de duración muy corta pudiera viajar a través de la tierra inalterado y ser reflejado solamente por discontinuidades geológicas y grabado sin distorsión, el resultado sería un sísmograma ideal. En el sísmograma ideal cada impulso representa una reflexión primaria de un contacto geológico. En la práctica, sin embargo, las señales son grandemente alteradas por la tierra y por los instrumentos de grabación, dando por resultado un sísmograma como se observa en la figura III.2.1.

Para alcanzar una aproximación al sísmograma ideal debemos deconvolucionar los datos, esto es, anular los efectos de convolución de

la tierra y de los instrumentos de grabación.

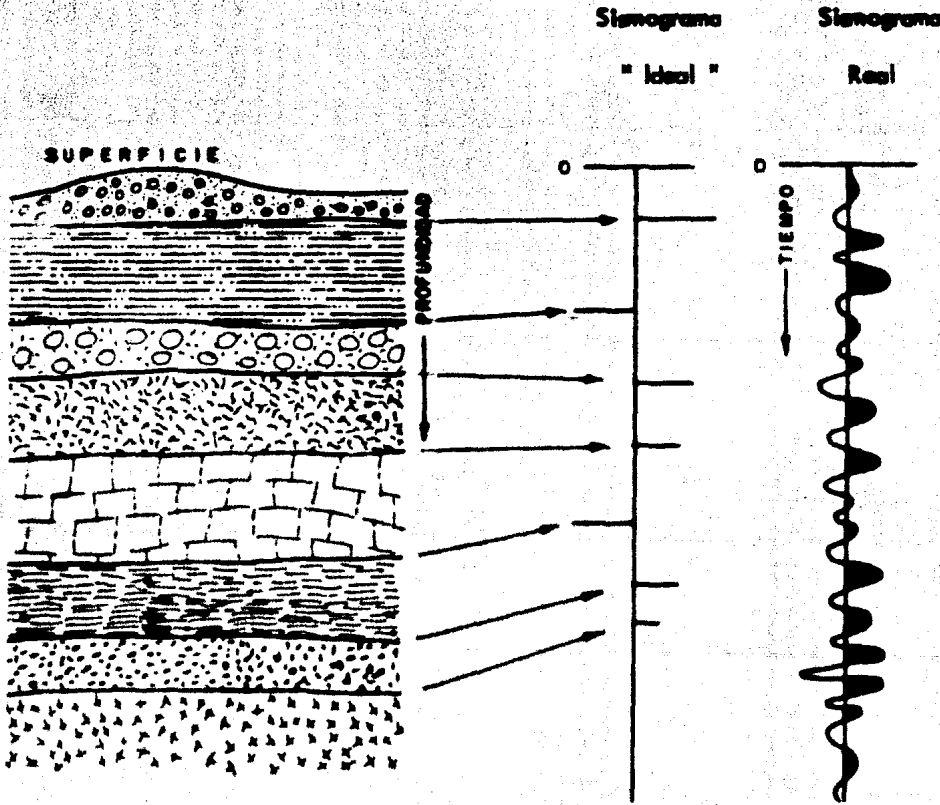


Fig. IH.2.1.

Los problemas que se enfrentan en deconvolución son :

- 1.- Problema no relacionado con múltiples, para lo cual se utiliza un filtro inverso para eliminar el efecto de filtrado de la tierra.
- 2.- Problema de reflejos múltiples, para lo cual se utiliza un filtro predictivo para atenuar tal energía.

III.3. Desarrollo Matemático.

Se asume que la tierra actúa como un filtro lineal, cuyo comportamiento como se mencionó con anterioridad, se cumple por el proceso de convolución. El proceso físico de la convolución es ilustrado en la figura III.3.1 en donde se considera que la onda de entrada A va a ser convolucionada con el operador de respuesta al impulso unitario B. La onda A está formada por un gran número de pulsos de corta duración, los cuales al pasar a través del filtro actuarán como impulsos separados, creando cada uno de ellos una señal de respuesta al impulso, cuya amplitud es proporcional a la amplitud del impulso que la origina. Además esta señal de respuesta al impulso empieza al mismo tiempo del impulso. La salida del filtro corresponde al transcurso de la señal de entrada completa A a través del filtro, siendo la suma de todas las señales separadas de respuesta al impulso. En este caso la señal de entrada A se considera representada por cinco ordenadas (ó impulsos). Cada uno de estos impulsos crea su propia señal de respuesta al impulso dibujadas en la parte de abajo de la figura y numeradas como: O_1, O_2, \dots, O_5 . La suma de estas cinco señales es la señal de salida O, la cual es el resultado de la convolución de la señal A con el operador B.

El proceso digital de la convolución es ilustrado esquemáticamente en la figura III.3.2, en la cual una señal de entrada A es convolucionada con el operador B. La señal A está formada por los valores discretos A_1, A_2, \dots, A_n . El tiempo corre a la izquierda. El operador del fil-

tro está formado por los valores B_1, B_2, \dots, B_m . El tiempo corre a la derecha. Siendo el intervalo de muestreo Δt , el mismo para ambas funciones. La traza C representa el resultado del proceso de convolución y está representada por los valores C_1, C_2, \dots, C_z , calculados con la siguiente relación: C_1 es igual al producto de A_1 y B_1 . Esto es, las dos funciones a convolucionar son posicionadas según los valores iniciales A_1 y B_1 coincidiendo en tiempo. Después la función A es corrida un intervalo t hacia la derecha, quedando A_1 alineado con B_2 y A_2 con B_1 , estos pares son multiplicados y sumados sus productos, dando $C_2 = A_1B_2 + A_2B_1$. Después la traza A es corrida otro intervalo t hacia la derecha y los tres pares de valores son multiplicados y sumados para dar: $C_3 = A_1B_3 + A_2B_2 + A_3B_1$, y así se obtienen todos los valores C . Finalmente el último valor de C , el cual es indicado como C_z es igual al producto de los últimos valores A_nB_m .

La señal de salida $F = (C_1 + C_2 + \dots + C_z)$, puede ser considerada como la suma de $A_1 (B_1 + B_2 + \dots + B_m) + A_2 (B_1 + B_2 + \dots + B_m) + \dots + A_n (B_1 + B_2 + \dots + B_m)$, donde $(B_1 + B_2 + \dots + B_m)$ es el operador de respuesta al impulso unitario. Esto puede ser expresado como la suma siguiente:

$$F = \sum (A_1 + A_2 + \dots + A_n) (B_1 + B_2 + \dots + B_m)$$

$$F = \sum (A_1 + A_2 + \dots + A_n) (\text{Respuesta al impulso})$$

teniéndose la misma relación que para el caso de la figura III.3.1.

La función de salida F tiene z términos, donde:

$z = m + n - 1$. Por esta razón la señal filtrada es más grande que la señal de entrada.

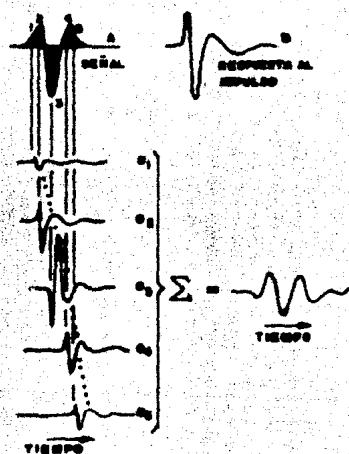


Fig. III.3.1

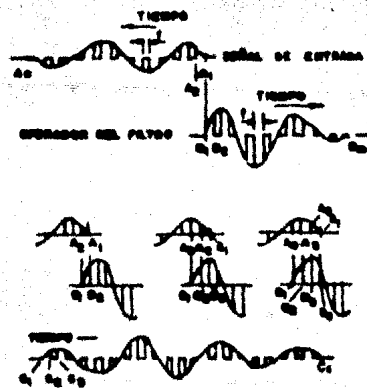


Fig. III.3.2

Ya que el operador de convolución no es conocido (pues no se conoce el operador de filtrado de la tierra), no existe una manera obvia en la cual el proceso de deconvolución pueda dar exactamente la señal original. Sin embargo existen varios procesos que pueden aproximar la deconvolución.

El proceso de convolución consiste en : (*)

$$Y(t) = X(t) * W(t) * H(t) + M(t)$$

donde:

$Y(t)$ es la salida grabada,

$X(t)$ es la entrada,

$W(t)$ es el filtro de la tierra,

$H(t)$ es el ruido coherente, y

$M(t)$ es el ruido aleatorio.

El proceso de deconvolución será : (*)

$$\bar{X}(t) = Y(t) * W(t)^{-1} * H(t)^{-1}$$

donde:

$\bar{X}(t)$ es la función de entrada aproximada,

$W(t)^{-1}$ es el filtro inverso, y

$H(t)^{-1}$ es el ruido coherente predictivo.

En la mayoría de los procesos de deconvolución, la señal

* Ref. 5.

y contenido de ruido de la función de tiempo, son examinadas por medio de la función de autocorrelación, que es un caso especial de la correlación, el cual es un proceso similar al de convolución excepto que el operador no es invertido. El propósito de la correlación es medir la similitud entre dos trazas ó señales (una de las cuales es llamada operador), y localizar la posición (ó posiciones), en la cual ocurre tal similitud. Cuando una traza se correlaciona consigo misma se tiene el proceso de autocorrelación. La función de autocorrelación de la traza de entrada $X(t)$ está definida como:

$$r(\tau) = \sum_t X(t) \cdot X(t-\tau)$$

dónde τ es el tiempo de cambio ó retraso.

La gráfica de los valores de autocorrelación se llama autocorrelograma, el cual siempre será simétrico con respecto al valor mayor (punto de retraso cero), figura III.3.3.

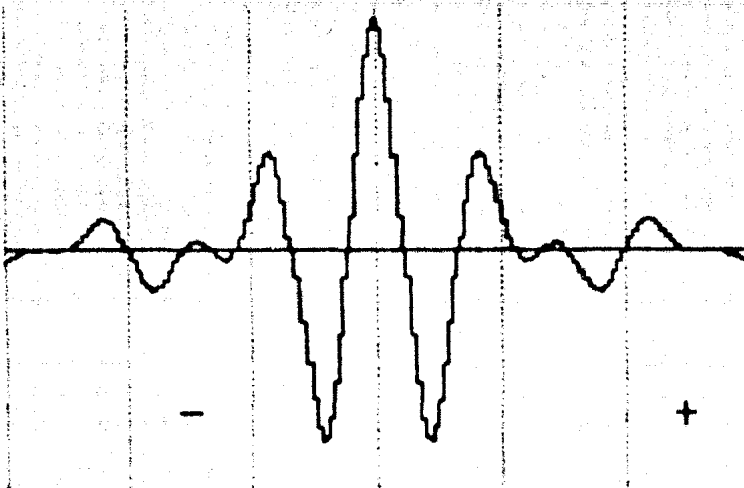


Fig. III.3.3

Las funciones de autocorrelación son calculadas antes de la deconvolución para cada zona a través de la cual la deconvolución será aplicada. Existe flexibilidad en la selección de los tiempos de comienzo de la autocorrelación, longitud de las ventanas, y número de ellas. La ventana de autocorrelación es definida como la sección de la traza a través de la cual la función de autocorrelación es calculada. El propósito principal de la autocorrelación es revelar periodicidades causadas por reverberaciones, fantasmas, y múltiples en general, lo cual es esquematizado en la figura III.3.4.

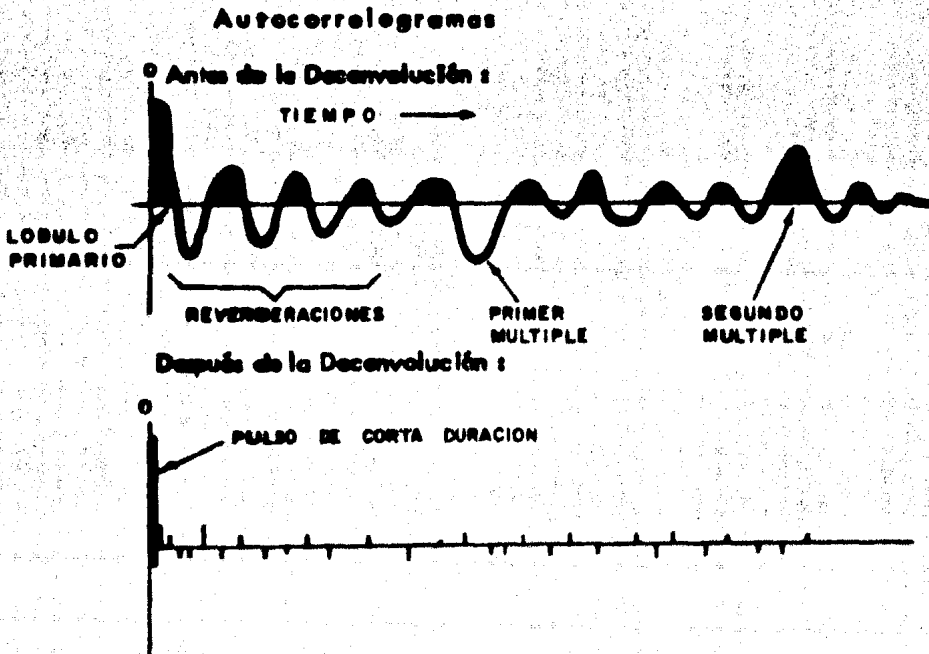


Fig. III.3.4.

Analizando el primer problema que se resuelve con deconvolución:

Problema no relacionado con múltiples :

Como se mencionó anteriormente, la salida deseada consiste de una serie de impulsos correspondientes a contrastes de velocidad y densidad (coeficientes de reflexión, R), de las rocas del subsuelo, en otras palabras, la salida deseada $R(t)$ será :

$$R(t) = (W(t) \circ R(t)) \circ W(t)^{-1}$$

El proceso de filtrado digital es descrito por la fórmula de convolución discreta :

$$Y(z) = \sum_t X(t) \cdot a(z-t)$$

donde :

$X(t)$ es la entrada ,

$a(t)$ es el filtro , y

$Y(z)$ es la salida .

Si $a(t)$ es un operador de predicción con distancia de predicción β (esto es, un filtro que actúa sobre la traza de entrada en el tiempo t , y estima la amplitud de la traza en el tiempo $t+\beta$), la salida $Y(z)$ será una estimación de la entrada $X(t)$ en algún tiempo futuro $t+\beta$. O sea :

$$Y(z) = \bar{X}(t+\beta) \quad \dots \text{III.3.1 (*)}$$

donde : $\bar{X}(t+\beta)$ es una estimación de $X(t+\beta)$.

* Ref. 6.

De lo anterior, se tendrá un error que consistirá en la diferencia entre el valor verdadero $X(t+\beta)$ y el estimado ó predicho $\bar{X}(t+\beta)$:

$$E(t+\beta) = X(t+\beta) - \bar{X}(t+\beta) \quad \dots \text{III.3.2}$$

Sustituyendo (III.3.1) en (III.3.2) :

$$E(t+\beta) = X(t+\beta) - \sum_{\tau=t}^{\infty} X(\tau) \cdot a(\tau-t) \quad \dots \text{III.3.3}$$

Obteniendo la transformada Z de (III.3.3) :

$$Z^{-\beta} E(Z) = Z^{-\beta} X(Z) - X(Z) \cdot A(Z) \quad \dots \text{III.3.4}$$

Multiplicando ambas miembros de (III.3.4) por Z^{β} :

$$E(Z) = X(Z) - Z^{\beta} X(Z) \cdot A(Z) = X(Z) (1 - Z^{\beta} A(Z)) \dots \text{III.3.5}$$

donde la cantidad $(1 - Z^{\beta} A(Z))$ es la transformada Z del operador de error de predicción .

Suponiendo que el operador de predicción está dado por la secuencia de longitud n :

$$a(t) = a(0), a(1), \dots, a(n-1)$$

entonces el correspondiente operador de error de predicción con distancia de predicción β es :

$$f(t) = 1, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{\beta - 1 \text{ ceros}}, -a(0), -a(1), \dots, -a(n-1)$$

Ahora, sabiendo que un filtro Wiener de longitud n resul-

te de la solución de las ecuaciones normales con representación matricial :

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(n-1) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(n-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(n-1) & r(n-2) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ \vdots \\ f(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(0) \\ g(1) \\ \vdots \\ g(n-1) \end{bmatrix} \quad \dots \text{III.3.6}$$

donde :

$r(t)$ es la autocorrelación de la entrada $X(t)$,

$g(t)$ es la correlación cruzada entre la salida deseada $d(t)$ (que es una versión de tiempo adelantado de la traza de entrada) y la entrada $X(t)$, y

$f(t)$ es el filtro Wiener.

La correlación cruzada entre la salida deseada y la traza

de entrada $X(t)$ es :

$$g(\tau) = \sum_t d(t) \cdot X(t-\tau) \quad \dots \text{III.3.7}$$

como :

$$d(t) = X(t+\beta)$$

la ecuación III.3.7 quedará :

$$g(\tau) = \sum_t X(t+\beta) \cdot X(t-\tau) = \sum_t X(t) \cdot X(t+\tau+\beta) = g(\tau+\beta)$$

convirtiéndose las ecuaciones normales III.3.6 en :

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(n-1) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(n-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(n-1) & r(n-2) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(0) \\ a(1) \\ \vdots \\ a(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(\beta) \\ r(\beta+1) \\ \vdots \\ r(\beta+n-1) \end{bmatrix} \quad \dots \text{III.3.8}$$

De lo cual se observa como el uso de error mínimo cuadrado de Wiener genera el operador de predicción.

Ahora se verá que el filtro de deconvolución de mínimos cuadrados, el cual idealmente convierte una señal no conocida a un impulso de retraso cero, es equivalente al filtro de error de predicción con distancia de predicción unitaria. Así, si en la ecuación III.3.8 $\beta = 1$:

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(n-1) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(n-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(n-1) & r(n-2) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(0) \\ a(1) \\ \vdots \\ a(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(1) \\ r(2) \\ \vdots \\ r(n) \end{bmatrix} \quad \dots \text{III.3.9}$$

Si el sistema anterior de n ecuaciones simultáneas lineales, se le resta el coeficiente $r(i)$ a ambos lados del i ésimo renglón de cada ecuación, se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{l}
 \rightarrow (1) + r(0) \cdot a(0) + r(1) \cdot a(1) + \dots + r(n-1) \cdot a(n-1) = r(1) \rightarrow (1) \\
 \rightarrow (2) + r(1) \cdot a(0) + r(0) \cdot a(1) + \dots + r(n-2) \cdot a(n-1) = r(2) \rightarrow (2) \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \rightarrow (n) + r(n-1) \cdot a(0) + r(n-2) \cdot a(1) + \dots + r(0) \cdot a(n-1) = r(n) \rightarrow (n)
 \end{array}$$

(la parte dentro del rectángulo es el sistema original III.3.9)

haciendo un aumento al sistema anterior :

$$\begin{array}{l}
 \rightarrow (0) + r(1) \cdot a(0) + r(2) \cdot a(1) + \dots + r(n) \cdot a(n-1) = -\gamma \\
 \rightarrow (1) + r(0) \cdot a(0) + r(1) \cdot a(1) + \dots + r(n-1) \cdot a(n-1) = r(1) \rightarrow (1) \\
 \rightarrow (2) + r(1) \cdot a(0) + r(0) \cdot a(1) + \dots + r(n-2) \cdot a(n-1) = r(2) \rightarrow (2) \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \rightarrow (n) + r(n-1) \cdot a(0) + r(n-2) \cdot a(1) + \dots + r(0) \cdot a(n-1) = r(n) \rightarrow (n)
 \end{array}$$

que en forma matricial queda :

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(n) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(n-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(n) & r(n-1) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -a(0) \\ \vdots \\ -a(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

que puede ser escrita en la siguiente forma :

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(n) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(n-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(n) & r(n-1) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b(0) \\ b(1) \\ \vdots \\ b(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \text{III.3.10}$$

donde :

$$b(0) = 1$$

$$b(i) = -a(i-1) ; i = 1, 2, \dots, n$$

$$\gamma = \sum_{i=0}^n b(i) \cdot r(i)$$

Si comparamos el sistema matricial III.3.10 con el siguiente sistema, que corresponde a un filtro de retraso cero (donde $f(i)$ son los coeficientes que transforman aproximadamente una onda en un impulso de retraso cero) :

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(n-1) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(n-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(n-1) & r(n-2) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ \vdots \\ f(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

se nota que son idénticas, excepto por un factor de escala γ . Por lo tanto el error de predicción de longitud $(n+1)$ con distancia de predicción unitaria ($\beta = 1$), es idéntico a un filtro inverso de retraso cero de longitud $n+1$, - excepto por el factor de escala.

Así, si se desea eliminar la acción de filtrado de la tierra se deberá deconvolucionar la salida que se tenga con un operador de error de predicción de longitud $n+1$ con distancia de predicción unitaria.

Análisis del segundo problema, que se resuelve con deconvolución :

Problema de Reflexos Múltiples :

En esta parte se analiza como el filtro predictivo con distancia de predicción mayor que la unidad puede también servir como un operador de deconvolución, y producir de esta forma la técnica de filtrado predictivo cuyo objetivo es eliminar ó atenuar energía múltiple presente en la traza.

La ecuación matricial de un filtro predictivo de longitud n y distancia de predicción β , está dada por la ecuación III.3.8. cuyo sistema de ecuaciones es el siguiente :

$$\left. \begin{array}{l} r(0) \cdot a(0) + r(1) \cdot a(1) + \dots + r(n-1) \cdot a(n-1) = r(\beta) \\ r(1) \cdot a(0) + r(0) \cdot a(1) + \dots + r(n-2) \cdot a(n-1) = r(\beta+1) \\ \vdots \\ r(n-1) \cdot a(0) + r(n-2) \cdot a(1) + \dots + r(0) \cdot a(n-1) = r(\beta+n-1) \end{array} \right\} \dots \text{III.3.11}$$

Procediendo como en el caso del filtro de error de predicción con $\beta=1$, para obtener el error de predicción correspondiente se tiene :

(donde el sistema original (11.3.11) se encuentra encerrado en el rectángulo)

$$\begin{array}{r}
 - r(0) - r(1) \cdot 0 - \dots - r(\beta-1) \cdot 0 + r(\beta) \cdot a(0) + r(\beta+1) \cdot a(1) + \dots + r(\beta+n-1) \cdot a(n-1) = -a(0) \\
 - r(1) - r(0) \cdot 0 - \dots - r(\beta-2) \cdot 0 + r(\beta-1) \cdot a(0) + r(\beta) \cdot a(1) + \dots + r(\beta+n-2) \cdot a(n-1) = -a(1) \\
 \vdots \\
 - r(\beta-1) - r(\beta-2) \cdot 0 - \dots - r(0) \cdot 0 + r(1) \cdot a(0) + r(2) \cdot a(1) + \dots + r(n) \cdot a(n-1) = -a(\beta-1) \\
 - r(\beta) - r(\beta-1) \cdot 0 - \dots - r(1) \cdot 0 + r(0) \cdot a(0) + r(1) \cdot a(1) + \dots + r(n-1) \cdot a(n-1) = r(\beta) - r(\beta) \\
 - r(\beta+1) - r(\beta) \cdot 0 - \dots - r(2) \cdot 0 + r(1) \cdot a(0) + r(0) \cdot a(1) + \dots + r(n-2) \cdot a(n-1) = r(\beta+1) - r(\beta+1) \\
 \vdots \\
 - r(\beta+n-1) - r(\beta+n-2) \cdot 0 - \dots - r(n) \cdot 0 + r(n-1) \cdot a(0) + r(n-2) \cdot a(1) + \dots + r(0) \cdot a(n-1) = r(\beta+n-1) - r(\beta+n-1)
 \end{array}$$

En forma matricial queda :

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(\beta+n-1) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(\beta+n-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(\beta-1) & r(\beta-2) & \dots & r(n) \\ r(\beta) & r(\beta-1) & \dots & r(n-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(\beta+n-1) & r(\beta+n-2) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -a(0) \\ \vdots \\ -a(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha(0) \\ \alpha(1) \\ \vdots \\ \alpha(\beta-1) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \text{III.3.12}$$

donde:

$$\alpha(0) = r(0) - (r(\beta) \cdot a(0) + r(\beta+1) \cdot a(1) + \dots + r(\beta+n-1) \cdot a(n-1))$$

$$\alpha(1) = r(1) - (r(\beta-1) \cdot a(0) + r(\beta) \cdot a(1) + \dots + r(\beta+n-2) \cdot a(n-1))$$

\vdots

$$\alpha(\beta-1) = r(\beta-1) - (r(1) \cdot a(0) + r(2) \cdot a(1) + \dots + r(n) \cdot a(n-1))$$

La solución del sistema matricial III.3.12, da el operador de error de predicción con distancia de predicción β .

Analizando la correlación cruzada :

$$g(\tau) = \underbrace{\alpha(0), \alpha(1), \dots, \alpha(\beta-1)}_{\beta \text{ términos}}, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{n \text{ ceros}}$$

Ya que la correlación cruzada desaparece para retrasos más

grandes que $\beta - 1$, la longitud de la salida deseada no puede ser más grande que β . En otras palabras, la onda de entrada es de longitud $\beta + n$, mientras que la onda de salida deseada es de longitud β . O sea que el operador de error de predicción esarte una onda de entrada de longitud $\beta + n$ a una onda de salida de longitud β . De lo cual la autocorrelación de la salida tenderá a desaparecer entre β y $\beta + n - 1$. Conforme β tienda a una habrá más contracción de la onda y consecuentemente más componentes de alta frecuencia en la traza deconvolucionada.

De lo anterior, se escogerán los parámetros β (distancia de predicción) y n (longitud del operador de predicción), tal que la energía predicable (repetitiva) que tenga períodos entre β y $\beta + n - 1$ unidades de tiempo tienda a ser eliminada, y así la autocorrelación de la salida tenderá a desaparecer entre β y $\beta + n - 1$.

La reverberación puede ser clasificada como de período corto ó de período largo. Las reverberaciones de período largo aparecen como ondas separadas por zonas quietas, las de período corto aparecen en la forma de ondas decayentes en amplitud y no separadas por intervalos quietos perceptibles. La siguiente figura ilustra la autocorrelación de una traza que presenta reverberación de período corto; la distancia de predicción β es escogida para especificar el grado de contracción deseado, conforme β se aproxima a la unidad, más contracción y consecuentemente más ruido de alta frecuencia es introducida. Así se selecciona β tal que queden balanceadas la contracción de la onda y el cociente señal/ruido de la traza de salida. Generalmente se escoge β de tal forma que la función de autocorrelación cruce dos veces el eje de tiempo. El diagrama in

ferior de esta figura ilustra el hecho de que la autocorrelación de la salida tiende a cero entre los retrasos β y $\beta + n-1$.

Autocorrelación de la traza de entrada:



Autocorrelación de la traza de salida:

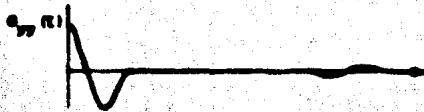


Fig. III.3.5.

El diagrama superior de la figura III.3.6 muestra la autocorrelación de una traza con reverberaciones de período largo. En este caso se seleccionó la distancia de predicción β tal que la ventana para barrer empiece justamente antes del comienzo del primer múltiple. Se selecciona n dependiendo de cuales sean las órdenes de las reverberaciones que se quieren atenuar, así si la reverberación que se quiere eliminar es de primer orden se escogerá la primera opción de la figura, si es de segundo orden se elegirá la segunda.

En general el operador será cerca de 1.25 veces la longitud del período del múltiple más grande. Una longitud más grande no causa daño pero el tiempo para efectuar la deconvolución se incrementa con el cuadrado de la longitud del operador.

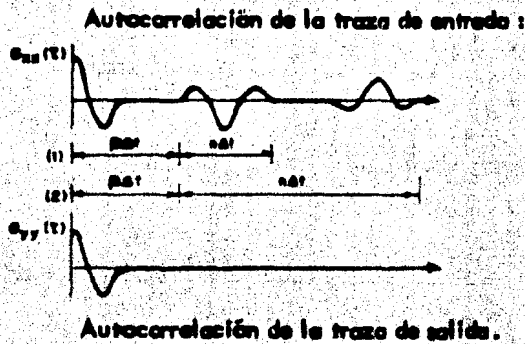


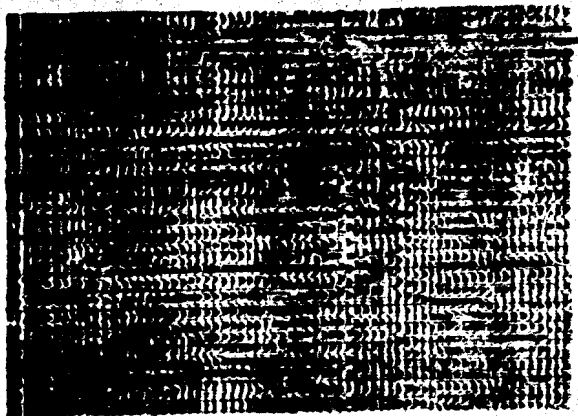
Fig. III.3.6.

Es necesario notar que el cálculo de un filtro de error de predicción depende solamente de la autocorrelación de las series de tiempo y no de las series en sí.

Después de que el operador de deconvolución es calculado y la deconvolución es ejecutada, puede parecer extraño que si el propósito de deconvolucionar una función de tiempo es acortar la duración de esta como se vió al principio de este inciso, la convolución de cualquier operador con una función siempre alarga la longitud de esta. Mientras la señal deconvolucionada es más larga que la señal original, los operadores de deconvolución son diseñados para hacer la señal deconvolucionada más corta por la distribución de la energía, de tal manera que la primera porción de la señal contenga la mayor parte de la energía (operadores de fase mínima). De esta forma la última porción de la señal deconvolucionada es frecuentemente de tan baja amplitud que puede considerarse casi nula.

Como ilustración del proceso de deconvolución, se muestran las secciones de autocorrelación de la figura III.3.7.

Antes:



Después:

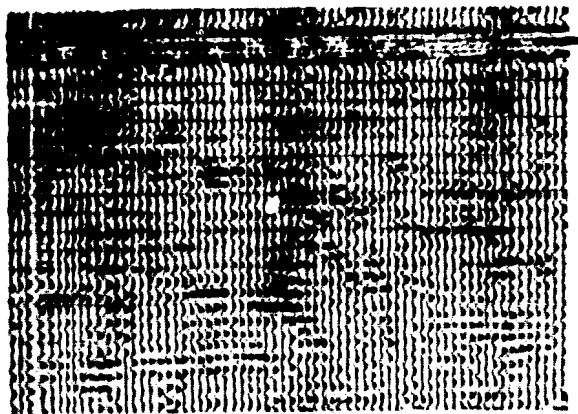


Fig. III.3.7.

IV. ANALISIS DE VELOCIDAD , CORRECCIONES DINAMICAS Y APILAMIENTO .

El cubrimiento múltiple del subavalo para técnicas sísmicas, tal como el método de punto de reflejo común (PRC), proporciona una multiplicidad de información de las trayectorias de viaje de la onda, lo cual permite la determinación de velocidades RMS (raíz cuadrática media), asociadas con tales trayectorias. El problema de la determinación de reflexiones primarias en medio de un tren de ruido y energía múltiple de varias reflexiones persiste aún con las técnicas de cubrimiento múltiple .

Actualmente se han desarrollado varias técnicas digitales para reducir esta interferencia indeseable. Entre las más exitosas están : la técnica de filtrado inverso de tiempo variable (deconvolución), y técnicas de PRC.

El objetivo de mejorar la relación señal a ruido y la atenuación de múltiples utilizando el PRC, puede ser realizado solo aplicando correcciones de tiempo apropiadas a los datos sísmicos, esto es, que las señales de reflexión primaria puedan ser movidas en fase y apiladas apropiadamente.

IV.1. Análisis de Velocidad .

En el análisis de velocidad nuestro principal problema es encontrar una función de velocidad contra tiempo por medio de la cual se puede hacer la mejor corrección dinámica. Para el caso de cubrimiento simple del sub suelo esto puede ser ejecutado observando tiempos de arriba de reflexiones fuertes en trazas próximas y lejanas al punto de tiro.

En general, las correcciones de tiempo de datos conocidas son generadas del caso simple de un medio estratificado horizontalmente.

IV.1.1. Descripción de términos.

Considere el medio estratificado de la figura IV.1.1, donde :

V_k = velocidad de intervalo de la k ésima capa ,

d_k = espesor de la k ésima capa ,

t_k = tiempo de viaje de ida y vuelta dentro de la k ésima capa (tiempo vertical) :

$$t_k = 2 d_k / V_k$$

X = distancia horizontal entre la fuente de energía y el sísmodetector ,

$T_{0,n}$ = tiempo de viaje vertical de ida y vuelta a la base de la n ésima capa ,

$$T_{0,n} = \sum_{k=1}^n t_k = 2 \sum_{k=1}^n d_k / V_k \quad \dots N.1.1$$

$V_{a,n}$ = velocidad promedio a la base de la n ésima capa ,

$$V_{a,n} = \frac{\sum_{k=1}^n V_k t_k}{T_{o,n}} = \frac{2 \sum_{k=1}^n d_k}{T_{o,n}} \quad \dots N.1.2$$

$T_{x,n}$ = tiempo de arribo de la reflexión de la n ésima capa a la distancia X .

Si ahora asumimos que el frente de onda viaja a lo largo de la trayectoria más corta (en distancia) entre la fuente de energía, el reflector y el geófono, el tiempo total de viaje el cual se designa como tiempo de arribo $T_{x,n}$ es dado por la relación :

$$T_{x,n}^2 = T_{o,n}^2 + \frac{X^2}{V_{o,n}^2} \quad \dots N.1.3$$

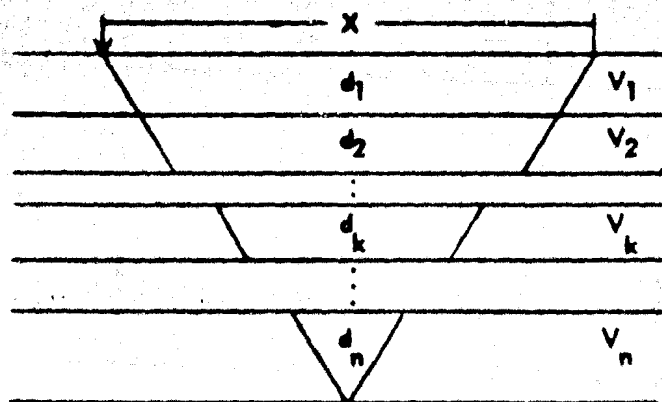


Fig. N.1.1.

Usando el método de trayectorias rectas, se puede calcular el tiempo de viaje de un rayo comenzando en la superficie, atravesando las n

capas horizontales y después de la reflexión regresando a la superficie. Este problema es usualmente resuelto sobre las bases de la ley de Snell. Sin embargo esta solución no es tan aceptable como la desarrollada a partir de la trayectoria de tiempo mínimo del Principio de Fermat, mostrado a continuación :

sean $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ los espesores de las n capas y $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ las velocidades de intervalo de las mismas. El segmento de rayo de la trayectoria hacia abajo dentro de la k ésima capa será asumido que tiene longitud P_k , como se muestra en la figura IV.1.2.

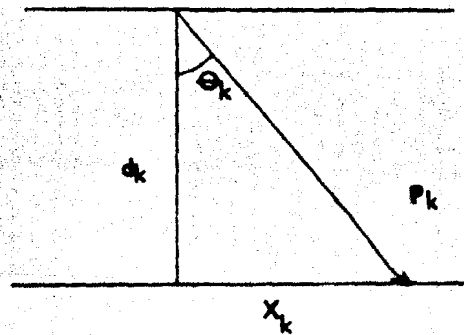


Fig. IV.1.2.

El tiempo total de viaje T_x está determinado en base al principio de Fermat y de la simetría con respecto a la línea vertical en el punto de reflexión, por la fórmula :

$$T_x = 2 \sum_{k=1}^n \frac{P_k}{V_k} = \text{tiempo mínimo} \quad \dots \text{IV.1.4}$$

donde:

$$P_k^2 = d_k^2 + X_k^2 \quad \dots \text{IV.1.5}$$

$$X = 2(X_1 + X_2 + \dots + X_n) \quad \dots N.1.6$$

minimizando (N.1.4) y considerando (N.1.6) queda: (*)

$$\frac{\delta T_x}{\delta X_k} = \frac{2 X_k}{P_k V_k} = 2q, \quad k=1, 2, \dots, n \quad \dots N.1.7$$

De (N.1.7) y (N.1.5), se obtiene:

$$X_k^2 = \frac{q^2 V_k^2 d_k^2}{1 - q^2 V_k^2} \quad \dots N.1.8$$

sustituyendo en (N.1.6) y (N.1.4);

$$X = 2q \sum_{k=1}^n \frac{V_k d_k}{\sqrt{1 - q^2 V_k^2}} \quad \dots N.1.9$$

$$T_x = 2 \sum_{k=1}^n \frac{d_k/V_k}{\sqrt{1 - q^2 V_k^2}} \quad \dots N.1.10$$

Las ecuaciones N.1.9 y N.1.10 son la forma paramétrica de la relación tiempo-distancia con q como parámetro dado por Stetnick - (1959). Conforme q varía de 0 a $1/V$, donde $V = \max(V_1, V_2, \dots, V_n)$ X varía de 0 a ∞ . El significado físico de q puede ser visto de la ecuación N.1.7, y de la figura anterior:

* Ref. 6.

$$q = \frac{\sin \Theta_k}{V_k}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad \dots N.1.11$$

la cual es la Ley de Snell.

Considerando ahora el problema de obtener una fórmula explícita tiempo-distancia de las ecuaciones paramétricas N.1.9 y N.1.10, para el caso especial en que $V_1 = V_2 = \dots = V_n = V$ estas ecuaciones se reducen a :

$$X = \frac{2qVd}{\sqrt{1-q^2V^2}}, \quad T_x = \frac{2d/V}{\sqrt{1-q^2V^2}}$$

donde, $d = d_1 + d_2 + \dots + d_n$, eliminando q , se obtiene :

$$T_x^2 = \frac{4d^2}{V^2} + \frac{X^2}{V^2} \quad \dots N.1.12$$

De las consideraciones teóricas de la función general dada por Capean (1935) puede verse que en el caso general existirá una generalización de la fórmula elemental (N.1.12) de la forma :

$$T_x^2 = C_1 + C_2 X^2 + C_3 X^4 + C_4 X^6 + \dots \quad \dots N.1.13$$

donde los coeficientes de la serie infinita C_1, C_2, \dots, C_n dependen de d_1, d_2, \dots, d_n y de V_1, V_2, \dots, V_n .

Los coeficientes C_n pueden ser expresados por varios métodos

das, sin embargo el método de cálculo más corto puede ser desarrollado usando solo operaciones algebraicas con series de potencias. El método siguiente es para expresar T_x^2 , X^2 , X^4 , X^6 , ... como una serie de potencias de q^2 , obtenidas de (N.1.9) y (N.1.10). Sustituyendo estas series en (N.1.13), e igualando los coeficientes de potencias similares de q , se obtiene un sistema de ecuaciones el cual puede ser resuelto para todas las coeficientes. Las fórmulas son las siguientes :

$$\text{sea : } s_1 = 1, \quad s_k = \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2k-3)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (2k-2)} \quad (k=2, 3, \dots) \quad \dots \text{N.1.14}$$

$$a_m = 2 \sum_{k=1}^m v_k^{2m-3} d_k \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad \dots \text{N.1.15}$$

$$b_m = s_m a_{m+1} \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad \dots \text{N.1.16}$$

$$u_m = s_m a_m \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad \dots \text{N.1.17}$$

De las ecuaciones N.1.9 y N.1.10 se obtiene :

$$X = \sum_{k=1}^{\infty} b_k q^{2k-1} \quad \dots \text{N.1.18}$$

$$T_x = \sum_{k=1}^{\infty} u_k q^{2k-2} \quad \dots \text{N.1.19}$$

Elevando al cuadrado (N.1.18) y (N.1.19) :

$$X^2 = q^2 \sum_{k=1}^{\infty} b_{k,1} q^{2k-2} \quad \dots \text{N.1.20}$$

$$T_x^2 = \sum_{k=1}^{\infty} A_k q^{2k-2} \quad \dots N.1.21$$

$$B_{k,1} = b_1 b_k + b_2 b_{k-1} + \dots + b_k b_1, \quad (k=1, 2, \dots) \quad \dots N.1.22$$

$$A_k = u_1 u_k + u_2 u_{k-1} + \dots + u_k u_1, \quad (k=1, 2, \dots) \quad \dots N.1.23$$

De (N.1.20) se pueden obtener series para $X^4, X^6, X^8, X^{10}, \dots$

$$X^{2n} = q^{2n} \sum_{k=1}^{\infty} B_{k,n} q^{2k-2}, \quad (n=1, 2, \dots) \quad \dots N.1.24$$

siendo los coeficientes $B_{k,n}$ determinados en forma recursiva por :

$$B_{k,n} = B_{k,n-1} B_{1,1} + B_{k-1,n-1} B_{2,1} + \dots + B_{1,n-1} B_{k,1} \quad \dots N.1.25$$

para : $n = 2, 3, 4, \dots$

$k = 1, 2, 3, \dots$

Sustituyendo (N.1.21) y (N.1.24) en (N.1.13) e igualando los coeficientes :

$$C_1 = A_1 \quad \dots N.1.26$$

$$C_m B_{1,m-1} + C_{m-1} B_{2,m-2} + \dots + C_2 B_{m-1,1} = A_m \quad (m=2, 3, 4, \dots)$$

Los coeficientes C_1, C_2, C_3, \dots pueden ser calculados en forma recursiva mediante la ecuación (N.1.26). Las fórmulas explícitas para C_1 y C_2 son :

$$C_1 = \sigma_1^2 = \left[2 \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{V_k} \right]^2 \quad \dots N.1.27$$

$$C_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{V_k} / \sum_{k=1}^n V_k d_k \quad \dots N.1.28$$

Sea :

$$t_k = \frac{d_k}{V_k} \quad \dots N.1.29$$

el tiempo de viaje en un sentido para un rayo vertical que cruza la k ésima capa, entonces : $C_1 = T_{0,n}^2$.

De acuerdo con (N. 1.28) y (N.1.29) el recíproco de C_2 puede ser escrito como :

$$\frac{1}{C_2} = VRMS^2 = \sum_{k=1}^n V_k d_k / \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{V_k} = \sum_{k=1}^n t_k V_k^2 / \sum_{k=1}^n t_k \quad \dots N.1.30$$

De aquí que $1/C_2$ es el promedio pesado de los cuadrados de las velocidades de intervalo, siendo los pesos los tiempos verticales de viaje.

Reemplazando C_1 y C_2 en la ecuación N.1.13, considerando que la convergencia de esta serie es bastante rápida como para considerar que solo los dos primeros términos dan suficiente seguridad para los propósitos prácticos en la gran mayoría de los casos :

$$T_x^2 = T_{o,n}^2 + \frac{1}{V_{RMS}^2} X^2 \quad \dots N.1.31$$

Es interesante notar que cuando la aproximación de 2 términos en (N.1.13) es usada, el primer término ignorado, $C_3 X^4$, siempre es negativo ó cero. Esto es por lo siguiente: Utilizando (N.1.26) en forma recursiva se llega a:

$$C_3 = \frac{a_2^2 - a_1 a_3}{4 a_2^4} \quad \dots N.1.32$$

de (N.1.32) y (N.1.15):

$$\begin{aligned} a_2^2 &= 4 \left[\sum_{k=1}^n v_k d_k \right]^2 \\ &= 4 \left[\sum_{k=1}^n \sqrt{v_k^3 d_k} \sqrt{d_k/v_k} \right]^2 \\ &= 4 \left[\sum_{k=1}^n v_k^3 d_k \right] \left[\sum_{k=1}^n \frac{d_k}{v_k} \right] \end{aligned}$$

por la desigualdad de Schwartz. Por consiguiente:

$$a_2^2 = a_1 a_3, \text{ y } C_3 = 0$$

N.1.2. Método .

Como se mencionó al inicio de este capítulo el análisis de

velocidades se basan en encontrar una velocidad aparente con la cual se logre el mejor apilamiento de las trazas que componen los puntos de reflejo común.

En el análisis se consideran ventanas de tiempo, al igual que en deconvolución, lo suficientemente espaciadas para lograr un traslape de ellas y de esa manera incluir todos los eventos que pueden presentarse a lo largo de las trazas sísmicas que componen una familia de PRC. Los tiempos centrales de cada ventana representan el tiempo vertical de viaje total de la onda ($T_{0,n}$) como se ilustra en la figura IV.1.3.

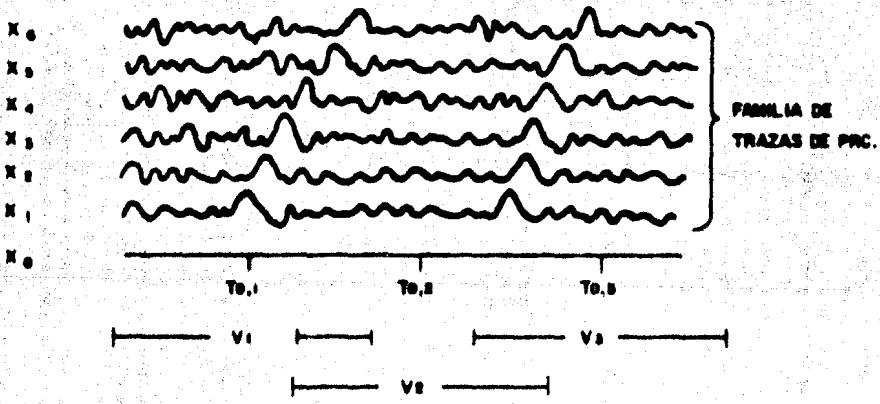


Fig. IV.1.3.

Para una mejor descripción del método se hará uso del modelo de la figura IV.1.4, en la cual se muestran las distintas trayectorias que componen un PRC, con una velocidad RMS y espesores conocidos. El tiempo vertical de viaje $T_{0,n}$ puede estimarse a partir de estos datos por medio de la ecuación IV.1.1. De esta manera, si en la ecuación IV.1.31 se calculan tiempos de arribo para todas las trazas del PRC en una ventana de tiempo va-

riendo la velocidad RMS se obtendrán diferentes curvas hiperbólicas a lo largo de los cuales quedarán los arribos de energía, como puede observarse en la figura N.1.5.

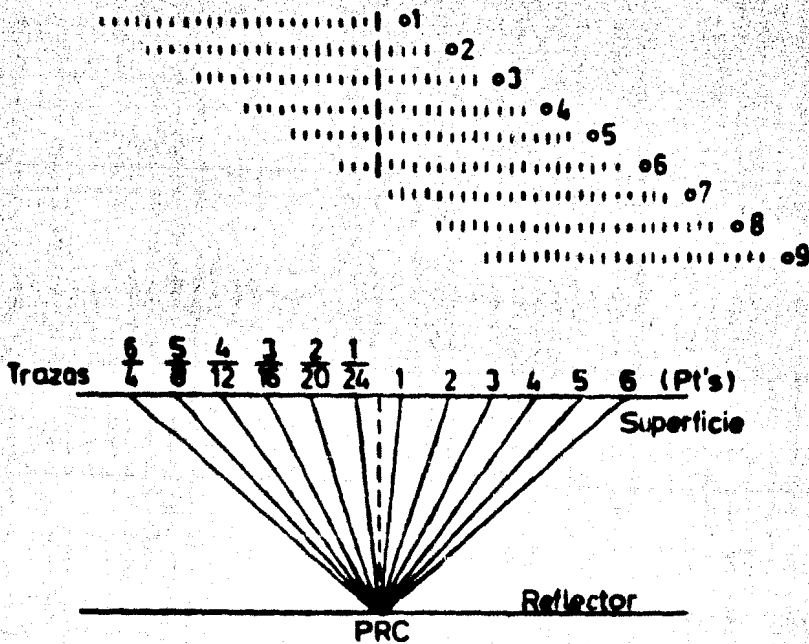


Fig. N.1.4

En el modelo de la figura N.1.5, los tiempos para un reflector n han sido tomados a partir de una ecuación en donde se estiman condiciones ideales del subsuelo. En la realidad estos arribos no están estrictamente alineados con la curva hiperbólica, a consecuencia de las heterogeneidades del

subavalo.

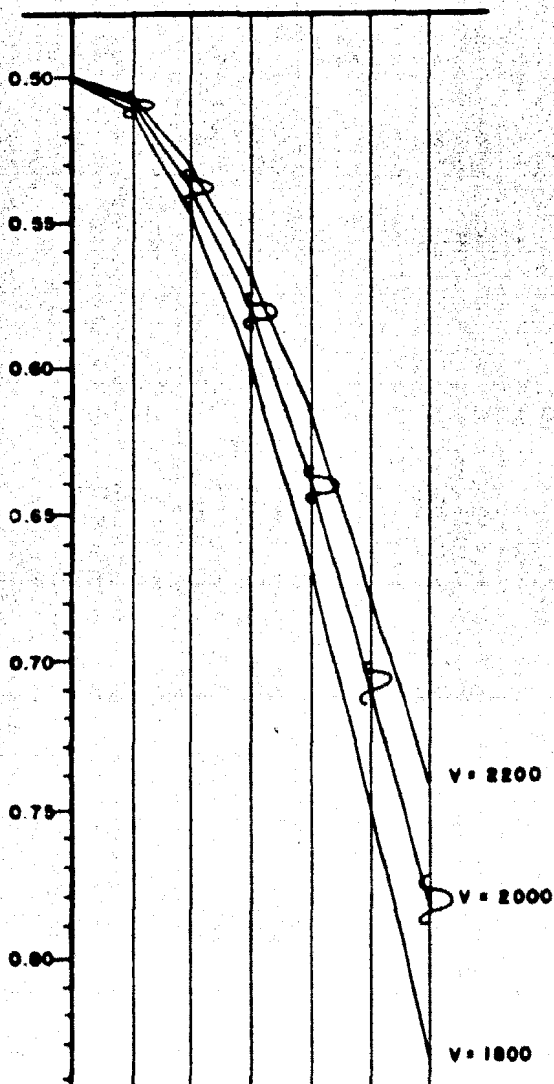


Fig. N.1.5.

El problema queda ahora limitado a establecer cual de las velocidades es la óptima para cada ventana de tiempo, dicho de otra manera,

cual velocidad es la que mejor alinea los eventos dentro de ese grupo de trazas.

Considerando una ventana de tiempo, el análisis de velocidad se efectúa de la siguiente manera :

Se da una velocidad inicial con la cual se estima el tiempo de arribo mediante la ecuación IV.1.31 considerando distancias de la fuente al detector para cada traza del PRC y tiempo vertical de ida y vuelta para $X = 0$. Al tiempo obtenido $T_{x,n}$ se resta el $T_{0,n}$ y la diferencia de estos tiempos es la corrección que se aplicará a cada una de las trazas. A esta corrección se le llama corrección dinámica.

Una vez que las trazas han sido movidas en tiempo son correlacionadas para medir la similitud de ellas. En este caso la correlación se efectúa para un desplazamiento $\tau = 0$.

La velocidad inicial dada es aplicada a lo largo de todas las ventanas de tiempo obteniéndose así un valor de correlación para cada una de ellas. La velocidad es incrementada y son nuevamente calculadas correcciones y valores de correlación hasta lograr un barrido de velocidades en todas las ventanas de tiempo. Los valores de correlación en cada ventana son comparados y la velocidad que haya logrado el más alto valor es la que mejor alinea las trazas.

El barrido de velocidades generalmente es aplicado con incrementos constantes (barrido lineal), sin embargo una manera de obtener mejor resolución de velocidades es dar incrementos pequeños para las ventanas

a poca profundidad (tiempo), e irlos aumentando conforme crece ésta. Esto es debido a que las variaciones importantes de velocidad se localizan en los prime ros tiempos.

En la etapa de correlación las sumas de los productos se a cumulan por cada ventana de tiempo y por cada velocidad de prueba del barri do. Estos valores de correlación para familias de punto de reflejo común adya centes (si es que se escogen varias de ellas para el análisis), son sumados en una matriz cuya fila índice corresponde a las velocidades de prueba y cuya co luma índice corresponde a las $T_{0,n}$ ó tiempos centrales de las ventanas. La fórmula que describe los valores de correlación de la matriz puede escribirse co mo sigue : (* Ref.1.)

$$C_{V,T_{0,n}} = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \sum_{i=1}^l (A_{j,i} \cdot A_{k,i}) \dots N.1.39$$

en donde :

$C_{V,T_{0,n}}$ representa el valor de correlación para la velocidad V en el tiempo de ventana $T_{0,n}$.

n es el número de trazas vivas en el tiempo de ventana $T_{0,n}$,

l es el número de muestras en cada ventana ,

$A_{j,i}$ es la muestra i ésima en el tiempo de ventana para la traza j desplazada por corrección dinámica.

Se supone que las muestras en los tiempos de ventana de ca da trazo, $A_{j,i}$ ($i = 1, 2, \dots, l$), se desplazan de manera que el punto medio

de cada ventana, $A_{i,1/2}$ queda en la trayectoria de efecto de tendido corres
pondiente a " V " y " $T_{0,n}$ ", y a la distancia de tendido dada en el encabezado
de traza de la traza j . $C_{V,T_{0,n}}$ será grande si :

- a).- $A_{i,i}$ así como $A_{k,i}$ están en fase y son similares en forma,
- b).- n es grande y la mayoría de las pares de ventanas de las trazas $A_{i,k}$ así
como $A_{k,i}$ son semejantes y están en fase.
- c).- cualquiera de las ventanas de las trazas $A_{i,i}$, son de excepcionalmente al
ta amplitud y están en fase con la mayoría de las otras ventanas en $C_{V,T_{0,n}}$.

Se ve claro que en primer lugar interesa la condición (a),
o sea, en encontrar aquellos pares de $V, T_{0,n}$ que mejoren la posición de las
grandes correlaciones debidas al emparejamiento de las formas de las ondulaciones
y las fases, ó de las coherencias de traza a traza.

Sería deseable eliminar las trazas y la ocurrencia de even
tas de muy alta amplitud como factores en la medición de $C_{V,T_{0,n}}$.

Considerando una medición simple de la energía de este
mismo juego de ventanas de tiempo :

$$E_{V,T_{0,n}} = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^l (A_{i,l})^2 \quad \dots N.1.34$$

La sumatoria derecha de la ecuación anterior es muy simi
lar en su estructura a la sumatoria derecha en la ecuación N.1.33, excepto

que, en lugar de una sumatoria de muestra por muestra, como producto de dos traza diferentes, tenemos el producto de la sumatoria de cada traza consigo misma.

El número total de traza sumadas de productos pares en la ecuación N.1.33 es: $n(n-1)/2$.

En la ecuación N.1.34 el total es justamente n . Por lo tanto, podemos normalizar las dos ecuaciones multiplicando (N.1.33) por $2/n(n-1)$, y (N.1.34) por $1/n$.

Finalmente se define la medida de coherencia $Q_{v,T_0,n}$ como la relación de los valores de $C_{v,T_0,n}$ a $E_{v,T_0,n}$, después de una apropiada normalización:

$$Q_{v,T_0,n} = \frac{\frac{2 C_{v,T_0,n}}{n(n-1)}}{\frac{E_{v,T_0,n}}{n}} = \frac{2 C_{v,T_0,n}}{(n-1) E_{v,T_0,n}} \quad \dots N.1.35$$

Bajo condiciones ideales de apareamiento por carácter del reflejo de traza a traza, y de un ajuste exacto de velocidades, entonces $Q_{v,T_0,n}$ se aproximará a un valor máximo de 1.0. Con una información razonablemente buena, los valores de coherencia del reflejo (a la velocidad correcta) deberán estar dentro de un rango como de 0.5 a 0.8, completamente independiente de la potencia del reflejo y de la multiplicidad del apareamiento.

La graficación de la matriz de velocidad contra tiempo en función de los valores de correlación (espectro de velocidad) ayuda a determinar la función de velocidad necesitada para un apilamiento óptimo. Del espectro de velocidad las reflexiones primarias son identificadas. Si la función de velocidad escogida toma en cuenta estas reflexiones primarias, estas serán apiladas adecuadamente y aparecerán en la sección apilada. A continuación se muestra una gráfica del espectro de velocidad.

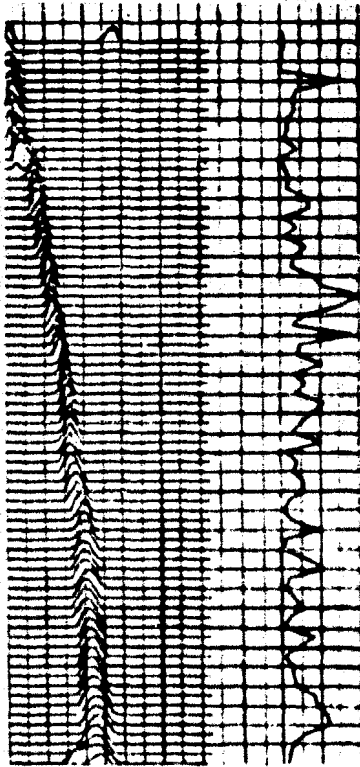


Fig. N.1.6.

N.2. Correcciones Dinámicas .

Una grabación de reflexión sísmica es una medida del doble tiempo de viaje . La figura N.2.1 muestra un tendido para grabación y la grabación sísmica resultante. Nótese que el evento de reflexión en la grabación sísmica es curvo y sin embargo el reflector real es plano. Esto sucede porque la trayectoria del rayo a un receptor que está a una distancia de la fuente es más larga que la trayectoria para un receptor más cercano a la fuente. En esta figura la fuente está en la estación 4 y la traza grabada en la estación 4 mide directamente el tiempo de viaje vertical. La traza grabada en la estación 7, la cual tiene una distancia de $X(7)$ muestra el arribo de reflexión en un tiempo posterior. La diferencia en el tiempo de arribo es la corrección dinámica.

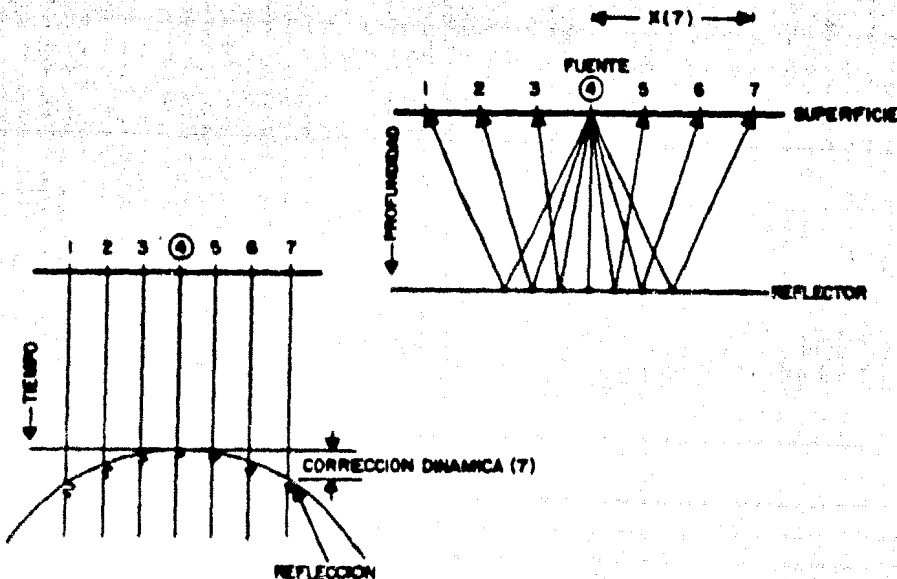


Fig. N.2.1

Este efecto puede ser eliminado por el cálculo de la corrección dinámica para cada reflexión en cada traza y ajustando la reflexión por esta cantidad, resultando el evento aplastado que se muestra en la figura N.2.2.

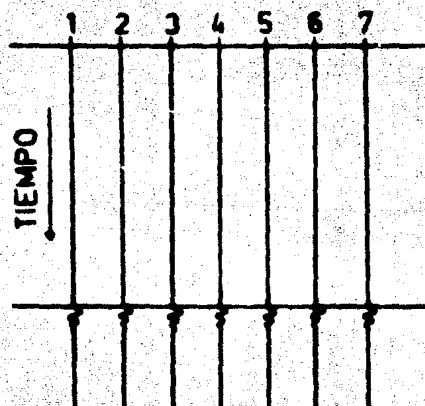


Fig. N.2.2.

A diferencia de las correcciones estáticas, en las cuales la traza entera es movida hacia arriba ó hacia abajo, las correcciones dinámicas para una traza varían con el tiempo y por lo tanto la traza puede realmente ser estirada ó contraída en tiempo.

La corrección dinámica varía como una función de la distancia fuente-receptor, tiempo de reflexión, y velocidad RMS. Para un conjunto dado de datos sísmicos la distancia fuente-receptor y los tiempos de reflexión son conocidas. Si la velocidad RMS es determinada, entonces la corrección di-

námica se pueda especificar.

En general, las velocidades se incrementan con la profundidad aunque algunas veces ocurren inversiones de velocidad.

Las características generales de la función de corrección dinámica son :

- a).- Crece con el incremento de distancia fuente-receptor,
- b).- decrece con el incremento de la velocidad RMS,
- c).- decrece con el incremento de la profundidad (tiempo).

N.3. Apilamiento.

Una vez que las correcciones estáticas y dinámicas han sido aplicadas, los datos están listos para ser apilados. La siguiente figura muestra la aplicación de tales correcciones. (figura N.3.1).

Todo lo que resta para apilar los datos es sumar todas las trazas de cada punto de reflejo común resultando una única traza apilada por cada PRC.

En la figura N.3.1 son 12 trazas para un PRC. En la figura N.3.2 se muestra la línea completa apilada. Cada traza individual en la línea apilada es realmente la suma de todas las trazas de un PRC. A este tipo de

apilamiento se le denomina apilamiento horizontal.

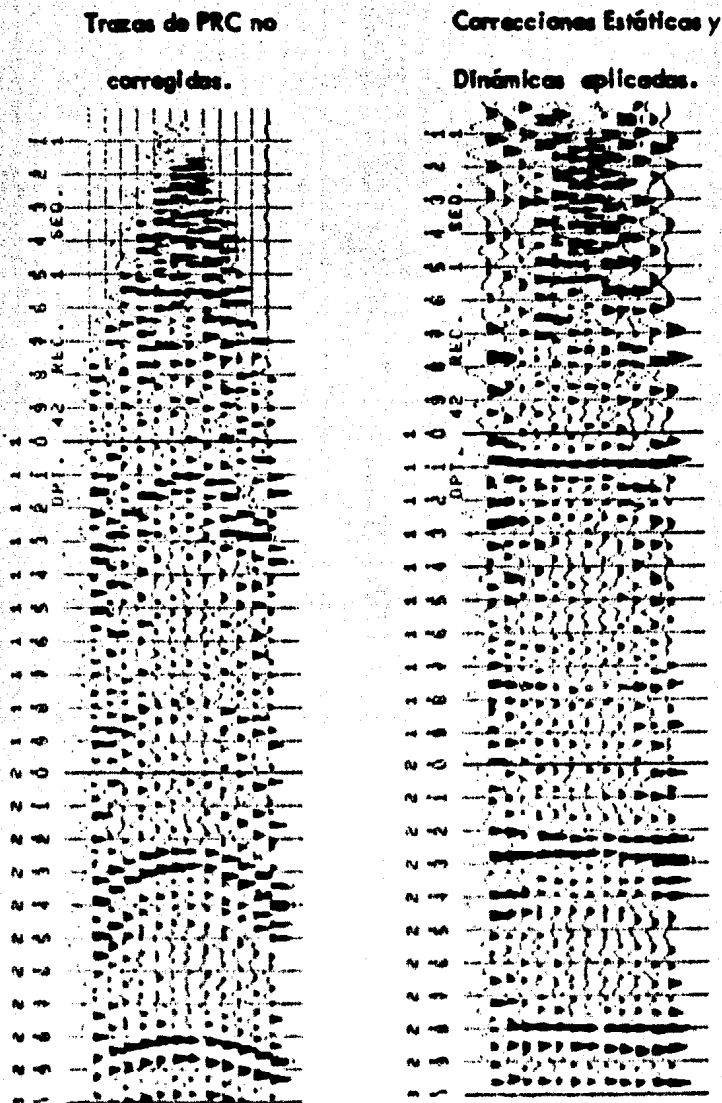


Fig. N.3.1.

Una traza de PRC.

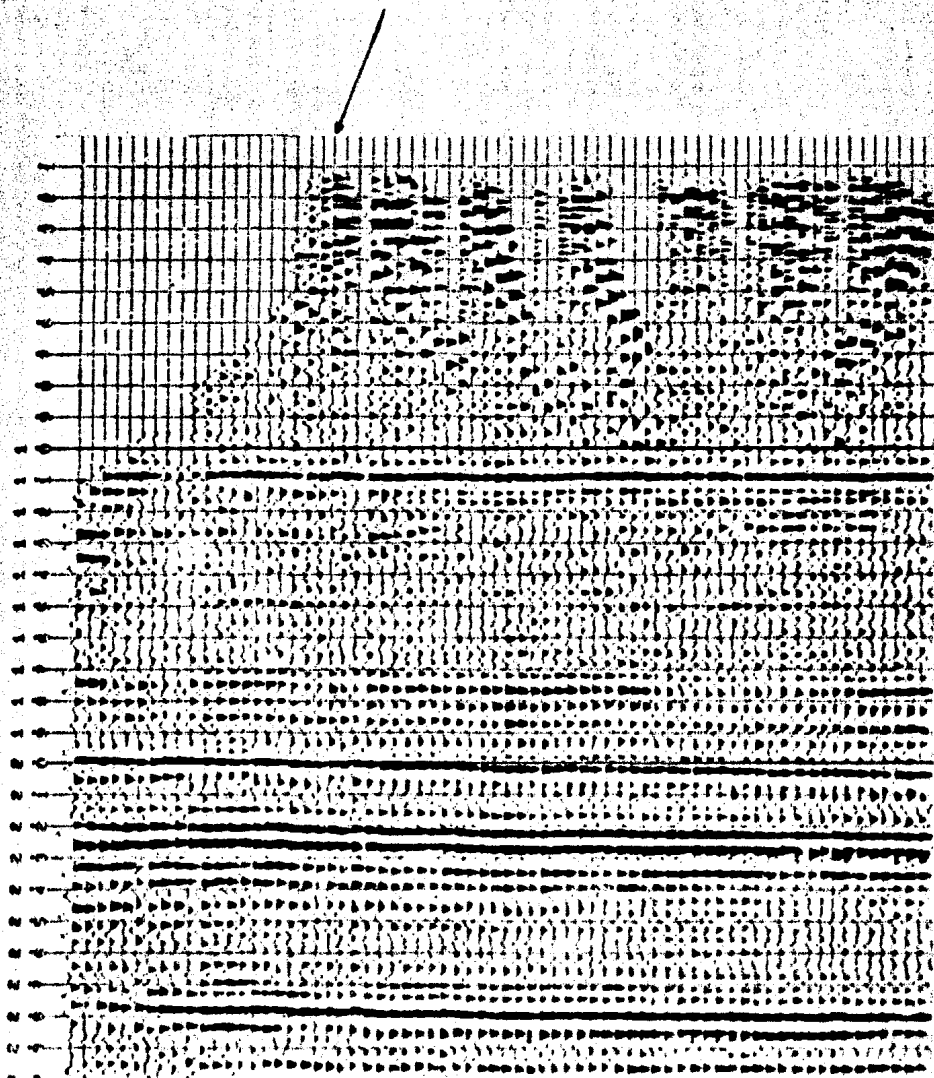


Fig. N.3.2.

Mediante el apilamiento horizontal se logra mejorar la relación señal-ruido, atenuando específicamente energía múltiple, lo cual depende de los siguientes factores:

1.- Diferencia en velocidad entre el evento primario y el múltiple.- En una gráfica tiempo-distancia para un mismo refractor se observa diferencia en velocidades, como se ilustra en la gráfica de la figura IV.3.3.

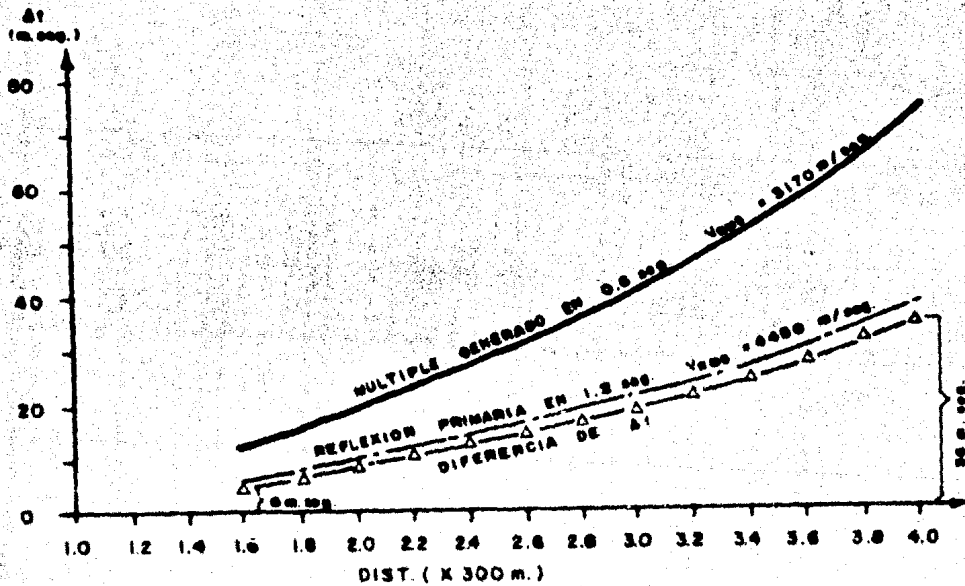


Fig. IV.3.3.

Como el análisis de velocidad trata de optimizar velocidades de apilamiento para eventos primarios, entonces los eventos múltiples quedarán desfasados atenuándose al efectuar el apilamiento horizontal.

2.- Configuración de tendedo en el campo.- Se ha estimado que la atenuación de múltiples es óptima cuando las variaciones de corrección dinámica para

una familia de PRC son lineales como se muestra en la figura IV.3.4.

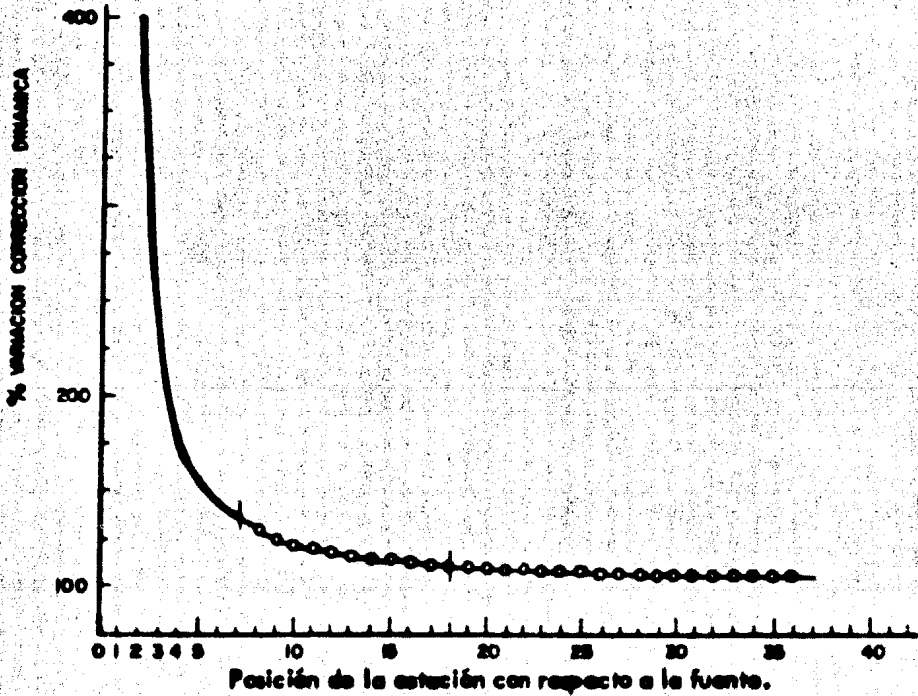


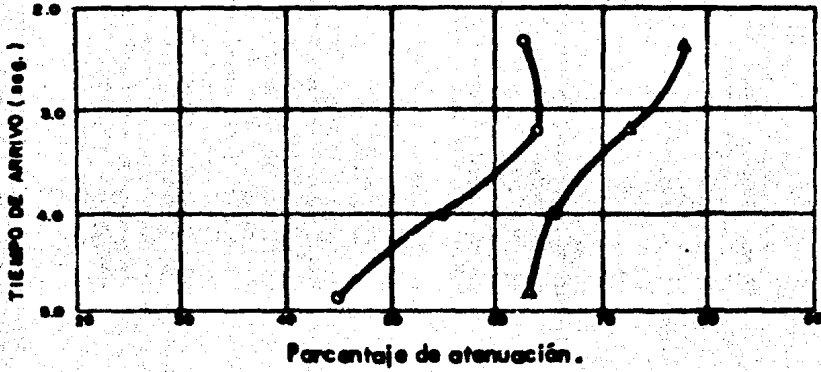
Fig. IV.3.4.

Para mantener cercanamente constantes las variaciones de corrección dinámica se sugieren distancias de fuente a detector más grandes que la estación número siete.

La influencia de la distancia fuente - detector en la atenuación de múltiples puede observarse en la figura IV.3.5.

3.- Porcentaje de apilamiento.- El apilamiento horizontal mejora la relación señal-ruido aproximadamente con la raíz cuadrada del por ciento de apila

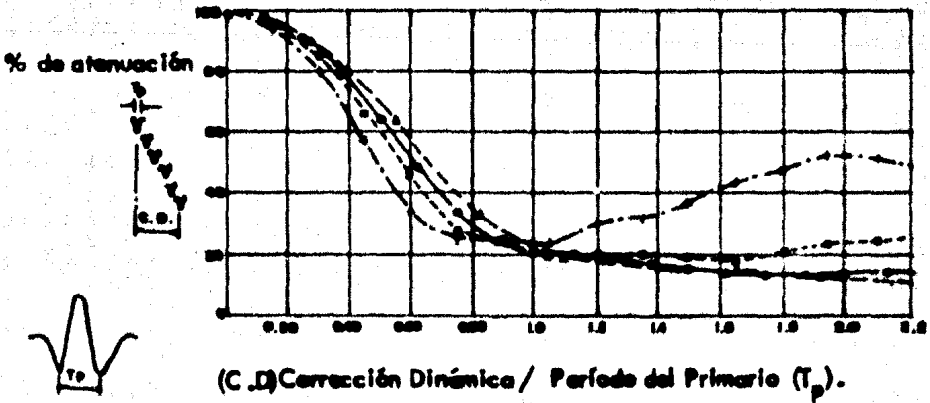
miento. Esto se observa en la figura N.3.7.



Leyenda: Apilamiento de 600 % con un tendido : 0 - 200 - 2200
 Apilamiento de 600 % con un tendido : 0 - 700 - 2700

Fig. N.3.5.

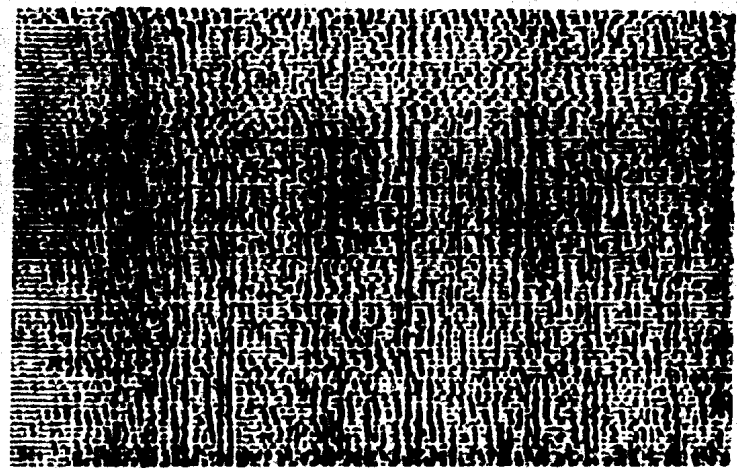
4.- Frecuencia del múltiple.- La frecuencia del evento múltiple es otro factor importante, esto se observa en la figura N.3.6.



Leyenda: + Apilamiento de 300%.
 □ Apilamiento de 400%.
 ○ Apilamiento de 600%.
 △ Apilamiento de 1200%.

Fig. N.3.6.

Cubrimiento Simple.



Apilamiento de 600 %.

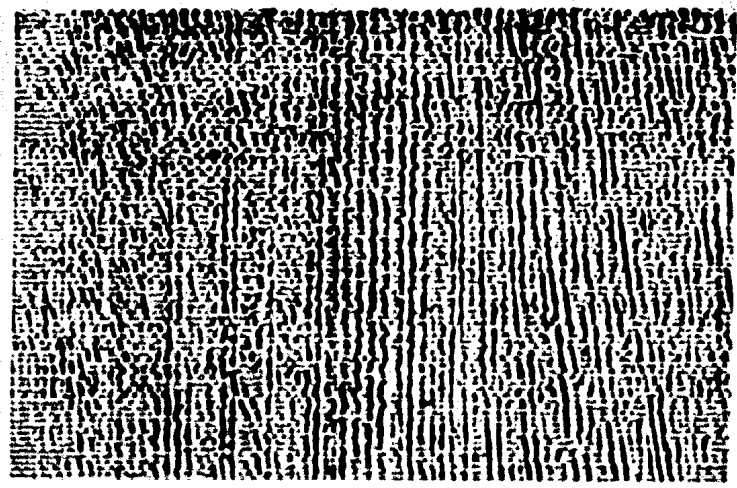


Fig. N.3.7.

Es claro que el cociente corrección dinámica / período del primario (T_p) deberá ser más grande que 0.8 para esperar una razonable atenuación. Desafortunadamente el contenido de frecuencia de los múltiplos se mueve en dirección opuesta en la mayoría de los casos.

A mayores tiempos las correcciones dinámicas son más pequeñas y las frecuencias son menores.

5.- Exactitud de velocidad aparente para el apilamiento.- Conforme aumenta el apilamiento la tolerancia de la estimación de la velocidad crece. Esto es, si el error que se comete en tiempo está en función de la frecuencia del evento, se podrá escoger un límite en el que tal error produzca la misma relación señal-ruido de entrada y de salida.

No. de trazas Apiladas .	Error en mseg. Período de la ondulada (T).	Máximo error permisible en tiempo para $T=35$ mseg.
2	0.25	9
3	0.382	13
4	0.458	16
5	0.524	18
6	0.565	20
7	0.597	21
8	0.619	22
9	0.646	23
10	0.665	23
11	0.684	24

V. CORRECCIONES ESTÁTICAS RESIDUALES .

Una corrección estática residual puede ser definida como un cambio en tiempo aplicado a una traza sísmica para refinar una corrección estática. La corrección estática es generalmente hecha con un conocimiento incompleto del medio cercano a la superficie (topografía, capa de intemperismo, etc.) y con errores en la medición de campo que afectan las correcciones estáticas de las trazas. Comúnmente las correcciones residuales son determinadas mediante la aplicación de criterios a los desplazamientos resultantes de la correlación de eventos reflejados de traza a traza.

La precisión en la aplicación de correcciones dinámicas es un requisito para un adecuado procesamiento de estáticas residuales. Las trazas que tienen un gran error de correcciones dinámicas (residual de correcciones dinámicas), requieren corrimientos a parte de los corrimientos de correlación. En este caso el residual de correcciones dinámicas es considerado como un promedio en la ventana de tiempo para la correlación. Nótese que la extensión de corrección dinámica y las variaciones en tiempo del residual de correcciones dinámicas tienden a reducir las magnitudes de los coeficientes de correlación. De manera, que en cuanto a las ventanas de tiempo, debe considerarse que los errores de correcciones dinámicas tienden a ser menores para tiempos de reflexión mayores.

V.1. Estimación de tiempo de desviación de estáticas.

Considérese una reflexión primaria fuerte de manera que aparezca sobre las trazas corregidas dinámicamente en un grupo de trazas de punto de reflejo común. Los tiempos de reflexión para el evento son diferentes sobre las distintas trazas a consecuencia del retraso del tiempo de viaje asociado con las variaciones laterales en la superficie ó cerca de ella. Correlacionando una traza y un modelo pueden ser estimadas las diferencias en tiempo de reflexión para las trazas. Desafortunadamente, el ruido aleatorio e interferencia de múltiples dentro de las ventanas de tiempo de correlación contaminan la correlación cruzada e introducen errores dentro de los tiempos relativos calculados. Para minimizar estos errores el carrimiento relativo de cada traza es calculado mediante la correlación de la traza con una traza modelo preliminar. Una vez estimadas las desviaciones de tiempo para las trazas, estas son corregidas y apiladas para formar una nueva traza modelo (intermedia), la cual es entonces correlacionada con cada traza de entrada. Nuevamente se estiman tiempos de desviación, se corrigen las trazas y se apilan para crear una traza modelo final con la cual se estiman las desviaciones definitivas.

Específicamente el procesamiento consiste de la siguiente secuencia de pasos :

- 1.- Escala de amplitudes de las trazas.- Cada segmento de traza es llevado a una amplitud común RMS. sobre la longitud de la ventana de tiempo de correlación.
- 2.- Sea $f_{|kh}(t)$ una ventana h de la traza k ésima en el grupo de trazas de pun

to de reflejo común j . Se efectúa la correlación cruzada de $f_{jkh}(t)$ con $M_{pjh}(t)$ que es la traza modelo preliminar, para todo el grupo de trazas j .

- 3.- Sean t_{jkh} y ϕ_{jkh} el carrimiento en tiempo determinado y el máximo valor de correlación normalizado respectivamente, para las trazas $f_{jkh}(t)$ y $M_{pjh}(t)$. Las trazas son alineadas de acuerdo con los valores t_{jkh} y una nueva traza modelo es dada por el peso promedio: (*)

$$M_{jkh}(t) = \frac{\sum_{k=1}^N w_{jkh} f_{jkh}(t - t_{jkh})}{\sum_{k=1}^N w_{jkh}} \quad \dots V.1.1.$$

donde:

$$w_{jkh} = \frac{\phi_{jkh}}{1 - \phi_{jkh}^2} \quad \dots V.1.2.$$

N = número total de trazas en el grupo de PRC.

- 4.- Las mismas ventanas de las trazas de entrada son entonces correlacionadas con la nueva traza modelo $M_{jkh}(t)$ y nuevos valores de t_{jkh} y ϕ_{jkh} son encontrados. Después los t_{jkh} son ajustados por una cantidad escalar común de manera que la suma de los t_{jkh} multiplicados por ese factor sea igual a cero. Estos valores de t_{jkh} y ϕ_{jkh} son usados en la ecuación V.1. para generar una traza modelo final $M_{fjh}(t)$.

- 5.- Las trazas modelo finales $M_{f,i}h(t)$ y $M_{f,i-1}h(t)$ son correlacionadas para encontrar un carrimiento en tiempo t_{jh} de modelo a modelo el cual es pro

* Ref. 7.

mediado sobre todas las ventanas. Las desviaciones en tiempo son actualizadas (por la suma de t_{ikh} con las corrientes acumuladas modelo a modelo), así las desviaciones de salida son efectivamente valores relativos a alguna traza de referencia en la sección.

δ.- El modelo preliminar para el próximo grupo ($j+1$) es dado por el siguiente esquema promediado en peso :

$$M_{p,j+1,h}(t) = \frac{1}{1+W_{jh}} \left[\bar{M}_{p,jh}(t) + W_{jh} M_{f,jh}(t) \right]$$

donde :

$M_{p,jh}(t) = \bar{M}_{p,jh}(t)$ después del corrimiento en tiempo dentro del alineamiento con $M_{f,jh}(t)$, y

$$W_{jh} = \frac{\phi_{jh}}{1 - \phi_{jh}}, \text{ donde } \phi_{jh} \text{ es el promedio de los valores } \phi_{ikh}$$

Nótese que cuando ϕ_{jh} es grande (≈ 1) entonces $M_{p,j+1,h}(t)$ (el modelo preliminar es significativamente mejorado), y cuando ϕ_{jh} es pequeño (≈ 0), entonces $M_{p,j+1,h}(t) \approx M_{p,jh}(t)$ (el modelo preliminar virtualmente no cambia del anterior).

Las cantidades ϕ_{ikh} son usadas para pesar, porque bajo ciertas consideraciones podemos considerarlas que son medidas de la relación señal-ruido. Los coeficientes de correlación tienen magnitudes entre 0 y 1.0 correspondientes a las variaciones de las relaciones señal-ruido de 0 a infinito. Porque de su relación el cociente señal-ruido, estos coeficientes de correlación

son pasadas por el proceso de evaluación de estáticas como medida de calidad de las trazas y sus correspondientes corrimientos en tiempo estimado.

La ventana de correlación es una zona selecta de tiempo en una localidad de trazas de PRC sobre la cual las trazas son correlacionadas con una traza modelo. Así la función resultante de correlación cruzada es una cantidad estadística cuyas características dan estimaciones de las diferencias relativas de tiempo entre señales según aparecen sobre una traza y una traza modelo mejorada, la confiabilidad estadística de estas estimaciones es por ventanas de tiempo seleccionadas sobre las cuales se juzga que el cociente señal-ruido es mejor. Puesto que las zonas de alta relación señal-ruido o morudo son separadas en tiempo, podemos frecuentemente dar más confiabilidad mediante selección múltiple de ventanas de tiempo centradas sobre los datos buenos de señal-ruido en una traza. Las zonas pobres de relación señal-ruido entre las ventanas de tiempo son aproximadas a cero antes de la correlación cruzada.

Las ventanas de tiempo pueden traslaparse, delimitarse ó ser separadas una de otra. Sin embargo, solo cuando las ventanas son separadas hay un beneficio de rechazo de zonas pobres de relación señal-ruido.

V.2. Evaluación de estáticas.

Las desviaciones en tiempo y valores de correlación normalizados dados por el proceso anterior son utilizados en este proceso para hacer una evaluación de estáticas. La solución consiste en un juego de correcciones superfi-

ciales uniformes de la fuente y del receptor, una estructura subsuperficial uniforme, efecto de tendido residual (correcciones dinámicas residuales), y expresiones de echado cruzado. El proceso de evaluación de estáticas emplea el método iterativo Gauss-Seidel para obtener una solución de error pesado dada por mínimos cuadrados.

El término "echado cruzado" se refiere a la componente de echado de un horizonte dado que está en la dirección del azimut perpendicular a la línea sísmica. La información sísmica obtenida de perfiles sísmicos lineales es insuficiente para hacer la evaluación del echado cruzado. El perfil sísmico debe ser configurado de tal manera que los disparos estén lateralmente desplazados de la línea de geófonos en cantidades diferentes, para que los PRC queden distribuidos tridimensionalmente en vez de bidimensionalmente, y así, los tiempos de viaje observados pueden ser empleados para una estimación de las componentes de echado cruzado en horizontes reflectores individuales ó zonas de tiempo.

La teoría de este proceso está dada por Wiggins, Lerner y Wiscup (1976) mediante el supuesto de que las estáticas residuales del tiro y del receptor son compatibles con la superficie, y que la estructura subsuperficial y el residual de tendido compatibles con el subsuelo. Basándose en esto se llega a un modelo matemático simple de los parámetros que contribuyen a las divergencias de tiempo observadas. Supóngase que el tiempo de reflexión observado para algún reflejo h (horizonte), y para una traza sísmica corregida dinámicamente resultante de un tiro en la posición j , y el receptor en la posición i , está dado por T_{ijh} . El verdadero tiempo de reflexión T'_{ijh} (independientemente de los errores de ob

servación) está dado por : (*)

$$T'_{ijh} = S_i + R_i + G_{kh} X_{ij}^2 + D_{kh} Y_{ij} \quad \dots V.2.1.$$

donde :

S_i = anomalía estática residual asociada con el punto de tiro en la posición i ,

R_i = anomalía de estáticas residuales asociada con el receptor en la posición i ,

G_{kh} = tiempo de viaje vertical de ida y vuelta entre el nivel de referencia y el reflector en el punto de ubicación de PRC k para un horizonte h .

M_{kh} = coeficiente residual por efecto de tendido a una corrección dinámica imperfecta en el horizonte h .

X_{ij} = distancia entre el disparo y el receptor,

D_{kh} = coeficiente de echado cruzado en el PRC k para un horizonte h ,

Y_{ij} = distancia media de desplazamiento perpendicular (al PRC) a partir de la salida del perfil de líneas.

Idealmente existe un tiempo de reflexión observado T_{ijh} para cada horizonte en cada trazo de una sección. En consecuencia el problema de estáticas se reduce a la solución de quizá miles de ecuaciones para miles de incógnitas (G_{kh} , M_{kh} , D_{kh} , S_i , R_i). Siendo la suma de los errores de observación cuadráticos

$$E = \sum_{ijh} (T_{ijh} - T'_{ijh})^2 \quad \dots V.2.2.$$

Los parámetros buscados serán aquellos que minimicen el error

cuadrático

* Ref. 8.

Una solución estadística de buena confiabilidad se obtiene considerando el hecho de que el tiempo observado (ó la divergencia de tiempo) estimada para cada traza en el proceso anterior, se obtiene del corrimiento en tiempo al cual la función de correlación cruzada opera. Sin embargo, el valor de correlación cruzada normalizada en la selección es, por sí misma, una medida de la relación señal-ruido en la información de las trazas. Así, debemos dar más peso a aquellas observaciones cuyas valores de correlación asociados sean grandes. Minimizando la suma jerarquizada (pesada) de cuadrados :

$$\epsilon_w = \sum_{ijh} W_{ijh} (T_{ijh} - T'_{ijh})^2 \quad \dots V.2.3.$$

donde:

$$W_{ijh} = \frac{\phi_{ijh} U_h}{1 - \phi_{ijh}} \quad \dots V.2.4.$$

donde:

ϕ_{ijh} = valor de correlación cruzada normalizada para la traza ij en un horizonte h (ventana de tiempo), y

U_h = peso deseado para el horizonte h.

Debido a que el número de ecuaciones comprendido es extremadamente grande se usa una aproximación iterativa para resolver las ecuaciones resultantes del problema de minimización de mínimos cuadrados. Tal aproximación es llevada a cabo, como ya se mencionó, mediante el método de Gauss-Seidel, llegando con ello al siguiente grupo de ecuaciones :

$$G_{kth}^{(c)} = \frac{\sum_{i,j} \left[T_{ijh} - \left[S_i^{(c-1)} + R_i^{(c-1)} + M_{kth}^{(c-1)} X_{ij}^2 + D_{kth}^{(c-1)} Y_{ij} \right] \right] \cdot W_{ijh}}{\sum W_{ijh}}$$

para $k=1, \dots, nh$ V.2.5.

$$M_{kth}^{(c)} = \frac{\sum_{i,j} \left[T_{ijh} - \left[S_i^{(c-1)} + R_i^{(c-1)} + D_{kth}^{(c-1)} Y_{ij} + G_{kth}^{(c)} \right] \right] \cdot W_{ijh} \cdot X_{ij}^2}{\sum W_{ijh} \cdot X_{ij}^4}$$

para $k=1, \dots, nh$ V.2.6.

$$D_{kth}^{(c)} = \frac{\sum_{i,j} \left[T_{ijh} - \left[S_i^{(c-1)} + R_i^{(c-1)} + G_{kth}^{(c)} + M_{kth}^{(c)} X_{ij}^2 \right] \right] \cdot W_{ijh} \cdot Y_{ij}}{\sum W_{ijh} \cdot Y_{ij}^2}$$

para $k=1, \dots, nh$ V.2.7

$$S_i^{(c)} = \frac{\sum_{h=1} \sum_{j,k} \left[T_{ijh} - \left[R_i^{(c-1)} + G_{kth}^{(c)} + M_{kth}^{(c)} X_{ij}^2 + D_{kth}^{(c)} Y_{ij} \right] \right] \cdot W_{ijh}}{\sum W_{ijh}}$$

....V.2.8.

$$R_i^{(c)} = \frac{\sum_{h=1}^c \sum_{i,k} \left[T_{ijh} - \left[G_{kh}^{(c)} + M_{kh}^{(c)} X_{ij}^2 + D_{kh}^{(c)} Y_{ij} + S_i^{(c)} \right] \right] \cdot W_{ijh}}{\sum W_{ijh}} \quad \dots V.2.9.$$

Donde la notación i, j, k implica la sumatoria de todas las líneas (j) y receptores (i), cuyo punto de reflejo común sea k , y c representa el contador de ciclos de iteración.

Nótese que para la primera iteración ($c=1$) se tiene del lado derecho :

$$S_i^{(0)}, R_i^{(0)}, M_{kh}^{(0)}, \text{ y } D_{kh}^{(0)}$$

que son las cantidades iniciales de estáticas, efecto de tendido residual y echado cruzado. Si se consideran estos valores iniciales como cero, tenemos que en la primera iteración, para la ecuación V.2.5 se trata de un promedio jerarquizado de los tiempos observados T_{ijh} , para todas las trazas sísmicas de ese punto de reflejo común, y la ecuación V.2.6 es un promedio pasado de los T_{ijh} asociados al efecto de tendido residual después de quitar la primera suposición de la estructura de los valores T_{ijh} .

Wiggins, Lerner y Wiscup (1976), demostraron que el proceso es convergente para todas las longitudes de onda espaciales con la excepción de algunas expresiones de longitudes de onda muy largas dentro del orden de la longitud de la línea sísmica completa.

Las suposiciones iniciales de M , D , S , R , son necesariamente erróneas, sin embargo estos errores tienden a cero a medida que se aumenta el número de iteraciones.

V.3. Aplicación de estáticas residuales.

Las correcciones estáticas residuales evaluadas por el proceso anterior, ordenadas por trazas de PRC serán aplicadas directamente a las trazas g pre pariadas.

Una corrección de corrimiento de tiempo (estático) se refiere a un tiempo constante mediante el cual una traza sísmica completa se desplaza pa ra compensar algunas anomalías en las proximidades de la superficie al propagarse las ondas sísmicas. Se acostumbra considerarlo como una corrección del efecto re sultante de: 1).- parámetros de campo conocidos (topografía de la superficie, ba ja velocidad en las capas intemperizadas, etc.), 2).- estáticas residuales derivadas automáticamente (tales como las estáticas relativas a una superficie constante del disparo y del receptor), 3).- cualquier comportamiento anómalo de tiempo (como el que se puede observar en una sección apilada) que el geofísico interpreta como independiente del tiempo de reflexión.

Las correcciones estáticas aplicadas a un grupo de trazas de PRC proporcionan el medio para que se alteren la forma del horizonte (por ejemplo, aplanamiento de un horizonte). Las correcciones pertenecientes a las únicas localidades de punto de tiro y receptor asociadas a una traza dada se suman juntas

y la corrección resultante es aplicada a la información.

La convención de signo, es que las correcciones positivas implican que las trazas de información serán retrasadas en tiempo (desplazamiento en la dirección del último tiempo), mientras que las estáticas negativas implican que las trazas serán adelantadas en tiempo.

Como ejemplo de la aplicación de las correcciones estáticas residuales, se tiene la sección de la figura V.1.

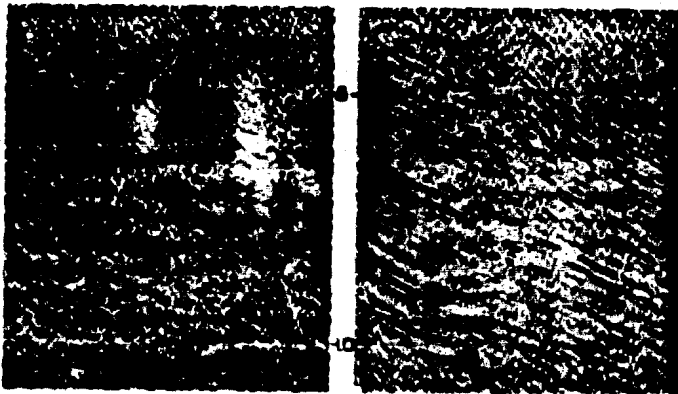


Fig. V.1.

VI. FILTRADO EN FRECUENCIA.

Como se mencionó en el capítulo III, existen dos categorías principales de filtros : a).- filtros de frecuencia y b).- filtros óptimos. En este capítulo se tratará lo referente a filtrado de frecuencia, que como su nombre lo indica es diseñado sobre la base de aceptación ó rechazo de ciertas componentes de frecuencia de la señal (señal + ruido).

Ya que en simología se trabaja con tiempos de arribo de la señal, y hablando de filtros de frecuencia, la transformación útil es el par de transformadas de Fourier. Así si una función en el tiempo (t) es $f(t)$ (traza sísmica), y la representación de ésta en el dominio de la frecuencia (ω) es $F(\omega)$, se tiene :

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (\text{Transformada} \dots \text{VI.1} \\ \text{de Fourier}).$$

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (\text{Transfer-} \dots \text{VI.2} \\ \text{mada Inversa} \\ \text{de Fourier}).$$

La habilidad para transformar datos de un dominio a otro es muy útil ya que proporciona un medio para hacer análisis cuantitativo y comparaciones de varias señales relacionadas. La amplitud y la fase de cada componen

te de frecuencia puede ser medida con considerable precisión y frecuentemente es muy fácil detectar la naturaleza exacta de diferencias que puedan existir entre las dos señales. También es posible modificar señales selectivamente por eliminación ó cambios de componentes específicas de la señal.

En el dominio del tiempo una función es representada mediante una sola gráfica (traza). Esto no puede ser así en el dominio de la frecuencia, porque las cantidades que resultan de la transformación a este dominio son complejas. Por lo tanto una función en este dominio se representará por dos gráficas conocidas con los nombres de espectros de amplitud y espectro de fase.

Escribiendo la ecuación VI.1. en otra forma :

$$F(w) = R(w) + jI(w) = [F(w) e^{j\phi(w)}] \quad \dots VI.3$$

donde :

$R(w)$ es la parte real de $F(w)$,

$I(w)$ es la parte imaginaria de $F(w)$, y

$\phi(w)$ es el ángulo de fase .

En la ecuación VI.3 :

$$|F(w)| = [R(w)^2 + I(w)^2]^{1/2} \quad \dots VI.4$$

$$y \quad \phi(w) = \tan^{-1} \left[\frac{I(w)}{R(w)} \right] \quad \dots VI.5$$

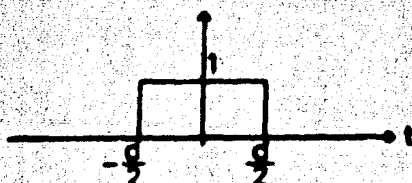
La gráfica de la función $|F(w)|$ es el espectro de am-

plitud, y a la gráfica de $\phi(\omega)$ se le denomina espectro de fase.

Función original en el dominio

del tiempo :

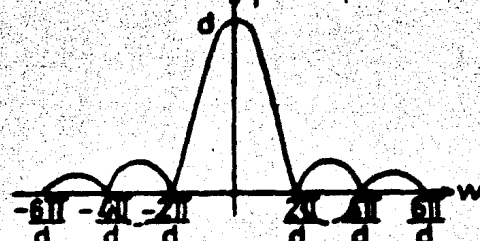
$f(t)$



Espectro Continuo de

Amplitud :

$|F(\omega)|$



Espectro Continuo de Fase :

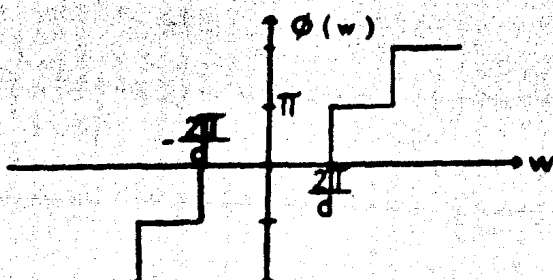
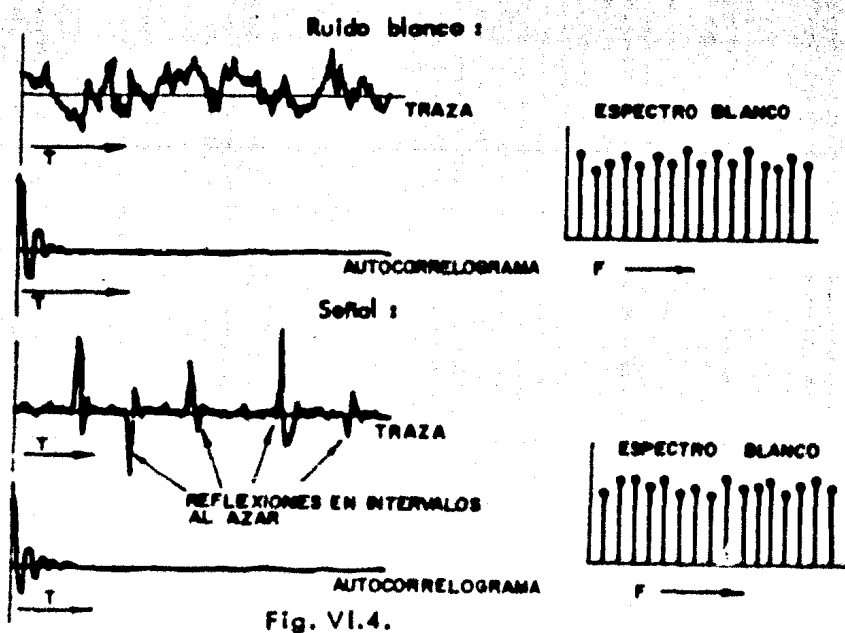
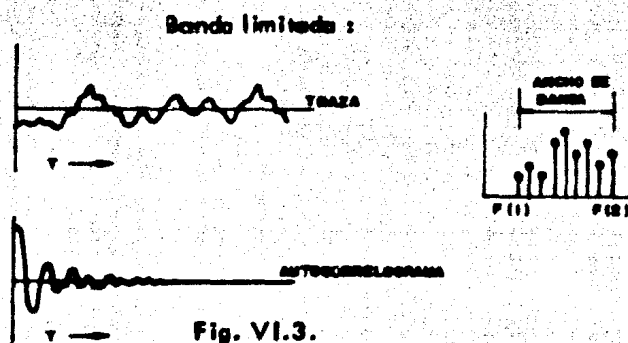


Fig. VI.1.

Otra aplicación útil de la transformación de datos de un dominio a otro, está en la determinación de los cambios producidos en la señal conforme pasó a través de un proceso dado. Así la autocorrelación de una traza proporciona información acerca del contenido de frecuencia. La siguiente figura (figura VI.2) muestra la autocorrelación (en el dominio del tiempo), así como los espectros de amplitud y fase de esta función de autocorrelación. El espectro de amplitud de la función de autocorrelación es el mismo que el de la

de autocorrelación tiende a ser un impulso. Cuando el espectro contiene cantidades aproximadamente iguales de todas las frecuencias se le llama blanco. En la figura VI.4 se ilustra este concepto.



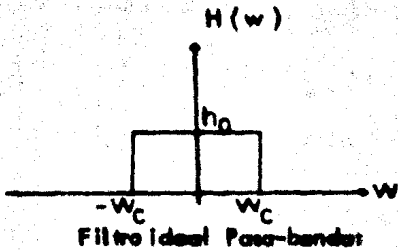
Se nota que las funciones de autocorrelación y espectros de

amplitud de estas dos trazas son similares. La diferencia se encuentra en el espectro de fase, el cual para el ruido aleatorio es muy irregular, mientras que para la señal es tal que las reflexiones son visibles donde las componentes de frecuencia se alinean en fase.

Idealmente se desearía que se transmitieran sin distorsión todas las componentes de frecuencia de cierta banda, esto se lograría con un filtro ideal. Es decir, en un filtro ideal el espectro de amplitud en la banda es constante y el espectro de fase es lineal. El filtro ideal tiene cortes muy abruptos, o sea con pendiente infinita.

Los filtros ideales se pueden clasificar en filtros pasa-baja, pasa-alta, pasa-banda, y filtro Notch (que atenúa una banda muy estrecha de frecuencias, por ejemplo: 60 Hz.), que son ilustrados en la siguiente figura:

Filtro ideal Pasa-bajas:



Filtro ideal Pasa-altas:

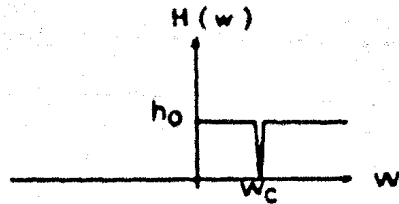
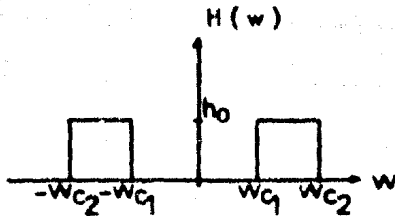
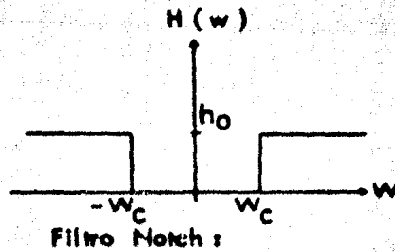


Fig. VI.5.

En el dominio de la frecuencia, la entrada (función a filtrar), la salida (función filtrada) y la función de transferencia del sistema (filtro), están relacionadas de la siguiente forma :

$$F_s (w) = H (w) F_e (w)$$

donde :

$F_e (w)$ es la función de entrada ,

$F_s (w)$ es la función de salida , y

$H (w)$ es la función de transferencia del sistema que actúa sobre la entrada para producir la salida.

Así podemos tener, por ejemplo la función de transferencia de un filtro ideal de paso-bajo, que se representa matemáticamente mediante la ecuación :

$$H (w) = \begin{cases} 1 & \text{para } |w| < w_c \\ 0 & \text{para } |w| > w_c \end{cases}$$

utilizando la transformada inversa de Fourier (VI.2), se tiene :

$$h (t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-w_c}^{w_c} (1) e^{iwt} dw$$

resolviendo la integral se obtiene :

$$h (t) = \frac{w_c}{\pi} \frac{\sin (w_c t)}{w_c t}$$

cuya gráfica se puede observar en la figura VI.6.

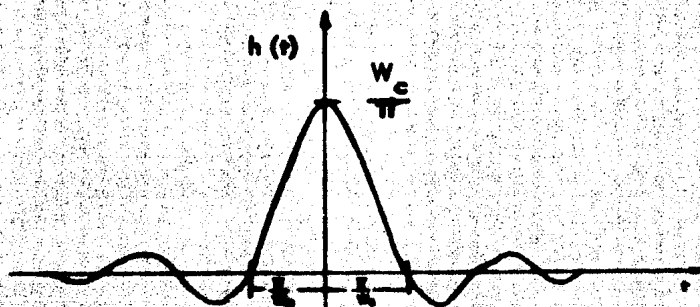


Fig. VI.6.

De lo anteriormente expuesto se observa que para filtrar los datos en el dominio del tiempo se deconvuelve la traza con el operador del filtro. Para ejecutar la misma operación en el dominio de la frecuencia se multiplican los espectros de amplitud, y se suman los espectros de fase. El espectro de amplitud de la traza de salida contiene solamente la frecuencia seleccionada y el espectro de fase queda inalterado, esto es debido a que el filtrado es de fase cero.

Las señales sísmicas del subsuelo son usualmente más fuertes en una banda de frecuencias que se extiende de 15 a 50 ó 60 Hz. aproximadamente. Un análisis del espectro de una traza sísmica comparada a la de coeficientes de reflexión demostrará que la tierra actúa como un filtro que quita ó al menos atenúa seriamente la mayor parte de las componentes de frecuencia que están fuera del rango antes mencionado. Esto se observa en la figura VI.7.

Es evidente que la mayor parte de la información contenida en los coeficientes de reflexión ha sido descartada ó al menos atenuada. Afortunadamente esto no es una pérdida considerable para muchas aplicaciones sísmicas.

micas.

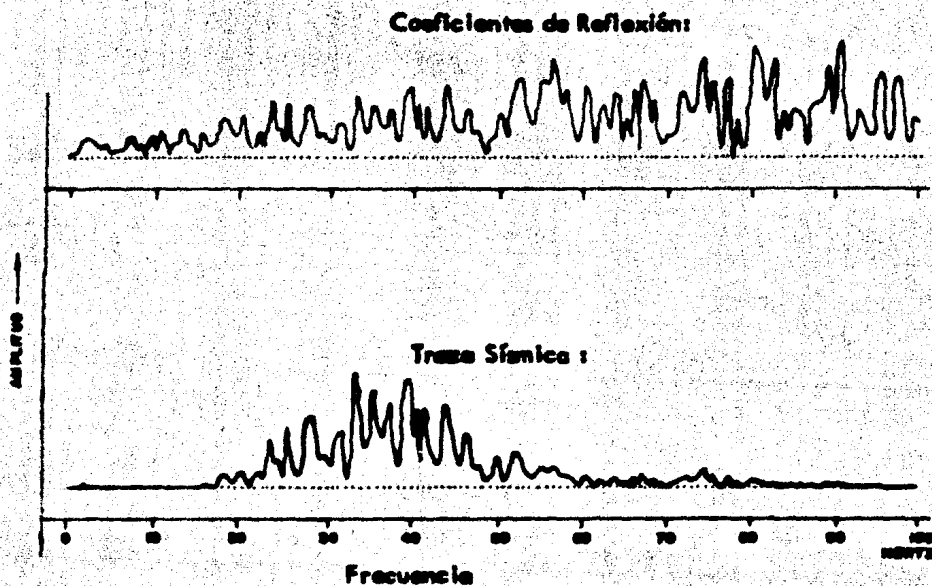


Fig. VI. 7.

Una señal sísmica es muy débil y debe ser grabada con equipos sensibles. El equipo es igualmente sensible para la señal y para el ruido, por lo tanto, influencias externas tales como viento, paso de vehículos, y señales indeseadas asociadas con el proceso de medición pueden producir bastante ruido como para inundar la señal. Afortunadamente la mayor parte de este ruido está concentrado fuera del rango de frecuencias de la señal el cual es normalmente transmitido por la tierra. El ruido de vehículos y ruido superficial tienden a estar en el principio del espectro, mientras que el ruido del viento y algún ruido del tiro (explosión) está en el final.

A esto, viene una muy común práctica de tener incluido equipo de filtrado en el instrumento de grabación el cual puede ser ajustado para cortar ciertas frecuencias, generalmente aquellas que comprende el ruido, permaneciendo así las componentes de la señal. Quitando parte de este ruido la señal puede ser vista con gran claridad y, por tanto, el resultado es una mejor grabación.

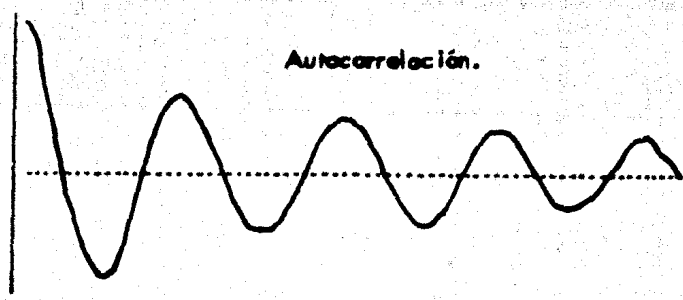
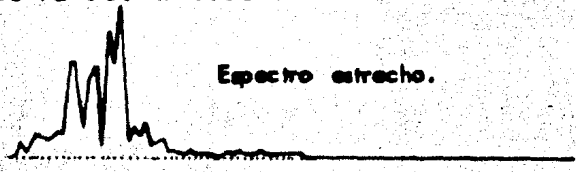
La parte de la información sísmica que está en altas y bajas frecuencias es desechada junto con el ruido, pero puesto que es de baja amplitud, relativamente contribuye poco en la señal de reflexión, la ganancia en calidad es mucho mayor que la pérdida de información.

El efecto neto de la transmisión de una señal de reflexión sísmica de una fuente a un receptor es usualmente considerado como una forma de filtrado pasabandas, el cual elimina (ó mejor dicho atenúa severamente) todas las componentes de frecuencia fuera de cierto rango del espectro de amplitud. El propósito de la deconvolución es restaurar las componentes atenuadas a su nivel original. La dificultad consiste en determinar cual es el nivel adecuado para cada componente de frecuencia. El resultado de una deconvolución efectiva es una traza con cada componente de frecuencia a su nivel relativo adecuado, como se observa en la figura VI.8.

En sísmología se requieren filtros con pendientes muy pronunciadas, los cuales se diseñan en frecuencia, pero su aplicación es en el dominio del tiempo. De lo anteriormente visto se observa que los filtros con pendientes muy a

brutas en frecuencia, como el pasabajas ideal anterior tienen correspondientes operadores en tiempo que se extiendan indefinidamente, por lo cual existe el problema de saber en que puntos cortar esta función. Por medio de la experiencia se ha visto que un valor adecuado de corte está entre 30 y 50 puntos (muestras del filtro digital). El hecho de cortar el operador en el dominio del tiempo implica que al regresar al dominio de las frecuencias, no se llegará a la función de la cual se partió, lo cual se observa en la figura VI. 9.

Antes de la deconvolución :



Después de la deconvolución :

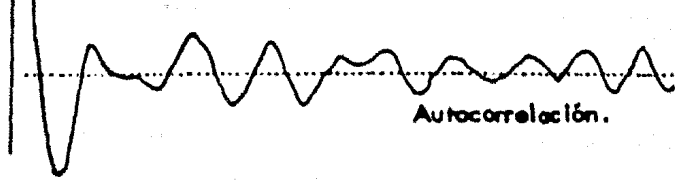
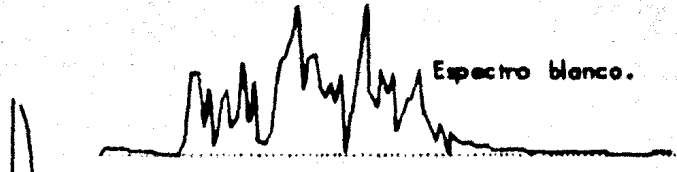


Fig. VI.8.

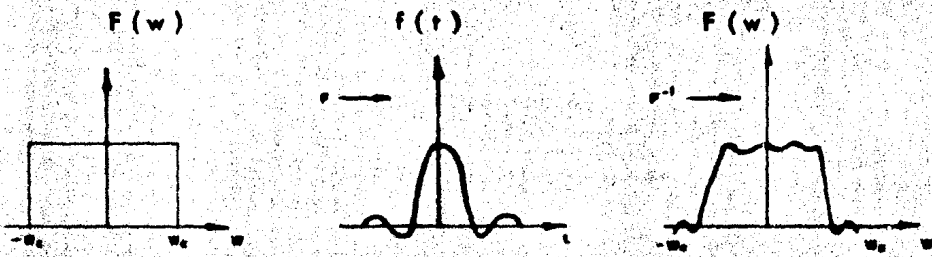


Fig. VI. 9.

Para poder conocer efectivamente cual va a ser el efecto del filtro, después de haber regresado al dominio de las frecuencias, se hace un ajuste por el método de mínimos cuadrados ó por polinomios. Se obtienen así los nuevos valores de frecuencia de corte y su pendiente.

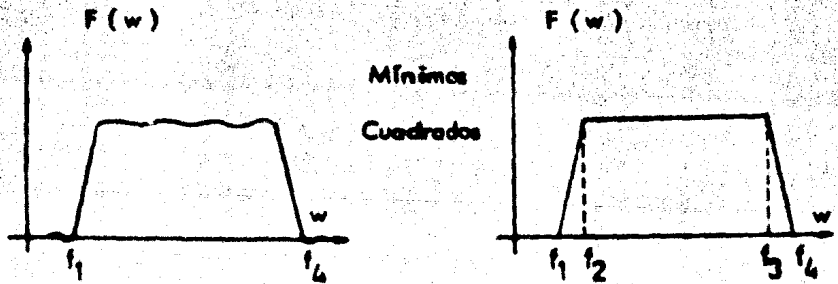


Fig. VIII.10.

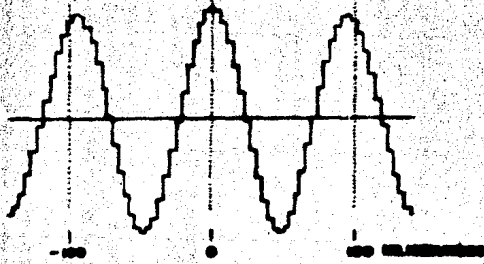
De esta manera es necesario especificar cuatro frecuencias para describir la respuesta deseada del filtro en el dominio de la frecuencia. Ninguna frecuencia entre 0 y f_1 será permitida que pase, de f_1 a f_2 gradualmente se les permitirá su paso, los datos entre las frecuencias f_2 y f_3 serán pasados sin atenuación, o sea que esta es la banda de paso del filtro. En el rango de f_3 a f_4 disminuirá su paso gradualmente y de f_4 en adelante no pasarán.

Los extremos de filtros pasabandas son mostrados a continuación:

Filtro pasabandas con frecuencias

de corte : 9, 10, 11, 12:

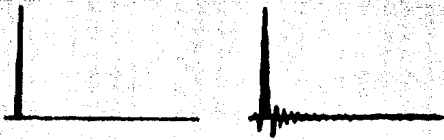
Dominio del tiempo:



Dominio de la frecuencia:

Respuesta
desada:

Respuesta
real:

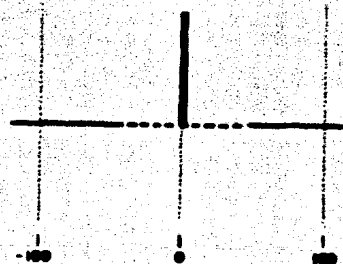


(a)

Filtro pasabandas con frecuencias

de corte : 1, 2, 120, 128 :

Dominio del tiempo :



Dominio de la frecuencia:

Respuesta
desada:

Respuesta
real:



(b)

Fig. VI.11.

En el filtro (a) casi una sola frecuencia es el ancho de banda y su operador en el dominio del tiempo es casi un coseno. En el filtro (b) el ancho de banda incluye casi todas las frecuencias útiles, por lo tanto su operador en el dominio del tiempo es cercano a un impulso.

La pendiente de las zonas de transición de los filtros también afecta a sus operadores. En la figura VI.12 se muestran los efectos de variación de

pendiente del lado de las frecuencias bajas. De lo cual se observa que la zona de transición de las frecuencias bajas será de menos de una octava de ancho (una octava es una diferencia en frecuencia en razón de dos a uno ó uno a dos).

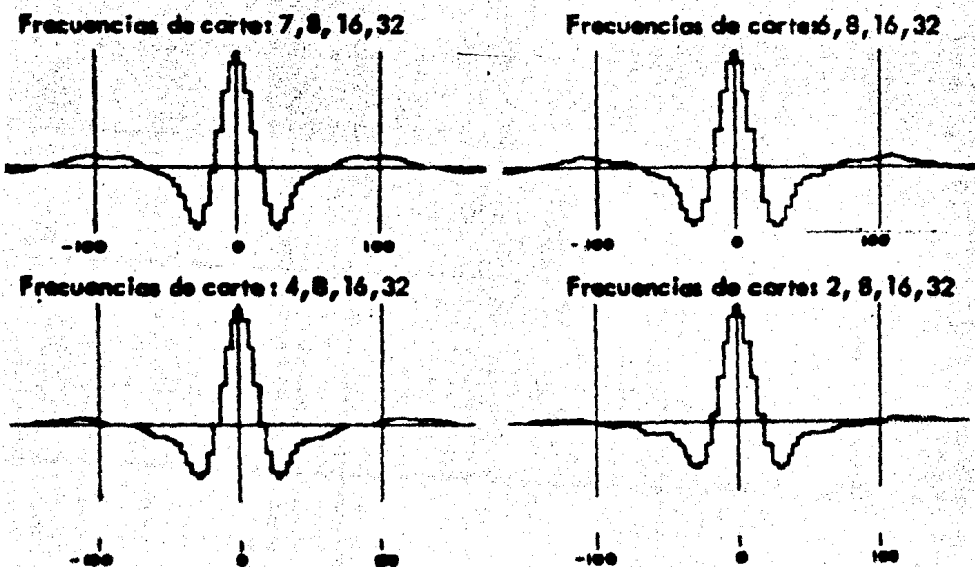


Fig. VI.12.

La figura VI.13 muestra los efectos de variación de la pendiente del lado de las frecuencias altas. De lo cual se observa que el ancho de la banda de transición en frecuencias altas será de cerca de la mitad de una octava.

Resumiendo, la oscilación del operador en el dominio del tiempo depende: del ancho de banda de peso y de las pendientes de la zona de transición. Tal que con una banda de peso amplia pueden usarse pendientes fuertes, y con pendientes suaves puede ser usada una banda estrecha.

Las frecuencias bajas son extremadamente importantes en la de

finición de la amplitud de reflexión. La experiencia ha demostrado que el principio del espectro contiene la información de velocidad, la parte media (por lo tanto el ancho de banda) contiene la información estructural, las frecuencias altas la resolución. Aunque estrictamente esta partición no es correcta, para propósitos prácticos se apega fuertemente a lo expuesto. (*)

Para conocer el contenido de frecuencia de la señal útil se usa un análisis de filtros que consiste en diseñar varios filtros con diferentes frecuencias de corte, y aplicarlos a lo largo de una sección sísmica ó en parte de ella, y los resultados de estas pruebas son analizados visualmente determinando cual de ellas "limpia" mejor determinada ventana de la sección. De esta manera se diseña un solo filtro variable en tiempo para toda la sección.

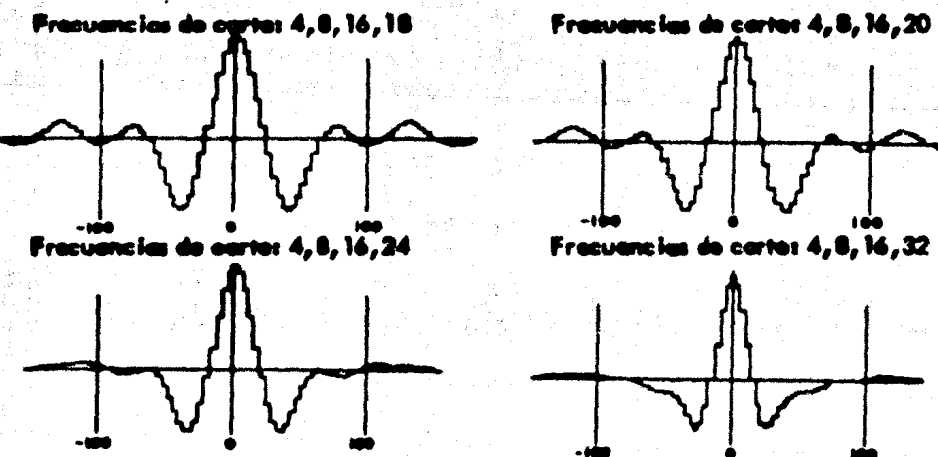


Fig. VI.13.

* Ref. 9.

VII. MIGRACION .

En una sección apilada, los eventos reflejados son graficados como si la energía sísmica viajara en trayectorias de rayos verticales. Esta hipótesis es adecuada cuando el horizonte de reflexión tiene poco ó ningún echado. Sin embargo, cuando el reflector está buzando, esta hipótesis no es correcta, lo cual se muestra en la figura VII.1.

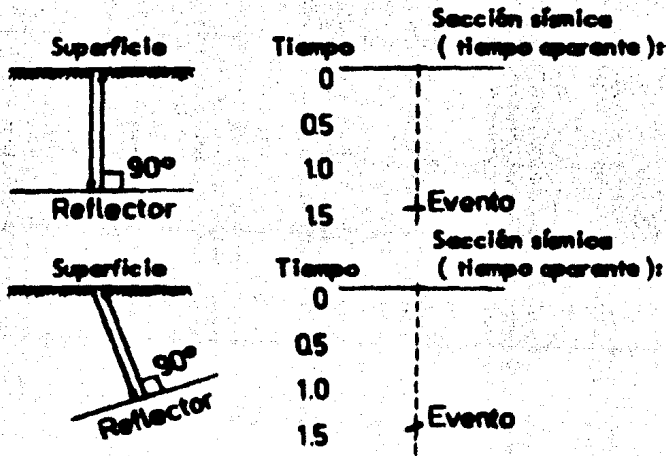


Fig. VII.1.

Para corregir lo anterior, los eventos en una sección sísmica son "migrados" a su posición correcta en tiempo y espacio, como se observa en la figura VII.2.

La localización correcta es determinada por:

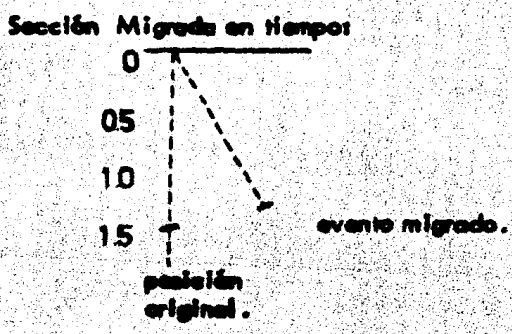


Fig. VII.2.

- A).- Tiempo de reflexión.
- B).- Echado aparente.
- C).- Velocidad sísmica.

Considerando una fuente (F) y un solo receptor (R) separado de élle una cierta distancia en la superficie de un material que tiene una velocidad constante (V), el lugar geométrico del punto para el cual se observa una reflexión en el tiempo T es elíptico. Este viene de la definición de una elipse, como el lugar geométrico de un punto C, la suma de cuyas distancias a otros dos puntos (F y R) es una constante (VT). La superficie de reflexión debe ser tangente a la elipse. Si el tiro y el receptor se encuentran en el mismo punto, la elipse se convierte en un círculo.

$$\frac{FC}{V} + \frac{CR}{V} = T_{PR}$$

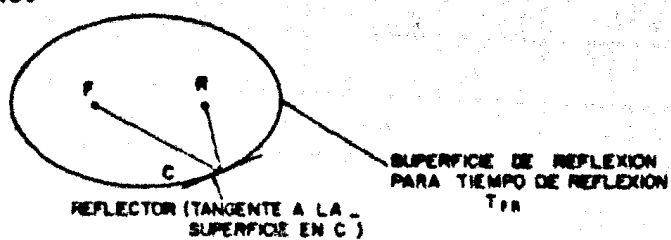


Fig. VII.3.

Una sola observación no puede por si sola localizar la posición de C sobre la elipse, pero una combinación de tiempos para dos ó más trayectorias de ondas del mismo reflector puede hacerlo.

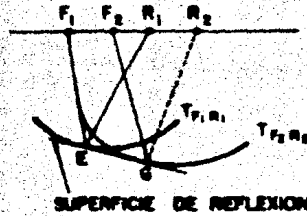


Fig. VII.4.

Un conocimiento de los tiempos de reflexión $T_{F_1 R_1}$ y $T_{F_2 R_2}$ hace posible dibujar las elipses respectivas correspondiendo a estos tiempos, y la superficie de reflexión es la tangente a ambas elipses.

Es evidente de este diagrama que cuando el reflector está huzando, los puntos de reflexión verdaderos son desplazados lateralmente y hacia arriba de sus posiciones.

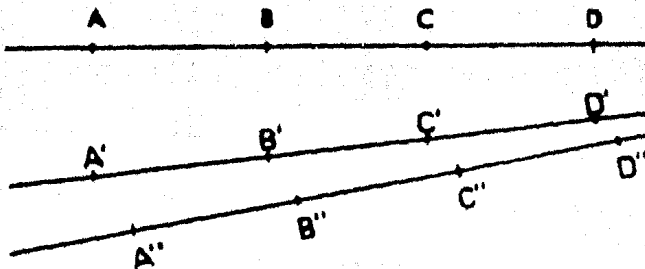


Fig. VII.5.

donde los puntos A, B, C, D, son los puntos de tiro sobre la superficie; A', B',

C' , D' , son los puntos que definen el contacto con una inclinación errónea, y A'' , B'' , C'' , D'' , son los puntos que definen el contacto con buzamiento real.

En áreas con fallas se presenta el mismo problema, solo que en estos casos se presenta el fenómeno de difracción, el cual hace que aparezcan sobre la sección sísmológica curvas cónsecas hacia abajo. El motivo por el cual aparecen en secciones sísmológicas estas curvas cónsecas se puede explicar por medio del Principio de Huygens, el cual establece que: Cada punto de un frente de onda es a su vez una fuente de nuevas ondas. La envolvente de todas las ondas es lo que constituye la onda que se propaga.

VII.1. Migración en el dominio del tiempo.

La migración ó transformación de posiciones de reflexión aparente a posiciones verdaderas, puede ser llevada a cabo gráficamente con plantillas especiales, mecánicamente con dispositivos de graficación, ó por técnicas automáticas que fueron introducidas alrededor de 1969 y cuyos programas de computadora hacen uso de los mismos principios de la migración antes de que la computadora estuviera disponible, esto se refiere a los conceptos de J. G. Hogedorn (*), en donde se analiza la migración usando curvas ó superficies de frentes de onda, según se trate de migración bidimensional ó tridimensional, así como también curvas ó superficies de máxima convexidad, según sea el caso.

En la figura VII.6. se ilustra una superficie de máxima convexidad (curvas de difracción) para el caso bidimensional. Esta curva representa el

* Ref. 10.

tiempo a lo largo de una trayectoria inclinada que sería requerido para una reflexión ó difracción de un punto en el subsuelo para viajar a un receptor conforme su distancia horizontal cambia. Así, un punto reflector en el tiempo P aparecería en una sección sísmica como una curva de difracción.

Superficie de máxima convexidad para el punto de reflexión en P . Las posiciones a lo largo de la curva son mostradas por seis puntos de tiro con geófonos incidentes:

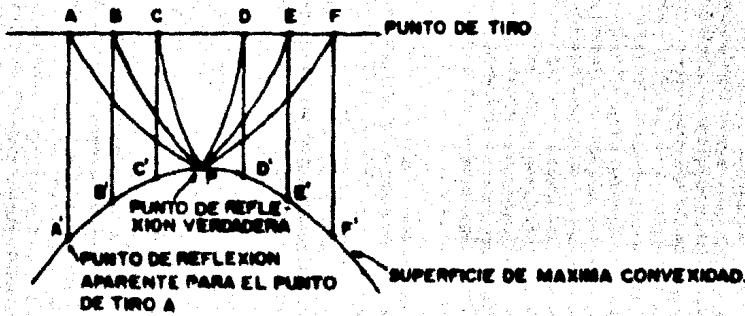


Fig. VII.6.

En la figura anterior $\overline{AA'}$ representa el tiempo de viaje para la trayectoria de A a P .

Si la velocidad sísmica es conocida como una función de la profundidad, una gráfica de frentes de onda (los frentes de onda indican la posición a tiempos sucesivos de una perturbación sísmica en movimiento, y son curvas de diversas formas dependiendo de las variaciones de velocidad, así, si la velocidad es uniforme la gráfica consistirá de círculos concéntricos, estando el centro en el punto de tiro) pueda ser construída. Un evento que tenga un tiempo aparente T_0 en

la sección podría tener su posición verdadera a lo largo del frente de onda W_a (curva de igual tiempo de reflexión) dependiendo del echado del evento (hay que notar que el evento se transforma tangente al frente de onda una vez que es migrado).

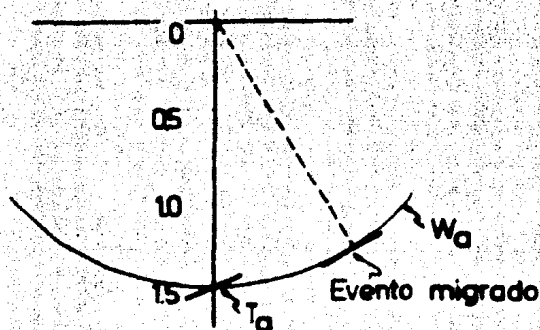


Fig. VII.7.

En la figura VII.8 se muestra como las gráficas de curvas de máxima convexidad y frentes de onda, son usadas en la migración de un segmento. La curva apropiada de máxima convexidad es tangente al segmento S en el punto Q . La posición verdadera de Q en el espacio será en P , el cual es localizado en el vértice de la curva. El echado del reflector migrado es obtenido de la curva de iguales tiempos de reflexión (representando la posición de un frente de onda en el tiempo de viaje indicado) que tiene un eje central a través de Q . El segmento migrado S' es dibujado a través de P y es tangente a la curva de igual tiempo de reflexión.

De esta manera, si un evento en una sección que correspondiera a una curva de difracción, fuera migrado adecuadamente, la curva entera (ó cualquier segmento en ella) sería migrado al punto P , que es la cima de la curva

de difracción.

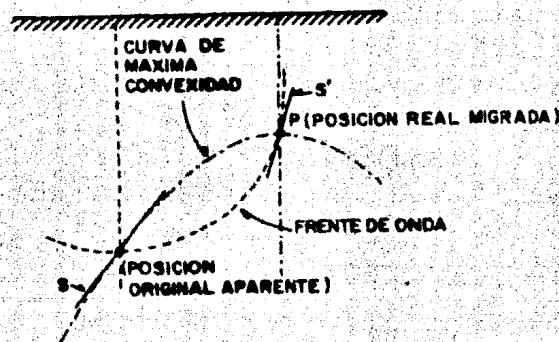


Fig. VII.8.

En la migración manual usando la técnica de Hagedoorn (*), son necesarias dos plantillas, una plantilla de frentes de onda y una de curvas de máxima convexidad. Las dos curvas son localizadas en yuxtaposición con las posiciones coincidentes de profundidad cero. El punto de reflexión es localizado a lo largo de la curva de la plantilla de frentes de onda al tiempo de reflexión a lo largo del eje central (vertical) de la plantilla. La plantilla con las curvas de máxima convexidad es deslizada lateralmente hasta que se encuentra una línea que es tangente al echado aparente (no migrado) en el tiempo del punto de reflexión. La posición migrada del punto está en el vértice de esta línea, y el echado del segmento migrado será la tangente al frente de onda correspondiente al tiempo de reflexión donde esta interseca al vértice de la curva de difracción (figura VII.9).

En la plantilla de frentes de onda generalmente se grafican o-

* Ref. 11.

tras curvas que corresponden a las trayectorias de la energía para diferentes ángulos de penetración dentro de la tierra desde el punto de tiro en la superficie. Las trayectorias son siempre perpendiculares a los frentes de onda. Para una velocidad constante las trayectorias son líneas rectas que radian del centro. Cuando hay un incremento lineal de la velocidad con la profundidad, las trayectorias son círculos ortogonales a los círculos (que ya no son concéntricos) de los frentes de onda. La figura VII.10 ilustra una plantilla de frentes de onda y trayectorias de rayo (con incremento de la velocidad con la profundidad).

Procedimiento práctico de migración bidimensional:

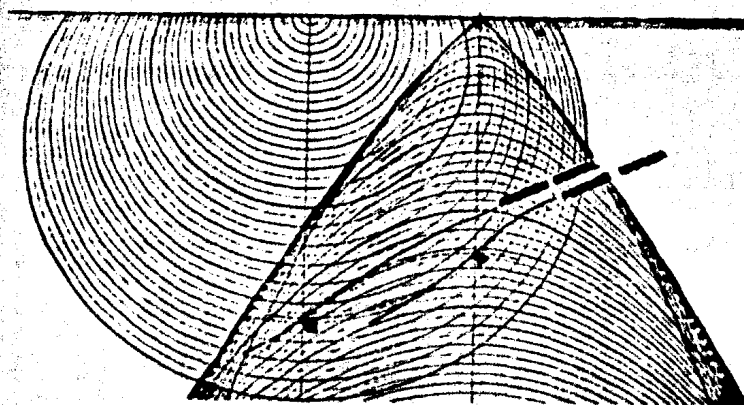


Fig. VII.9.

Los programas para migración están generalmente basados en la superficie de máxima convexidad de Hogedoarn. La migración automática como los otros tipos de migración, requiere un conocimiento de la relación velocidad-profundidad, y está basada en dos hipótesis: (1) que todos los reflectores buzan

tes son tangentes a alguna curva de máxima convexidad construida con su función de velocidad, y (2) que tales reflectores al ser migrados aparecerán en el vértice de esta curva. La figura VII.11 ilustra como este principio es aplicado en el diseño de los programas de computadora.

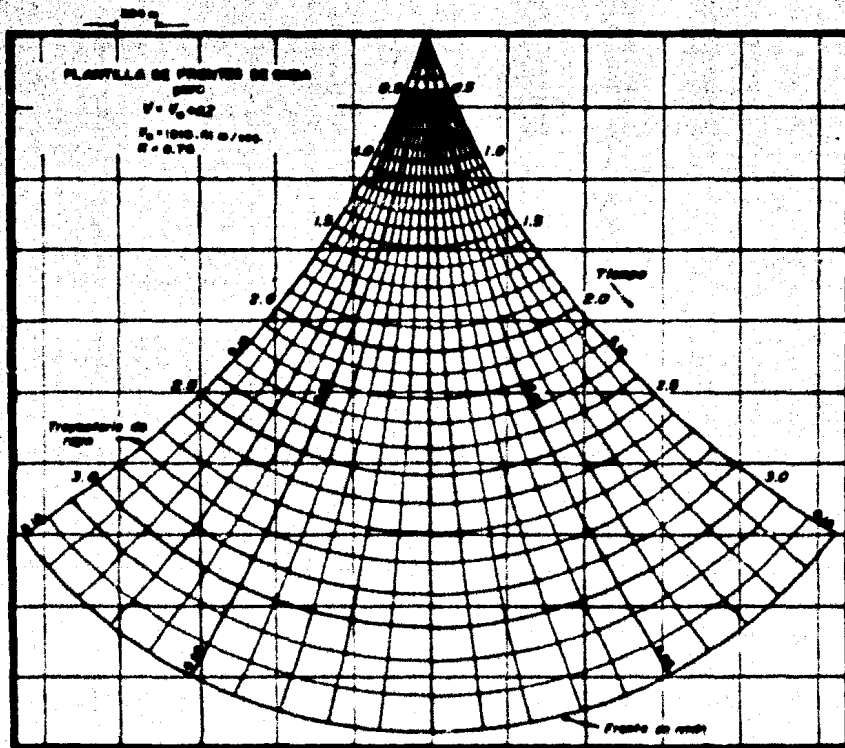


Fig. VII.10.

En el ejemplo de la figura VII.11, los señales en los canales de 1 a 99 son sumados para obtener datos para la graficación en una sola traza de salida (traza 50), la cual es impresa en la sección final. El tiempo de muestreo usado para determinar las amplitudes de traza en cada uno de los 99 canales es a-

quel en el cual este canal es cruzado por la curva de máxima convexidad que tiene su vértice en el tiempo 1.2 seg. en el canal 50.

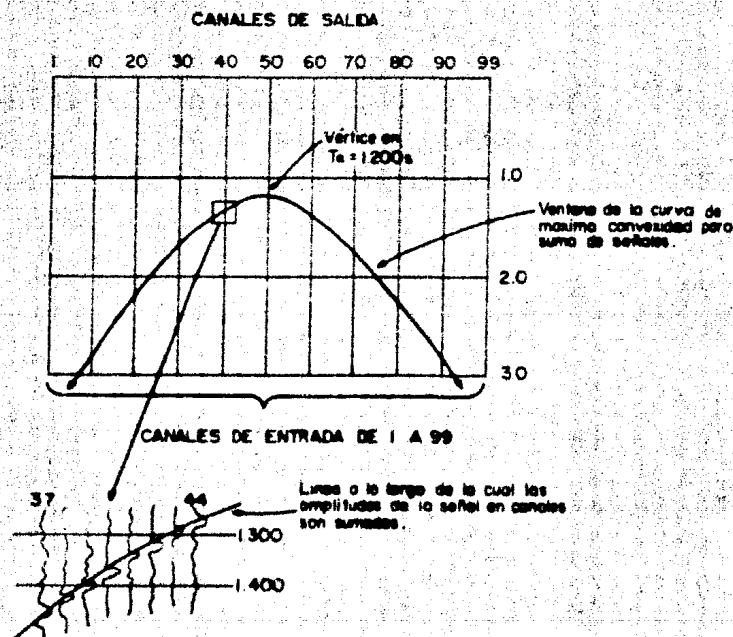


Fig. VII.11.

Las muestras en estos tiempos son sumadas para obtener un valor de salida el cual es graficado en el canal central (50) en 1.2 segundos. Cuando un pico de reflexión ó difracción, ó un seno, sigue esta línea ó es esencialmente tangente a ella, la suma será más grande que si las ondas a lo largo de la línea de suma estuvieran orientadas al azar. Las reflexiones tangentes a la curva ó difracciones cayendo a lo largo de esta producirán un evento de alta amplitud en el vértice el cual representa la posición verdadera del evento en el espacio.

Los tiempos vértices para los cuales las amplitudes son acumu-

datos son separados por el intervalo de muestreo, tal que la siguiente suma, en este caso para un tiempo 1.202 seg. en el canal 50, será ajustada tal que permita una curva diferente de máxima convexidad. Cada canal de salida para una grabación de 3 segundos involucra la suma de puntos a lo largo de 1500 curvas de máxima convexidad, si el intervalo de muestreo es de 2 milisegundos. Cuando todos los valores de salida son calculados para el canal 50, el cálculo es llevado a cabo en la misma forma para el canal 51, extendiéndose la ventana de entrada desde el canal 2 al 100, y así sucesivamente. Una vez que se ha terminado con todos los canales de salida, una sección es graficada, la cual tendrá todos los eventos de reflexión y difracción localizados en sus posiciones verdaderas. Las secciones migradas son mucho más útiles y confiables para la interpretación que las secciones no migradas, principalmente donde se tienen echados fuertes (aunque muchos intérpretes prefieren las secciones no migradas, ya que en estas, la presencia de las curvas de difracción les ayuda a detectar fallas, aún cuando estas tengan poco salto). Los eventos de difracción son particularmente fáciles de suprimir, y este tipo de procesamiento puede ser más útil cuando la superposición de eventos reflejados y difractados complican la interpretación.

Con la migración en dos dimensiones se puede generalizar para tres dimensiones, con posiciones arbitrarias de fuente y receptor. Procesando los datos de la reflexión sobre modelos en tres dimensiones demuestra que la migración tridimensional elimina muchas de las correlaciones ambiguas laterales (que pueden ser causadas por estructuras ocultas), esto se observa con el modelo de la figura VII.12, el cual tiene dimensiones equivalentes al campo (*), (los datos

* Ref. 12.

fueron procesadas, como si la fuente y el receptor fueran coincidentes). En este modelo se llevaron a cabo trece secciones transversales.

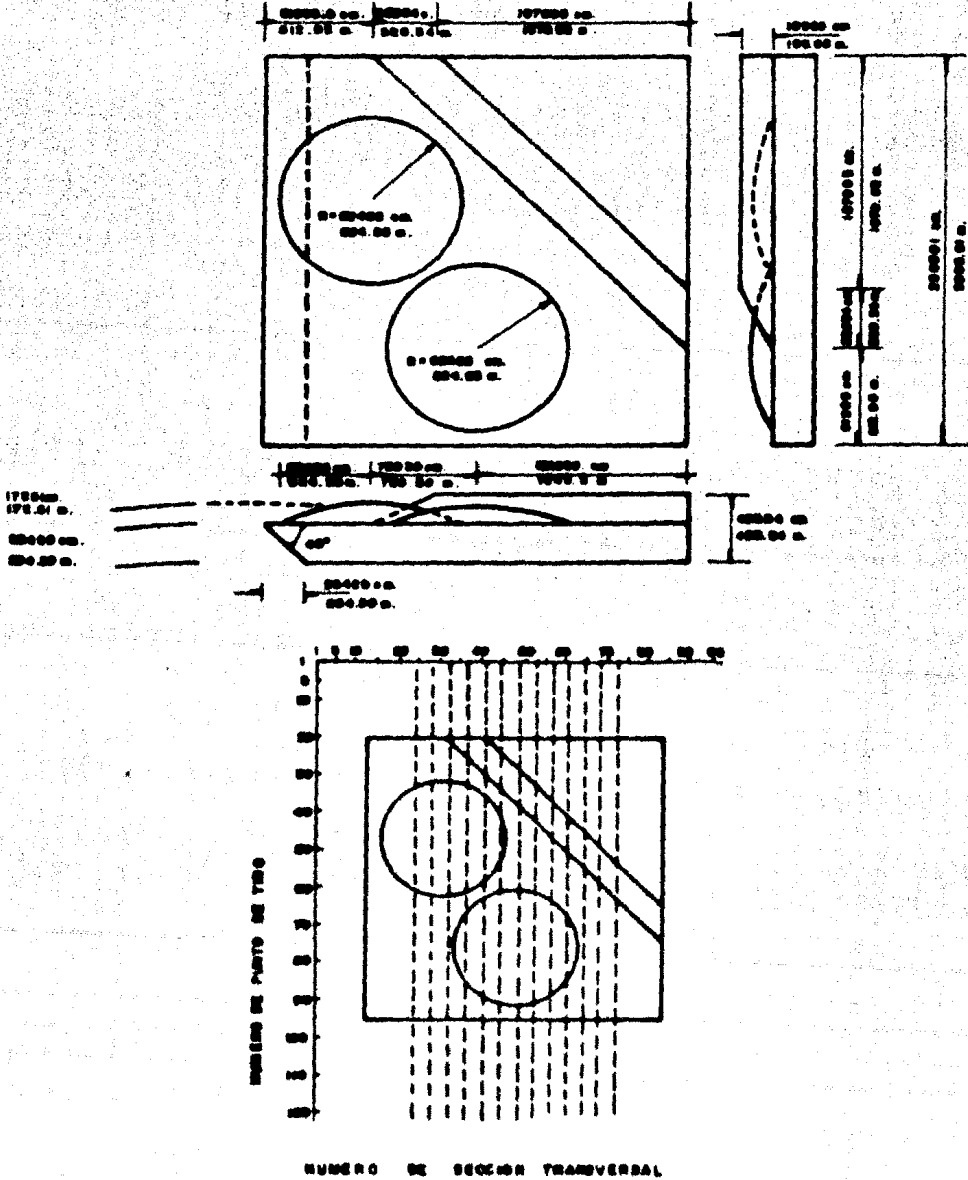


Fig. VII.12.

Perspectiva del modelo tridimensional.

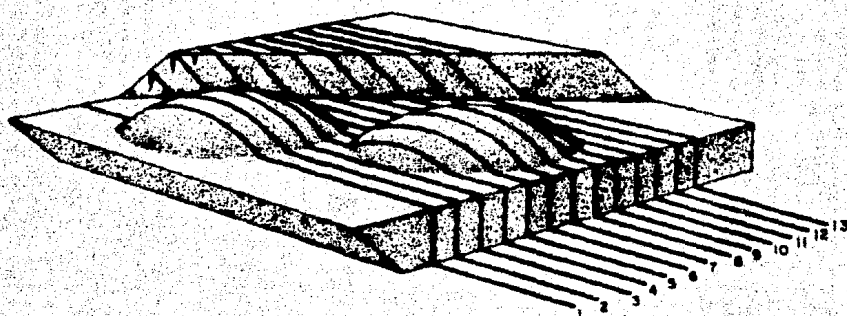


Fig. VII.12 bis.

Los resultados para la sección transversal central (número 7) se muestran en la figura VII.13. En esta A es el perfil de datos originales, B es una migración bidimensional convencional de los datos originales, y C es el resultado de la migración tridimensional para esta sección.

Varias observaciones pueden ser hechas de estos resultados:

- 1.- Los datos originales son extremadamente difíciles de interpretar debido a la difracción e interferencia de los eventos.
- 2.- Las estructuras verdaderas en el perfil pueden estar ausentes en los datos originales debido a una componente perpendicular al perfil (estructuras ocultas).
Por ejemplo, la energía no reflejada de la porción de la falla la cual está en el plano del perfil, está registrada en los datos originales del perfil.
- 3.- La migración convencional bidimensional del perfil de los datos originales no elimina la interferencia de los eventos, ó sea que se ocultan las estructuras.

Por ejemplo, la jeroba central en la migración bidimensional, es una interferencia oblicua del evento y no ha sido eliminada por la migración. Esta interferencia causa ambigüedad en la correlación lateral. Además en la migración convencional (bidimensional) la posición plana de la falla no es correcta.

- 4.- La migración bidimensional produce un incremento de ruido en el fondo de la sección.
- 5.- La migración tridimensional elimina las interferencias oblicuas y saca las estructuras ocultas.
- 6.- El ruido en la parte inferior creado en la migración tridimensional es similar ó menor que el de la migración bidimensional.

Resultados para la sección transversal número 7.

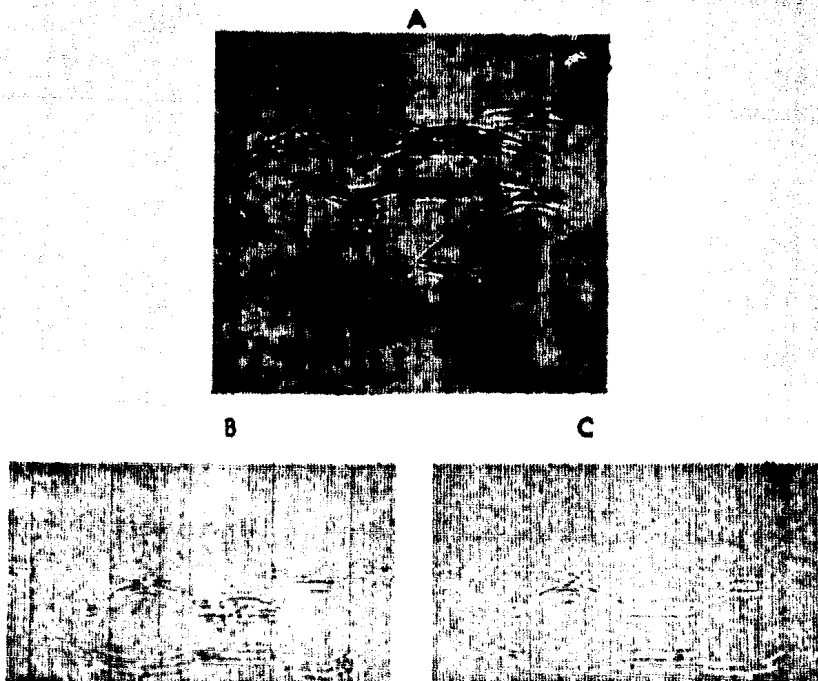


Fig. VII.13.

La migración no siempre produce buenos resultados, y esto se debe a que no se usan las velocidades adecuadas, así en algunas ocasiones se han necesitado velocidades muy altas para la eliminación de las difracciones. En general la velocidad de migración se obtiene de la siguiente manera (*):

$$V_m = V_v / \cos \Theta$$

donde:

V_m = velocidad correcta de migración,

V_v = velocidad verdadera,

$90^\circ - \Theta$ = ángulo entre el perfil y la tendencia de la estructura bidimensional.

En el caso en que V_v sea reemplazada por V_{RMS} , la velocidad de migración estará dada por:

$$V_m = V_{RMS} / \cos \Theta$$

La figura VII.14 muestra los resultados que se obtuvieron sobre la sección transversal 11 de la figura VII.12, al variar la velocidad de migración. La sección A son los datos originales, B es la migración bidimensional con una velocidad de migración igual a la velocidad verdadera, C es el resultado de la migración bidimensional con la velocidad de migración igual a la velocidad verdadera sobre el coseno de 45° , y D es el resultado de la migración tridimensional con una velocidad de migración igual a la velocidad verdadera.

Todos los esquemas de migración están relacionados con la ecuación

* Ref.13.

ción de onda. Ya que transforman un campo de onda en otro, han sido extensamente estudiados desde varios puntos de vista de onda teóricas. Sin embargo, poca atención se ha dado al tipo de relación que los tiempos de viaje de las reflexiones primarias migradas tienen con sus reflectores reales en profundidad. (*)

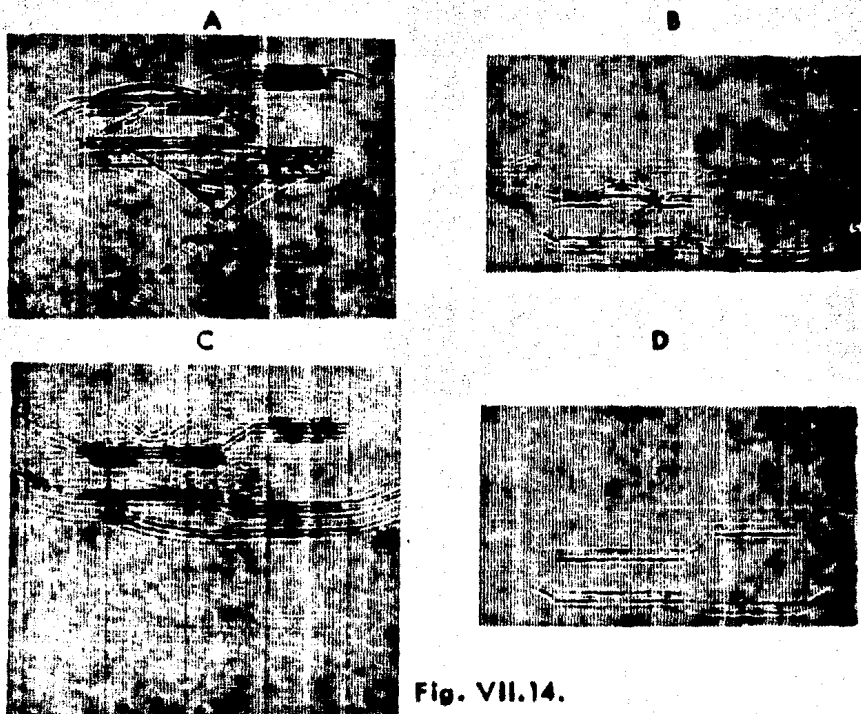


Fig. VII.14.

Respecto a la migración tomando en cuenta la ecuación de onda, se tiene que la propagación de ondas compresionales a través de la tierra es representada por soluciones matemáticas de la ecuación de onda escalar, y la migración es el proceso de solución de esta ecuación en el espacio ocupado por la tierra. Este problema puede ser abordado por dos métodos cuyas bases teóricas y

* Ref. 14.

procedimientos computacionales son totalmente diferentes. Por cuestiones de espacio en este trabajo se hablará solamente de algunas generalidades y diferencias de estos métodos.

Una de las aproximaciones corresponde a la solución integral de Kirchhoff de la ecuación de onda escalar (también puede ser referido como la migración por la Sumatoria de Kirchhoff) . El otro método se deriva del trabajo de Jon F. Claerbout en la Universidad de Stanford y depende de las aproximaciones de diferencia finita de una forma diferencial de la ecuación de onda escalar (migración por Diferencias Finitas). (*)

Cada uno de estos métodos requiere sus propias aproximaciones para producir resultados prácticos, así cuando los resultados de los métodos resultan similares se puede tener confianza en el proceso de migración .

La figura VII.15 muestra una sección de tiempo apilada, grabada en el Golfo de México. Sobre esta sección se van a efectuar los dos métodos de migración anteriores.

Los resultados de los métodos de migración son notablemente similares no obstante la diferencia básica en el proceso, como se puede observar en las figuras VII.16 y VII.17. La similitud de los resultados da confianza de la seguridad de la migración.

Las diferencias en los dos métodos son las siguientes:

* Ref. 15.

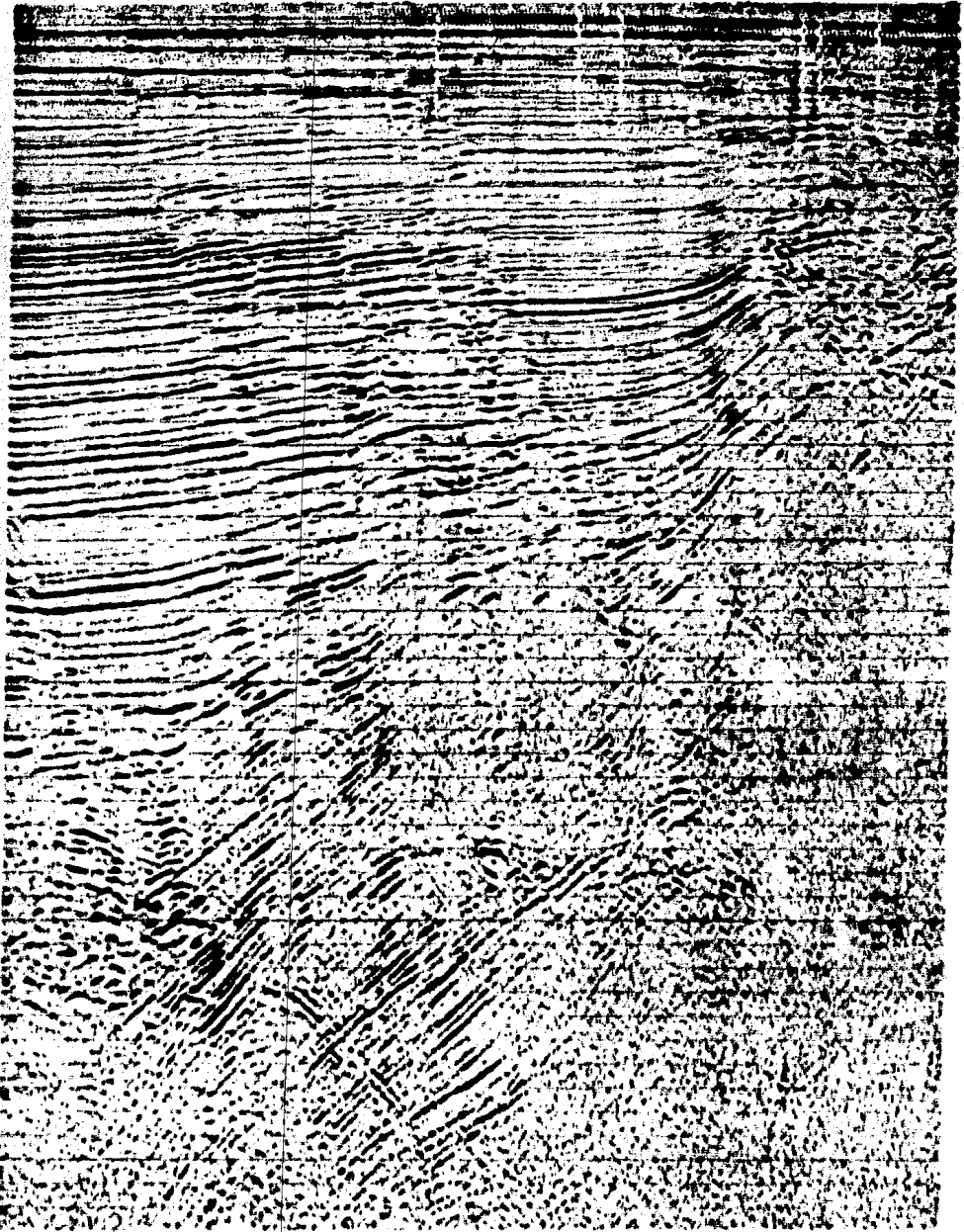


Fig. VII.15.

Migración por Sumatoria de Kirchhoff

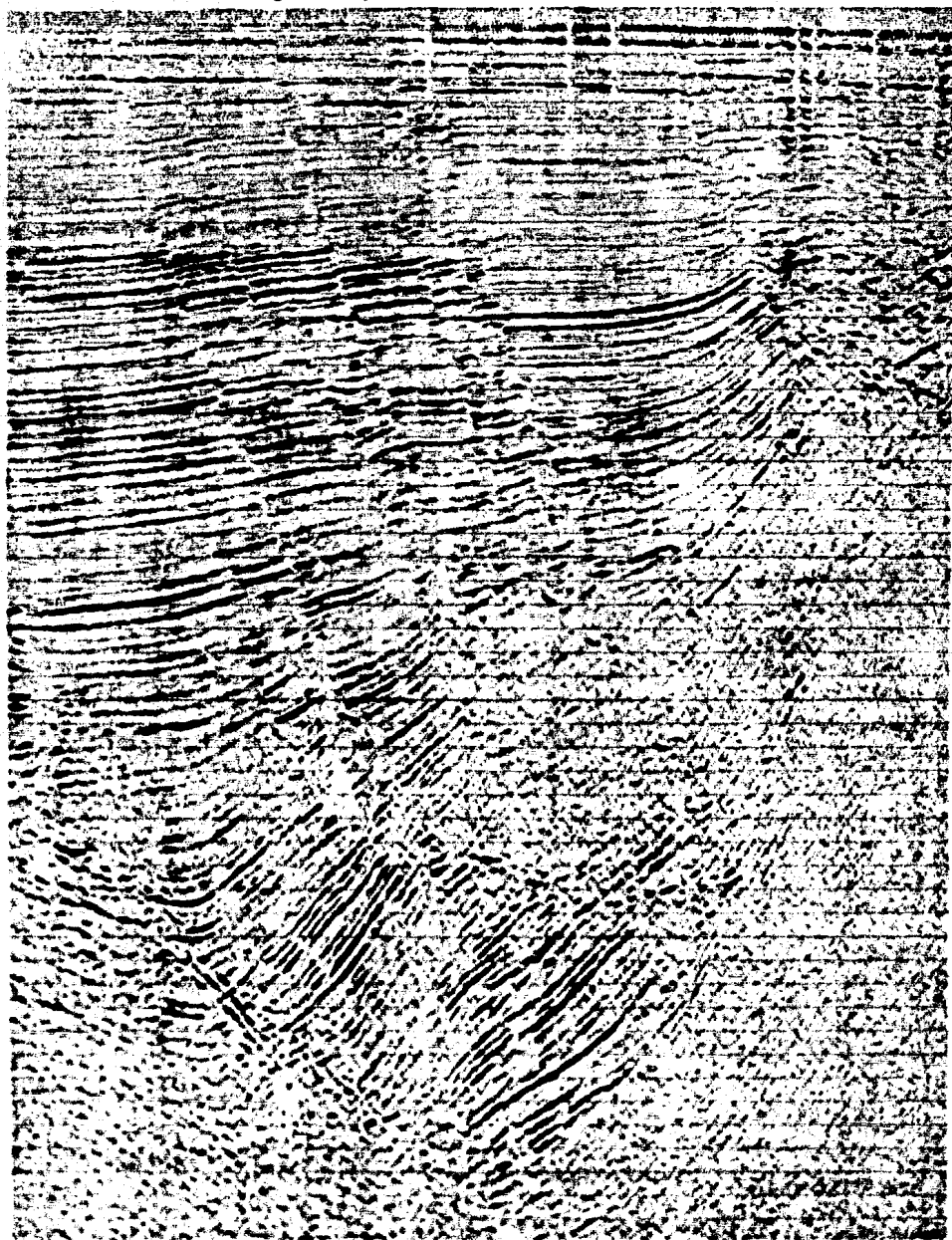


Fig. VII.16.

Migración por Diferencias Finitas

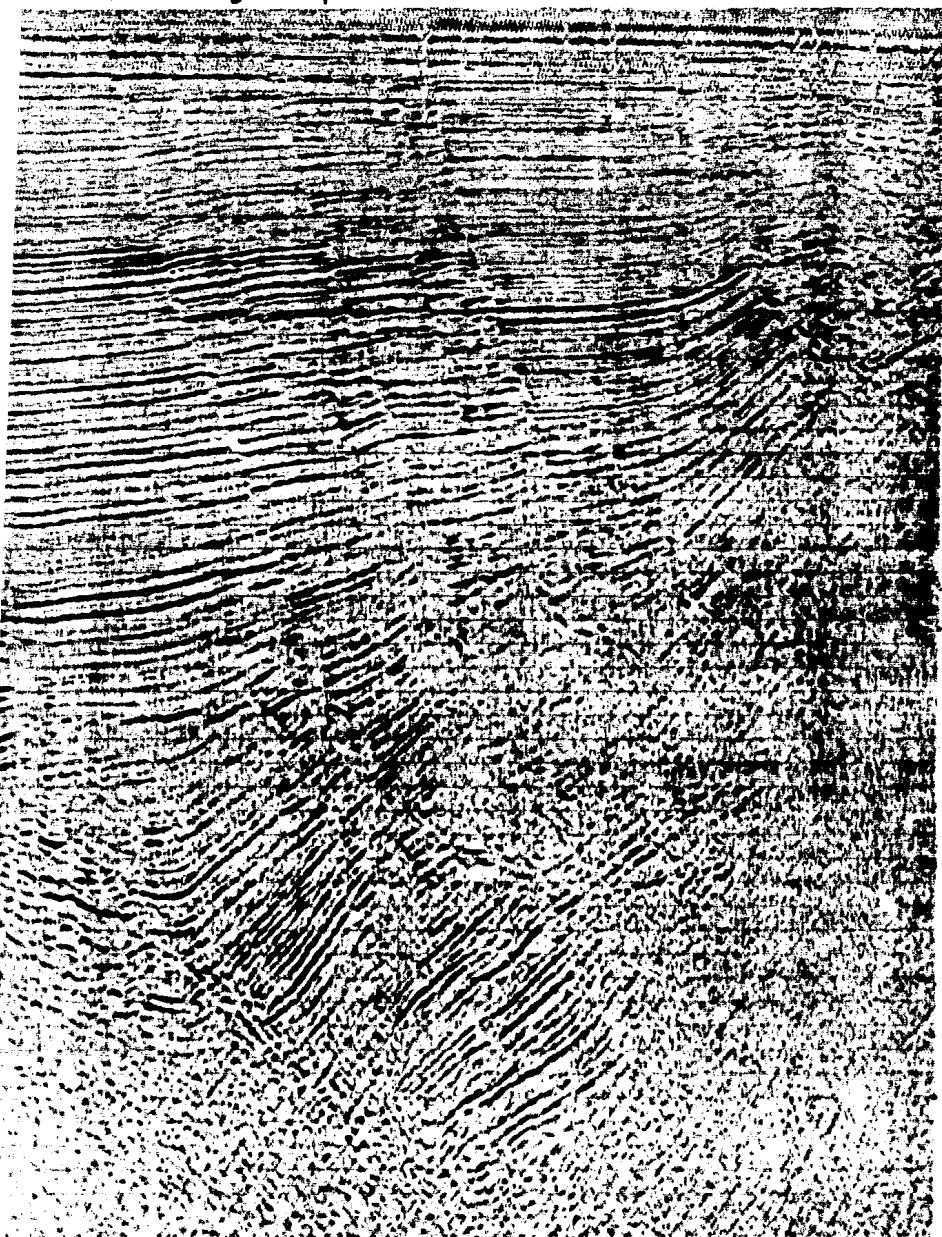


Fig. VII.17.

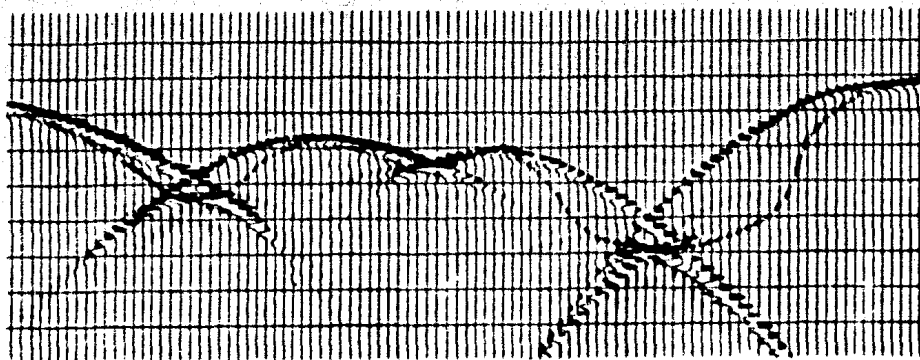
- 1.- Los echados altos son migrados en forma inadecuada por la Aproximación de Diferencia Finita (esta dificultad puede ser vencida por un incremento considerable en costo). La Aproximación de la Sumatoria de Kirchhoff maneja estos echados bastante bien.
- 2.- El método de Sumatoria de Kirchhoff tiende a organizar ruido en forma de sin clinal, lo cual puede confundir las interpretaciones en regiones de pobre cociente señal-ruido. Este comportamiento es una inevitable consecuencia de la teoría de onda. En las migraciones de Diferencia Finita, la severidad de este problema depende del método de diferenciación usado.

La figura VII.18 ilustra lo anteriormente dicho para una sección sintética (que es una sección sísmica artificial de reflexión, elaborada a partir de los datos del registro de velocidad, convolucionando la función de reflectividad, con una forma de onda que incluye los efectos de filtrado de la tierra y del sistema de registro), que representa el basamento acústico extraído de una sección sísmica real. Los eventos de echado suave tienen mejor cociente señal-ruido en la migración por Diferencia Finita, pero los echados más fuertes son migrados inadecuadamente. El método de la Sumatoria de Kirchhoff migra adecuadamente eventos para una gran variedad de echados. La velocidad de migración es constante e igual a 1850 m/seg.

Es de notar la excelente redistribución de amplitudes de las re giones anómalas de foco subterráneo, ó sea en situaciones en que la curvatura cón cava hacia arriba de un reflector es lo suficientemente grande, que su radio de -

curvatura está ubicado debajo del plano de referencia, con esto la reflexión pierde continuidad y sufre distorsiones.

Datos apilados:



Migración por Sumatoria de Kirchhoff:



Migración por Diferencias Finitas:

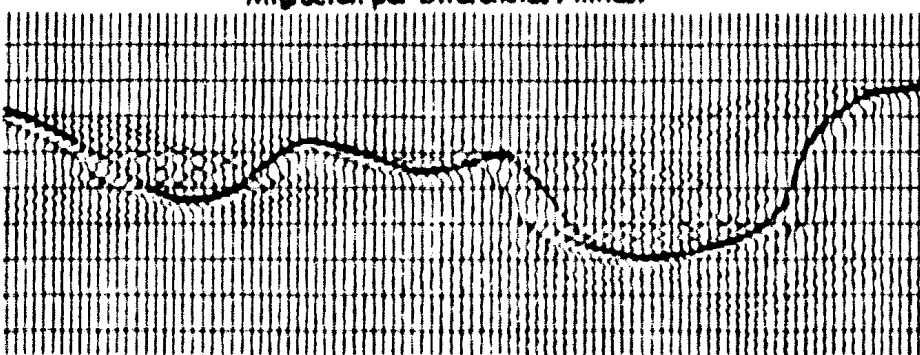


Fig. VII. 18.

En teoría, cualquiera de las dos aproximaciones puede ser usada para migrar datos sísmicos no apilados. La figura VII.19 muestra parte de los datos no apilados de la sección de la figura VII.15, migrados por el método de Sumatoria de Kirchhoff. La definición de reflexiones de las superficies de falla de buzamiento fuerte es especialmente clara. Estas reflexiones son destruidas en el apilamiento convencional de PRC.

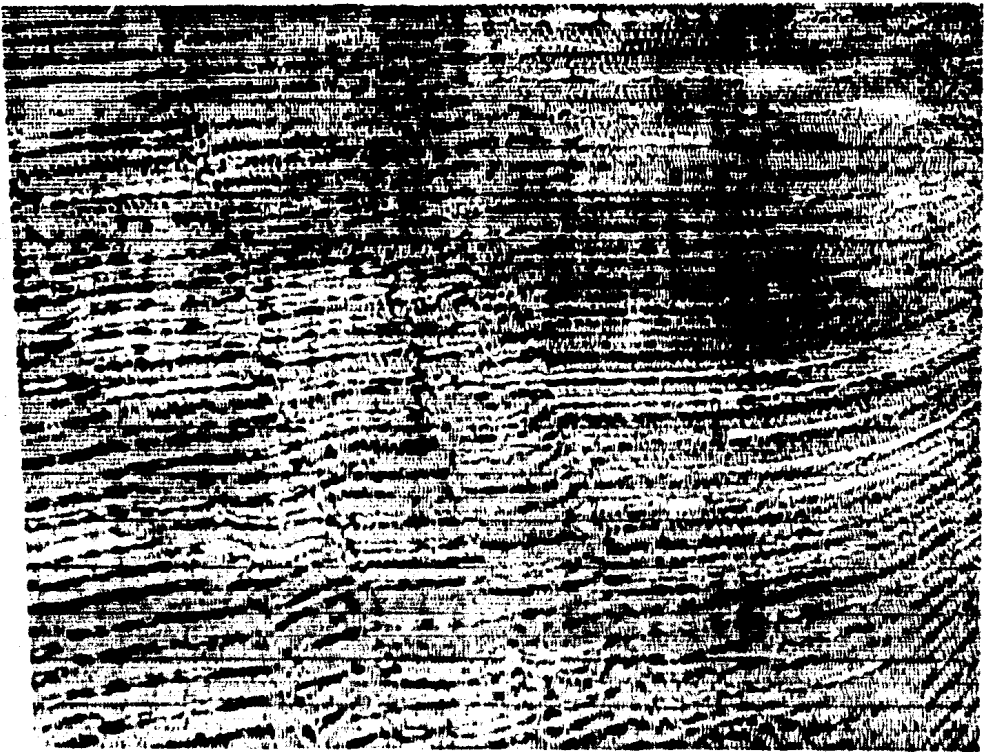


Fig. VII.19.

De lo visto hasta aquí, se concluye que el tipo de migración apropiado será dependiente de los datos. Los echados fuertes pueden ser económica

mente migrados por el uso de la aproximación de la Sumatoria de Kirchhoff. Por otro lado, donde los buzamientos no sean muy fuertes, los cocientes superiores de señal-ruido de la aproximación de Diferencia Finita puede ser el factor dominante en la elección del método de migración.

VII.2 Migración en el Dominio de la Frecuencia.

Recientemente, el Dr. Stolt desarrolló una solución exacta de la ecuación de onda en el dominio de la frecuencia. El sugirió que convirtiendo la sección en tiempo a una sección en profundidad, el término de la velocidad en el dominio de la frecuencia deja de ser tan problemático. Convirtiéndose la migración en un simple mapeo similar a la aplicación de la corrección dinámica en el dominio del tiempo. (*)

La sección de tiempo de entrada es primero convertida a una sección en profundidad. La profundidad de cualquier punto en la sección de tiempo es encontrada por:

$$D = \frac{T \cdot V}{2}$$

donde: D es la profundidad,

T es el doble tiempo de viaje, y

V es la velocidad promedio en el tiempo T.

La parte más difícil de la conversión a profundidad es determinar

* Ref.16.

la velocidad promedio correcta como una función del tiempo. Las velocidades RMS usadas para corregir dinámicamente los datos pueden ayudar a proveer esta información (aunque estas velocidades son ligeramente más altas que las velocidades reales). Este mapeo de tiempo a profundidad es indicado como D .

La transformada de Fourier es tomada en la dirección de z produciendo $F(x, k_z)$. Enseguida se obtiene la transformada bidimensional $F(k_x, k_z)$.

Después de haber obtenido la transformada bidimensional, se lleva a cabo el mapeo de migración denotado por M ó el mapeo inverso de migración (mapeo de difracción) denotado por M inverso. Con el mapeo inverso se puede aplicar difracciones a un modelo sintético y generar una sección no migrada. El mapeo de migración es simplemente una translación en el dominio de la frecuencia (x')

$$M: F(k_x, k_z) \longrightarrow \alpha F'(k'_x, k'_z)$$

donde:

$$\alpha = \frac{k_z}{k'_z}$$

$$k'_z = \sqrt{k_z^2 + k_x^2}$$

$$k'_x = k_x$$

Resumiendo los pasos seguidos para la migración en el dominio

de la frecuencia:

$$\begin{array}{ccccccc}
 f(x, t) & \xrightarrow{D} & f(x, z) & \xrightarrow{F} & F(x, k_z) & \xrightarrow{F} & F(k_x, k_z) \\
 & & & & & & \downarrow M \text{ ó } M^{-1} \\
 f'(x', t') & \xleftarrow{D^{-1}} & f'(x', z') & \xleftarrow{F^{-1}} & F'(x', k'_z) & \xleftarrow{F^{-1}} & F'(k'_x, k'_z)
 \end{array}$$

* Ref. 17.

La figura VII.20 ilustra el mapeo de migración. La línea horizontal a través del punto (k_x, k_z) es mapeada al semicírculo que pasa a través del punto (k'_x, k'_z) . Es de notar que el mapeo es un mapeo vertical en la dirección de k_z solamente. Esto es atractivo, ya que reflectores planos ($k_x = 0$) pueden ser mapeados sobre ellos mismos. Creciendo k_x el crecer la intensidad del echado.

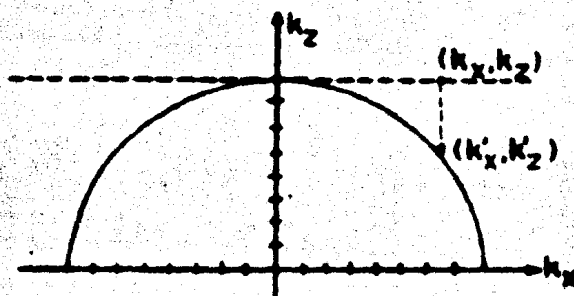


Fig. VII.20.

La descripción matemática del mapeo de difracción es la siguiente:

tal:

$$M^{-1} : F(k_x, k_z) \longrightarrow \alpha F'(k'_x, k'_z)$$

donde:

$$\alpha = \frac{k_z}{k'_z}$$

$$k'_z = \sqrt{k_z^2 - k_x^2} \quad \text{para } |k_z| = |k_x|$$

$$k'_x = k_x$$

En la figura VII.21 se puede observar el mapeo de difracción.

Los puntos en la línea horizontal que pasa a través del punto (k_x, k_z) son mapeos

das a la hipérbola que pasa a través del punto (k'_x, k'_z) . De nuevo, el mapeo es vertical en la dirección k_z solamente.

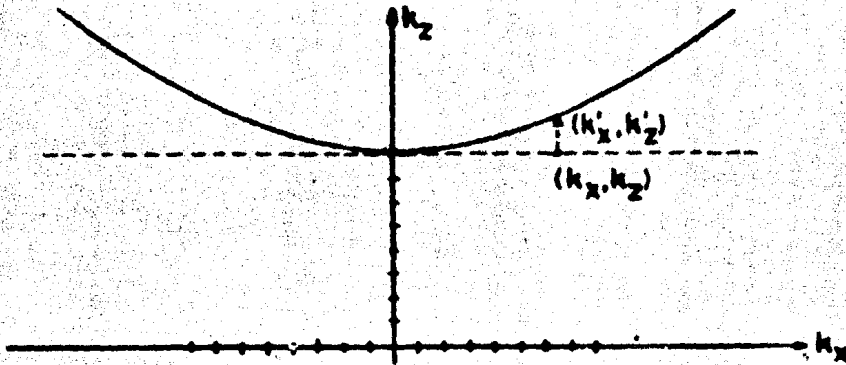


Fig. VII.21.

Después de ejecutar el mapeo de migración ó difracción el proceso es completado por la aplicación de la transformada inversa de Fourier. Esto da una sección migrada de profundidad denotada por $f'(x', z')$. El proceso es terminado por la conversión de profundidad a tiempo denotada por D inversa para obtener la sección de tiempo migrada.

Algunas de las ventajas de la migración en el dominio de la frecuencia son :

- 1.- Se pueden migrar echadas altas sin dispersión.
- 2.- Es computacionalmente más rápida, ya que toma en cuenta el algoritmo de la transformada Rápida de Fourier.
- 3.- Es muy fácil para la implementación de modelos, lo cual facilita la generación de secciones sintéticas difractadas de modelos geológicos en un tiempo relati-

vamente corto.

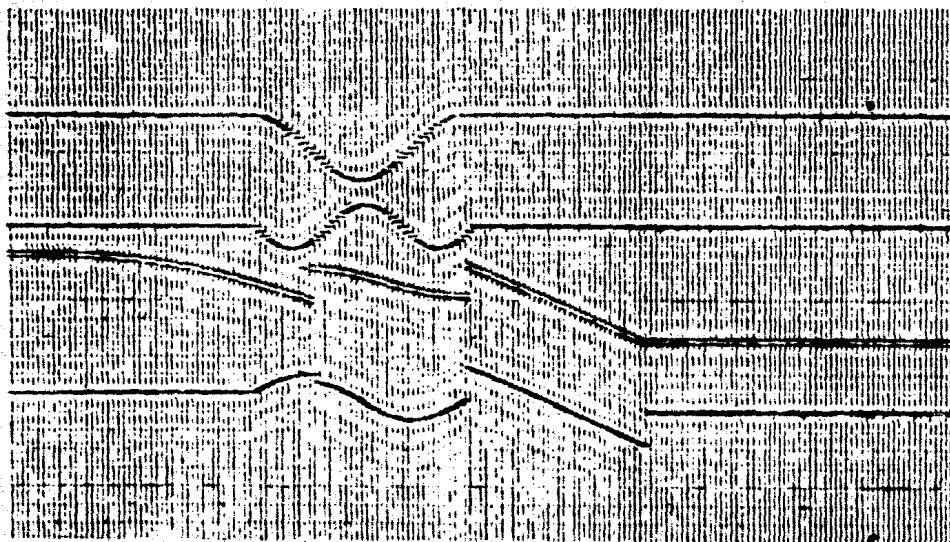
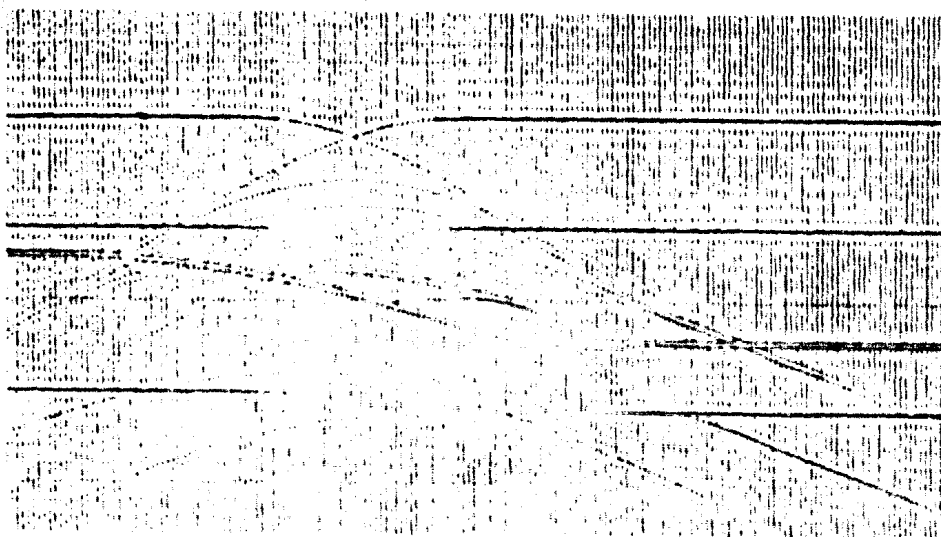
- 4.- Es más fácil manejar velocidad variante en espacio. Ya que las velocidades son manejadas en las conversiones de tiempo a profundidad y de profundidad a tiempo, es fácil aplicar cualquier función de velocidad deseada. Sin embargo, hay restricciones para las funciones de velocidad, que pueden ser manejadas en forma realística. (*)
- 5.- El filtrado pasabandas puede reducir el tiempo de corrida, ya que al aplicarlo solo se trabajaría con frecuencias de interés.

A pesar de las ventajas anteriores, la migración en el dominio de la frecuencia presenta algunos problemas como son:

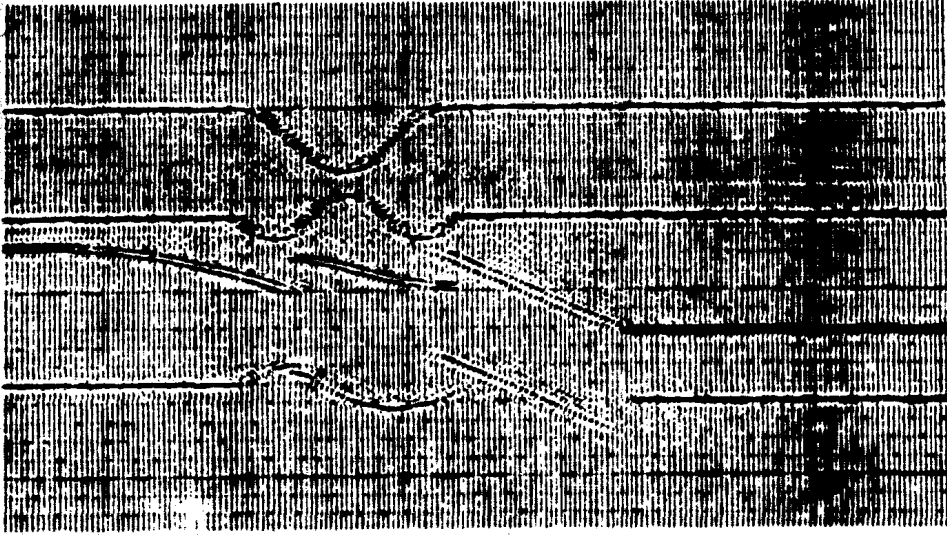
- 1.- Los eventos cruzados con diferentes velocidades no pueden ser manejados muy fácilmente. Ya que se está convirtiendo una sección de tiempo a una sección de profundidad antes de la migración, y dos velocidades no pueden ser aplicadas al mismo tiempo.
- 2.- Aunque las velocidades pueden variar con el espacio, la variación debe ser suave. Si cambios fuertes son permitidos en la función de velocidad, se obtendrán resultados drásticos en la sección de profundidad, y posteriormente la migración de tal sección dará resultados malos.

La siguiente sección muestra un modelo complejo (el cual puede ó no tener un significado geológico). (Ver figura VII.22). En la figura VII.23 se muestran los resultados de la migración por Diferencia Finita y de la migración en el dominio de la frecuencia.

* Ref. 18.

Modelo:**Sección en tiempo del mismo modelo:****Fig. VII.22.**

Migración por el método de Diferencia Finita:



Migración en el dominio de la frecuencia:

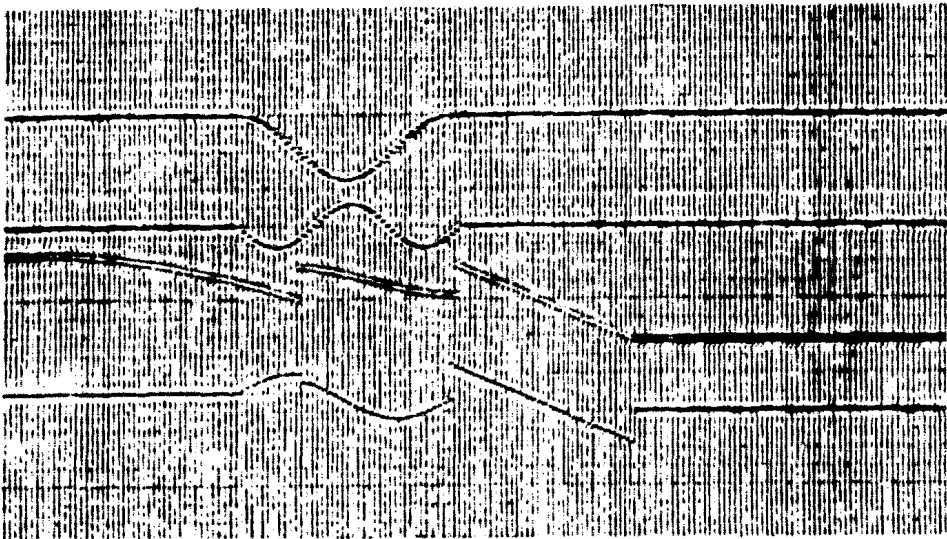


Fig. VII. 23.

Al igual que en el dominio del tiempo, la migración en el dominio de la frecuencia se puede realizar en tres dimensiones (*). Considerando el modelo de dos domos de la figura VII.24, en donde la línea 106 fué seleccionada para ilustrar los resultados de la migración.

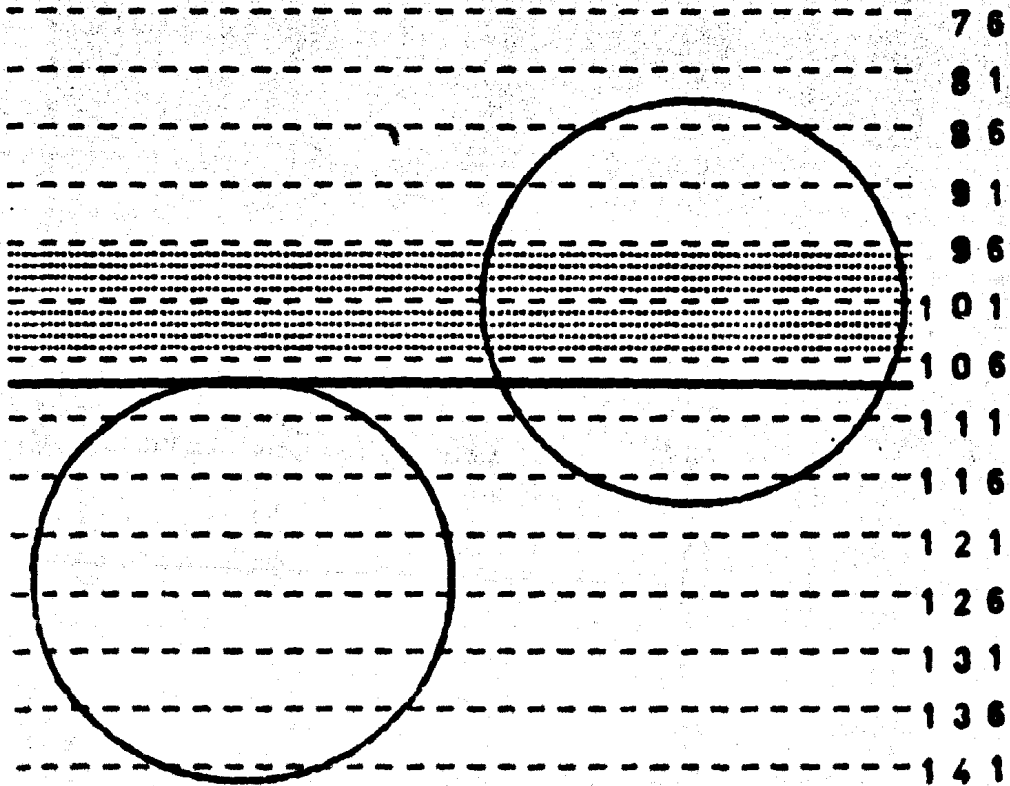


Fig. VII.24.

En la figura VII.25 se puede observar la sección antes de la migración, así como los resultados de las migraciones bidimensional y tridimensional.

En la migración bidimensional se puede observar un pequeño domo en la izquierda

* Ref. 19.

del verdadero domo que es demasiado alto, así como también demasiado ancho. La migración tridimensional no produjo ninguna estructura visible a la izquierda del domo prominente, que posee el ancho y altura adecuados.

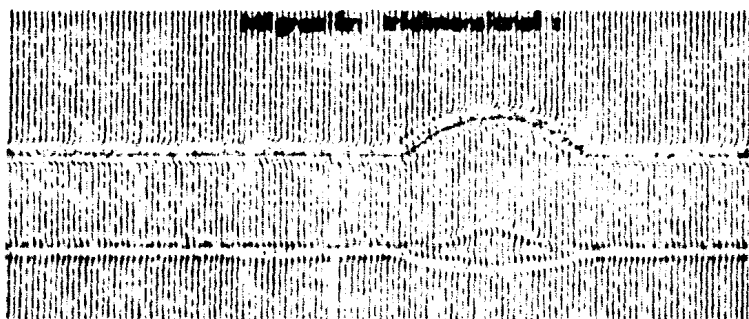
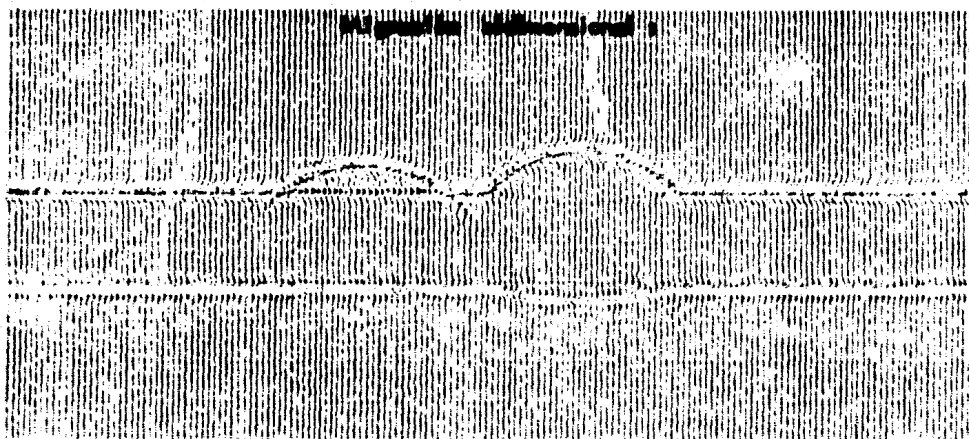
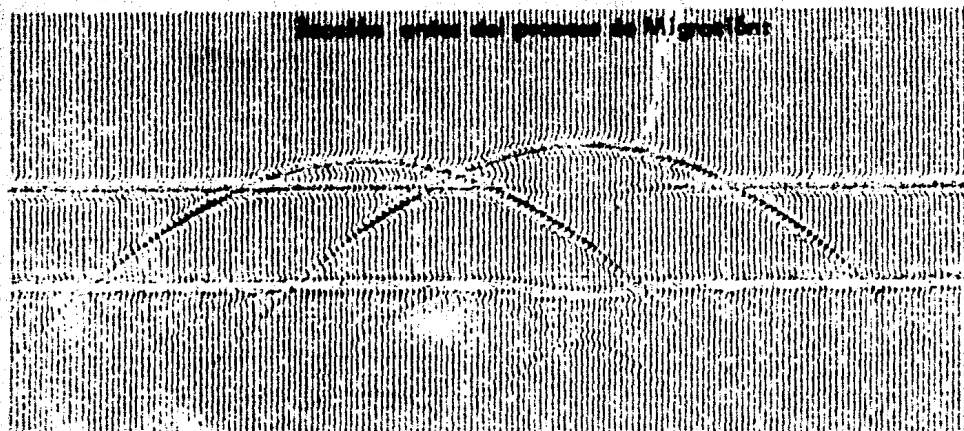


Fig. VII.25.

VIII. CONCLUSIONES .

Actualmente la demanda de hidrocarburos es tal que hay necesidad de explorar áreas complejas, y en general, hacer estudios cada vez a mayores profundidades. Junto con ello han venido evolucionando los métodos de exploración, sobre todo el método sísmico de reflexión, que es el que mayor importancia ha tenido en la industria petrolera de México. Una notable evolución para este método fue dada con el advenimiento de los sistemas digitales y con el desarrollo de las técnicas de cubrimiento múltiple del subsuelo, es decir, se han mejorado tanto las técnicas de campo como las de procesamiento de datos.

A lo largo de este trabajo se ha marcado la importancia que tiene el procesamiento digital para poder obtener una mejor calidad en las secciones finales.

El primer proceso, el cual se trata en el capítulo II, está enfocado a la eliminación de datos que no son útiles, así como al ordenamiento apropiado de los datos útiles. A excepción de este proceso y del proceso de apilamiento (que se trata en el capítulo IV), todos los procesos restantes son de análisis y aplicación de parámetros adecuados para lograr optimizar la relación señal a ruido.

Algunos de los procesos van enfocados directamente al mejoramiento de la señal (como son las correcciones estáticas, dinámicas, estáticas re

señales, así como también la Migración), algunos otros a la atenuación del ruido (deconvolución y filtrado), y el apilamiento que va enfocado a ambos.

No existe un conjunto de parámetros adecuado para todos los casos que se presentan en la realidad. Cada caso se debe tratar en forma individual, y la elección de los parámetros más idóneos dependerá de la experiencia del analista. De esta manera no hay métodos buenos ó malos, sino parámetros adecuados ó inadecuados para la solución del problema.

Los procesos que en este trabajo se incluyen son los procesos básicas en el procesamiento digital que se utilizan actualmente en México (a excepción de la migración tridimensional y migración en el dominio de la frecuencia). Existen otros procesos auxiliares, que facilitan ó dan mayor resolución a los procesos básicas anteriores.

Ciertas métodos, como por ejemplo la migración en el dominio de la frecuencia, pueden ser desarrolladas todavía más, debido al poco tiempo que tienen de haber sido diseñados.

REFERENCIAS :

- 1.- Apuntes varios de la campaña Western Geophysical.
- 2.- Gutiérrez G. D., (1963), " Características teóricas de algunos tipos de ruido y métodos para su reconocimiento y eliminación ". A.M.G.E.
- 3.- Silverman D., (1967), " The Digital Processing of Seismic Data ".
Geophysics, Vol.32, No. 6.
- 4.- Leskinen R.D., (1975), " Introduction to Seismic Processing ".
Petty - Ray Geophysical Division.
- 5.- Peacock K.L. and Treitel S. (1967), " Predictive Deconvolution: Theory and Practice ".
Geophysics, Vol.32, p. 155-169 .
- 6.- Toner M.T. and Koehler, F. (1969), " Velocity Spectra - Digital Computer Derivation and Applications of Velocity Functions ".
Geophysics, Vol.34, No.6.
- 7.- Lerner, K.L., (1975), " Optimum - weight averaging of seismic data ".
Western Technical Document, TD. 75.04-30.01.
- 8.- Toner M.T., Koehler F., and Alhilali K.A., (1974), " Estimation and correction of near - surface time anomalies ".
Geophysics, Vol.39, p. 441-463.

- 9.- **Stratigraphic Interpretation of Seismic Data. (1978). Technica. Resource Development Ltd.**
- 10.- **Introduction to Geophysical Prospecting. Dobrin, M. (1976).**
- 11.- **Hagedorn J.G., (1954), "A process of Seismic Reflection Interpretation". Geophysical Prospecting, Vol.2, p. 85-127.**
- 12.- **French W., (1974), "Two - Dimensional and three - Dimensional Migration of Model - Experiment Reflection Profiles". Geophysics, Vol.39, No.3.**
- 13.- **Gardner G.H.F., and French W.S., and Metzok T., (1974), "Elements of Migration and Velocity Analysis". Geophysics, Vol.39, No.6.**
- 14.- **Hubral P., (1977), "Time Migration - Some Ray Theoretical Aspects". Geophysical Prospecting, Vol.25, p. 738-745.**
- 15.- **Wave Equation Migration : Two Approaches. (1975). Western Geophysical.**
- 16.- **Stolt R.H., (1978), "Migration by Fourier Transform". Geophysics, Vol.43, No.1.**
- 17.- **Neale G., Stone D., Atherton J., (1978), "Migration in the Frequency Domain". Seismograph Service Corporation.**
- 18.- **Harman A., Ananie R., Chun J., (1978), "A Fast 3-D Modeling Technique and Fundamentals of 3-D Frequency Domain Migration". Seismograph Service C.**
- 19.- **French W., (1975), "Computer Migration of Oblique Seismic Reflection Profiles". Geophysics, Vol.40, No. 6.**