

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y
DE EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

FILTRO SELECTIVO DE VELOCIDAD "NFK"

T E S I S
MAESTRIA EN CIENCIAS

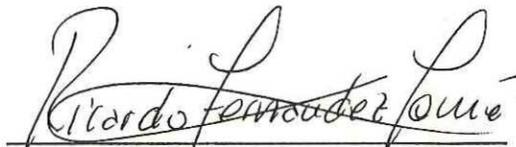
Noel Felipe Hernandez Reyes

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, SEPTIEMBRE DE 1990.

RESUMEN de la tesis de NOEL FELIPE HERNANDEZ REYES, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en GEOFISICA APLICADA. Ensenada, Baja California, México. Septiembre de 1990.

FILTRADO SELECTIVO DE VELOCIDAD "NFK"

Resumen aprobado por :


Dr. Ricardo Fernández Tomé
Director de Tesis

En este trabajo se presenta un análisis descriptivo del ruido sísmico, producto de las ondas superficiales en datos de reflexión sísmica.

Se propone una solución numérica a este problema. Esto es, se desarrolla un algoritmo cuya finalidad es la de eliminar en forma eficiente esta clase de ruido.

El algoritmo es esencialmente un filtro de velocidad numérico, actuando en el dominio de la frecuencia y número de onda (f-k). La técnica se basa en una idea simple que consiste en la aplicación de un filtro Butterworth (unidimensional) a través de su traslación a lo largo de la zona del ruido a cancelar en el plano f-k.

Esta nueva metodología fue aplicada primeramente a datos sintéticos generados para un modelo geológico sencillo, lográndose atenuar el efecto del ruido superficial sobre la señal de interés.

Posteriormente, también se aplicó a datos de campo correspondientes a un estudio geofísico en Los Alamos, Nuevo México. La mejora en la sección sísmica filtrada es bastante notable donde el efecto de las ondas superficiales fue reducido substancialmente.

Los resultados obtenidos en ambos casos demuestran que el filtrado de velocidad desarrollado en esta tesis es satisfactorio.

TESIS DEFENDIDA POR: NOEL FELIPE HERNANDEZ REYES
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE:

Ricardo Fernandez Tome

DR. RICARDO FERNANDEZ TOME.- Director del Comité

Espinosa

M.C. JUAN MANUEL ESPINOZA CARDENA- Miembro del Comité

(Mia)

M.C. FRANCISCO SUAREZ VIDAL .- Miembro del Comité

M. Martinez G.

DR. MARIO MARTINEZ GARCIA.- Miembro del Comité

Josue Alvarez Borrego

M.C. JOSUE ALVAREZ BORREGO.- Miembro del Comité

Jose Manuel Romo Jonez

M.C. JOSE MANUEL ROMO JONEZ .- Director de la División de Ciencias de la Tierra

Heras

DR. HECTOR ECHAVARRIA HERAS.- Director Académico

Septiembre 21., 1990

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

DIVISION CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOFISICA APLICADA

FILTRO SELECTIVO DE VELOCIDAD "NFK"

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta

NOEL FELIPE HERNANDEZ REYES

Ensenada, Baja California. Septiembre de 1990

DEDICATORIA

A JESUCRISTO

A SADOT y VIRGINIA; mis padres

A ANGELICA; mi inspiración

A HERMANOS Y AMIGOS; regalo de Dios

"PORQUE ¿QUE APROVECHARE EL HOMBRE, SI GANARE TODO EL MUNDO Y
PERDIERE SU ALMA?"

MARCOS 8:36

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ricardo Fernández Tomé por su dirección en este
trabajo de tesis.

A los miembros del comité de tesis por sus comentarios al
manuscrito.

A todos los centros de estudios que tomaron parte en mi
formación académica.

A todos mis profesores y amigos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

CONTENIDO

	<u>PAGINA</u>	
I	INTRODUCCION	1
II	DESCRIPCION DEL METODO	11
	II.1 Filtros Butterworth	15
	II.2 Implementación numérica	18
III	EXPERIMENTO CON DATOS SINTETICOS	22
	III.1 Parámetros del modelo sintético	22
	III.2 Aplicación del Filtrado "NFK"	24
IV	APLICACION DEL METODO A DATOS DE CAMPO	34
	IV.1 Adquisición de los datos	34
	IV.2 Procesado de datos	39
V	CONCLUSIONES	50
	LITERATURA CITADA	52

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>	<u>PAGINA</u>
1. Eventos registrados en un perfil de ruido. Onda de aire (a), onda superficial (B), reflexiones (C), ondas directa y refractada (D y E).	2
2. Representación gráfica de los diferentes tipos de filtrado aplicados a las señales sísmicas: a) filtrado Pasa-Banda, b) filtrado de longitudes de onda (arreglo de detectores), y c) filtrado de velocidad f-k.	4
3. a) Trayectorias y velocidades típicas de algunos ruidos coherentes. b) Atenuación de las ondas superficiales mediante un filtro de longitudes de onda constituido por un arreglo lineal de n detectores, "g".	6
4. Principio de diseño del filtro de velocidad propuesto por Sako e Hirano, (1984). a) filtro 1-d, b) filtro 2-d y c) filtro 2-d rotado.	8
5. Diagrama a bloques que muestra el principio del filtrado de velocidades F-K.	13
6. Aplicación gráfica del filtrado selectivo de velocidad "NFK". a) filtro Butterworth 1-d, b) traslación del filtro en el dominio F-K.	14
7. a) Espectro de amplitud de un filtro Butterworth pasa-alto de orden 8 con una frecuencia de corte de 4.5 hz. b) Respuesta a la amplitud en decibeles.	17
8. Diagrama de flujo del filtrado de velocidad "NFK".	20
9. Parámetros del modelo sísmico sintético de tres velocidades con un tendido lateral de 24 detectores.	23
10. Registro sísmico correspondiente al modelo de la figura 9. Los eventos aquí representados son: las reflexiones (A,B y C) y las ondas superficiales (D,E y F).	25

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>FIGURA</u>	<u>PAGINA</u>
11. Espectro de amplitud en el plano f-k del registro sísmico de la figura 10. Marcadas con las mismas letras identificamos las reflexiones (A,B y C) y las ondas superficiales (D,E y F).	27
12. Análisis en el dominio f-k para determinar los parámetros óptimos del filtrado; frecuencia de corte (f_c) y las coordenadas que definen la pendiente del ruido, P_f (divisiones) y P_k (número de traza).	29
13. Datos en el dominio f-k después de aplicado el filtrado "NFK".	32
14. Datos en el dominio tiempo-distancia filtrados. Notese el ruido "residual" producido por el aliasing en el lugar donde estaban las ondas superficiales y los efectos de la transformada en las trazas de las orillas.	33
15. Area de estudio del prospecto Tesuque Pueblo en Nuevo México. La línea sísmica de estudio se encuentra marcada con asteriscos.	35
16. Geometría del tendido utilizada. Tendido lateral de 24 detectores, con una distancia al primer detector (x) de 220 ft. y una separación entre geófonos (Δx) de 55 ft.	37
17. Registros sísmicos de campo en el dominio "t-x" correspondientes a los tiros 1, 33, 70 y 100. Notese la mala grabación de las 12 primeras trazas así como la presencia de las ondas superficiales en casi todo el registro, trayectorias rectas, mientras con trayectorias hiperbólicas se presentan las reflexiones.	38
18. Secuencia de procesos aplicados a la línea sísmica del prospecto Tesuque Pueblo.	40

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>FIGURA</u>	<u>PAGINA</u>
19. a) Análisis en el dominio f-k para determinar los parámetros óptimos del filtrado realizado en el tiro 1; frecuencia de corte (fc) y las coordenadas que definen la pendiente del ruido, Pf (divisiones) y Pk (número de traza). b) Datos en el dominio f-k filtrados.	42
20. Análisis de velocidad para la determinación de las velocidades de corrección "NMO". Los valores máximos de semblanza corresponden a los tiempos de .2 y .5 seg. con velocidades de 6300 y 7500 ft/s respectivamente.	44
21. Corrección dinámica (NMO) realizada con los parámetros obtenidos en el análisis de velocidad a los cdp's 32, 33 y 34. a) cdp's sin corrección, b) cdp's corregidos.	46
22. Sección final obtenida al 600 % después de aplicarle los procesos descritos en la figura 18, incluyendo el filtrado de velocidad "NFK".	47
23. Sección final obtenida al 1200 % procesada de la misma manera que la figura anterior pero sin el filtrado de velocidad "NFK".	48

LISTA DE TABLAS

<u>TABLA</u>		<u>PAGINA</u>
I.	Parámetros del modelo sísmico sintético de 3 capas.	22
II.	Rango de velocidades aparentes y regiones de influencia en el plano F-K.	26
III.	Profundidad, velocidad e interfase de los reflectores A,B y C.	49

FILTRADO SELECTIVO DE VELOCIDAD "NFK"

I INTRODUCCION

En la prospección sísmica de reflexión, al igual que en las diferentes disciplinas geofísicas, los datos recabados contienen en la mayoría de los casos, aparte de la señal de interés, información no deseada conocida como ruido. Es por ello que el énfasis en el procesado de datos recae en el desarrollo de algoritmos numéricos que permitan extraer la señal de interés de la información obtenida en el campo.

El ruido puede ser de dos tipos: aleatorio o coherente. El primero puede provenir de la instrumentación utilizada o bien por condiciones ambientales tales como : inducciones eléctricas, falsos contactos, animales, viento, tráfico, etc. Mientras que el ruido coherente o sistemático es generalmente causado por la fuente de energía utilizada, reconociéndose como los más importantes a los múltiples, las difracciones, la onda de aire y las ondas superficiales, entre otros.

A manera de ejemplo es mostrada en la figura 1 una gráfica de tiempo-distancia para eventos registrados en un perfil

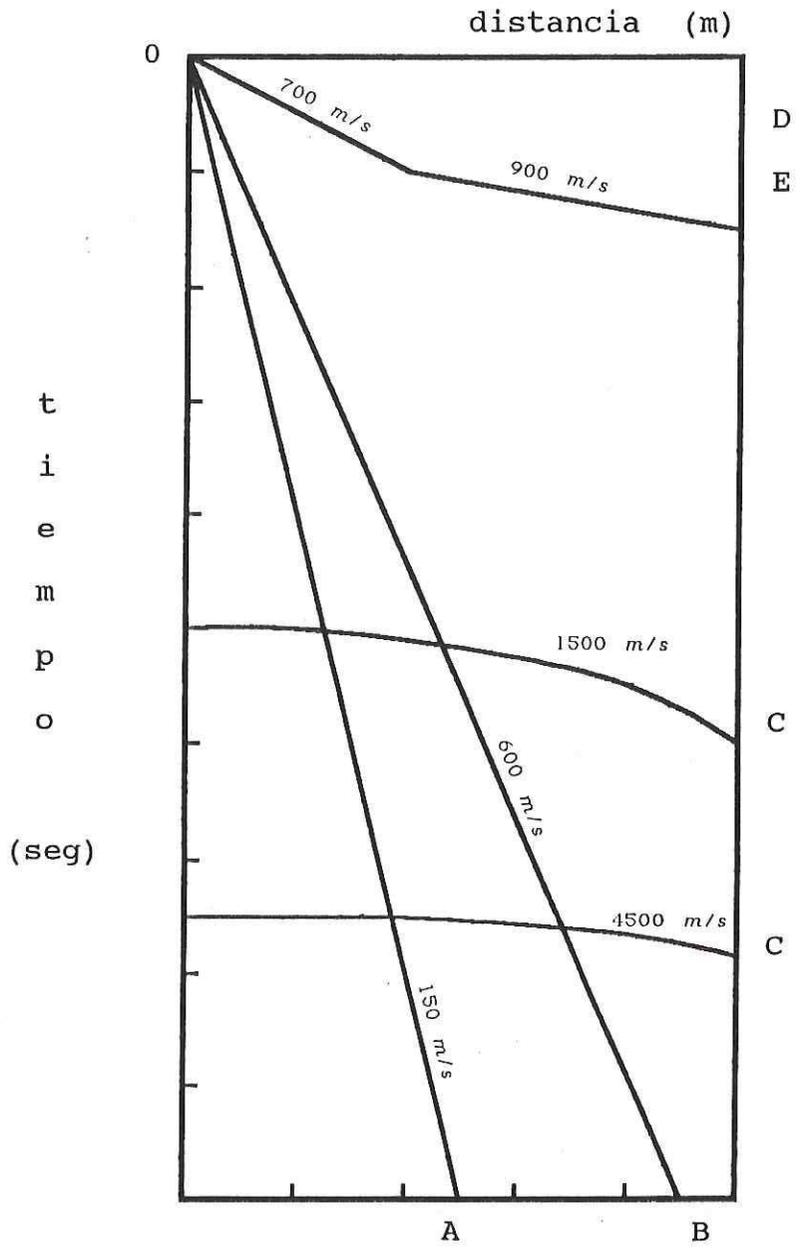


Figura 1. Eventos registrados en un perfil de ruido. Onda de aire (A), onda superficial (B), reflexiones (C), ondas directas y refractadas (D y E).

sísmico lateral. La onda directa (D) y refractada (E) aparecen al principio del registro con trayectorias que describen líneas rectas. A tiempos posteriores y con trayectorias hiperbólicas, se presentan las reflexiones (C). La onda de aire (A) y las ondas superficiales (B) aparecen en eventos que forman una línea recta (con un efecto dispersivo no mostrado en la figura) y a una velocidad mucho más baja que los eventos anteriores.

En una sección sísmica el efecto de la onda de aire (producto de algún mecanismo de fuente sísmica) aunado al de las ondas superficiales se presenta enmascarando las reflexiones que arriban a tiempos comparables a éstas, y se caracterizan por su mayor amplitud (de 2 a 10 veces la amplitud de las reflexiones), y en general de baja frecuencia (6 a 30 hz). Se podría decir que aplicando métodos de filtrando sería factible eliminar dichos ruidos de los registros. En la figura 2 son mostrados las tres clases de filtrado que se aplican a los datos sísmicos: el Pasa-Banda, el de Longitudes de Onda (arreglos de detectores) y el de Velocidad "F-K". En realidad, el filtrado tiene su efecto, pero distorsiona severamente el resto de la sección sísmica, en particular tiende a correr la fase de la señal de interés.

La presencia de estos eventos fué reconocida tiempo atrás y se han diseñado para su eliminación un sin número de algoritmos numéricos y/o técnicas de campo.

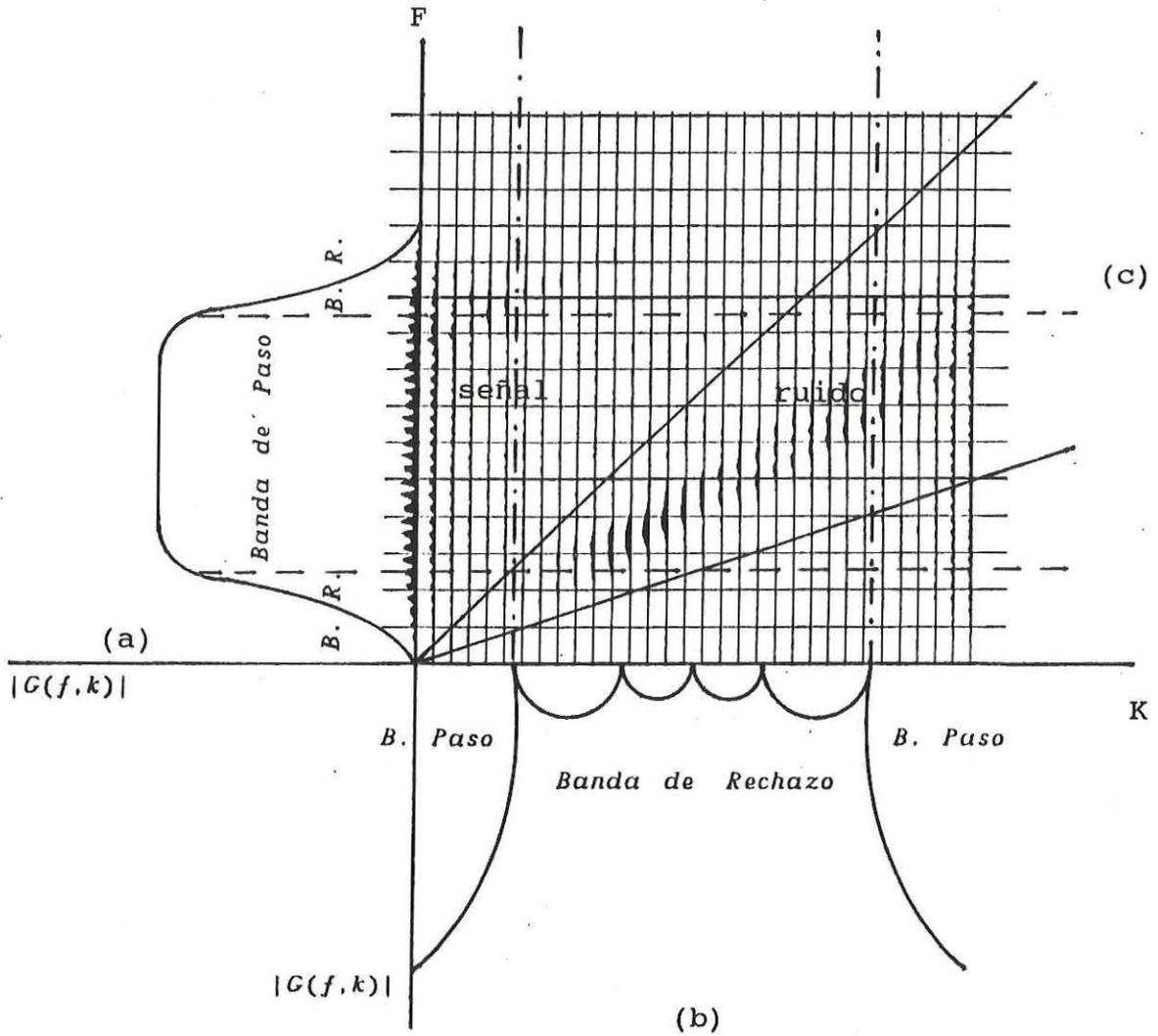
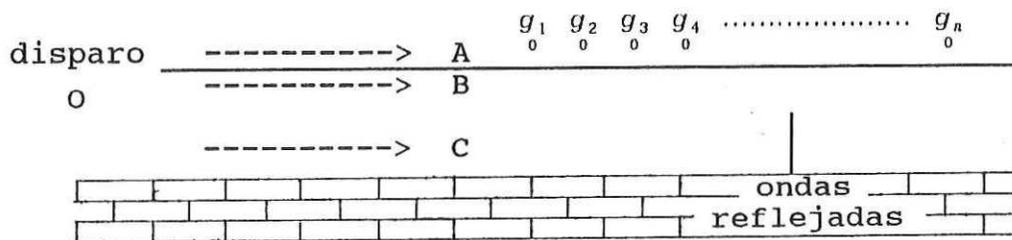


Figura 2. Representación gráfica de los diferentes tipos de filtrado aplicados a señales sísmicas: a) filtrado Pasa-Banda, b) filtrado de longitudes de onda (arreglo de detectores), y c) filtrado de velocidad (f-k).

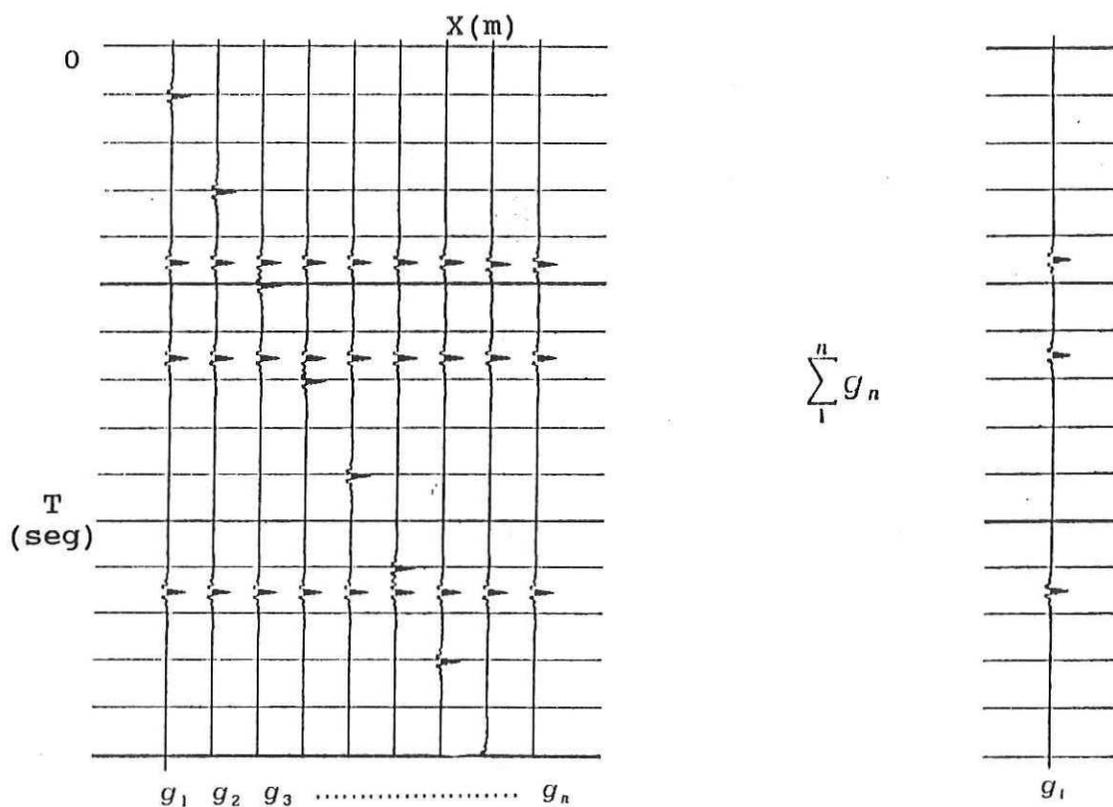
Por ejemplo, el filtrado de longitudes de onda (Smith, 1956) donde en el campo es común el utilizar un grupo o un arreglo de "n" detectores (geófonos) distribuidos a lo largo de un perfil tal que la longitud del arreglo corresponda a un múltiplo de la longitud de onda predominante en las ondas superficiales, como se muestra en la figura 3. Como la onda es superficial, cada detector grabará las llegadas de éstas con una cierta diferencia en tiempo, mientras que los arribos correspondientes a las reflexiones que viajan en trayectorias casi verticales, serán grabados al mismo tiempo en cada detector. La suma de la respuesta de cada geófono en el arreglo, tiende a cancelar la onda superficial en un amplio rango de longitudes de onda, mientras que tiende a incrementar linealmente la señal deseada, (figura 3). Queda claro que, para longitudes de ondas mayores que la utilizada al diseñar la disposición del arreglo de geófonos, la cancelación se reduce considerablemente.

A pesar de utilizar las técnicas de campo, es necesario procesar numéricamente los datos. A este proceso se le conoce como "filtrado de velocidad". El proceso consiste en diseñar filtros digitales óptimos en dos dimensiones para discriminar el ruido de la señal basados en las diferencias de sus velocidades aparentes. Su aplicación puede ser en el plano tiempo-distancia en forma de convolución o en el dominio de Fourier mediante una multiplicación en la frecuencia-número de



A.- onda de aire (300 m/s)
 B.- onda superficial (600 m/s)
 C.- onda directa (900 m/s)

(a)



(b)

Figura 3. (a) Trayectorias y velocidades típicas de algunos ruidos coherentes. (b) Atenuación de la ondas superficiales mediante un filtro de longitudes de onda constituido por un arreglo lineal de n detectores, "g".

onda (f-k). Los métodos más conocidos son: el filtrado en Abanico (Fail and Grau, 1963), "Pie-Slice" (Embre et al, 1963), filtro "f-k" (Wiggins, 1966), entre otros (Yilmaz, 1987).

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño de una nueva técnica numérica para resolver el problema del "ruido" producido por la Onda de Aire y las Ondas Superficiales, utilizando un filtro unidimensional en el dominio de la frecuencia y el número de onda (f-k).

El diseño del filtro surge como una variante a la forma propuesta por Sako e Hirano (1984). Ellos diseñaron un filtro bidimensional a partir de un filtro en 1-d es decir, primero realizaron el diseño de un filtro unidimensional (figura 4a), luego "desdoblado" obtuvieron un filtro bidimensional (figura 4b) y finalmente mediante una rotación hacen coincidir los ejes de la matriz con la región de ruido como se ilustra en la figura 4c. El proceso de rotación trae como consecuencia una reducción en el ancho de banda seleccionado, así como la necesidad de extrapolar en los extremos del filtro.

Tratando de evitar estas operaciones se buscó una alternativa a ello. El propósito fué realizar el filtrado con el mismo principio, pero con un diseño más sencillo del filtro y por ende una aplicación más práctica.

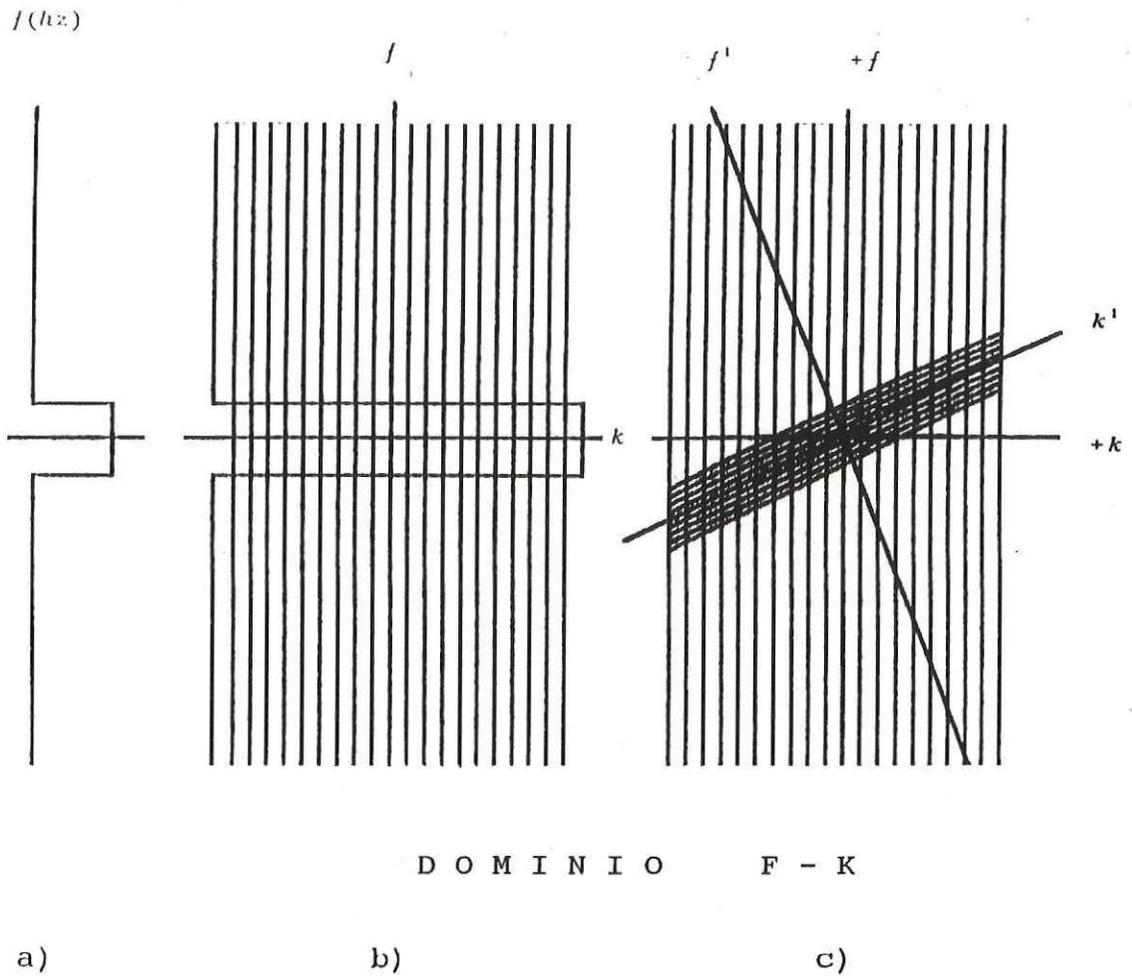


Figura 4. Principio de diseño del filtro de velocidad propuesto por Sako e Hirano, (1984). a) filtro 1-d, b) filtro 2-d y c) filtro 2-d rotado.

Se propuso realizar el diseño y aplicación del filtro en el dominio $f-k$, de la siguiente manera; se diseñó un filtro en $1-d$ de corte de banda (pasa altos) el cual es aplicado en los datos transformados trasladándolo sobre la región del ruido. Los datos filtrados en el dominio $t-x$ son obtenidos realizando la transformada inversa bidimensional de Fourier.

Hemos llamado a este proceso "Filtrado Selectivo de Velocidad NFK".

Con la finalidad de probar la eficacia del método, se aplicó este proceso a un modelo sintético de datos, donde simulamos los diferentes eventos registrados en un levantamiento sísmico con 24 canales. También fue aplicado a datos reales en toda una línea sísmica de 110 tiros con 24 canales cada tiro, correspondientes a un estudio geofísico realizado por un grupo de investigadores del CICESE y los Estados Unidos, en Los Alamos Nuevo México.

El experimento con datos sintéticos mostró la bondad del método al eliminar de los datos el "ruido superficial". Mientras que en la aplicación a datos reales se logró reducir substancialmente el efecto producido por este ruido en la señal de interés, logrando mejorar considerablemente la presentación de la sección sísmica final a diferencia de la obtenida sin la aplicación del filtrado de velocidad.

De esta manera los resultados obtenidos demuestran que el Filtrado Selectivo de Velocidad NFK diseñado en este trabajo es satisfactorio.

II DESCRIPCION DEL METODO

La traza sísmica es una serie de tiempo que se puede describir como la suma de varias sinusoidales de una determinada amplitud con diferentes frecuencias y alineamientos (fase). Dicho de otra forma, la ondícula sísmica es equivalente a la síntesis de las componentes de onda plana.

La transformada directa de Fourier descompone una onda sísmica en sus componentes de onda plana, mientras la transformada inversa sintetiza la traza dada sus componentes.

Cada onda plana lleva una señal monocromática que se propaga con un cierto ángulo de la vertical, (echado). Los eventos con una misma velocidad en el plano $t-x$, son graficados a lo largo de una línea recta con dirección radial en el dominio de la frecuencia y el número de onda. Esto hace que los eventos con echados diferentes, que en el dominio $t-x$ aparecen mezclados, se presenten separados en el plano $f-k$, lo cual permite identificar y eliminar de manera fácil cierto tipo de energía no deseada de los datos.

Al filtrado que se realiza tomando en consideración las componentes de frecuencia y número de onda se le conoce como "filtrado de velocidad". La aplicación de este proceso

se efectúa en el espectro de amplitud debido a que las operaciones en el espectro de fase modifican la forma y posición de la ondícula, mientras que en el espectro de amplitud solamente afecta la amplitud de la ondícula en el tiempo.

El diagrama de bloques en la figura 5 muestra el principio de aplicación del filtrado de velocidad. Los datos a filtrar pueden ser de tres tipos: datos "crudos", aquellos provenientes de un arreglo en punto medio común o bien a los datos apilados.

Tomando cualquiera de estos tipos de datos, se procede a realizar la Transformación de Fourier en 2-d para definir en el plano "f-k" la región de rechazo. En este plano se diseña un filtro que ayude a eliminar la presencia de componentes espectrales no deseadas y finalmente, aplicando la Transformada Inversa de Fourier en 2-d se obtienen los datos originales sin la presencia de las ondas superficiales y la onda de aire.

El procedimiento del filtrado "NFK" que se plantea en este trabajo, se ilustra en la figura 6 y se realiza en dos etapas: (a) primero se diseña un filtro de banda de corte (pasa altos), figura 6a. y (b) se aplica el filtro diseñado trasladándolo sobre la región de interés, figura 6b. El incremento en frecuencia del filtro para la traslación, está gobernado por la velocidad del evento como: $\Delta_f = Va \times \Delta_k$.

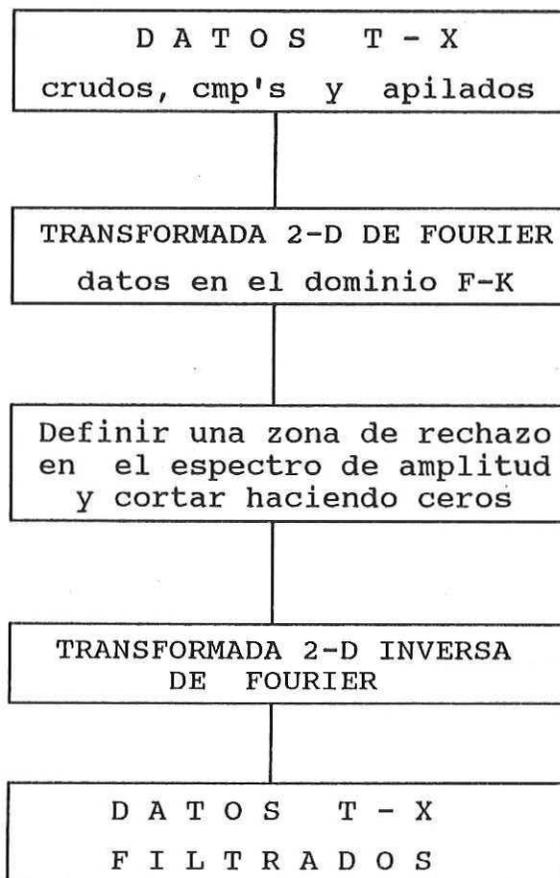


Figura 5. Diagrama a bloques que muestra el principio de aplicación del filtrado de velocidades F-K.

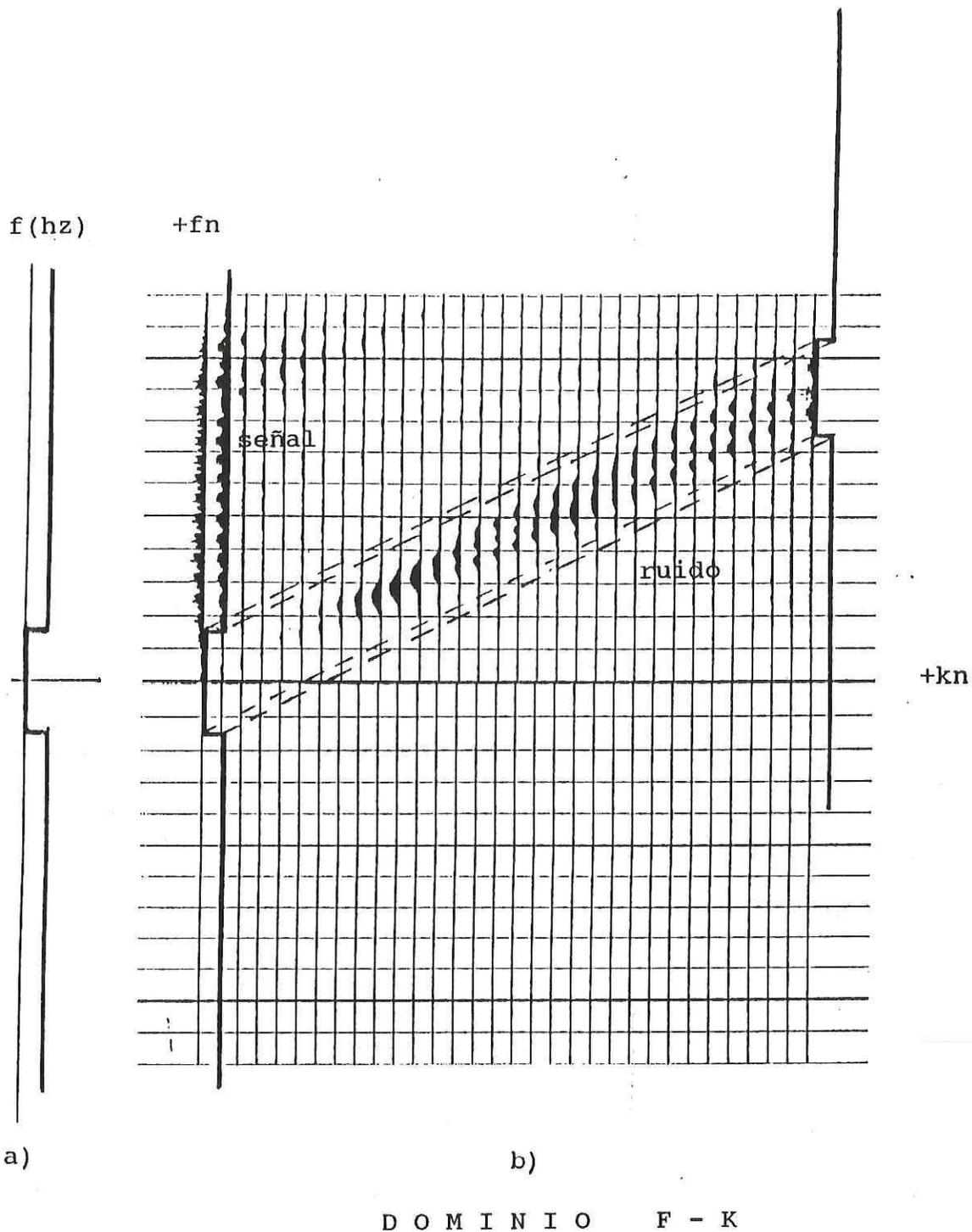


Figura 6. Aplicación gráfica del filtrado selectivo de velocidad "NFK". a) filtro Butterworth 1-d, b) traslación del filtro en el dominio F-K.

El problema principal que se presenta en este tipo de filtrado es el "aliasing espacial". Este fenómeno ocurre cuando los datos espacialmente están muestreados a separaciones grandes, provocando que un determinado evento (ruido superficial) aparezca en una posición incorrecta en el plano $f-k$, traslapándose con la señal. (ver figura 11 en la región de 30 hz y bajos números de onda)

Cuando este efecto de traslape es muy grande el filtrado de velocidad puede ser pobre, ya que parte del ruido no sería eliminado.

La influencia del aliasing puede ser evitada en algunas ocasiones aplicando un corrimiento en tiempo (modificando los echados de eventos), un filtro pasa-bajos o disminuyendo el espaciamiento entre trazas.

El aliasing en frecuencia es eliminado en el campo mediante un filtro "anti-alias" en el momento que los datos son grabados.

II.1 FILTROS BUTTERWORTH

Un filtro es un sistema por el cual el contenido espectral de una señal de entrada es pasado en una cierta banda

de frecuencias especificadas. Se desea que la parte que pase se conserve inalterable y que la parte de rechazo sea completamente eliminada.

Los filtros Butterworth se caracterizan por tener un máximo aplanamiento en ambos lados, en el pasa-banda y en la banda de corte. Por tal razón se selecciono este tipo de filtro.

En este trabajo utilizamos un filtro Butterworth pasa-alto de ganancia unitaria con una pendiente en la zona de rechazo de 48 db/oct, (figura 7).

El orden (N) del filtro determina la pendiente de éste, a mayor orden mayor pendiente, (Stearns, 1983). El orden está directamente relacionado con las frecuencias de corte y de rechazo.

Se ha seleccionado el orden de 8, tomando en consideración la cantidad de operaciones que ello implica así como también lo "redundante" de aumentar el orden.

La función de transferencia de un filtro pasa-alto Butterworth es la siguiente (Stearns, 1983);

$$H(j\omega) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{-2N}\right]^{1/2}}$$

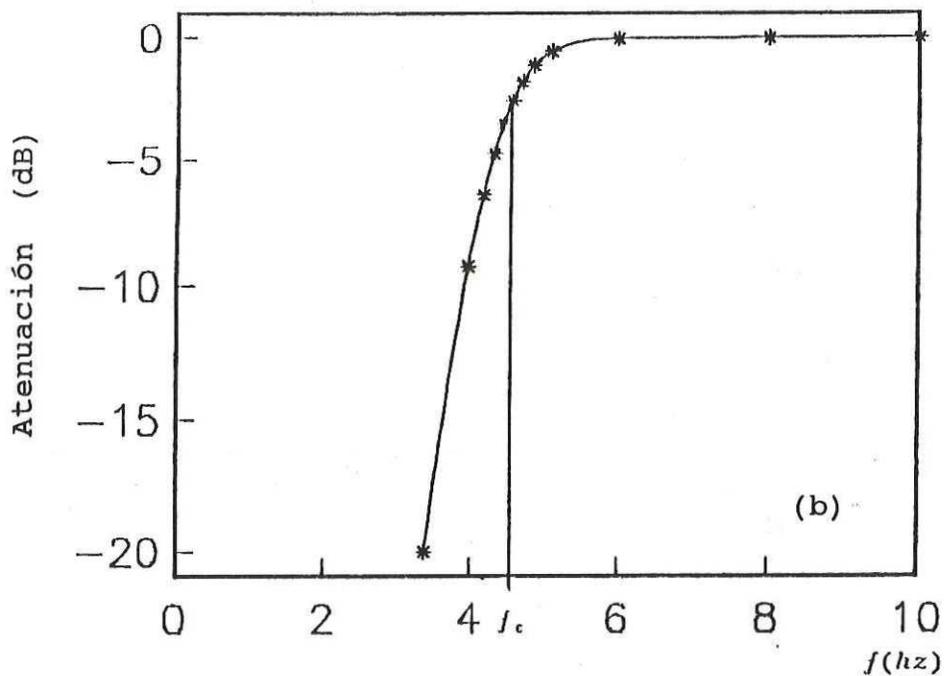
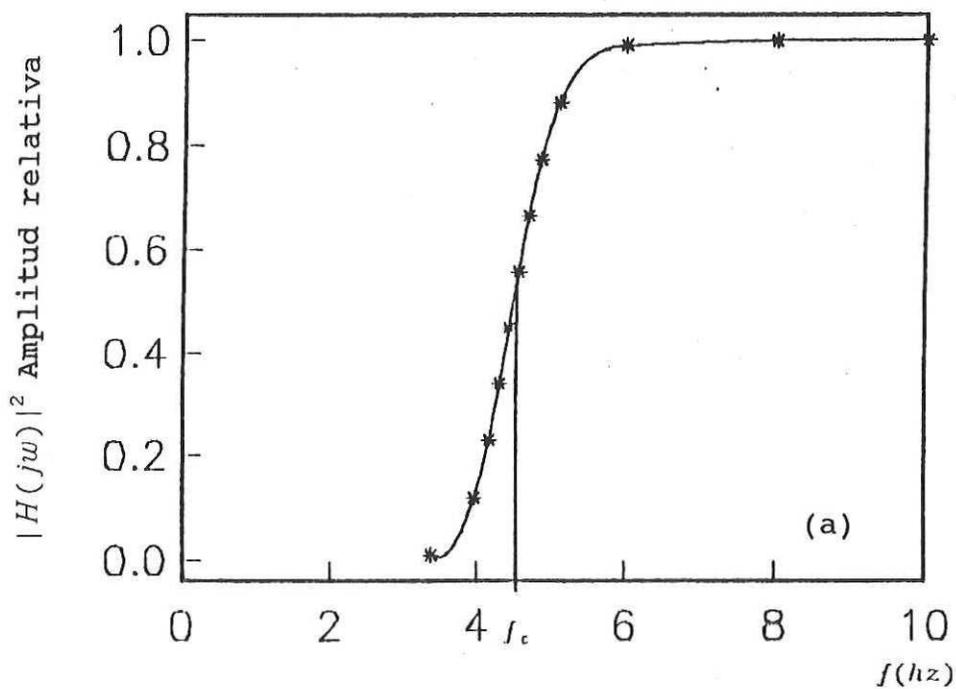


Figura 7. (a) Espectro de amplitud de un filtro Buterworth pasa-alto de orden 8 con una frecuencia de corte de 4.5 Hz. (b) respuesta a la amplitud en decibeles.

donde:

$H(jw)$ = función de transferencia.

W_c = frecuencia de corte

W = frecuencia a filtrar

N = orden del filtro

Entonces, la operación del filtrado "NFK" descrita en la figura 6 se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Sf(f_i, k_j) = |H(f_{i+df}, k_0)|^2 \times S(f_i, k_j)$$

donde:

$S(f, k)$ = señal sin filtrar

$H(f, k_0)$ = función de transferencia

$Sf(f, k)$ = señal filtrada

df = incremento en función de la velocidad

II.2 IMPLEMENTACION NUMERICA

El trabajar matrices de datos en forma vectorial facilita el procedimiento, ya que las grabaciones sísmicas se realizan traza a traza, de aquí que la implementación numérica de este filtrado en cualquier paquete de procesado que trabaje por trazas, es relativamente fácil.

En este trabajo se utilizó el paquete de procesado de datos sísmicos SIOSEIS desarrollado por Paul Henkart de IGPP en la Universidad de California en San Diego.

El diagrama de flujo de la figura 8, describe la adaptación hecha en este paquete de procesado. El procedimiento se realiza por tiros. Para poder aplicar la transformada de Fourier se completan los datos con ceros en ambas direcciones hasta obtener cantidades que sean potencia de dos, enseguida se transforma fila por fila obteniendo $S(t,k)$. Después de un análisis previo de los datos en el plano "f-k", donde se determinó los parámetros óptimos para el diseño del filtro, éste es diseñado con las características deseadas. Una vez hecho el diseño se transforma y se filtra columna por columna hasta tener todos los datos filtrados en el dominio "f-k", $S_f(f,k)$.

Para obtener los datos filtrados se realiza la transformación inversa en manera análoga, transformando renglón por renglón para obtener $S_f(f,x)$, y finalmente se transforma columna por columna, obteniendo la señal en el dominio tiempo-distancia ya filtrada $S_f(t,x)$.

La razón de hacerlo en esta forma, radica principalmente en la cantidad de memoria usada, ya que los datos sísmicos por lo general son mayores de cien mil por una cantidad de memoria permisible en la computadora que es de 32 mil valores.

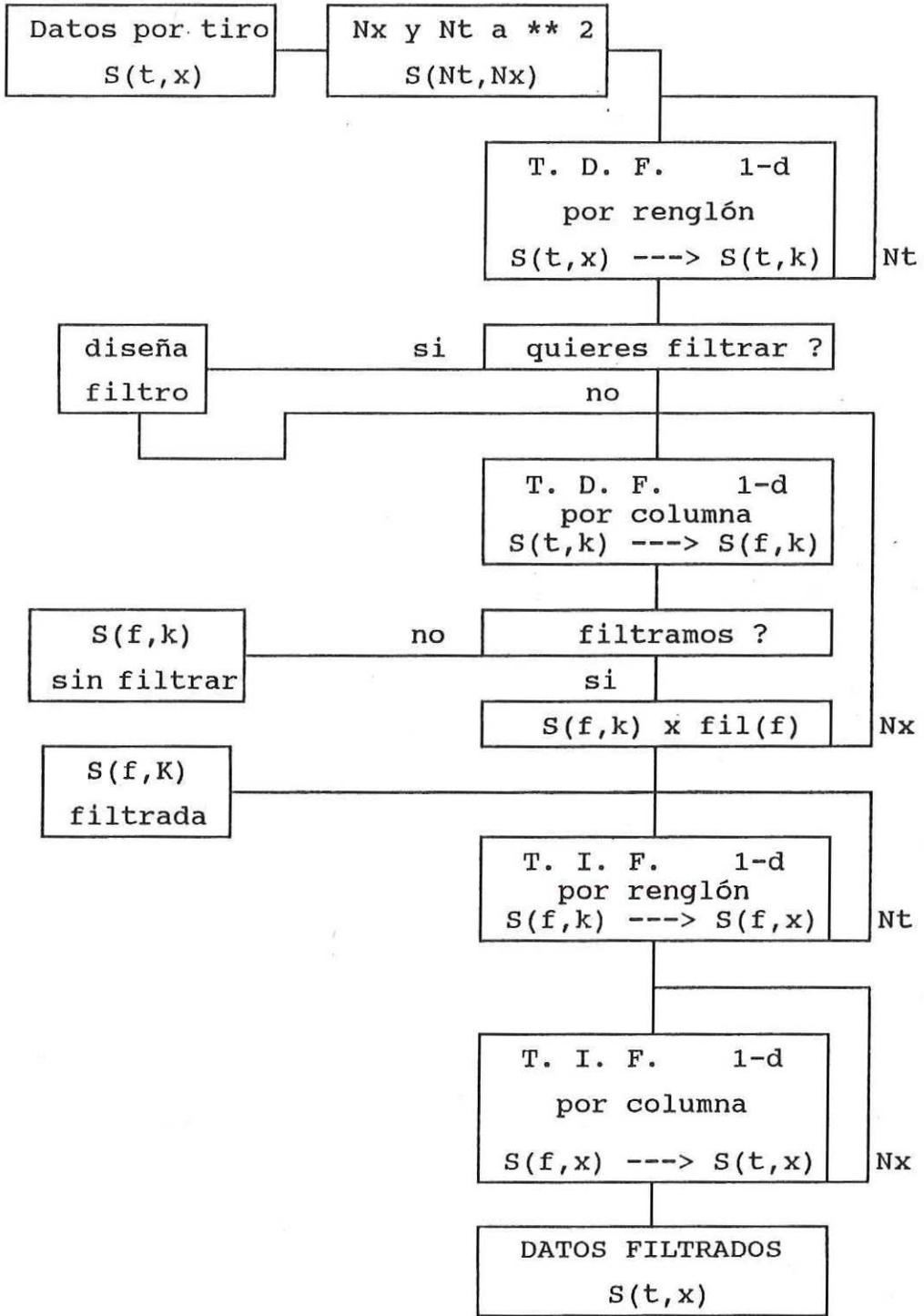


Figura 8. Diagrama de flujo del filtrado de velocidad "NFK".

De esta manera se ha descrito el diseño del método y su implementación numérica. En los siguientes dos capítulos se aplica a datos sintéticos y a datos de campo con la finalidad de probar su efectividad.

III EXPERIMENTO CON DATOS SINTETICOS

III.1 PARAMETROS DEL MODELO SINTETICO

Con el objeto de probar el algoritmo descrito anteriormente, se generó un modelo sintético para un levantamiento sísmico con eventos que incluyeron ondas de aire y ondas superficiales.

Se utilizó un modelo de tres capas el cual es mostrado en la figura 9. Cada uno de los eventos ahí señalados corresponden a los eventos de la tabla I.

Tabla I. Parámetros del modelo sísmico sintético de tres capas.

EVENTO	TIPO	PROFUNDIDAD seg.	VELOCIDAD (m/seg.)
A	reflexión	0.40	1200
B	reflexión	0.60	3500
C	reflexión	1.25	5000
D, EyF	onda sup.	0.30	350

Los parámetros de campo para este caso hipotético se muestran también en la figura número 9. El tendido es lateral, consta de 24 detectores con una distancia de la fuente al primer detector de 120 m. y una separación entre geófonos (Δx) de 5 m. Un intervalo de muestreo (ΔT) de .004 seg. y un tiempo total de grabación de 2 seg. (500 muestras).

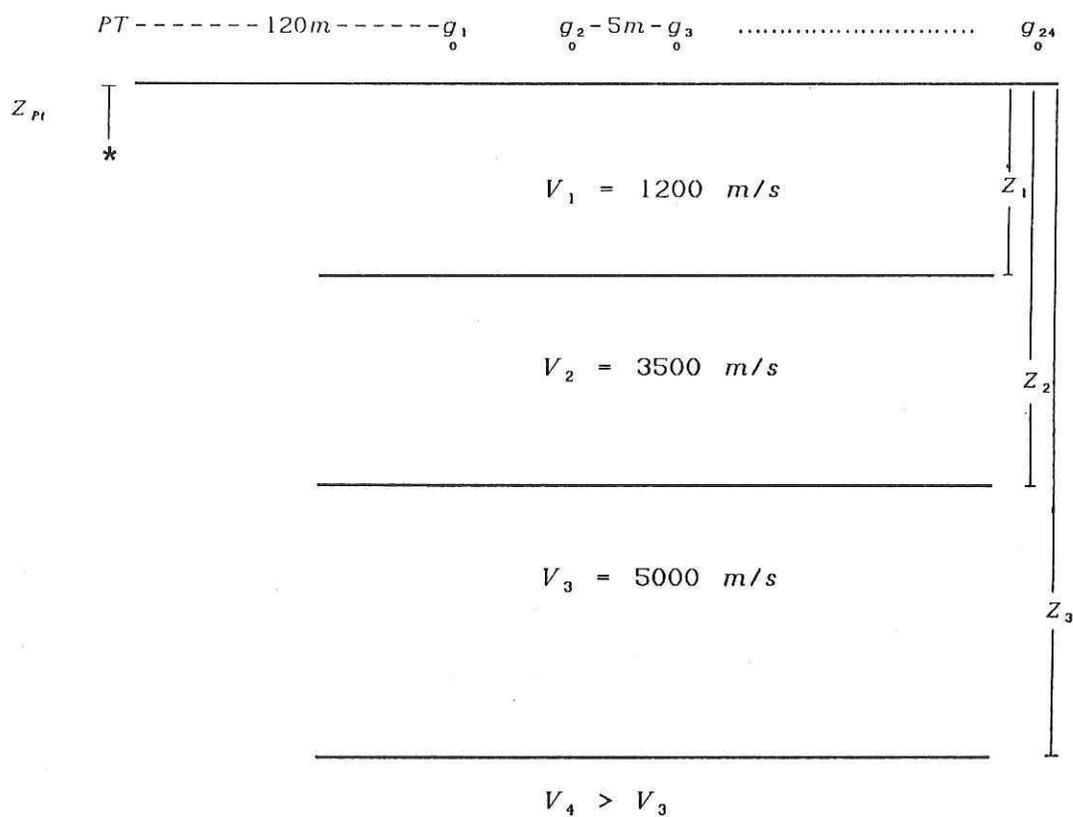


Figura 9. Parámetros del modelo sísmico sintético de tres velocidades, con un tendido lateral de 24 detectores.

La respuesta sísmica sintética obtenida para éstos parámetros se muestra en el registro de la figura 10 donde se han marcado los diferentes tipos de eventos antes señalados (Tabla I). Así, las letras A, B y C representan reflexiones y simulando las ondas superficiales se encuentran los eventos marcados con las letras D, E y F, respectivamente. Los datos están libres de ruido aleatorio. Nótese que el arribo de menor velocidad corresponde a los eventos D, E y F.

III.2 APLICACION DEL FILTRADO "NFK".

Una vez establecido el modelo sísmico y los parámetros de campo se procedió a la aplicación del filtrado de velocidad diseñado en este trabajo. El procedimiento seguido se ilustra en el diagrama de flujo en la figura 8 del capítulo anterior.

En los datos sintéticos no se incluyó el efecto dispersivo de las ondas superficiales. A pesar de ello, si bien, estos tienen el mismo contenido de frecuencias temporales, difieren en sus frecuencias espaciales (longitudes de onda) y es esta diferencia la que se va a aprovechar para eliminarlas.

Al utilizar la Transformada Rápida de Fourier, es necesario que el número de datos tanto en tiempo, como en el

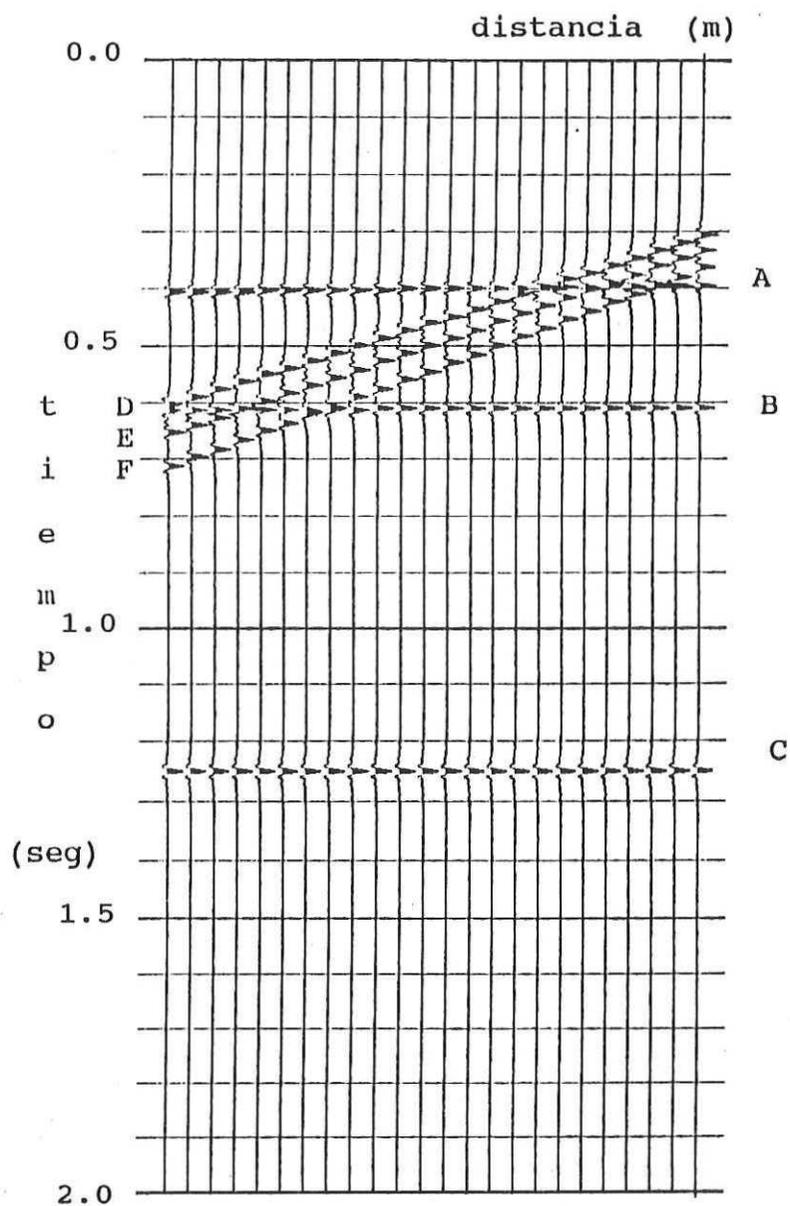


Figura 10. Registro sísmico correspondiente al modelo de la figura 9. Los eventos aquí representados son: las reflexiones (A, B y C) y las ondas superficiales (D, E y F).

espacio sean potencia de 2. Para ello se agregaron ceros para completar 512 muestras temporales y 104 trazas muertas con el fin de completar a 128 el número de puntos espaciales.

La figura 11, muestra el espectro de amplitud en el plano f-k del registro sísmico de los datos sintéticos. La frecuencia temporal máxima recuperada, la Frecuencia de Nyquist, es de 125 Hz., por lo que cada muestra tendrá un valor de 0.244 Hz.; mientras que su equivalente en número de onda kn, resulta de 100 c/km., teniendo un valor por muestra de 0.781 c/km. En el plano f-k de esta figura (11), se han identificado los diferentes eventos marcados con las mismas letras de la Tabla I. Es claro que se puede estimar la velocidad aparente de las distintas señales, ya que la razón $f/k=V_a$, la velocidad aparente.

En la Tabla II se muestra el rango de velocidad estimado y se describen además las regiones de influencia de cada uno de los eventos con las letras a-a', b-b' y c (figura 11).

Tabla II. Rango de velocidades aparentes y regiones de influencia en el plano f-k.

ONDA	VELOCIDADES (m/s)		REGION DE INFLUENCIA	
	máx.	mín.	vel-máx	vel-mín
superficial	600	200	a'	a
directa	1700	700	b'	b
reflejada	∞	1500	-	c

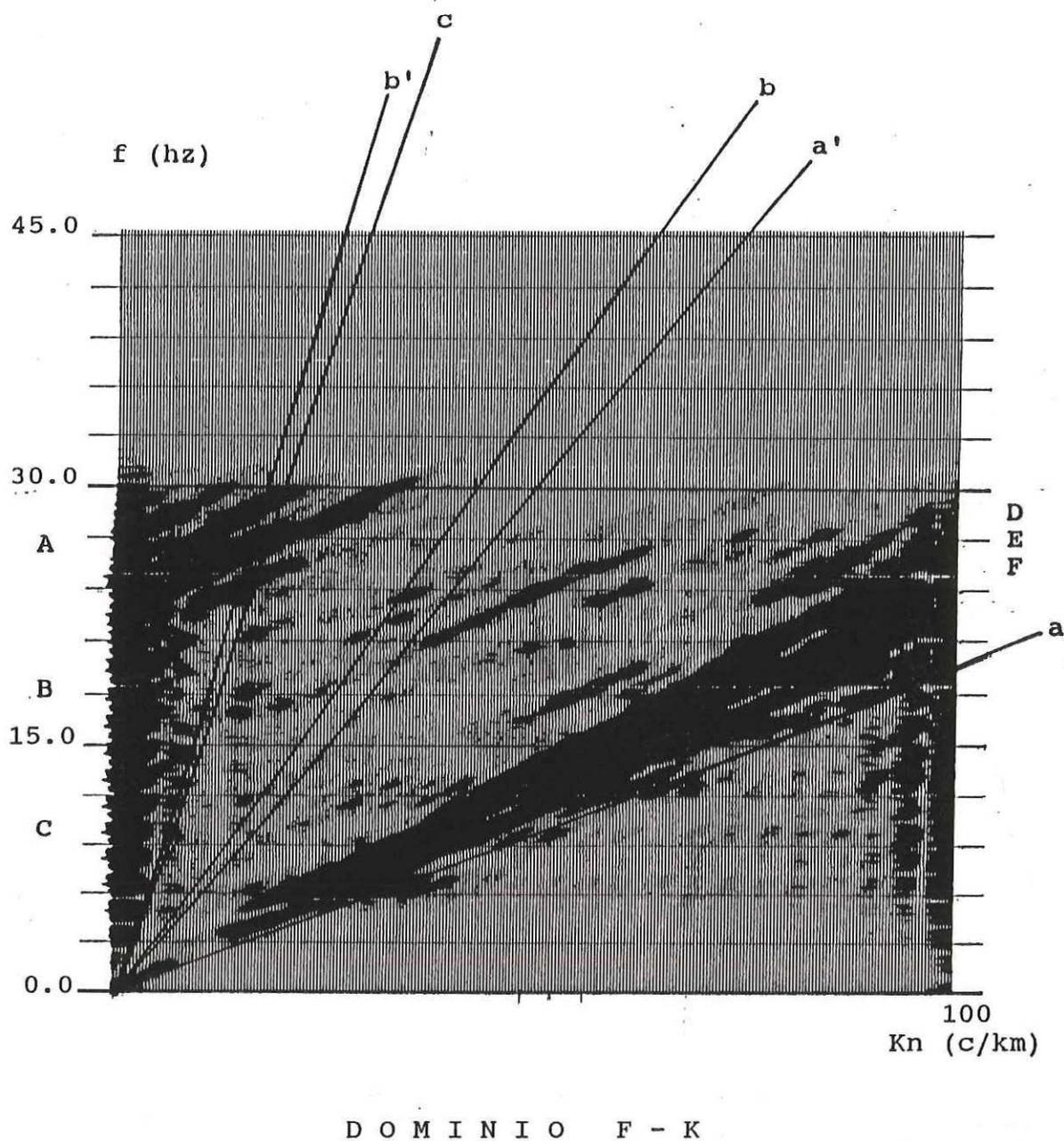


Figura 11. Espectro de amplitud en el plano $f-k$ del registro sísmico de la figura 10. Marcadas con las mismas letras identificamos las reflexiones (A, B y C) y las ondas superficiales (D, E y F).

Las regiones trazadas forman un abanico, por lo que el método tradicional de filtrado de velocidad que cancela o resalta éstas regiones se le conoce como "filtrado en abanico".

Una vez identificados los diferentes eventos, se procede a determinar los parámetros óptimos del filtrado "NFK" utilizando los siguientes pasos: (ver figura 12)

a) se traza una línea que defina la pendiente de la región del ruido.

b) en la región más dispersa, se estima el ancho de banda.

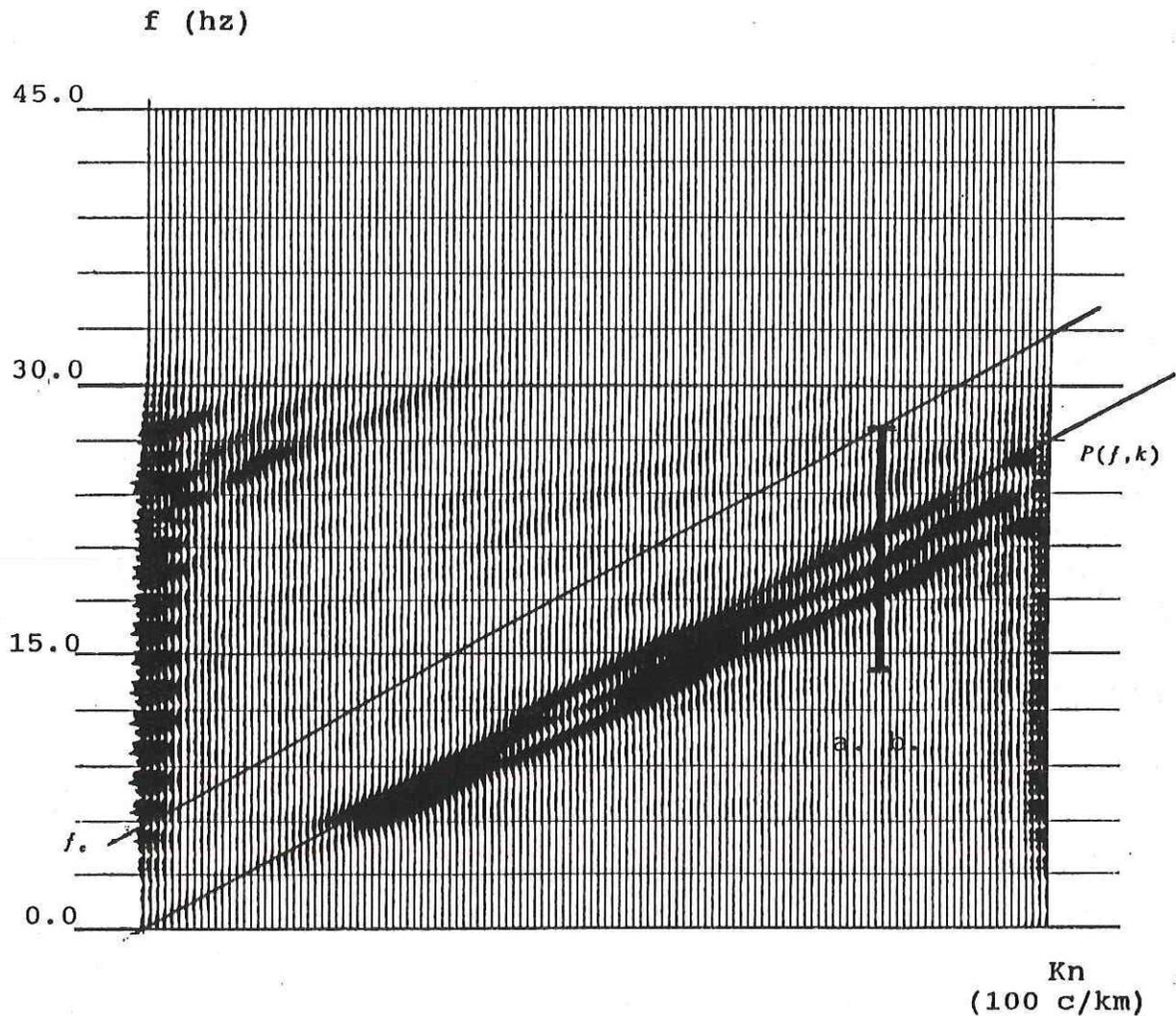
c) enseguida se traza una línea paralela a la trazada en el inciso "a", partiendo del límite superior estimado en "b".

d) el punto donde corte esta línea al eje vertical, nos dará la frecuencia de corte, (f_c).

e) el ancho de banda del filtro será entonces dos veces la frecuencia de corte.

Los parámetros obtenidos fueron los siguientes:

división en el eje vertical	(Pf): 0.9	(27 hz)
división en el eje horizontal	(Pk): 128	(100 c/km)
frecuencia de corte	:	5.5 hz
ancho de banda ($2*f_c$)	:	11.0 hz



ANÁLISIS DE RUIDO
DOMINIO F - K

Figura 12. Análisis en el dominio f-k para determinar los parámetros óptimos del filtrado; frecuencia de corte (f_c) y las coordenadas que definen la pendiente del ruido, P_f (divisiones) y P_k (número de traza).

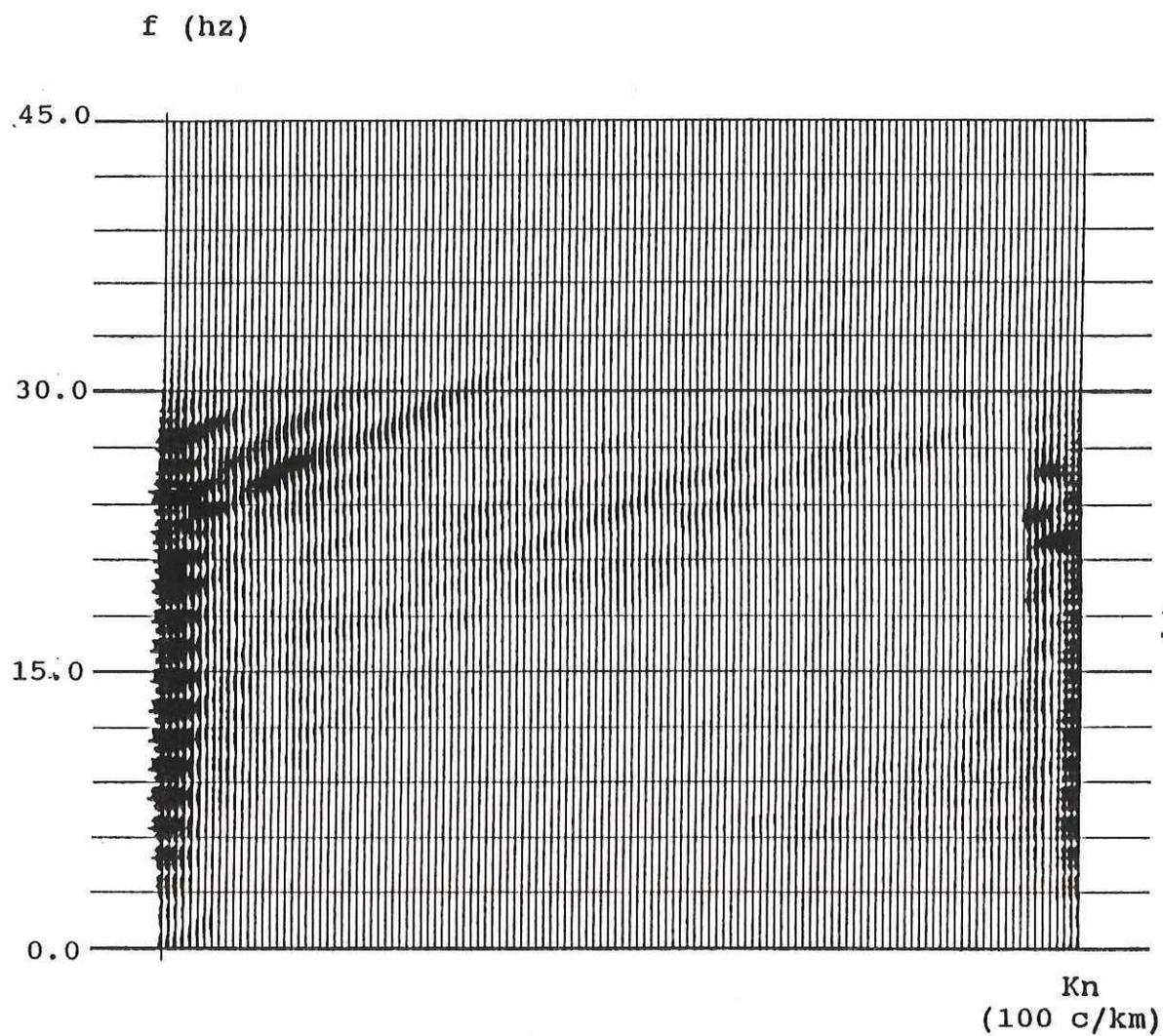
Utilizando estos parámetros se procede a la aplicación del filtro selectivo de velocidad. El orden (N) del filtro fue 8, de acuerdo con las consideraciones hechas en el capítulo anterior.

En la figura 13 se muestra el resultado de la aplicación del filtrado a los datos sintéticos. Es importante señalar que la operación del filtrado no inicia en la primera división (traza) del eje horizontal, así como tampoco termina en la última. Esto es debido al "compromiso" estrecho que hay de la señal y el ruido en estas dos regiones, donde ambas aparecen juntas. De una manera empírica, tomando en consideración los límites de localización mencionado anteriormente, se obtuvo una relación para dejar pasar toda la señal, permitiendo el paso de un poco de ruido, ya que es preferible esto a eliminar todo el ruido y afectar la señal. La relación fue de número de trazas entre 16.

Finalmente la figura 14, presenta los datos en el dominio tiempo-distancia ya filtrados. Como se puede observar el ruido fue casi eliminado en su totalidad. También se puede ver los efectos del "compromiso" en el lugar donde estaba el ruido superficial y en los trazas de las orillas.

De esta manera se ha mostrado la efectividad del método. En el siguiente capítulo se presenta la aplicación en

datos reales.



D O M I N I O F - K.

Figura 13. Datos en el dominio f-k después de aplicado el filtrado "NFK"

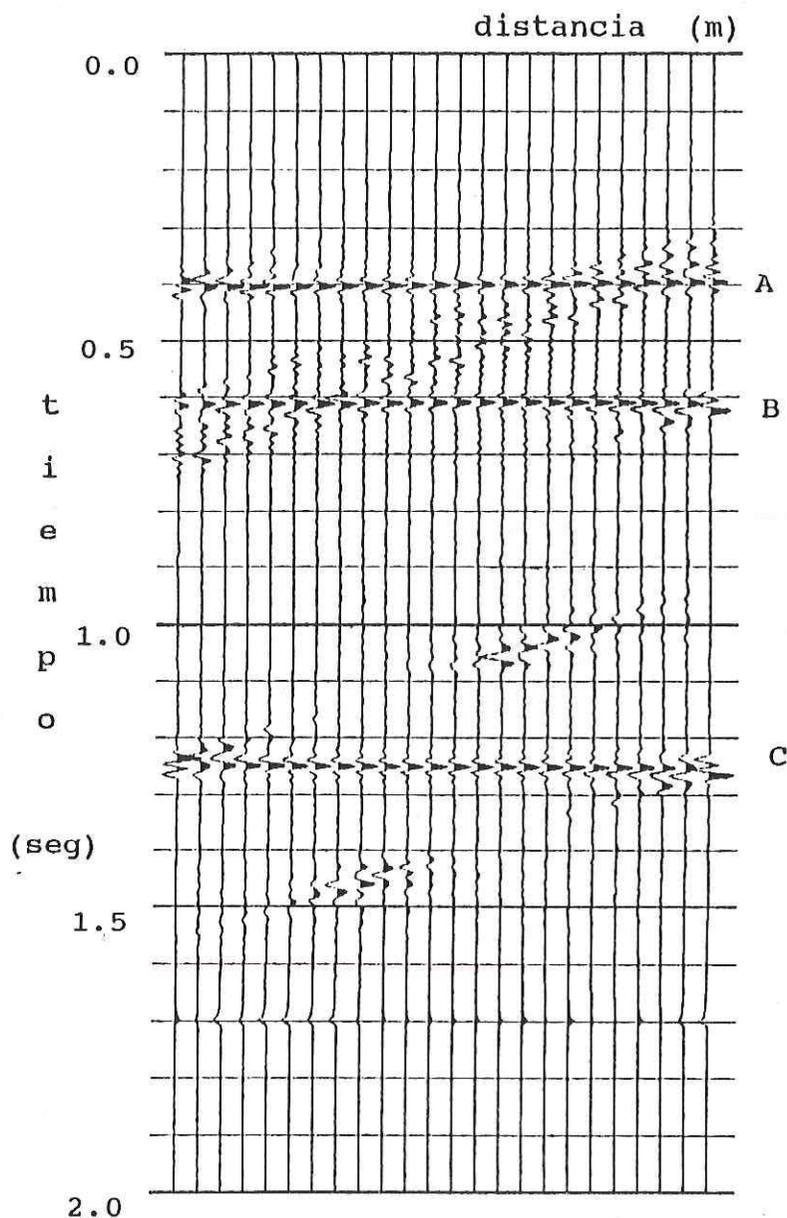


Figura 14. Datos en el dominio tiempo-distancia filtrados. Notese el ruido "residual" producido por el aliasing en el lugar donde estaban las ondas superficiales y los efectos de la transformada en las trazas de las orillas.

IV APLICACION DEL METODO A DATOS DE CAMPO

IV.1 ADQUISICION DE LOS DATOS

El método de filtrado de velocidad "NFK" antes descrito, fué aplicado a datos de campo que fueron recabados durante el curso de verano "Summer of Applied Geophysical Experience" (SAGE), impartido por un grupo de Universidades de los Estados Unidos y el CICESE. El levantamiento fué realizado en el año de 1986 como parte de un estudio geofísico en la cuenca Española, Nuevo México (Biehler et al. 1990). En la figura 15 se muestra el área de estudio y la ubicación de la línea sísmica utilizada.

Los parámetros de campo del levantamiento fueron tomados en el sistema inglés de medida y por razones prácticas se decidió usar éstas, sin que por ello se pierda generalidad.

La grabación de las señales se llevó a cabo mediante un equipo EG&G Geometrics ES-2420, usando como fuente de energía el sistema de detonación de gas, Dinoseis. El levantamiento comprendió un total de 110 tiros, cubriendo una longitud aproximada de 8200 ft.

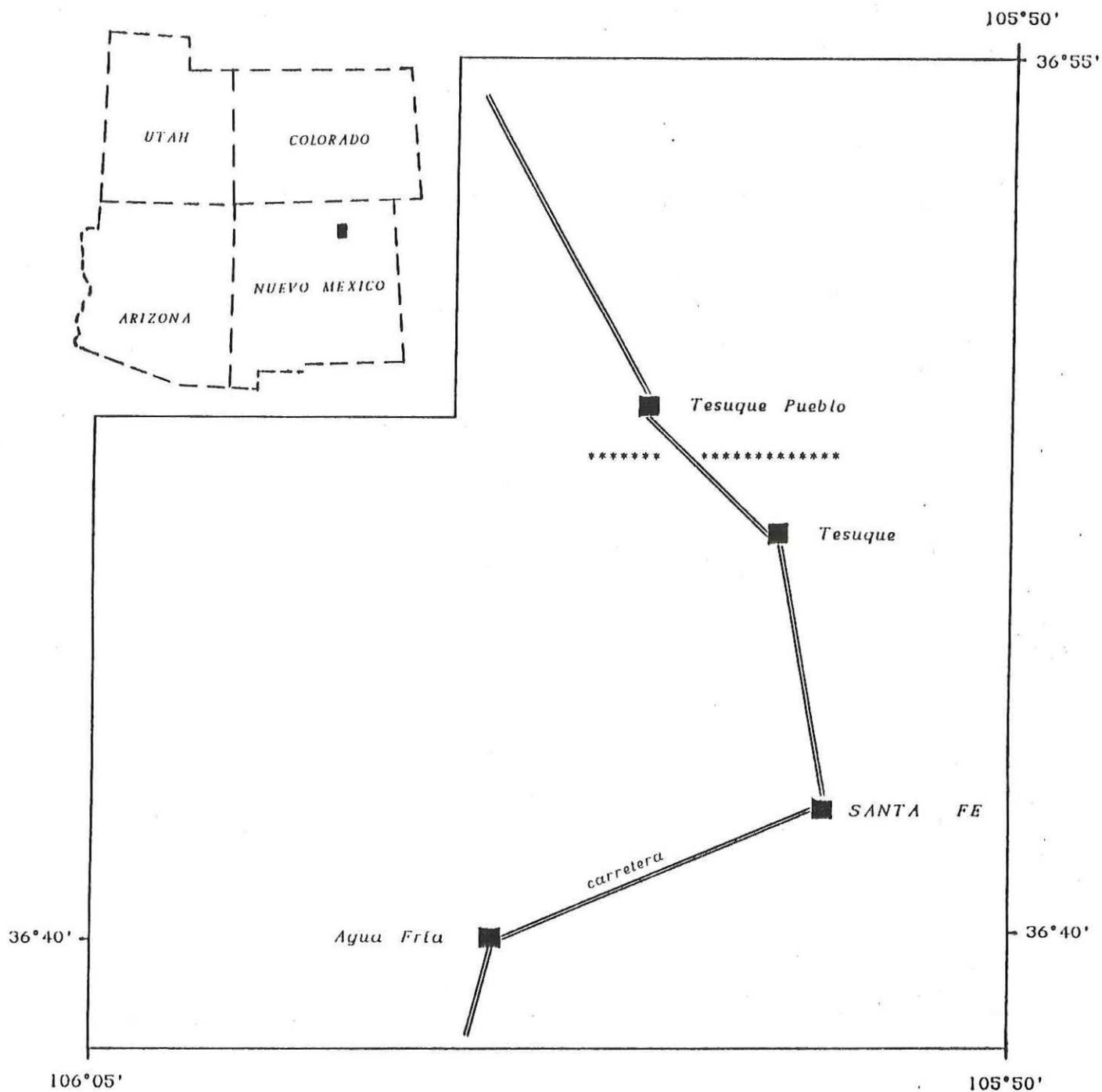


Figura 15. Area de estudio del prospecto Tesuque Pueblo en Nuevo México. La línea sísmica de estudio se encuentra marcada con asteriscos.

La geometría del tendido se presenta en la figura 16, la cual es del tipo lateral con 24 geófonos, tiene una distancia fuente-detector de 220 ft. y una separación entre detectores de 55 ft.

El desplazamiento entre puntos de tiros fué de 55 ft. a lo largo de toda la línea con excepción de los tiros 43 con 110 ft. y el 61 con 605 ft. Con esta geometría se alcanzó una cobertura máxima de 1200 % en un arreglo de Punto Medio Común (PMC), (Yilmaz, 1987).

En la figura 17, se muestran los registros correspondientes a los tiros 1, 33, 70 y 100, respectivamente. Se puede observar que la definición de las reflexiones no es muy clara, incluso en algunos tiros como el 70 y 100 no se alcanza a identificar ningún reflector. Esto es debido a la gran cantidad de ruido que se presenta en la mayoría de los datos, originado aparentemente por el efecto de las ondas superficiales, la onda de aire y de heterogeneidades laterales provocados por la presencia de material ígneo en el terreno, (Pérez, 1986). Como se verá posteriormente, si estos datos se procesan de manera convencional, sería imposible obtener una sección sísmica confiable. En casos como éste, donde los datos se encuentran contaminados con esta clase de ruido, la mejor opción es el aplicar un método de filtrado de velocidad.

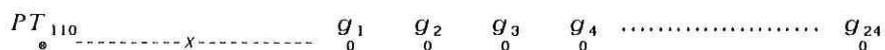
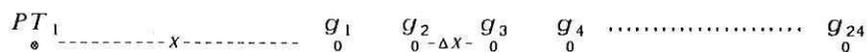


Figura 16. Geometría del tendido utilizada. Tendido lateral de 24 detectores, con una distancia al primer detector de 220 ft (x) y una separación entre geófonos de 55 ft (Δx).

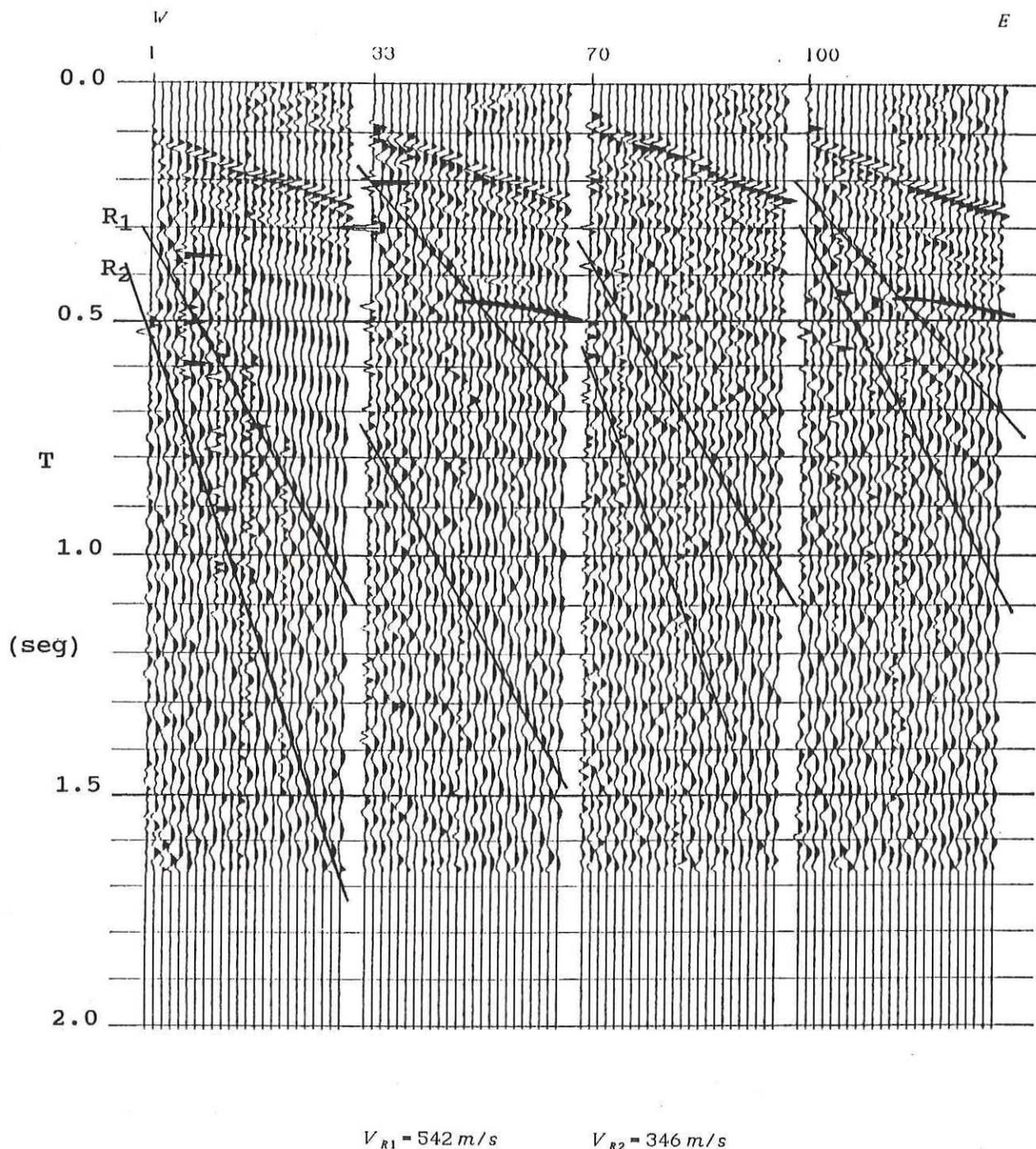


Figura 17. Registros sísmicos de campo en el dominio "t-x" correspondientes a los tiros 1, 33, 70 y 100. Notese la mala grabación de las 12 primeras trazas, así como la presencia de las ondas superficiales en casi todo el registro, (trayectorias rectas, mientras con trayectorias hiperbólicas se presentan las reflexiones).

IV.2 PROCESADO DE DATOS

Antes de poder utilizar el filtro de velocidad aquí propuesto, fué necesario llevar a cabo cierto tratamiento a los datos. Para ello se empleó el paquete de procesado de datos sísmicos SIOSEIS. Este paquete fué implementado en la PRIME 750 con un procesador de arreglos FPS 120B por los investigadores del Departamento de Geofísica Aplicada del CICESE.

El tratamiento y proceso de datos seguido se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 18, y se resume a continuación:

FORMATO: los datos originales fueron grabados en un formato que no era compatible con el paquete de procesado, por lo que fué necesario elaborar un traductor de formato SEG D a SEG Y (Digital Tape Standards, 1980).

GEOMETRIA: se introdujeron los parámetros geométricos del tendido, esto es, se definió la posición de cada tiro y detector respecto al primer Punto de Tiro, así como también se correlacionó detector con punto de reflejo en el subsuelo (PMC).

CORRECCION ESTATICA: esta corrección se realizó con el fin de eliminar las variaciones topográficas en todo el

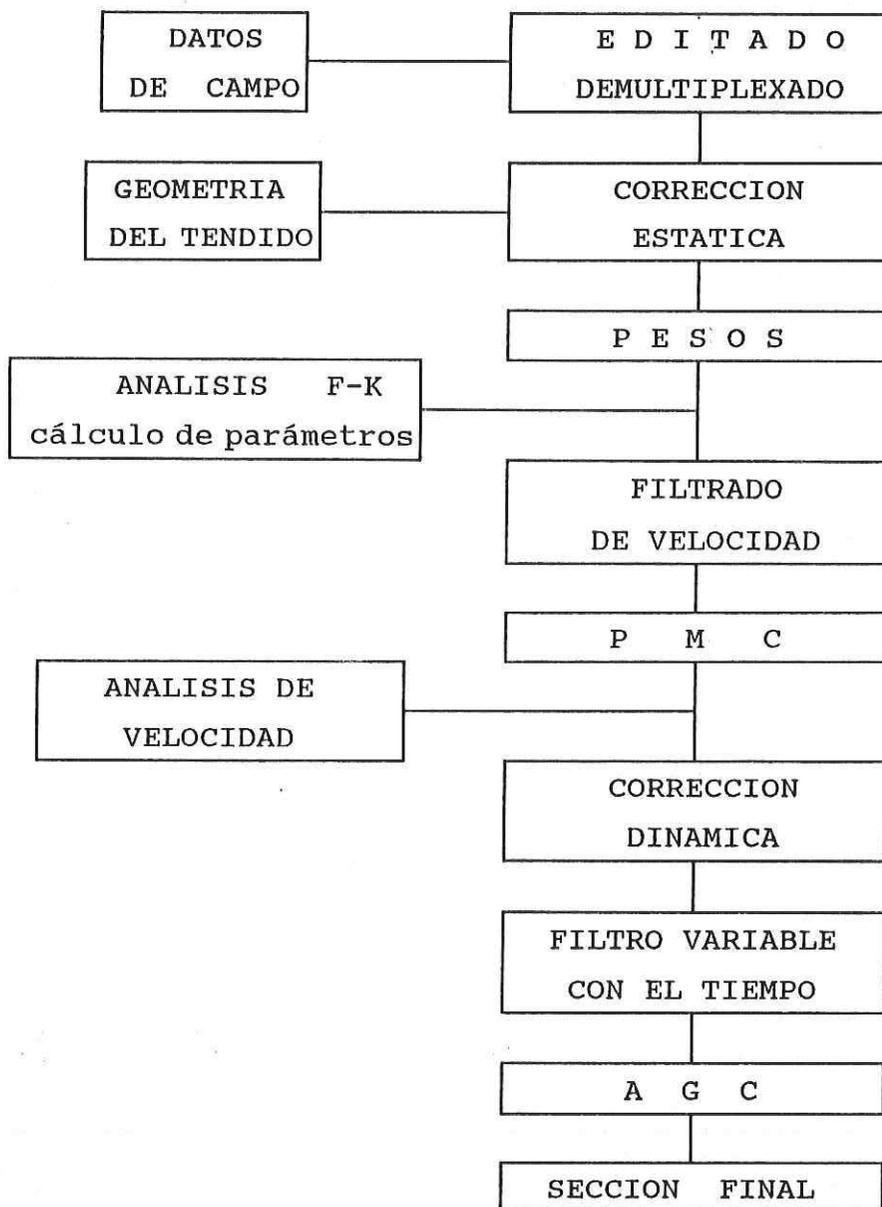


Figura 18. Secuencia de procesos aplicados a la línea sísmica del prospecto Tesuque Pueblo

tendido. Se optó por escoger una altura de 6500 ft. sobre el nivel medio del mar, como referencia.

PESOS: este proceso de edición de datos se realizó con el objeto de eliminar las trazas que no contribuyen con alguna información (geófono o canal defectuoso). En la figura 17 se puede observar que las 12 primeras trazas se encuentran mal grabadas (existe un ruido de carácter electrónico), por lo que solamente se utilizó las 12 últimos canales de cada tendido. Esto, desafortunadamente trae como consecuencia una reducción en la multiplicidad de los datos en el agrupamiento de PMC, lográndose únicamente una cobertura de 600 %.

ANALISIS F-K: se procedió a realizar un análisis en el dominio f-k el cual es mostrado en la figura 19. En este plano se identificaron los ruidos R_1 y R_2 señalados previamente en la figura 17 con líneas rectas. Se calcularon las velocidades aparentes de cada uno las cuales fueron de 562 m/s y 352 m/s para R_1 y R_2 respectivamente. Como se puede notar estas son aproximadamente iguales a las obtenidas en el dominio t-x de la figura 17, $V_{R1}=542$ m/s y $V_{R2}=346$ m/s. A partir de este análisis se determinaron los parámetros óptimos a usar en el filtrado de velocidad "NFK" siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Primero definimos mediante una línea recta el ruido mas predominante, R_2 , y en la región donde el ruido es más disperso se calculó el ancho de banda. De este, en el límite

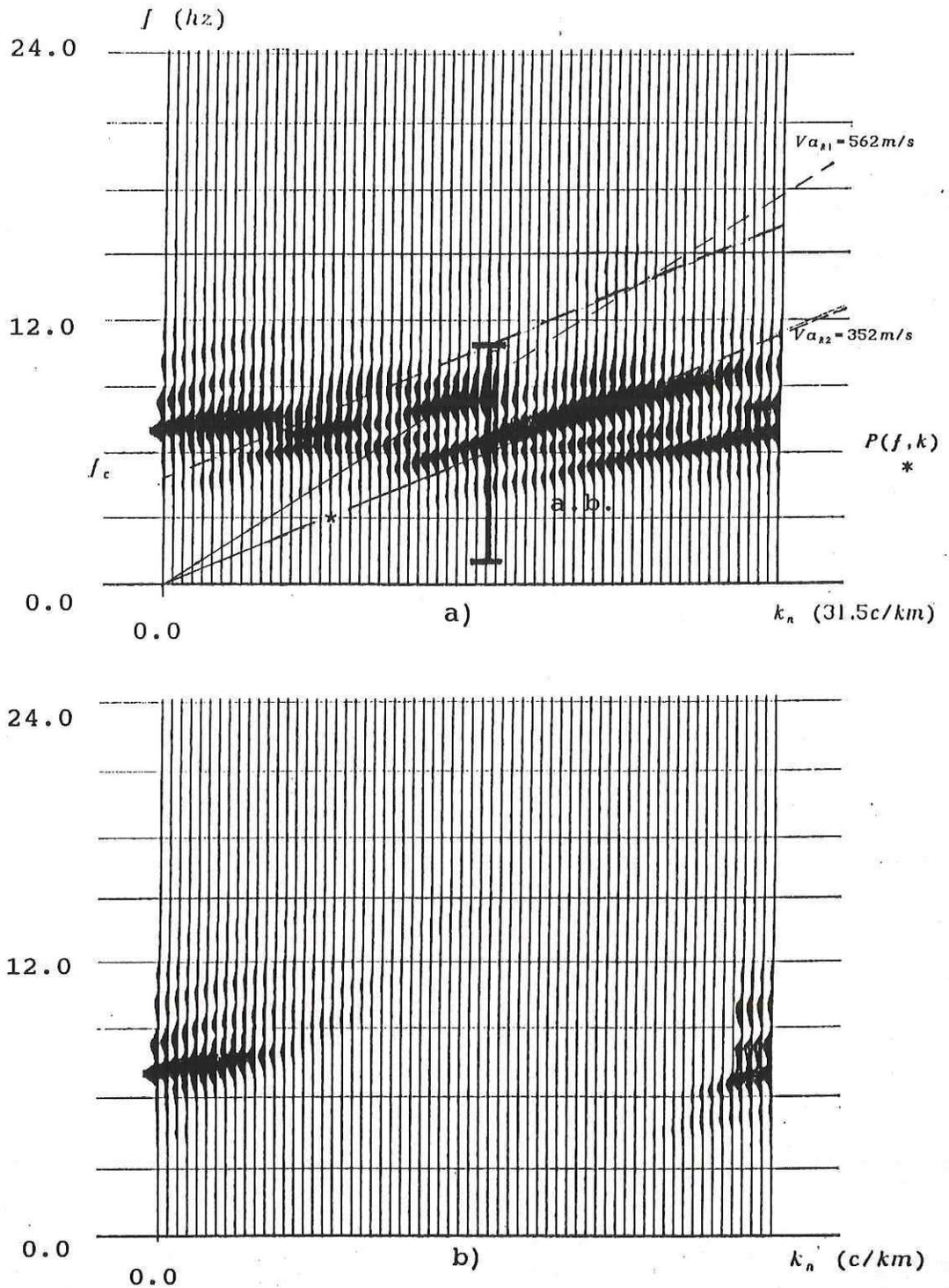


Figura 19. a) Análisis en el dominio f - k para determinar los parámetros óptimos del filtrado realizado en el tiro 1; frecuencia de corte (f_c) y las coordenadas que definen la pendiente del ruido, P_f (divisiones) y P_k (número de traza). b) datos en dominio f - k filtrados.

superior se trazó una línea paralela a la que define el ruido R_2 prolongándola hasta cortar el eje de las frecuencias, dandonos en este cruce la frecuencia de corte f_c . Los parámetros óptimos obtenidos fueron los siguientes:.

división en el eje vertical	(Pf):	0.1	(3 hz.)
división en el eje horizontal	(Pk):	18.0	(8 c/km)
frecuencia de corte f_c	:	4.5	hz
ancho de banda ($2 \cdot f_c$)	:	9.0	hz

FILTRADO DE VELOCIDAD: en base a los parámetros de diseño obtenidos en el proceso anterior se aplicó el filtro de velocidad "NFK" a cada tiro, (figura 19b).

PUNTO MEDIO COMUN: después de haber filtrado los 110 tiros, se agruparon los datos en PMC, esto es, de acuerdo a la geometría se tuvo una cobertura al 600 % para los puntos medios comunes del 16 al 267.

ANALISIS DE VELOCIDAD: en este análisis obtuvimos las velocidades para realizar la corrección dinámica (NMO) mediante el método espectral (Tanner, 1969), mostrado en la figura 20. Las cuales fueron:

evento A (.2 seg)	:	6300 ft/seg.	(1900 m/s)
evento B (.4 seg)	:	7500 ft/seg.	(2300 m/s)
evento C (.75 seg)	:	12000 ft/seg.	(3600 m/s)

CORRECCION DINAMICA: en este proceso se corrigió los datos debido al sobretiempo por distancia (NMO) con las velocidades obtenidas anteriormente (figura 21)

APILADO: en este proceso se suman las trazas de cada PMC ya corregidas obteniendo una sección sísmica semifinal.

PROCESOS DE MEJORAMIENTO A LA SECCION: se aplicó una Ganancia Automática de .3 seg. y un Filtro Variable en Tiempo con un pasabanda de 3 a 50 hz. esto, con el objeto de dar un acabado final a la sección sísmica.

Después de llevar a cabo estos procesos se obtuvo la sección mostrada en la figura 22. A manera de poder comparar esta sección se obtuvo otra realizando los mismos procesos con excepción del filtrado de velocidad, la cuál se presenta en la figura 23.

Haciendo una comparación de las dos secciones, figuras 22 y 23, se puede observar que en la sección filtrada el evento (A) correspondiente al tiempo de .2 seg., se encuentra definido en su totalidad en toda la sección; mientras que en la sección sin filtrar la definición es parcial. Por otra parte, el reflector (B) que se encuentra a .4 seg. en la primera sección presenta una continuidad y una mejor definición en gran parte de la sección, más no así en la segunda sección.

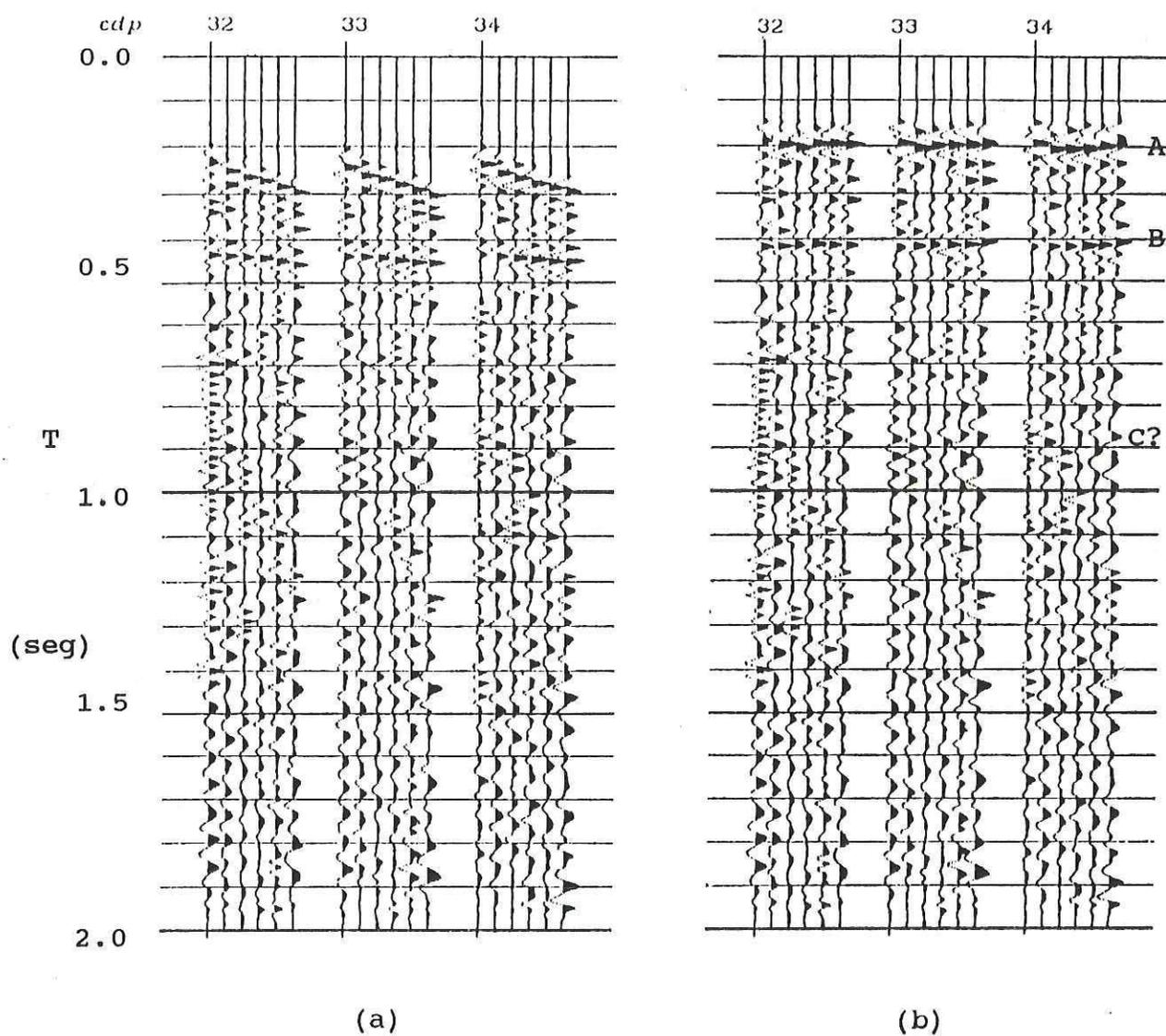


Figura 21. Corrección dinámica (NMO) realizada con los parámetros obtenidos en el análisis de velocidad a los cdp's 32, 33 y 34. a) cdp's sin corrección, b) cdp's corregidos.

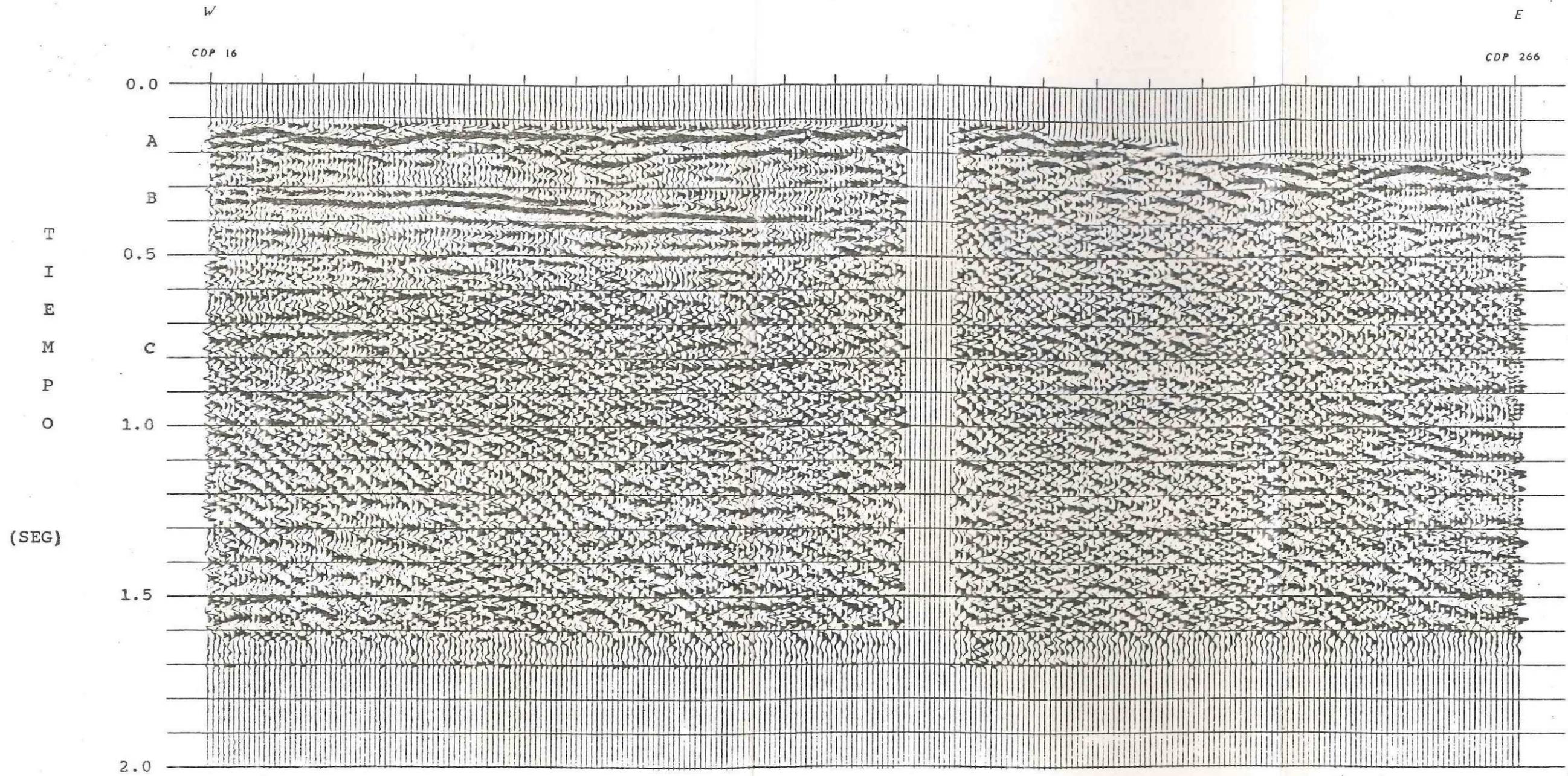


Figura 22. Sección final al 600 % obtenida después de aplicarle los procesos descritos en la figura 18, incluyendo el filtrado de velocidad "NFK".

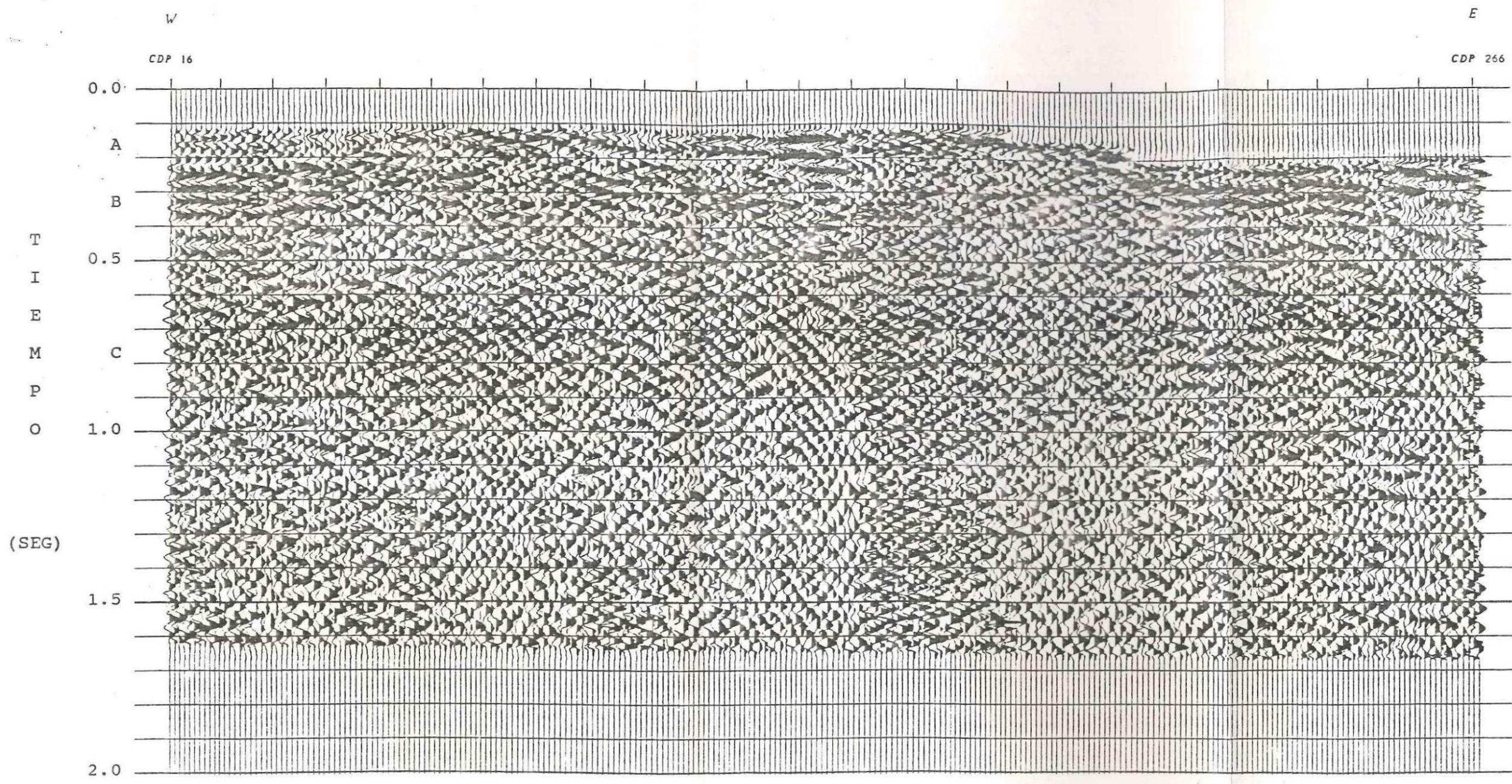


Figura 23. Sección final a 1200% procesada de la misma manera que la figura 22 pero sin el filtrado de velocidad "NFK".

Es importante hacer notar que este tipo de filtrado tiene resultados excelentes cuando existen reflectores que son cubiertos en su totalidad por el ruido superficial y que con el procesado convencional nunca podrían ser vistos, tal es el caso del reflector (C), que aparece en la parte izquierda de la figura 22 marcada en el tiempo .75 seg.

El siguiente paso después de haber realizado el procesamiento a los datos es la interpretación. Aunque no es realmente el objetivo principal de la tesis trataremos en una forma general de explicar en términos geológicos lo que sucede bajo el subsuelo del área de estudio.

Se identificaron tres reflectores los cuales son congruentes con el patrón estratigráfico del área (Pérez, 1986), teniendo las siguientes características:

TABLA III. Profundidad, velocidad e interfase de los reflectores A, B y C.

REFLECTOR	PROFUNDIDAD		VELOCIDAD (ft/seg)	INTERFASE formación
	seg	fts		
A	.2	565	6100	aluvión - Tesuque
B	.4	1580	7900	Tesuque - Galisteo
C	.75	5400	12000	Galisteo ? Basamento

V CONCLUSIONES

La transformada bidimensional de Fourier descompone las señales sísmicas en sus componentes de onda plana, de tal manera que eventos con velocidades diferentes, que en el dominio del tiempo aparecen mezclados, son graficados en el plano $f-k$ en forma aislada permitiéndonos la discriminación en la señal de interés del ruido.

Por esta razón el dominio de la frecuencia y el número de onda es el espacio natural en el cual el filtrado de velocidad puede llevarse a cabo, ya que el análisis de los datos es efectuado en este dominio lo cual nos permite estimar con precisión los parámetros óptimos del filtro, además de facilitar la aplicación de este.

Otra ventaja más de la implementación en el dominio $f-k$, es la estimación del grado de influencia del aliasing en los datos, lo que nos sirve para determinar los parámetros óptimos de campo.

Se trabajó en este dominio debido al principio de aplicación que tiene el filtrado selectivo de velocidad "NFK". El diseño desarrollado es sencillo. Utilizamos un filtro

Butterworth unidimensional de ganancia unitaria, el cual es aplicado sobre los datos en la región de interés, mediante una traslación de este filtro. De aquí que, la implementación de este proceso de filtrado en cualquier paquete de procesado de datos sísmicos que trabaje por tiros, traza a traza, es relativamente fácil (figura 8).

El tiempo de operación en la PRIME 750 utilizando un procesador de arreglos, para filtrar un tiro de 24 canales con 2 segundos de grabación y a un intervalo de muestreo de 4 milisegundos es de aproximadamente 60 segundos, el cual en el procesado de datos sísmicos es aceptable.

Los resultados obtenidos en la aplicación del filtrado "NFK" a datos sintéticos y datos reales, en las figuras 14 y 22, donde la influencia de la onda de aire y las ondas superficiales fué reducida en su totalidad, demuestran que esta nueva técnica de filtrado de velocidad es excelente.

LITERATURA CITADA

- Biehler, S., Ferguson, J., Baldrige, W. S., Jiracek, G. R., Aldern, J. L., Martínez García, M., Fernández Tomé, R., Romo Jones, J., Gilpin, B., Braile, L. W., Hersey, D. R., Luyendyk, B. P., and Aiken, C. L., 1990. A geophysical model of the Española basin, Rio Grande rift, New México. En prensa, Geophysics.
- Digital Tape Standards, 1968. Society of Exploration Geophysics., Tulsa. 65 pp.
- Embree, P., Burg, J. P., and Backus, M. M., 1963. Wide-band velocity filtering-The pie-slice process: Geophysics, V. 28, p. 948-974.
- Fail, J. P., and Grau, G., 1963. Les filtres en eventail: Geophysics, V. 11, p. 9-163.
- Peréz Flores, M., y García Aguilar, A., 1986. Reporte técnico de curso de verano en Santa Fe Nuevo México. (no publicado).
- Sako, B., and Hirano, K., 1984. Design of recursive digital filters for the selection or rejection of a particular velocity in seismic signals: Circuits, Systems, and Signal Processing, V. 3, No. 2, p 177-191.
- Smith, M. K., 1956. Noise analysis and multiple seismometer theory: Geophysics, V. 21, p 342.
- Stearns, S. D., 1983. Digital signal analysis, p. 182-222. Hayden Book Company, Inc., New Jersey. 280 pp.
- Taner, T. T., and Koehler., 1969. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity funtions: Geophysics, V. 34, No. 6, p 859-881.
- Wiggins, R. A., 1966. W-K filter desing: Geophysical Prospecting, V. 14, p 427-440.
- Yilmaz, O., 1987. Fundamentals, p. 1-50. Seismic data processing. (Dorothy S. M., ed). Society of Exploration Geophysiscs., Tulsa. 526 pp.