

CAPÍTULO V

PROCESADO DE DATOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN

En el procesamiento de datos de sísmica superficial se utilizan los mismos algoritmos, incluso el mismo *software*, que en sísmica profunda. En particular, esta memoria se ha desarrollado con un paquete comercial de *software* (PROMAX, V.7; Landmark Inc.) ampliamente usado en el procesamiento de la sísmica de exploración petrolera.

El procesamiento consiste en la elección y posterior aplicación de los parámetros y algoritmos de tratamiento adecuados a los datos sísmicos adquiridos en el campo (datos brutos) con el fin de obtener secciones sísmicas de calidad. El objetivo fundamental de todo procesamiento multiseñal es aislar en los registros las reflexiones de los otros eventos sísmicos que se superponen a ellas (ruido ambiental, *GR*, onda aérea, etc.). Actualmente, debido al gran incremento del volumen de datos (mayor capacidad instrumental) y al desarrollo de nuevos algoritmos (mayor potencia de cálculo), el dominio de las técnicas de procesamiento es el pilar básico de la prospección geofísica.

Otro factor decisivo en sísmica de alta resolución que afecta al procesamiento es la necesidad de preservar las altas frecuencias ya que las estructuras geológicas superficiales están en el límite de la detectabilidad sísmica y la aplicación de filtros para suprimir los eventos que no pertenecen a reflexiones caen, a menudo, en el mismo rango de frecuencias, de manera que cualquier disminución de este rango supone una menor definición de la sección sísmica.

Es también un precepto que todo algoritmo empleado durante el procesamiento debe preservar el máximo posible las reflexiones originales, de manera que su aplicación no se superponga a éstas creando "artefactos" que puedan considerarse como falsas reflexiones.

V.I SECUENCIA CONVENCIONAL DE PROCESO DE DATOS

Desde el momento en que los datos de campo (registros sísmicos) son introducidos en una estación de trabajo¹ la secuencia de procesamiento comienza su desarrollo. Según Yilmaz [7], hay tres etapas en el procesamiento de datos: 1) La etapa de pre-apilamiento (*pre-stack*); en donde una de las operaciones más significativas es la deconvolución. 2) La etapa de apilamiento (*stack*); con el

¹ Debido al gran volumen de datos, el procesamiento se realiza normalmente en estaciones de trabajo y bajo un entorno UNIX

análisis de velocidad como punto fundamental. Y 3) la etapa de post-apilamiento (*post-stack*); siendo la migración uno de los algoritmos finales que se aplican. En cada uno de estas etapas intervienen una serie de tratamientos fijos, mientras que hay otros algoritmos que se pueden aplicar en cualquier momento del procesado (filtrado, escalado de amplitud, etc.). En la Figura V.1 se presenta el esquema de la secuencia básica de procesado.

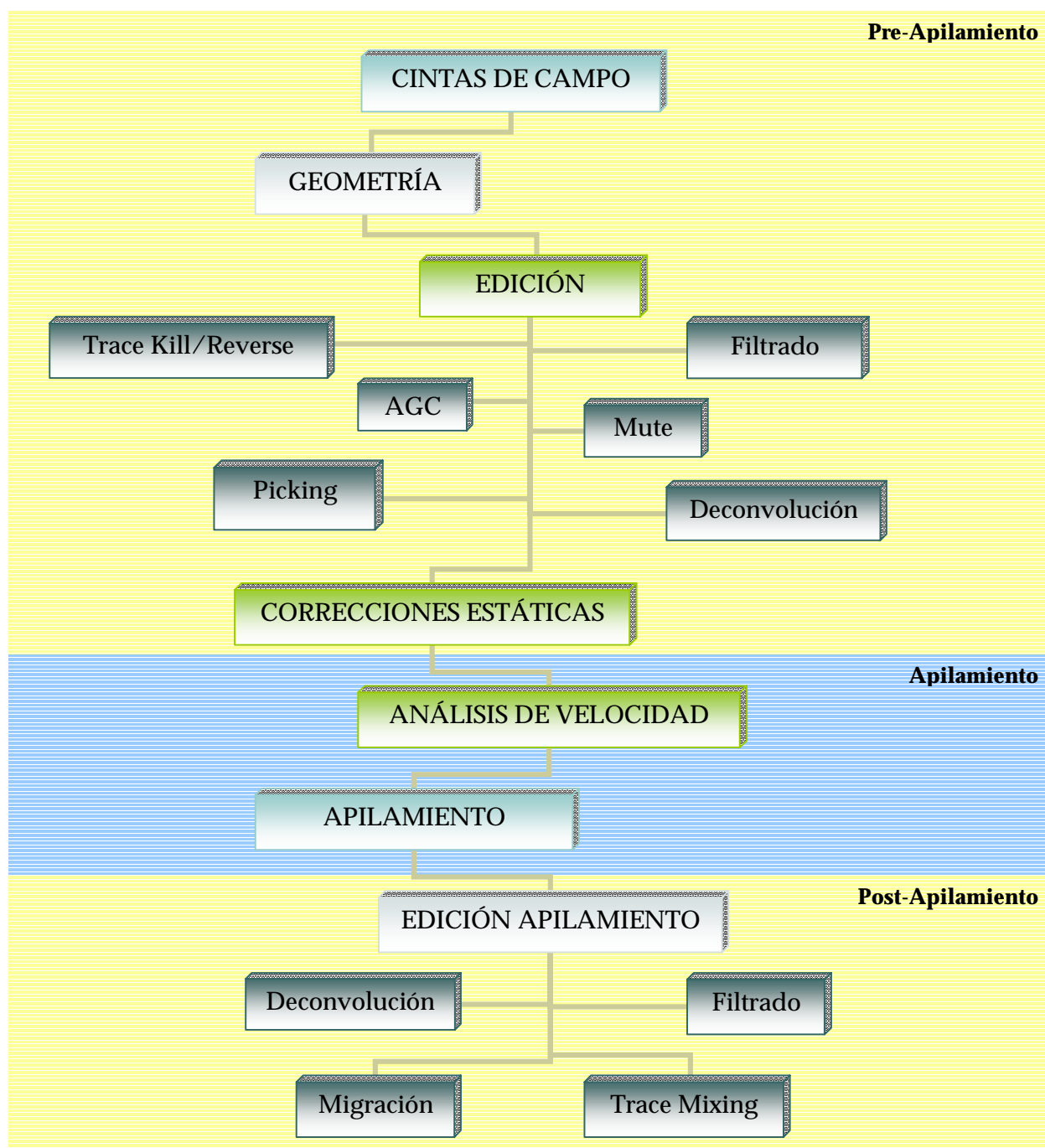


Figura V.1 Secuencia básica del procesamiento de datos sísmicos de reflexión.

TRATAMIENTOS DE PRE-APILAMIENTO

1. ALMACENAMIENTO

Los datos de campo son grabados en diferentes tipos de formatos, que deben ser compatibles con el software utilizado. A partir de 1990 el subcomité de la S.E.G. de “Agua subterráneas e Ingeniería Geofísica” propuso un formato estándar para todos los datos adquiridos con sísmica y radar del subsuelo, de aquí surgieron el formato SEG-2 para sísmica superficial, y el SEG-Y para sísmica profunda; entre otros.

2. DEFINICIÓN Y ESTABLECIMIENTO DE LA GEOMETRÍA

En primer lugar, es esencial definir correctamente las coordenadas (X, Y, Z) de cada una de las estaciones (fuentes y receptores), así como algunas otras características como el *offset* y el azimut (*skid*) entre otras. Algunos de estos datos deben ser introducidos manualmente, mientras que otros ya se encuentran en las cabeceras (*headers*) de los ficheros de cada registro sísmico.

Una vez definida la geometría de la línea sísmica se procede a su implantación de manera que cada traza de cada uno de los tiros de campo queda perfectamente ubicada.

3. EDICIÓN DE LOS REGISTROS

Durante la adquisición de datos, se pone mucho empeño en que el registro sísmico sea de alta calidad ya que esta parte del procesado es la más importante de todo el flujo de tratamiento de los datos; dado que los resultados posteriores van a depender del buen aislamiento de las reflexiones. A continuación se presenta una descripción de las etapas más significativas de este paso.

Proceso	Descripción
Eliminación de trazas (<i>kill trace</i>) (Figura V.2)	Se excluyen, total o parcialmente, aquellas trazas que presentan ruido o malas conexiones. El malfuncionamiento del geófono implica la pérdida de una traza [9].
Cambio de polaridad (<i>reverse trace</i>)	Algunas trazas suelen presentar cambios de polaridad debido a efectos de sitio o de intercambio de conexiones.
Lecturas de las primeras llegadas (Figura V.3)	En sísmica de reflexión se emplean estas lecturas para el cálculo de las correcciones estáticas. En el caso específico de la sísmica superficial, el conjunto de estas lecturas también se utiliza para calcular el campo de velocidades de refracción y así obtener un primer modelo del subsuelo ² .

² En el capítulo VI, cuando se describe el tratamiento específico de las secciones sísmicas y los resultados obtenidos se explicitan los modelos de refracción obtenidos.

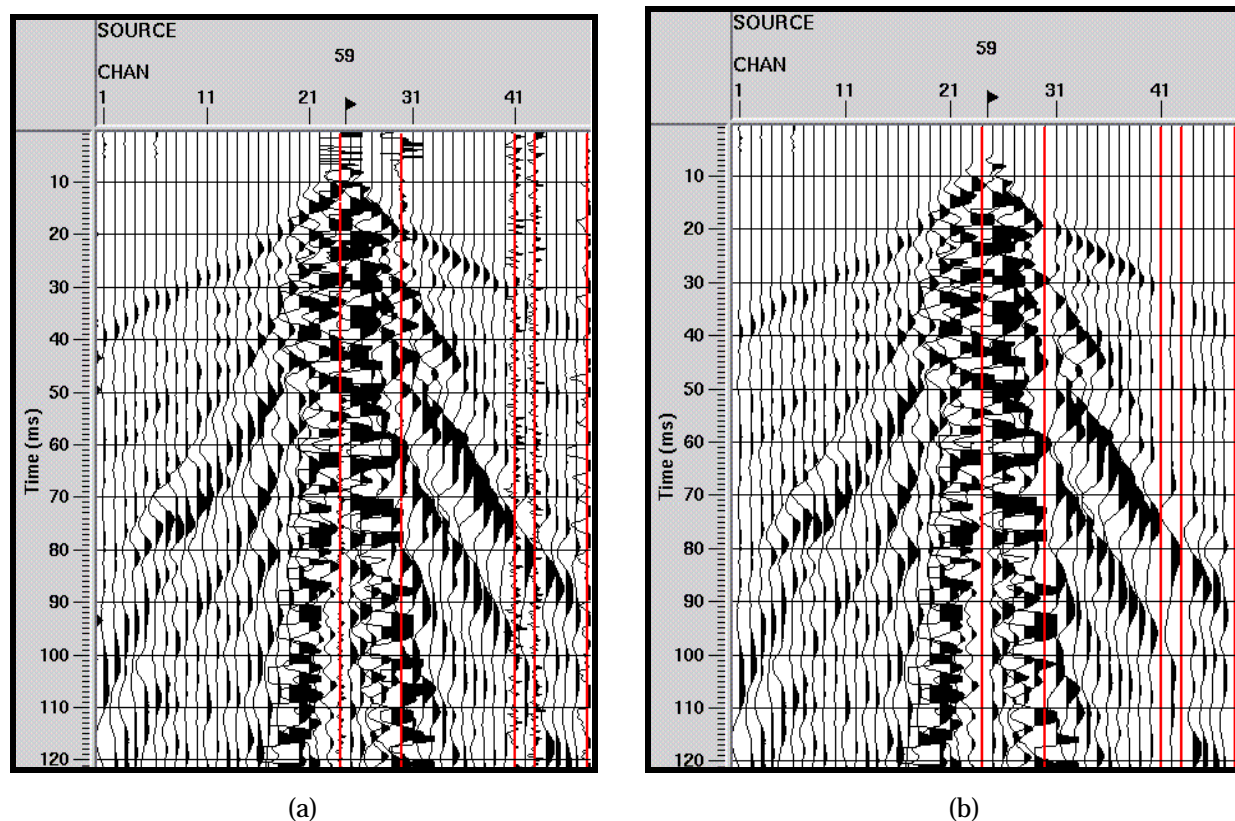


Figura V.2 Ejemplo de un tiro de campo (a) en el que se observan las trazas con alto contenido de ruido que deben ser eliminadas (b) en la primera fase del procesamiento. Tiro correspondiente al perfil PS-1. Espaciado entre trazas 5 m.

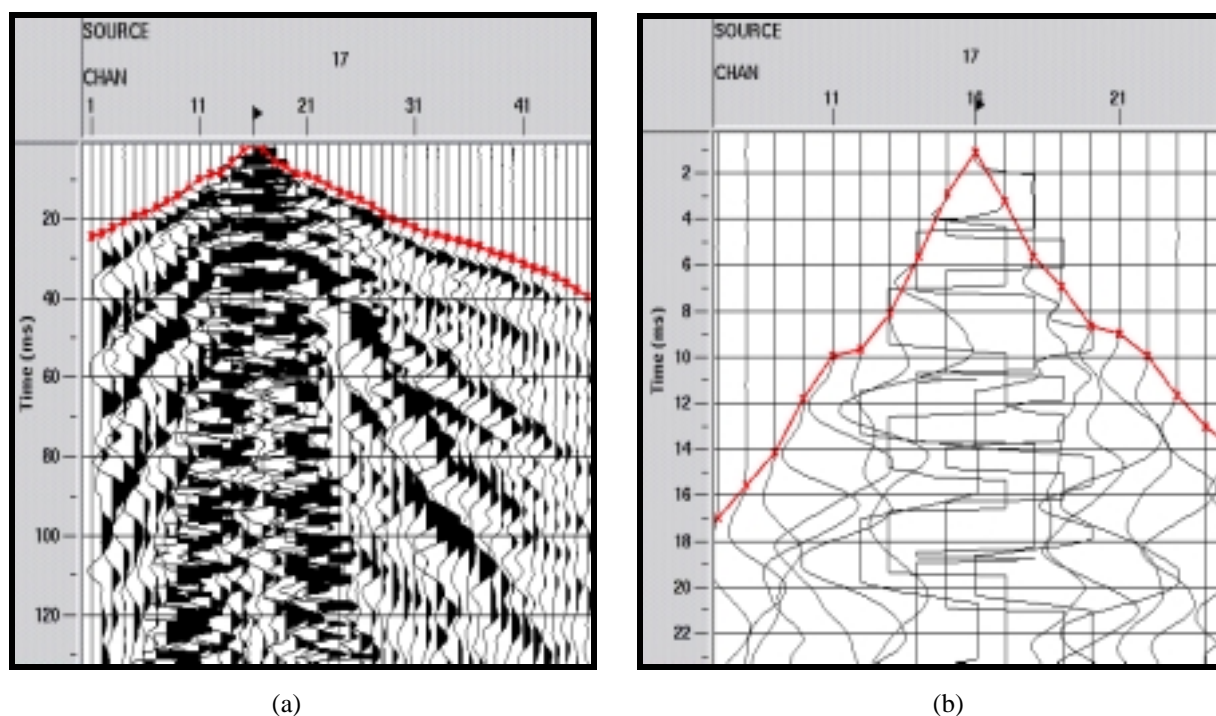


Figura V.3 (a) Lectura de las primeras llegadas y (b) detalle del *picking*. Con esta información se procede a realizar un estudio de refracción de las capas más superficiales. Registro correspondientes al perfil PS-1. Espaciado entre trazas 5 m.

Proceso	Descripción
Eliminación de las refracciones (<i>top mute</i>) (Figura V.3)	Las señales de primeras llegadas correspondientes a las refracciones deben eliminarse o de lo contrario se superpondrán con las reflexiones. Mientras en sísmica profunda este aspecto es sencillo, en sísmica superficial se convierte en un minucioso proceso debido a la corta distancia temporal entre ambos trenes de ondas. Su no eliminación también puede producir artefactos; por ejemplo, si en la etapa inicial se ejecuta un algoritmo dependiente de la amplitud, el cálculo de los parámetros de ganancia estará afectado por las altas amplitudes que caracterizan a las primeras refracciones [4].
Borrado directo por zonas (<i>Surgical and bottom mute</i>) (Figura V.4)	A menudo hay eventos sísmicos que a pesar del tratamiento aplicado es imposible eliminarlos del todo, entonces se hace necesario suprimir estos trenes de onda mediante borrado directo. Este fenómeno suele presentarse cuando los registros poseen ondas superficiales en fuerte <i>aliasing</i> , u ondas aéreas fuertes.

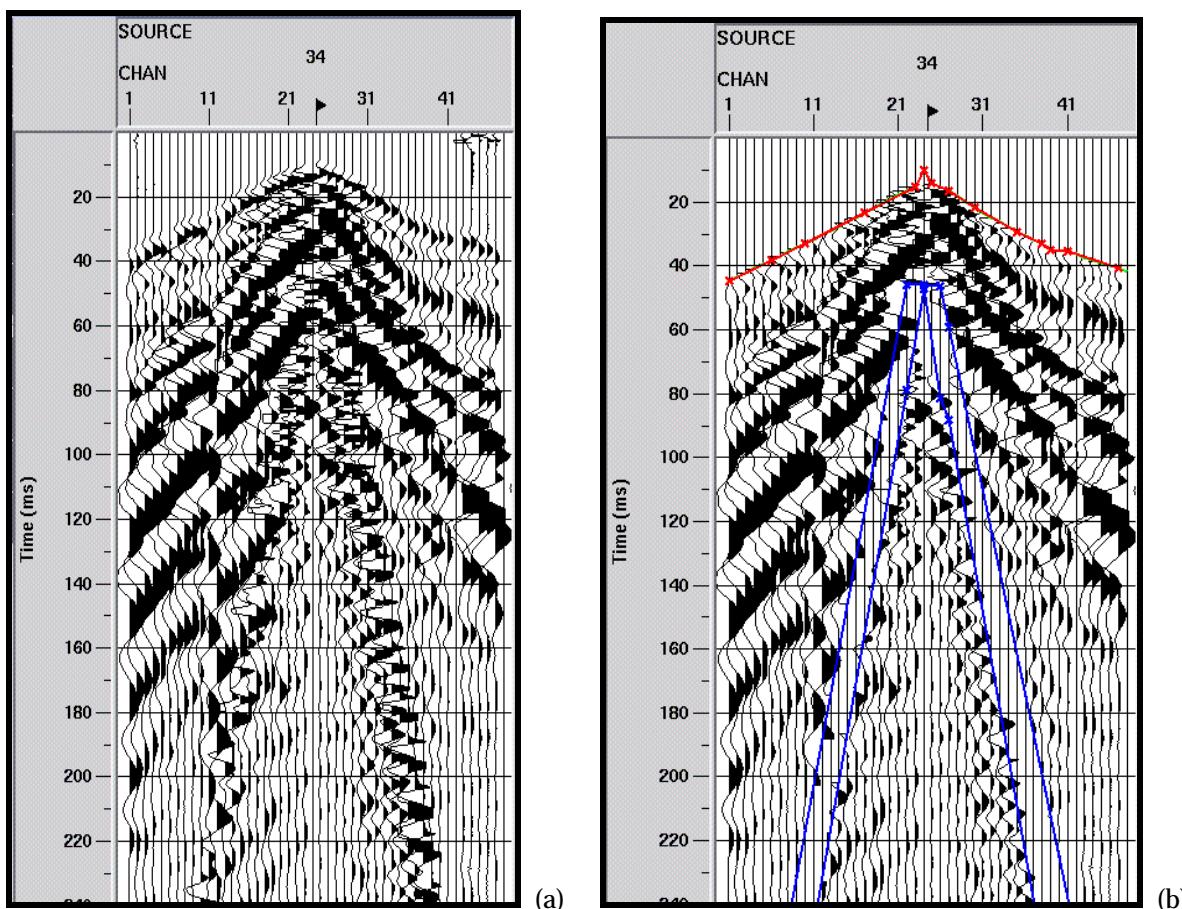


Figura V.4 (b) Efecto de la eliminación directa de la onda aérea y de las primeras refracciones en un registro. (a) El mismo registro previo borrado de esta onda. Datos procedentes del perfil sísmico PS-1. (Espaciado entre geófonos de 5 m y muestreo de 0.1 ms).

Proceso	Descripción
Aplicación de filtros:	El objetivo del filtrado es eliminar el ruido y resaltar los eventos de reflexión. Los filtros, por lo general, operan sobre las bases de la frecuencia y la amplitud de las trazas, aunque también se pueden usar filtros que actúan sobre su coherencia o su longitud de onda.
Análisis espectrales (figuras V.5 y V.6) Paso-Banda.	Los análisis espectrales de los registros se utilizan para elegir los tipos de filtro y sus parámetros. Es uno de los filtros más empleados, tiene como finalidad dejar pasar la señal en una banda limitada de frecuencias de manera que se aceptan las frecuencias que contienen energía de reflexión coherente y se rechazan aquellas frecuencias asociadas al ruido sísmico (ondas superficiales, aérea, ruido ambiental, etc.).
Filtro F-K (Figura V.7 y V.8)	Este tipo de filtro es útil para eliminar el ruido coherente que presenta una tendencia lineal. Se le conoce también como filtro de velocidad ya que en el espacio en que opera (número de onda, frecuencia), se discriminan los distintos eventos por estar alineados según rectas cuyas pendientes definen las distintas velocidades. De esta forma los eventos lineales de baja velocidad (<i>GR</i> u onda aérea) se hallan con ángulos menores respondiendo a las bajas velocidades, mientras que las reflexiones, se localizan en sectores angulares mayores.

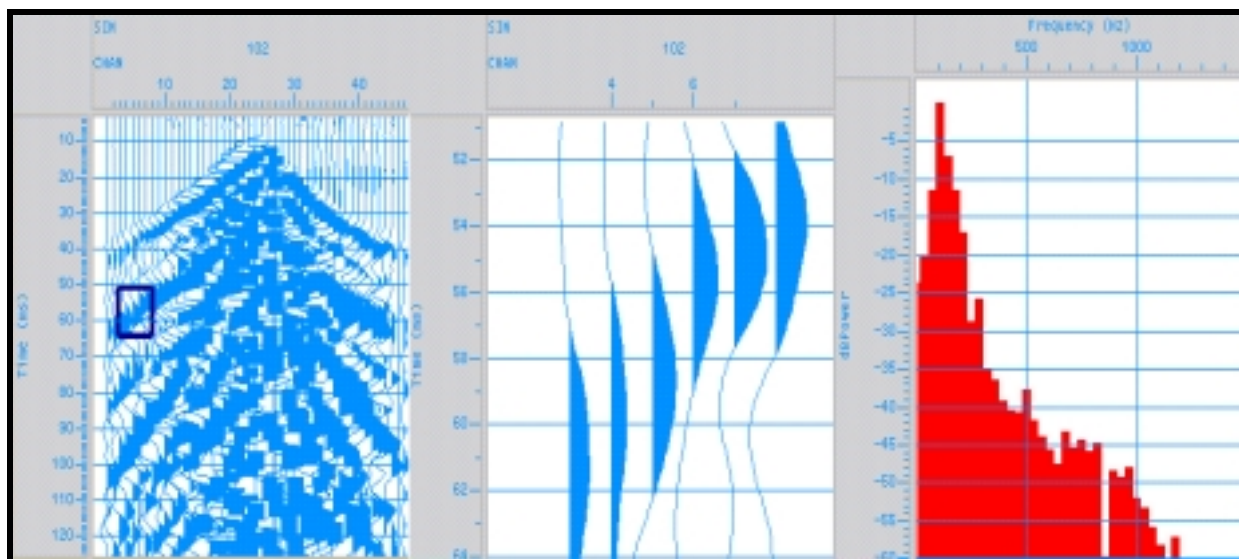


Figura V.5 Antes de aplicar cualquier filtro es necesario realizar el estudio espectral (frecuencias, amplitudes) de los registros a fin de caracterizar cada uno de los eventos presentes. La figura muestra el contenido de frecuencia para una ventana temporal en donde se superponen ondas superficiales a la reflexión. Registro perteneciente al perfil PS-1.

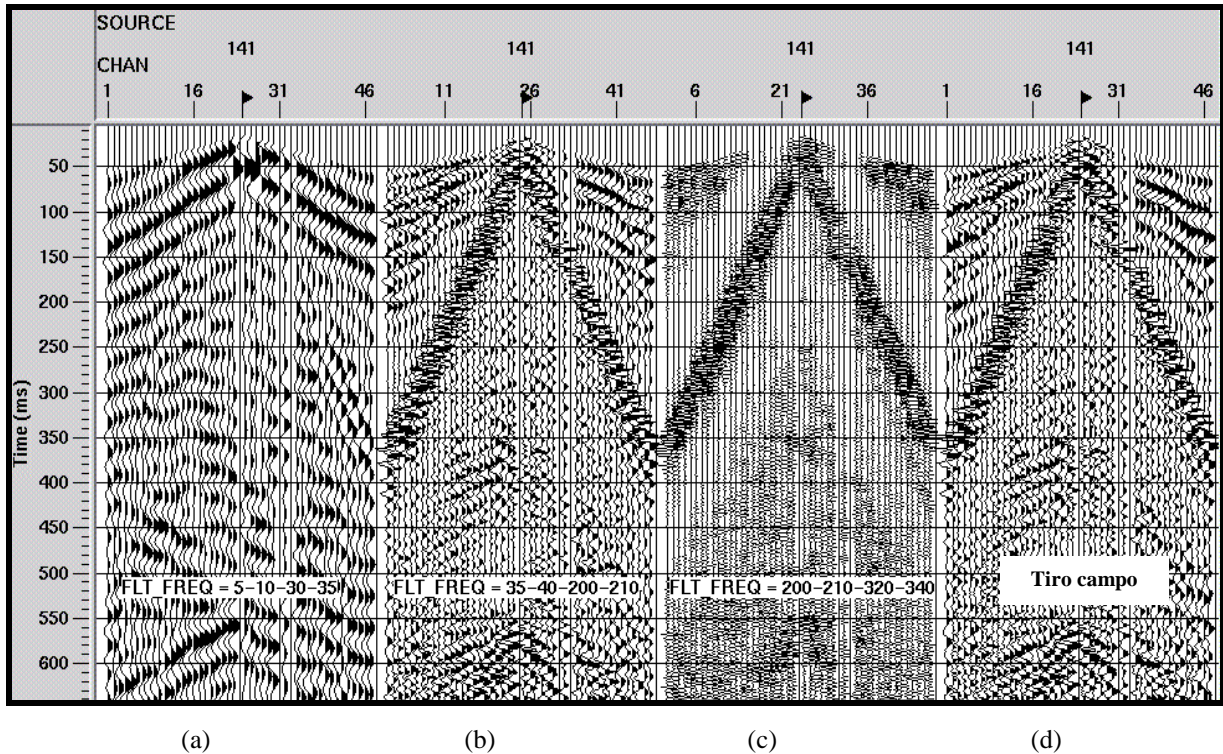


Figura V.6 Otro análisis que suele hacerse antes de aplicar un filtro pasa-banda es la descomposición de los registros en bandas de frecuencia a fin de determinar el ancho óptimo en donde se sitúan las reflexiones. En este caso se diseñó un filtro paso-banda de Ormsby definido por el trapecio 30-40-200-210 Hz. Puede observarse como ni en la banda baja de frecuencias (a), ni en la banda alta (c) no hay señales de reflexión. Registro perteneciente al perfil PS-1.

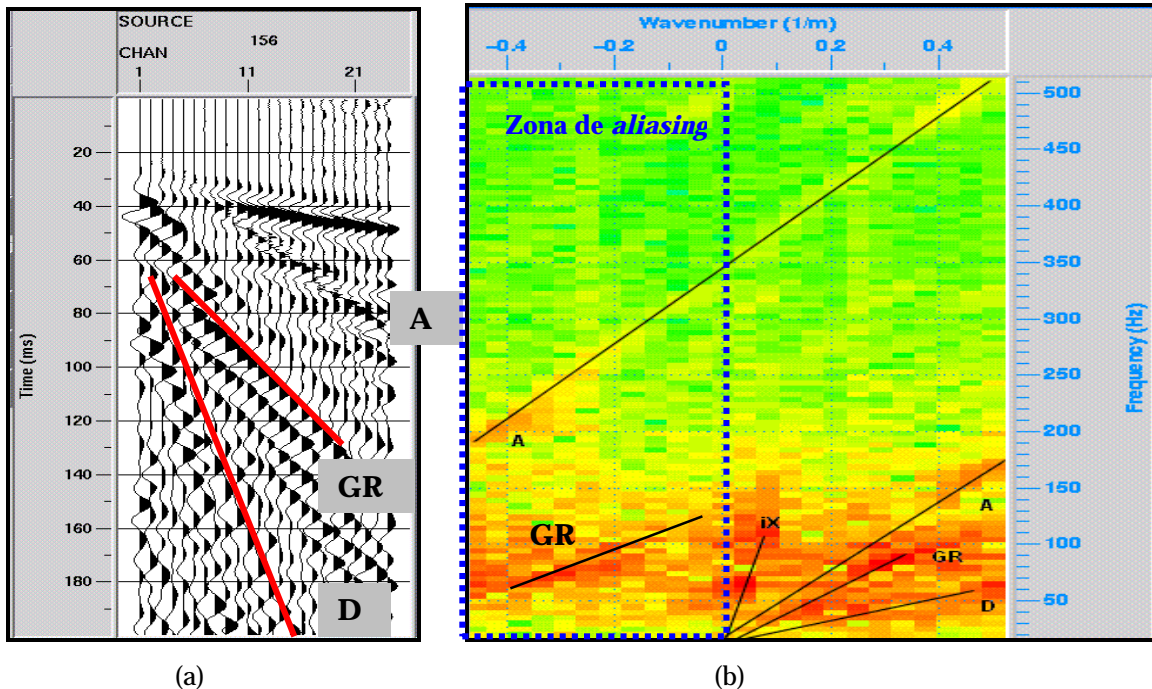


Figura V.7 Análisis de las frecuencias espaciales. (a) Registro de campo. (b) Espectro en el espacio F-K en donde se han marcado los eventos más significativos, según la nomenclatura: GR = *Ground roll*, A = Onda aérea, D = Onda directa. Nótese el *aliasing* de la onda aérea y del GR. (c).

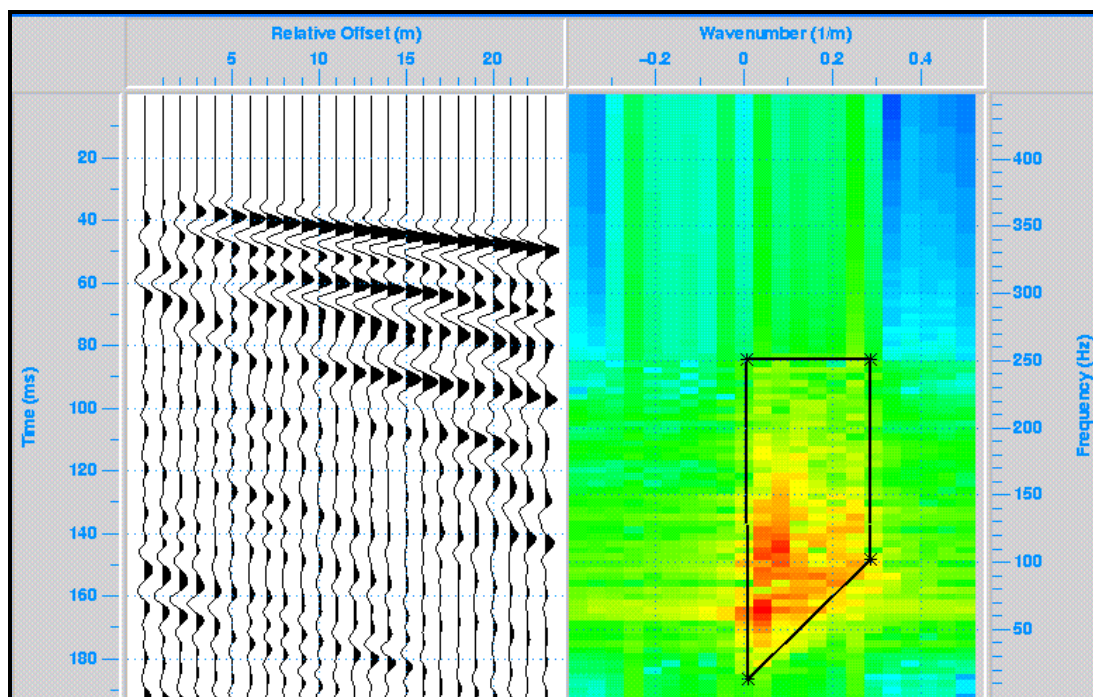


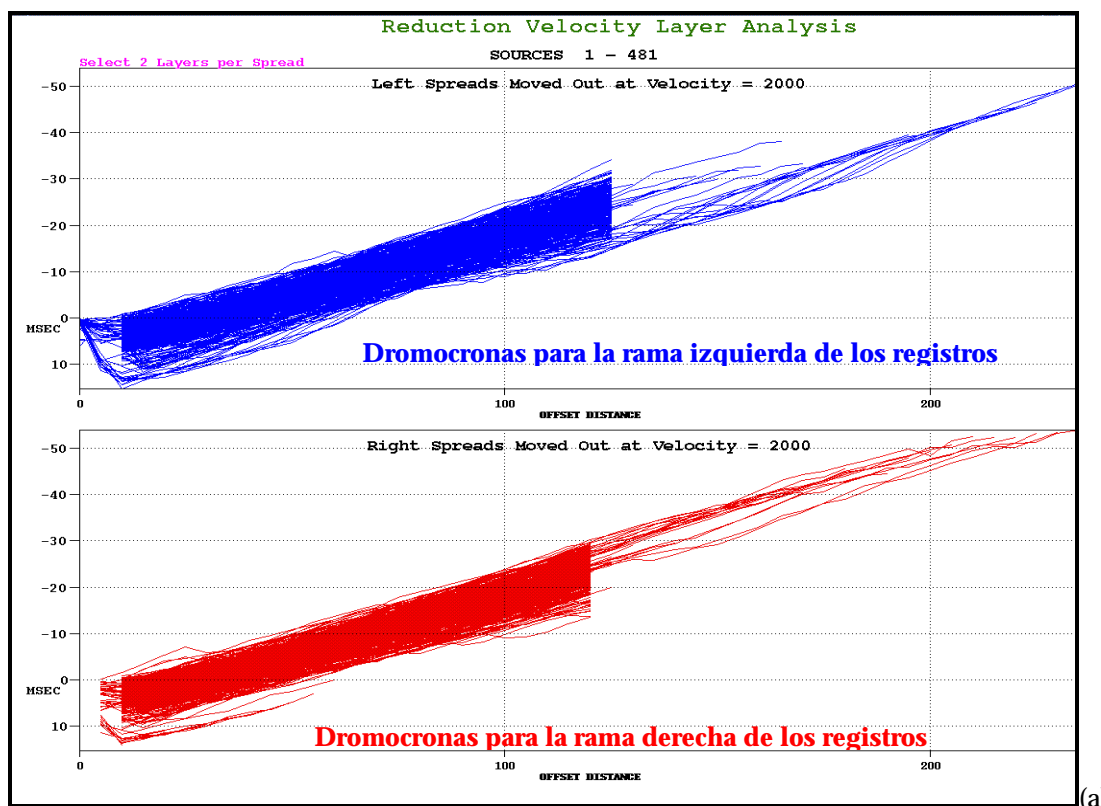
Figura V.8 Efecto sobre el registro después de filtrar por número de onda y frecuencia los eventos atribuidos a ruido (*GR*, *A* y *D*). El filtro que se ha aplicado es de tipo trapezoidal (trazo negro) y consiste en dejar pasar las frecuencias y números de onda contenidas dentro del trapecio

4. APLICACIÓN DE CORRECCIONES ESTÁTICAS

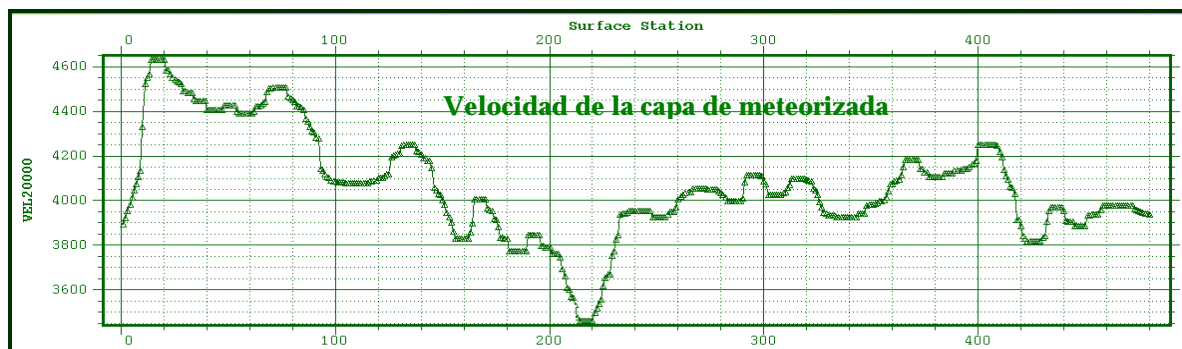
En sísmica superficial, las frecuencias generadas son mucho más elevadas que las observadas en sísmica profunda, por tanto el tiempo de viaje a través de la capa meteorizada puede cubrir varios ciclos del tren de ondas sísmico. Normalmente esta primera capa está caracterizada por ser altamente heterogénea, por poseer bajas velocidades y por presentar un relieve irregular. Estas características influyen en las trayectorias de los rayos de manera que se hace preciso corregirlas a fin de obtener el buen emplazamiento, en profundidad, de los reflectores de interés.

El principal objetivo es ajustar el tiempo de viaje, al que se observaría si la fuente y los receptores estuvieran ubicados al mismo nivel, sobre el plano de referencia (*datum*) por debajo de la capa meteorizada (generalmente constituida por rocas y materiales no consolidados, de forma que su espesor varía desde cero hasta unos cuantos metros). Hay dos formas de determinar el espesor y la velocidad de la capa meteorizada, midiendo directamente a través de un tiro de verificación (*check-shot*) o, lo más usual en sísmica superficial, calculándolos mediante refracciones estáticas: Los tiempos de primeras llegadas atribuidos a la capa meteorizada definen las curvas Distancia-Tiempo a partir de las cuales se calcula la profundidad y la velocidad de esta primera superficie. Una vez caracterizada esta superficie, se elige el nivel del

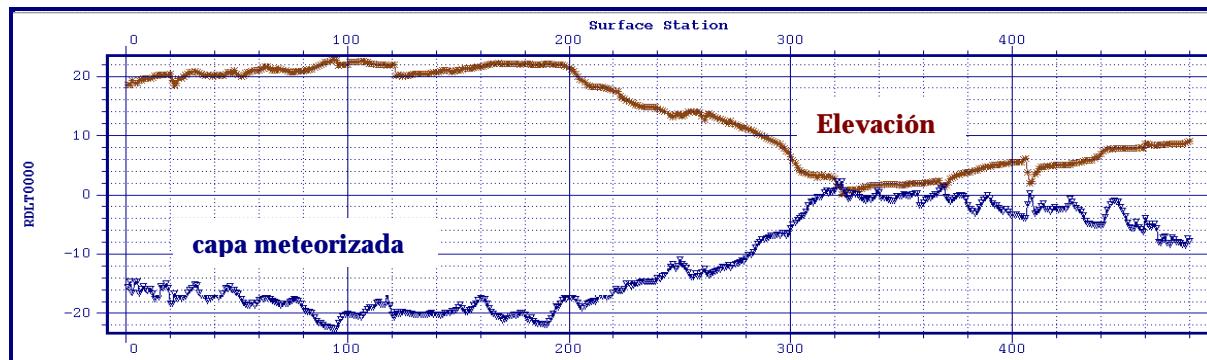
datum y se calculan los intervalos de tiempo que deben corregirse para cada rayo de la línea sísmica (figuras V.9 y V.10).



(a)



(b)



(c)

Figura V.9 Cálculo de las correcciones estáticas de refracción. (a) Curvas espacio-tiempo construidas para el perfil PS-1. (b) deducción de la velocidad para la capa meteorizada y (c) cálculo de la su profundidad.

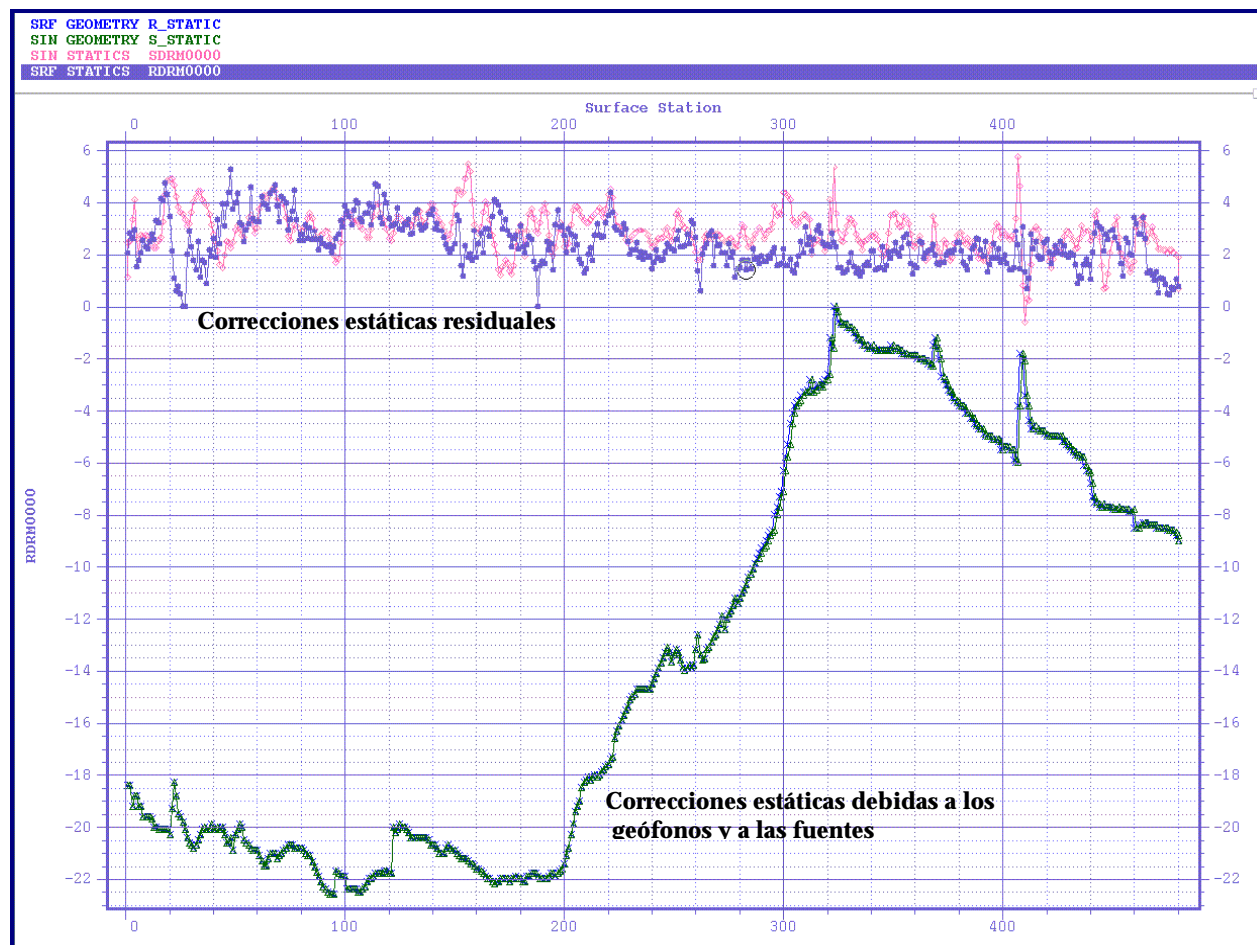


Figura V.10 Curvas de correcciones estáticas y residuales para las posiciones de las fuentes y los receptores. En el eje de las abscisas se hallan las posiciones de los geófonos en coordenadas de estación sensora y en el eje de las ordenadas los tiempos de corrección en ms. Estos tiempos son los que deben aplicarse a cada traza sísmica para corregir el efecto del tránsito de los rayos a través de la capa meteorizada. Nótese que hay dos contribuciones: una debida a la posición de la fuente (porción de rayo incidente) y otra debida a la posición del geófono (porción del rayo emergente). Conjunto de datos perteneciente al perfil PS-1.

5. CORRECCIONES DE AMPLITUD

La amplitud de los datos sísmicos varía dentro de un amplio rango debido al efecto que sobre ella tienen los coeficientes de reflexión y el decaimiento de la energía con la distancia (divergencia esférica); sin mencionar las posibles pérdidas en la transmisión de los datos o la atenuación intrínseca. Para compensar todos estos factores se aplican varios tipos de algoritmos, basados cada uno de ellos en criterios específicos. Entre ellos los más usados en sísmica superficial son:

Proceso	Descripción
Control de ganancia programada (<i>Programmed Gain Control, PGC</i>)	Es la corrección de amplitud más simple y consiste en asignar un valor predefinido a los datos. Se calcula el inverso de la envolvente de la traza (curva que une los picos de las trazas) de manera que al aplicar esta relación se corrige el decaimiento de la amplitud. Puede aplicarse tanto a los tiros como a las secciones apiladas, con el fin de preservar las variaciones relativas de amplitud en la dirección horizontal.
Control de ganancia automática (<i>Automatic Gain Control, AGC</i>)	El es una de las funciones de ganancias más utilizadas. Se obtiene calculando el valor medio (o promedio absoluto) de la amplitud dentro de una ventana específica de tiempo, luego se obtiene la relación entre el valor RMS deseado y el promedio antes calculado. Este escalar es asignado a la función de ganancia la cual se aplica a cada muestra o traza dentro de la ventana temporal elegida.
Corrección de amplitud por divergencia esférica (<i>True Amplitude Recovery, TAR</i>) (Figura V.10)	El objetivo de esta corrección es reconstruir las amplitudes debido a la absorción de los materiales y al decaimiento del frente de ondas con la distancia

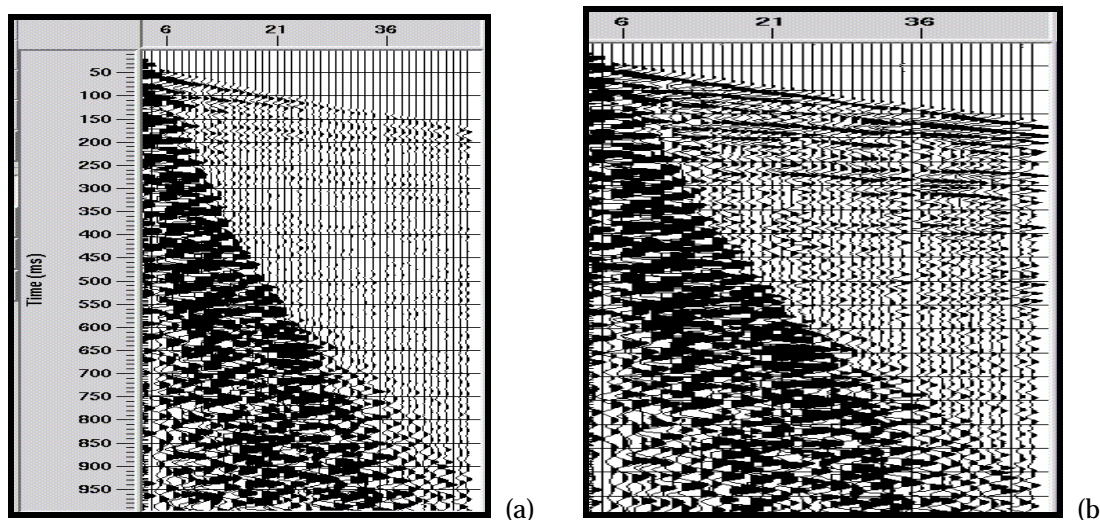


Figura V.11 Efecto sobre un registro de campo de la corrección de amplitud por pérdida energética debido a la expansión geométrica del frente de ondas y a los mecanismos de absorción a lo largo de la trayectoria. (a) Tiro de campo sin procesar. (b) El mismo tiro en donde se ha corregido por divergencia ($1/d$), nótese el aumento de amplitud de las bajas frecuencias.

6. DECONVOLUCIÓN

La deconvolución puede ser aplicada en las diferentes etapas del procesamiento, es un algoritmo que se utiliza con el fin de aumentar la resolución temporal de las reflexiones (Figura V.11). Ello se consigue invirtiendo una ondícula básica (*wavelet*) y convolucionándola con la cada traza (sismograma) [9], el resultado es una compresión de la señal. Existen varios tipos de ondículas sobre las cuales se opera; por ejemplo el tipo delta de Dirac (*spike*) que tiende a convertir los lóbulos de reflexión en picos.

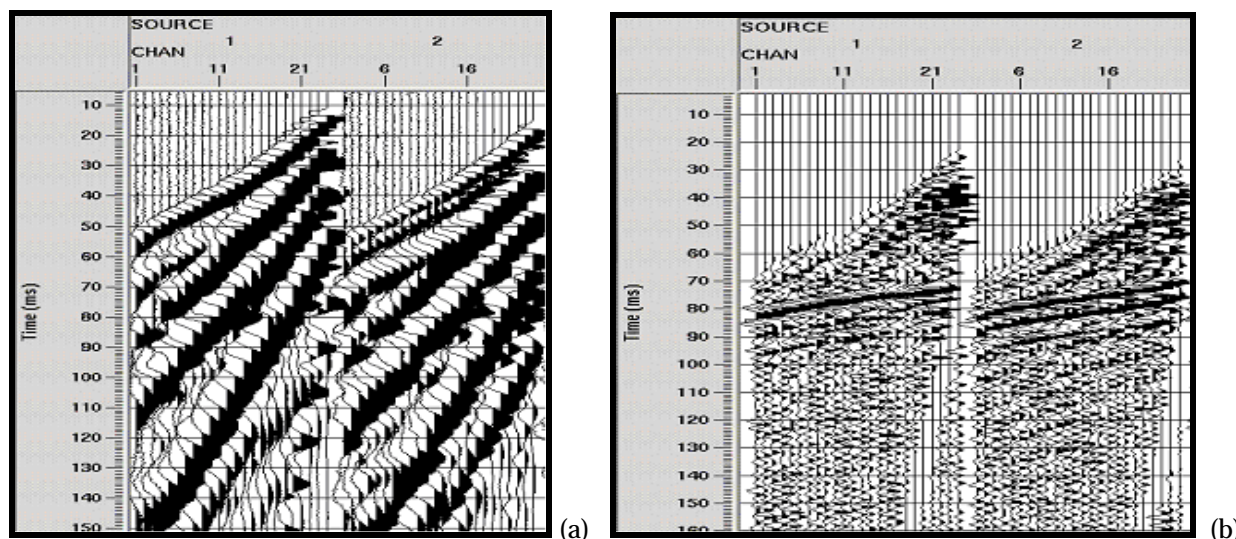


Figura V.12 (a) Registros de campo pertenecientes al glaciar Johnsons (Artártida) (b) Los mismos registros después del borrado de las refracciones, de la aplicación de un balance de amplitud y de una deconvolución seguida de un filtro pasa-banda [13].

TRATAMIENTOS DE APILAMIENTO

7. ORDENAMIENTO CMP

Una vez editados los tiros de campos, se procede a realizar un reordenamiento de las trazas sísmicas en conjuntos de punto reflector común o CMP (*Common MidPoint*). Este ordenamiento consiste en agrupar las trazas que por geometría pertenecen a un mismo punto medio entre una fuente y un receptor determinado. Se deduce, por construcción, que el espaciado entre CMP es la mitad el espaciado entre geófonos y que las reflexiones en estos conjuntos poseen también trayectorias hiperbólicas.

8. APLICACIÓN DE CORRECCIONES DINÁMICAS (NMO)

En este nuevo orden, todas las trazas pertenecientes a un mismo punto reflector dan cuenta de las mismas características reflectivas y por tanto, pueden sumarse para obtener una traza resultante (traza CMP) que posee mejor relación señal/ruido. Tal es el objeto de la ordenación en conjuntos CMP. Pero para ello, antes del apilamiento (o suma de las trazas CMP) la trayectoria hiperbólica de los eventos de reflexión debe ser transformada, en el eje del tiempo, en una línea horizontal (paso a *offset* cero) de manera que todas las trazas al ser sumadas estarán en fase. A este paso se le conoce como corrección NMO (*Normal Move Out*) y la forma de conseguir dicha alineación es mediante la asignación de la velocidad de la trayectoria de reflexión (Figura V.12-a).

9. ANÁLISIS DE VELOCIDAD

En función de proveer una relación señal/ruido mejorada, la sísmica de cobertura multicanal requiere información acertada sobre la velocidad del subsuelo, la cual es obtenida mediante un análisis de velocidad. Este proceso se realiza sobre conjuntos o grupos de conjuntos de CMP determinados. El resultado del análisis es un campo de velocidades que se usará en el apilamiento para obtener la sección sísmica. Cuando hay poca precisión en el establecimiento de las velocidades de reflexión, la calidad de la sección apilada puede degradarse, ya que las reflexiones no se suman coherentemente [4].

10. APILAMIENTO

Con los resultados del análisis de velocidad y una vez aplicadas las correcciones NMO se procede, mediante la suma, a obtener la sección sísmica. Así pues, una sección sísmica está formada por todas las trazas CMP y representa una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo en de *offset* cero y modo tiempo doble. Esta sección obtenida aún no es la definitiva, si no que aún deben realizarse determinados tratamientos cuyo número de aplicación, al igual que ocurre con la edición de los tiros, depende en última instancia de la calidad de los datos.

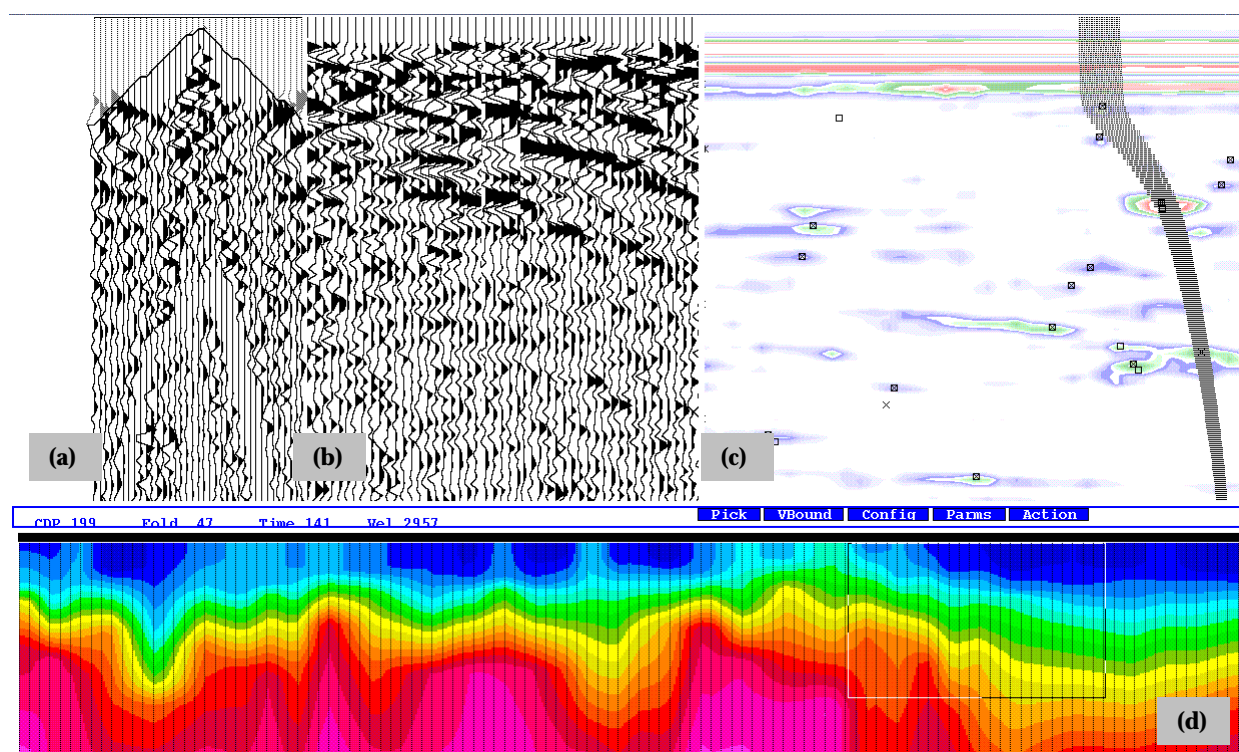


Figura V.13 Ejemplo de análisis de velocidad (cuenca evaporítica de Cardona [5]). (a) Conjunto CMP sobre el que se está realizando las correcciones NMO a partir de la ley de velocidades descrita en (c). (b) Sección apilada con el campo de velocidades (d). En (c) los puntos de máxima semejanza son los guías sobre los que se hace la corrección NMO que finalmente va a dar como resultado el campo de velocidades.

TRATAMIENTOS DE POST-APILAMIENTO

11. PROCESAMIENTO POST-APILAMIENTO

Por lo general, una secuencia de procesamiento post-apilamiento incluye la deconvolución para recuperar las altas frecuencias perdidas durante el apilamiento y para suprimir las reverberaciones y múltiples de periodo corto. También suele aplicarse un filtro pasa banda para eliminar el ruido asociado a bajas y altas frecuencias generado (y/o residual) en el apilamiento. Finalmente, suele introducirse algún tipo de ganancia de amplitud a fin de lograr una mejor visualización. En el capítulo siguiente (VI) se muestran los diferentes flujos de procesados aplicados a cada sección sísmica y los resultados obtenidos.

12. MIGRACIÓN

Es un proceso que se aplica para corregir las difracciones que se producen en una sección sísmica debido a un relieve brusco de algún reflector. Su objetivo es, pues, reubicar esta energía a su verdadera posición y ello se realiza provocando el colapso de estas difracciones actuando en sentido opuesto.

Entre los principales algoritmos se encuentran la **migración de Kirchhoff [7]**, se basa en la solución integral de la ecuación de onda. La respuesta a un punto de difracción es una hipérbola definida por una determinada velocidad y por tanto la suma sobre su inversa coloca en fase a la difracción. La **migración de Stolt [7]** transforma los datos a un pseudo-dominio de profundidad para aproximar a una velocidad constante de la tierra, luego reubica la energía en el dominio de la frecuencia-numero de onda filtrando la velocidad de conversión. Posteriormente los datos son convertidos de nuevo al dominio del tiempo.

En la presente memoria se ha utilizado la migración en los perfiles PS-2 y PS-3, en el siguiente capítulo (VI) se presentan los resultados y una valoración de su aplicación.

13. CONVERSIÓN A PROFUNDIDAD

Las secciones sísmicas están en tiempo doble debido a que cada rayo reflejado ha hecho el viaje de ida (incidencia) y vuelta (reflexión). El punto final del procesado es proporcionar una referencia a profundidad de estas imágenes sísmicas. A los geólogos que están acostumbrados a trabajar con secciones sísmicas les es fácil pasar mentalmente del tiempo doble en donde se detecta un reflector, a la profundidad aproximada que le tocaría (profundidad equivalente). Para ello se elige algunos de los reflectores más potentes de la sección (reflectores guías) y se les calcula la profundidad de forma individual, considerando las velocidades de apilamiento.

En sísmica superficial suele realizarse una conversión a profundidad de la totalidad de la sección si en el subsuelo investigado no hay un contraste fuerte entre las velocidades de los materiales (figuras III.8 y III.9). Para ello se aplica una conversión con velocidad constante a fin de que no se distorsionen las frecuencias; obteniéndose una imagen en profundidad bastante aproximada [14]. Pero cuando existe un contraste fuerte esta estrategia ya no es posible y las técnicas que se proponen para obtener referencias de profundidad deben basarse en la información de sondeos mecánicos y/o en el campo de velocidades de refracción. En el próximo capítulo (VI) se muestran las estrategias utilizadas para convertir las secciones sísmicas a profundidad.