

DECONVOLUCION MULTICANAL DE LA TRAZA SISMICA
MEDIANTE UN METODO DETERMINISTA

Danilo R. Velis y Alberto H. Comínguez
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP
La Plata, Argentina

RESUMEN

Se presenta un procedimiento determinista multicanal para la deconvolución de la traza sísmica. No se requieren premisas especulativas acerca de las características de fase de la ondícula, tampoco de propiedades estadísticas de la serie de coeficientes de reflexión. El Sistema utiliza como información adicional la velocidad de *stacking* para vincular mediante la corrección dinámica dos trazas sísmicas correspondientes a un mismo CDP (punto de reflejo común) u optativamente a un mismo SHP (punto de tiro), cuyas distancias fuente-receptor son conocidas. Esta vinculación produce una compresión de los pulsos de la serie reflectora en un esquema iterativo (Comínguez, 1983). Problemas de *aliasing*¹ son resueltos mediante la utilización de filtros óptimos de Remez. El Sistema es aplicado a un CDP sintético obteniéndose excelentes estimadores, tanto para la ondícula sísmica como para la serie de coeficientes de reflexión.

ABSTRACT

A multi-channel deterministic procedure for seismic deconvolution is presented. Neither speculations about the wavelet phase character nor statistical properties of the reflectivity series are needed. The stacking velocity function is used as a critical information for matching two traces of the same CDP or shot point. This is carried out by dynamic correction, with the additional knowledge of source-receiver distances. The iterative scheme leads to a pulse compression of the reflector series estimate (Comínguez, 1983). Aliasing problems are solved by using optimum Remez filters. The System is applied to a numerical multi-channel seismogram. Quite good estimators are obtained for both seismic wavelet and reflectivity function.

¹ Por *aliasing* se entiende: *superposición del espectro periódico de una señal muestreada con una frecuencia de muestreo insuficiente (inferior a dos veces la frecuencia máxima de la señal).*

INTRODUCCION

De acuerdo con un esquema de linealidad, la traza sísmica puede representarse mediante la convolución de una ondícula o fuente $A(t)$ con la respuesta impulsiva $R(t)$ (serie reflectora) del subsuelo, esto es:

$$S(t) = R(t) * A(t) \quad (1)$$

El registro $S(t)$ es una superposición de ondículas cuya simple visualización por parte del intérprete geofísico no permite inferir mucho acerca de la estructura del subsuelo. El objetivo de la deconvolución sísmica es aumentar la resolución de la traza de manera que $R(t)$ pueda ser distinguida. Esto se logra recobrando, a partir de (1), $A(t)$ y/o $R(t)$.

Claramente, es necesario contar con alguna información adicional para reducir la ambigüedad del problema (la expresión (1) representa una ecuación con dos incógnitas). Para ello, algunos métodos clásicos de deconvolución asumen como válidas ciertas características acerca de la naturaleza de estas funciones. En particular, consideran a $R(t)$ como una serie aleatoria de picos aislados (semejante a ruido blanco), de tal forma que la autocorrelación de la traza puede ser utilizada como una estimación de la autocorrelación de la ondícula, una función mucho más suave cuando se la compara con $R(t)$. Asumen además que la ondícula es de fase mínima. Los métodos más usados que parten de estas hipótesis son la "deconvolución de pico" (*spiking deconvolution*) desarrollada por Robinson y Treitel (1967), y la "deconvolución predictiva" (*prediction deconvolution*) descrita por Peacock y Treitel (1969). Estos algoritmos no obtienen resultados totalmente satisfactorios cuando las hipótesis asumidas no se ajustan a la realidad.

Las técnicas de "deconvolución homomórfica" (Tribolet, 1979; Ulrych, 1971) imponen menos exigencias sobre la ondícula y la serie reflectora. El sistema pasa del dominio temporal al dominio Cepstral, en el cual la ondícula ("suave") y la serie reflectora (aleatoria) son separables con un simple operador pasabajos. Extraídas las ondículas a partir de diferentes intervalos temporales de las trazas, se obtiene la ondícula final sincronizando y promediando las estimaciones individuales (Sacchi y Comínguez, 1991). Sin embargo, cuando la relación señal-ruido es pobre, el Sistema no arroja resultados confiables.

La "deconvolución por mínima entropía" (MED), desarrollada por Wiggins (1978), realiza la deconvolución mediante la aplicación de un operador lineal que maximiza el carácter de "sucesión de picos" (norma varimax) del estimador de la serie reflectora. El método funciona muy bien aun para relaciones señal-ruido bajas, independientemente de la fase de la ondícula. No obstante, es sensible a la densidad de sucesión de picos, y obtiene los mejores resultados cuando los picos son aislados y de amplitud importante.

Las mencionadas, son técnicas con premisas subjetivas donde es necesario suponer ciertas propiedades, menos o más restrictivas según el caso, acerca de las funciones $A(t)$ y $R(t)$. Como contraparte, en este trabajo se presenta un modelo determinista de deconvolución en el que no se requieren en absoluto hipótesis sobre propiedades de $A(t)$ y/o $R(t)$. A partir de un par de trazas correspondientes a un mismo CDP (o bien a un SHP), vinculadas funcionalmente por la ley de velocidades (velocidad de *stacking*) y sus respectivos *offsets* (distancia fuente-receptor), será posible extraer la ondícula

cula y la serie reflectora sin realizar especulaciones de ningún tipo.

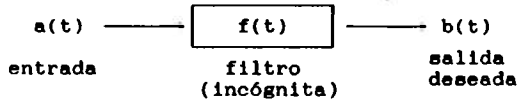
El procedimiento permite también desarrollar un Sistema multicanal tendiente a obtener un mejor estimador a partir de la sincronización y suma pesada de las estimaciones individuales. Esto es particularmente útil cuando el modelo de trazas utilizado está afectado de ruido.

DESCRIPCION DEL SISTEMA

La Figura 1 muestra un diagrama en bloques donde se destacan los pasos fundamentales del funcionamiento del Sistema de deconvolución.

Paso 1. En el primer paso se cuenta con dos trazas, $S_x(t)$ y $S_y(t)$, elegidas de un mismo gather¹, con respectivos offsets X e Y ($X < Y$). Se cuenta además con la ley de velocidades y con una estimación inicial $\hat{A}(t)$ de la ondícula, definida en una ventana temporal simétrica.

Paso 2. Este paso representa un filtro Wiener (*least-square shaping filter*) en el dominio temporal (Robinson y Treitel, 1967):

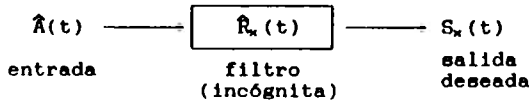


El diseño del operador lineal $f(t)$ que por el criterio de ajuste de mínimos cuadrados transforme $a(t)$ en $b(t)$, conduce a resolver la siguiente ecuación matricial:

$$\Phi_{aa} \cdot f = \Phi_{ba} \tag{2}$$

donde el primer factor es la matriz formada por los elementos de la autocorrelación de $a(t)$ (matriz de Toeplitz), y el segundo miembro es la correlación cruzada de $b(t)$ con $a(t)$.

En el caso particular del paso 2, el operador es el estimador $\hat{R}_x(t)$ de la serie reflectora correspondiente al offset X; mientras que la entrada y la salida deseada son la ondícula estimada $\hat{A}(t)$ y la traza sísmica $S_x(t)$ respectivamente, o sea:

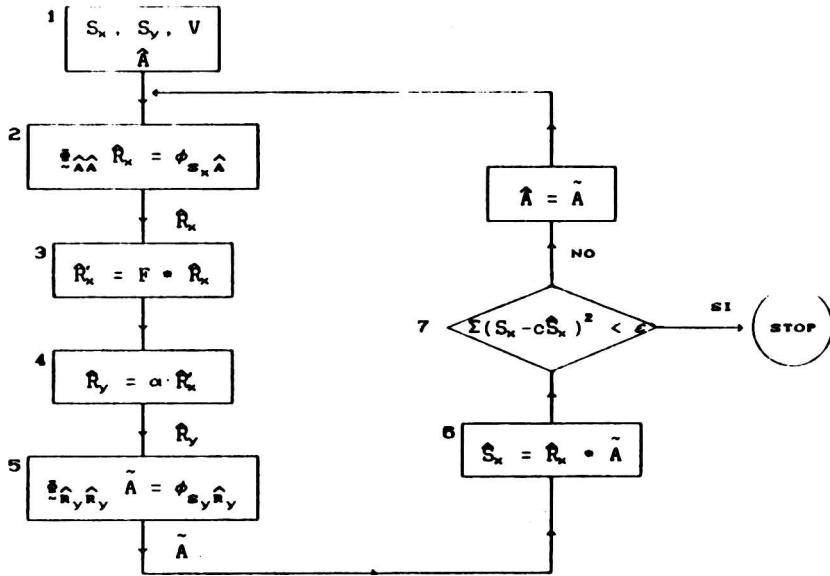


resultando la ecuación matricial de la Figura 1.

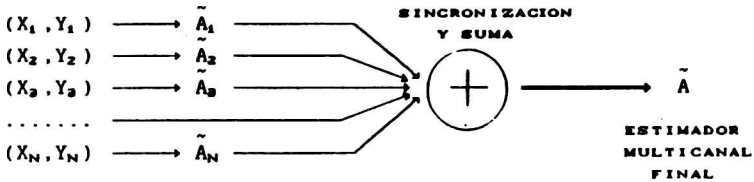
Pasos 3 y 4. Los pasos 3 y 4 son claves. Mediante la corrección dinámica α se pasa del estimador de la serie para offset X, $\hat{R}_x(t)$; al

¹ Por gather se entiende: grupo multicanal de trazas sísmicas correspondientes a un mismo CDP (punto de reflejo común).

74 Deconvolución multicanal



(a)



(b)

Figura 1. (a) Diagrama en bloques del Sistema de deconvolución propuesto. Se destacan los pasos fundamentales seguidos en el proceso. (b) Obtención del estimador multicanal mediante la sincronización y suma de los estimadores para cada par de offsets.

estimador de la serie para offset Y, $\hat{R}_y(t)$. La transformación queda determinada por la conocida expresión:

$$T_y = \sqrt{T_x^2 + (Y^2 - X^2)/V_x^2} \quad (3)$$

Diferenciando T_y con respecto a T_x , resulta:

$$dT_y = \frac{1}{\sqrt{1 + (Y^2 - X^2)/V_x^2 T_x^2}} dT_x \quad (4)$$

Puesto que $Y > X$, $dT_y < dT_x$, por lo tanto la transformación (3) produce una compresión de los eventos al pasar de X a Y. Además de la compresión, existe un corrimiento. En la Figura 2 se pueden apreciar los efectos de compresión y corrimiento introducidos por la transformación sobre una serie de impulsos.

Esta compresión equivale a disminuir el intervalo entre eventos sucesivos en la proporción señalada por la expresión (4), lo que es equivalente a una decimación en tiempo. En el dominio de las frecuencias en cambio, se produce un ensanchamiento de la banda al pasar de $\hat{R}_x(t)$ a $\hat{R}_y(t)$. Puesto que el Sistema es iterativo, al cabo de varias iteraciones la compresión introducida por el paso 4 acaba

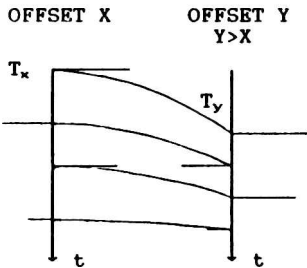
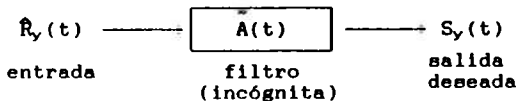


Figura 2. Efecto de compresión y corrimiento de la corrección dinámica α al pasar de un offset X a un offset mayor Y (paso 4).

por ensanchar la banda de $\hat{R}_x(t)$ más allá de la frecuencia permitida por el Teorema de muestreo (frecuencia de Nyquist), produciéndose el consiguiente efecto de *aliasing*. Para evitar este inconveniente que podría afectar la convergencia del Sistema, previo a la compresión se aplica un filtro pasabajos a la serie $\hat{R}_x(t)$, con una frecuencia de corte tal que la compresión siguiente ensanche su banda justo hasta la frecuencia de Nyquist (paso 3). El filtro utilizado ha de producir muy poca distorsión y debe contar con una banda de transición muy abrupta, con el fin de afectar mínimamente la convergencia del Sistema. Un filtro no muy riguroso, al cabo de varias iteraciones produciría fuertes distorsiones y deformaciones de la serie impidiendo la convergencia a una solución satisfactoria. Por ello se debió recurrir a los filtros óptimos Minimax de Remez (Rabiner y Gold, 1975; Velis y Comínguez, 1989) capaces de cumplir con todos los requerimientos con el mayor grado de rigurosidad posible. Este punto será aclarado más adelante con algunos ejemplos sintéticos.

al cabo de varias iteraciones produciría fuertes distorsiones y deformaciones de la serie impidiendo la convergencia a una solución satisfactoria. Por ello se debió recurrir a los filtros óptimos Minimax de Remez (Rabiner y Gold, 1975; Velis y Comínguez, 1989) capaces de cumplir con todos los requerimientos con el mayor grado de rigurosidad posible. Este punto será aclarado más adelante con algunos ejemplos sintéticos.

Paso 5. Esta etapa representa, análogamente al paso 2, un filtro de Wiener en el dominio temporal. Ahora el operador lo constituye un nuevo estimador de la ondícula $A(t)$. La entrada y la salida deseada son en este caso, el estimador $\hat{R}_y(t)$ (obtenido de los pasos 3 y 4) y la traza correspondiente al offset mayor $S_y(t)$, o sea:



Paso 6. Hallado el nuevo estimador $A(t)$, se lo convoluciona con el estimador de la serie reflectora $\hat{R}_x(t)$ para obtener, a la vez, un estimador de la traza sísmica $\hat{S}_x(t)$.

Paso 7. $\hat{S}_x(t)$ es comparada con la traza sísmica verdadera $S_x(t)$. Si la suma de los cuadrados de los errores temporales entre ellas es menor que cierto umbral ϵ , entonces la solución ha sido encontrada

satisfactoria: $\hat{A}(t)$ y $\hat{R}_n(t)$ pueden considerarse buenos estimadores de la ondícula y de la serie reflectora respectivamente. Si el umbral no ha sido alcanzado, se toma $A(t)$ como una nueva estimación inicial para volver al paso 2 y comenzar la siguiente iteración.

MODELO SINTETICO

El modelo utilizado para la deconvolución consiste en un CDP sintético de 12 trazas (Figura 3) generado a partir del esquema de la Figura 4a. Utilizando la expresión (3) fueron calculadas las series reflectoras correspondientes a los offsets 1000, 1100, ... y 2000 m a partir de la serie correspondiente al offset 300 m. El intervalo de muestreo fue de 4 msec, resultando una frecuencia de Nyquist de 125 Hz. La ley de velocidades utilizada fue definida para el intervalo 400-600 msec (Figura 4b). Tanto las velocidades como los offsets fueron elegidos para dar un efecto de corrección dinámica real, a lo largo del gather. Finalmente, las series fueron convolucionadas con una ondícula de Ricker de 25 muestras, o una longitud temporal de 0.1 seg.

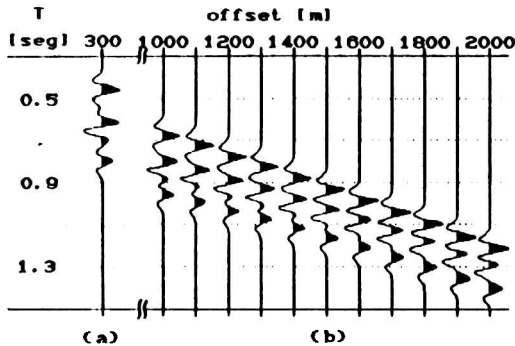


Figura 3. CDP sintético utilizado en la deconvolución. (a) Trazas de offset 300 m. (b) Trazas de offset 1000 a 2000 m.

25 muestras, o una longitud temporal de 0.1 seg.

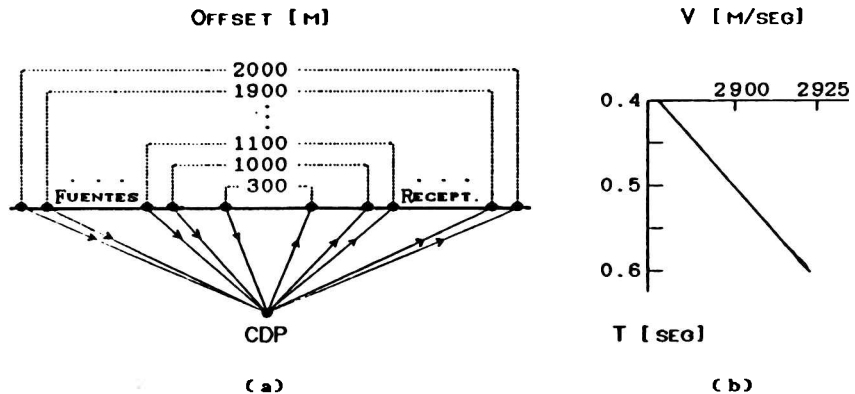


Figura 4. (a) Esquema de diseño del CDP sintético. (b) Ley de velocidades utilizada en el modelo (velocidad de stacking).

RESULTADOS

Experimento 1: Deconvolución multicanal.

El sistema de la Figura 1 fue aplicado a cada uno de los pares de trazas de offsets (X, Y_i) . En todos los casos se tomó como estimación inicial de la ondícula un impulso unitario ubicado en el centro de la ventana de diseño de la misma, cuya longitud fue fijada en 31 muestras.

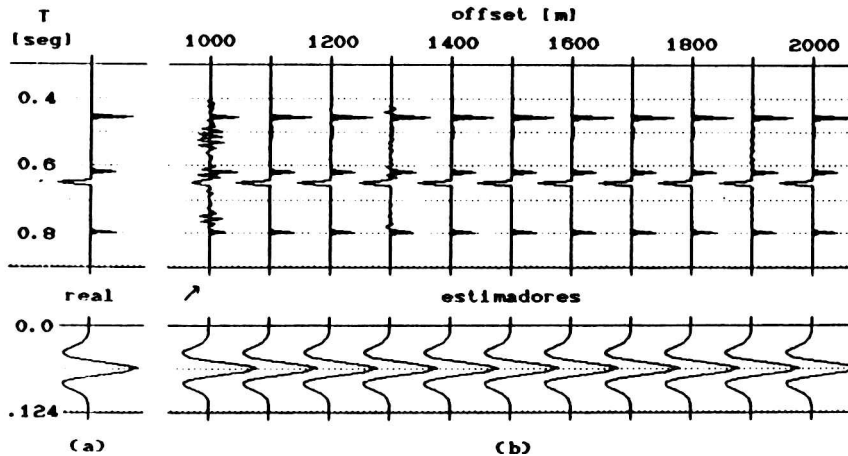


Figura 5. (a) Serie reflectora real (offset $X=300$ m) y ondícula de Ricker utilizadas para generar el CDP sintético. (b) Estimadores de la serie reflectora y de la ondícula obtenidos mediante la aplicación del Sistema de deconvolución propuesto, para los pares de offset (X, Y_i) , $Y_i=1000, 1100, \dots, 2000$ m.

La Figura 5a muestra la serie reflectora real ($X=300$ m) y la ondícula de Ricker utilizadas en el diseño del modelo. En la parte (b) de la misma figura se muestran las salidas del Sistema: el estimador de la serie reflectora y el estimador de la ondícula para cada canal. La aplicación del filtro de Remez del paso 3 fue omitida en este primer experimento. El Sistema iterativo fue detenido cuando el error definido en el paso 7 alcanzó un umbral de $\epsilon=0.0001$ o bien al llegarse a un máximo de 150 iteraciones. La Tabla 1 muestra el número de iteraciones necesarias para obtener cada estimador, así como el valor del error. Para su evaluación, las trazas $S_x(t)$ y $\hat{S}_x(t)$ fueron normalizadas en energía de modo que $0 < \epsilon < 1$. En particular, sólo para $Y=1000$ m se realizaron las 150 iteraciones prefijadas, sin alcanzarse el umbral de error. La mejor estimación para ese caso se obtuvo para la iteración 25. En todos los otros casos entre 21 y 37 iteraciones fueron suficientes para cumplirse $\epsilon < 0.0001$.

Se puede observar que se han obtenido excelentes estimadores para los canales con $Y=1100$ a 2000 m. Sin embargo, para $Y=1000$ m no se obtuvieron resultados tan precisos. En este caso la convergencia del Sistema se vio afectada por el efecto de *aliasing* discutido anteriormente, originado en la compresión del estimador $\hat{R}_x(t)$. Si f_N es la frecuencia de Nyquist correspondiente al estimador $\hat{R}_x(t)$, la

78 Deconvolución multicanal ...

máxima frecuencia permitida en $\hat{R}_x(t)$ para que luego de la compresión no exista *aliasing* puede ser aproximada por la fórmula:

$$f_{\text{máx}} = \frac{dT_v}{dT_x} f_N \quad (5)$$

donde dT_v/dT_x fue dado por la expresión (4).

Tabla 1. Número de iteraciones y error correspondiente de cada estimación para los offsets indicados.

offset	iterac.	error	offset	iterac.	error
1000	25	0.00145	1600	21	0.00008
1100	29	0.00008	1700	21	0.00007
1200	29	0.00009	1800	21	0.00009
1300	26	0.00009	1900	23	0.00006
1400	28	0.00008	2000	37	0.00003
1500	21	0.00009			

Experimento 2: Eliminación del aliasing mediante el filtro Remez

En este experimento, los estimadores correspondientes al $Y=1000$ m fueron recalculados aplicándose ahora un filtro pasabajos de Remez, cuya frecuencia de corte se determinó mediante la ecuación (5) y resultó ser igual a 100 Hz.

La Figura 6 muestra los nuevos estimadores obtenidos en comparación con los estimadores obtenidos sin la aplicación del filtro de Remez. Estas nuevas estimaciones fueron alcanzadas mediante 2 etapas de proceso. La primera consistió en aplicar el Sistema con el filtro de Remez presente en todas las iteraciones. La mejor estimación se muestra en la parte (c) de la Figura 6. En la segunda etapa ya no fue necesaria la aplicación del filtro. En este caso se tomó como estimación inicial al estimador final obtenido en la primera etapa, alcanzándose los estimadores que se muestran en la parte (d) de la misma figura. La razón de este procedimiento es la siguiente: cuando el estimador es "suficientemente bueno" (Figura 6c) prácticamente no hay aliasing, y el Sistema se vuelve estable. La aplicación del filtro de Remez si bien favorece la convergencia cuando aún no se tiene un estimador "suficientemente bueno", introduce errores (aunque pequeños, pero iteración tras iteración) que no permiten alcanzar la solución exactamente.

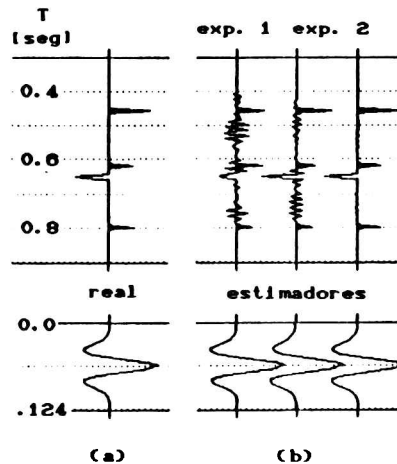


Figura 6. (a) Serie reflectora y ondícula reales. (b) Estimadores del experimento 1, offset (300,1000), (SIN filtro Remez) (c) Estimadores del experimento 2-1a etapa: CON filtro Remez. (d) Estimadores del experimento 2-2a etapa: SIN filtro.

El efecto del filtro de Remez se manifiesta estudiando las curvas de convergencia que se muestran en la Figura 7. Cuando el filtro no es aplicado, el Sistema es muy inestable y al cabo de 150 iteraciones no se obtienen estimadores satisfactorios. La Tabla 2 resume los valores del error y número de iteraciones para este caso. El umbral ϵ preestablecido de 0.0001 es superado al cabo de unas pocas iteraciones cuando el filtro dejó de aplicarse en la segunda etapa de este experimento.

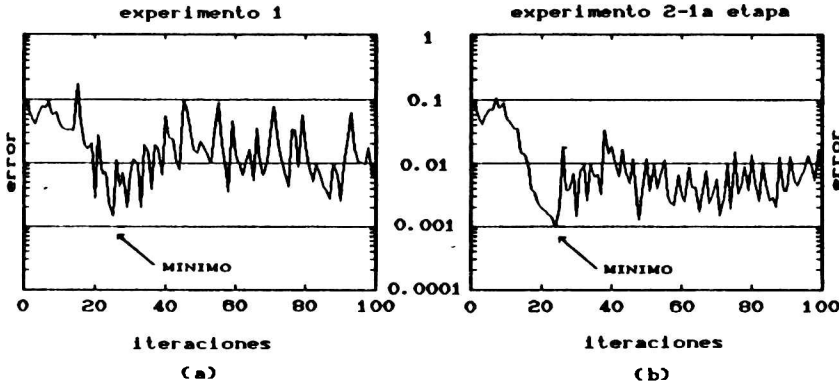


Figura 7. Curvas de convergencia para las primeras 100 iteraciones del error definido en el paso 7 del Sistema, correspondiente al par de offsets (300,1000). (a) Para el experimento 1: SIN filtro Remez. (b) Para el experimento 2-1a etapa: CON filtro Remez.

Tabla 2. Número de iteraciones y error para las estimaciones correspondientes al offset 1000 m, para cada experimento.

		iterac.	error
experimento 1:	sin filtro	25	0.00145
experimento 2:	con filtro (1a etapa)	24	0.00098
	sin filtro (2a etapa)	15	0.00008

La Figura 8 muestra los espectros de amplitud de la serie reflectora real y de los respectivos estimadores para $Y=1000$ m. Comparando los espectros de la serie real y del estimador para el primer experimento, se aprecia claramente que las mayores diferencias se encuentran en la banda próxima a la frecuencia de Nyquist, resultando un estimador pobre. Si bien el *aliasing* no ha sido totalmente eliminado según se desprende al observar el espectro (c), la similitud de éste con el de la serie real es mayor. Por último, el espectro del estimador final (Figura 8d) es prácticamente igual al real. Los espectros de amplitud de la ondícula real y de los estimadores respectivos se muestran en la Figura 8e-h, a título ilustrativo. En todos los casos se observa una buena concordancia entre las funciones espectrales.

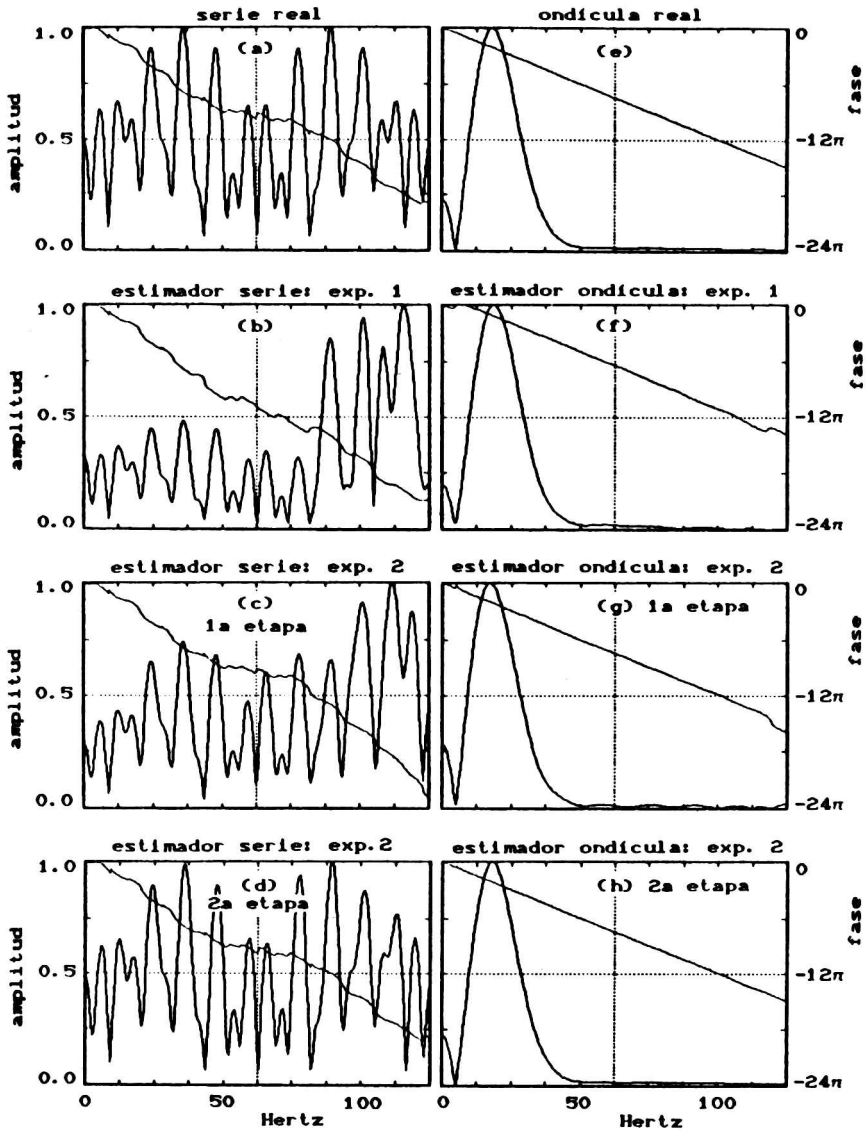


Figura 8. Espectros de amplitud y fase para las series reflectoras (columna izquierda) y las ondículas (columna derecha). (a) y (e) Serie y ondícula real. (b) y (f) Estimadores respectivos SIN filtro Remez (experimento 1). (c) y (g) Estimadores respectivos CON filtro (experimento 2-1a etapa). (d) y (g) Estimadores respectivos SIN filtro (experimento 2-2a etapa).

CONCLUSIONES

Tanto la ondícula como la serie reflectora pueden ser estimadas iterativamente mediante el Sistema determinista de la Figura 1. No es necesario hacer ningún tipo de especulaciones sobre las características de fase de la ondícula ni acerca de las propiedades estadísticas de la serie reflectora. La idea sobresaliente reside en aprovechar la información adicional provista por la ley de velocidades (velocidad de *stacking*), cuya determinación hoy en día es muy precisa en la mayoría de los estudios geofísicos.

El Sistema mostró que puede dar estimadores consistentes en casi todas las pruebas numéricas realizadas. El efecto de *aliasing* originado por la compresión del paso 4 ha sido prácticamente eliminado para el par de offsets que presentaba una fuerte inestabilidad. Fue necesario aplicar un filtro pasabajos muy riguroso (filtro de Remez) para minimizar la propagación de errores debido al filtrado.

Cabe destacar que en este trabajo se ha considerado un modelo totalmente elástico. En próximos trabajos los autores se abocarán a incluir en el modelo consideraciones de inelasticidad, así como la aplicación del Sistema a datos reales.

La velocidad de *stacking* constituye una función de análisis muy importante en el procesamiento de la información sísmica. En futuros trabajos será sensibilizada la robustez del Sistema ante errores en la estimación de esta función, y del mismo modo se verá si el monitoreo de los resultados permite detectar y erradicar dichos errores.

BIBLIOGRAFIA

- Comínguez, A. H., 1983, Estimation of the seismic wavelet using a multi-channel procedure: Phd. Thesis, University of Houston.
- Peacock, K. L. y Treitel, S., 1969, Predictive deconvolution; theory and practice: *Geophysics*, 34, p.155-169.
- Rabiner, L. R. y Gold, B., 1975, Theory and Application of Digital Signal Processing: Prentice-Hall, Inc., Nueva Jersey.
- Robinson, E. A. y Treitel, S., 1967, Principles of digital Wiener filtering: *Geophysical Prospecting*, 15, p.311-333.
- Sacchi, M. D. y Comínguez, A. H., 1990, Una estrategia para extraer la ondícula sísmica basada en la transformación homomórfica logarítmica: *Geoacta*, 17, n.2, p.91-102.
- Tribolet, J. M., 1979, Seismic Applications of Homomorphic Signal Processing: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Ulrych, T. J., 1971, Application of homomorphic deconvolution to seismology: *Geophysics*, 39, p.650-660.
- Velis, D. R. y Comínguez, A. H., 1989, Diseño de filtros digitales de respuesta impulsiva finita y fase lineal mediante una aproximación de Chebychev óptima: *Geoacta*, 16, n.2, p.245-259.
- Wiggins, R. A., 1978, Minimum entropy deconvolution: *Geophys. Res. Lett.*, v.16, p.21-35.