



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Esta tesis doctoral contiene un índice que enlaza a cada uno de los capítulos de la misma.

Existen asimismo botones de retorno al índice al principio y final de cada uno de los capítulos.

[Ir directamente al índice](#)

Para una correcta visualización del texto es necesaria la versión de [Adobe Acrobat Reader 7.0](#) o posteriores

Aquesta tesi doctoral conté un índex que enllaça a cadascun dels capítols. Existeixen així mateix botons de retorn a l'índex al principi i final de cadascun dels capítols .

[Anar directament a l'índex](#)

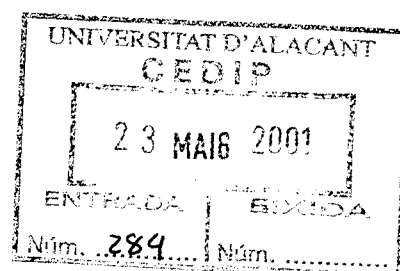
Per a una correcta visualització del text és necessària la versió d' [Adobe Acrobat Reader 7.0](#) o posteriors.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Departament de Física, Enginyeria de Sistemes i Teoria de la Senyal
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal

**Aplicación de la transformada de wavelet a
sismogramas locales: filtrado, deconvolución y
estimación del ángulo azimut**



TESIS DOCTORAL

Juan José Galiana Merino

Mayo, 2001





Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Departament de Física, Enginyeria de Sistemes i Teoria de la Senyal

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

D. JULIO L. ROSA HERRANZ, Doctor Ingeniero en Informática por la Universidad de Alicante y **D. PEDRO J. JÁUREGUI ESLAVA**, Doctor Ingeniero en Informática por la Universidad de Alicante,

CERTIFICAN: Que la presente Memoria titulada "*Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales: filtrado, deconvolución y estimación del ángulo azimut*" ha sido realizada bajo su dirección por **D. JUAN JOSÉ GALIANA MERINO** en el Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal de la Universidad de Alicante, y constituye su Tesis Doctoral para optar al Grado de Doctor.

Y para que conste, y en cumplimiento de la legislación vigente, firman el presente certificado en Alicante a quince de mayo de dos mil uno.

Fdo: Julio L. Rosa Herranz

Fdo: Pedro J. Jáuregui Eslava



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Ayuda a la investigación en la convocatoria de 2000 en el apartado II. Apoyo a la investigación. II.4. Tesis doctorales. (re.847 m) del Instituto Alicantino de Cultura Juan Gil-Albert (Diputación Provincial de Alicante).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Dedicada a mis padres:

Juan Antonio Galiana Ligüercena y Josefa Merino Fernández

AGRADECIMIENTOS



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mis directores de tesis: Julio Rosa Herranz y Pedro Jáuregui Eslava. Dispuestos a ayudarme en todo momento con su experiencia y conocimientos, y derrochando horas y paciencia conmigo en todas las fases de esta tesis.

También agradezco a José Juan Giner Caturla, coordinador de la Unidad de Registro Sísmico de la Provincia de Alicante, permitirme formar parte del equipo investigador de dicha unidad y poner a mi disposición todos los recursos necesarios.

A Augusto Beléndez Vázquez, director del departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, le quiero dar las gracias por permitirme disponer desde primer el día de todos los recursos del departamento que necesité.

A Federico Botella y Sergio Molina, compañeros de fatiga de la red local les agradezco que siempre estén ahí para echarme una ayudita. Gracias por proveerme siempre de la última versión del software y gracias por incluirme en la página web.

También me gustaría dar las gracias a todo el personal del departamento, profesores, administrativos y técnicos, por ayudarme siempre que lo he necesitado y sufrirme durante todos los días. De manera muy especial le doy las gracias a todos aquellos/as con quienes compartí los primeros días en este departamento. Siempre ayudándome en todo aquello que necesitaba y haciéndome mucho más cómodo el día a día.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

No me olvido tampoco de mis padres. A ellos les debo toda la educación recibida que me ha conducido hasta aquí. Me dieron la oportunidad de estudiar aquello que más me gustaba y constantemente me han apoyado en todo mi trabajo. Se merecen por parte mía toda la gratitud del mundo. Siempre soportando con gran paciencia todos mis nervios de exámenes y demás, y siempre intentando proporcionarme el mejor ambiente de estudio. Por siempre, gracias.

Por último, también se merecen mi agradecimiento todos aquellos que siempre han confiado en aquello que hacía y que siempre han estado ahí para animarme en los malos momentos.

Gracias a todos.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

INDICE

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento	1
1.2 Contenidos	8

Capítulo 2. Características de la red sísmica local

2.1 Introducción	13
2.2 Características geológicas de la provincia de Alicante	14
2.2.1 Estructura geológica	14
2.2.2 La edad de los materiales	16
2.2.3 Litofacies	18



Universitat d'Alacant
 Universidad de Alicante

2.2.4	Geología local de los emplazamientos	19
2.3	Características tectónicas de la provincia	22
2.4	Modelo de estructura local	23
2.5	Ruido de los emplazamientos	25
2.6	La respuesta instrumental	29
2.6.1	La red analógica	30
2.6.2	La red digital	34

Capítulo 3. La Transformada Discreta de Wavelets

3.1	Introducción	41
3.2	Filtros de cuadratura	43
3.2.1	Filtros ortogonales	44
3.2.2	Filtros biortogonales	45
3.3	Wavelets y análisis de multiresolución	47
3.4	Wavelets y bancos de filtros	51
3.4.1	Codificación en subbandas	54
3.5	Propiedades de la función wavelet	57
3.6	Wavelet packets	60
3.7	Determinación de la base de wavelet packets	65
3.7.1	Funciones de coste	66
3.7.2	Algoritmos de búsqueda	71



3.8	Métodos de filtrado de ruido	75
3.8.1	Umbralización de los coeficientes de wavelets	77

Capítulo 4. Generación de sismogramas sintéticos mediante el método de trazado de rayos

4.1	Introducción	85
4.2	Propagación de ondas de volumen en medios homogéneos estratificados	86
4.2.1	Ondas P y S. Ecuaciones de onda	86
4.2.2	Teoría de rayos	90
4.2.3	Efectos del medio en la propagación de las ondas	91
4.2.3.1	Dispersión geométrica	91
4.2.3.2	Absorción	92
4.2.4	Efectos de una interfase sobre las ondas	92
4.2.4.1	Trayectorias	94
4.2.4.2	Amplitudes	94
4.2.4.3	Energías	101
4.2.5	Ondas precursoras	101
4.3	Propagación de ondas Rayleigh	103
4.3.1	Pérdidas de energía	104
4.3.2	Dispersión	105



4.4	Generación de sismogramas sintéticos	106
4.4.1	Selección de las trayectorias de los rayos	107
4.4.2	Selección del pulso fuente	119
4.4.3	Selección de parámetros característicos	121
4.4.4	Ejemplos de sismogramas sintéticos locales	123

Capítulo 5. Deconvolución de sismogramas de periodo corto

5.1	Introducción	137
5.2	Deconvolución de señales contaminadas con ruido	139
5.2.1	Inversión pura en el dominio de Fourier	142
5.2.2	Inversión regularizada en el dominio de Fourier	142
5.3	Deconvolución regularizada basada en wavelet packets (DReWP)	145
5.3.1	Filtrado de ruido	145
5.3.2	Deconvolución	147
5.4	Evaluación del método DReWP	150
5.5	Aplicación del método DReWP a sismogramas de periodo corto reales	163

Capítulo 6. Estimación del azimut en sismogramas locales

6.1	Introducción	177
6.2	Estimación del azimut en un sismograma de tres componentes	178



6.3	Estimación del azimut mediante filtrado y detección en el dominio de las wavelets	182
6.4	Aplicación a sismogramas locales	187

Capítulo 7. Conclusiones

7.1	Resultados	191
7.2	Conclusiones	194
7.3	Líneas de trabajo futuro	197

Referencias	199
--------------------------	-----

Abreviaturas	207
---------------------------	-----

<i>Apéndice A</i>	211
--------------------------------	-----

<i>Apéndice B</i>	247
--------------------------------	-----

<i>Apéndice C</i>	257
--------------------------------	-----

<i>Apéndice D</i>	273
--------------------------------	-----

<i>Apéndice E</i>	291
--------------------------------	-----

<i>Apéndice F</i>	305
--------------------------------	-----



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento.

La presente tesis se enmarca dentro del programa de doctorado de Informática Aplicada, ofertado por el departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal de la Universidad de Alicante. El tema de investigación surge como resultado de la colaboración entre este departamento y el de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente de la Universidad de Alicante. El objetivo es mejorar las herramientas de análisis y procesado de la señal usadas actualmente por la Unidad de Registro Sísmico de la Provincia de Alicante (URSPA), con el fin de conseguir sismogramas de mejor calidad que faciliten la investigación de la sismología local y global.

La URSPA se encarga de la detección y registro de eventos locales de baja

intensidad, que por sus características propias están por debajo del umbral de detección de la Red Sísmica Nacional. Por tanto, forma un excelente complemento a la información sísmica que proporciona el Instituto Geográfico Nacional sobre la provincia de Alicante.

En el momento de comenzar esta tesis, la URSPA dispone de una tarjeta de adquisición de datos y el software correspondiente para poder monitorizar, de forma continua en un computador personal, todas las señales registradas por las estaciones sísmicas que hay distribuidas por la provincia de Alicante. En concreto se trata del hardware y software de IASPEI. Por otro lado, como herramienta de análisis y procesado de los registros sísmicos se dispone de todo un completo software, resultado de la tesis de Pedro Jáuregui (1997), adaptado a los recursos y necesidades específicas de la propia red local.

Este software implementa diversos filtros digitales pasa banda de fase cero, que actúan sobre la señal en diversos momentos del análisis de la misma, con el fin de mejorar la relación señal ruido ('signal to noise ratio', SNR), evitar el efecto de aliasing, evitar el efecto del ruido en el proceso de deconvolución de la respuesta instrumental, etc. No obstante, en la mayoría de los casos, los resultados obtenidos no son tan buenos como se desearía. Sobre todo en lo que se refiere al aumento de la SNR. Además, este tipo de filtros de fase cero presentan una respuesta impulso simétrica respecto al eje de ordenadas, lo cual los convierte en filtros no causales. Esto produce una serie de señales precursoras que en muchos casos pueden llegar a distorsionar y ocultar la forma de la onda sísmica justo en su momento inicial.

Scherbaum (1996) describe todos estos problemas y muestra una solución para eliminar la respuesta no causal introducida por los filtros de fase cero. No obstante, esto es sólo una solución para poder seguir aplicando los filtros digitales como filtros anti-aliasing, o dicho de una forma más general, como filtros pasa banda. Pero su aplicación no pasa de aquí.

Cuando lo que se desea es mejorar la SNR del sismograma, los filtros pasa banda muestran verdaderas limitaciones. De hecho, la misma palabra lo dice todo.

Un filtro pasa banda ideal, como mucho, sólo puede aspirar a obtener una señal de salida con un espectro contenido entre un par de frecuencias que se especifiquen, y todo ello con una distorsión en fase y amplitud nula. Por ejemplo, en el caso de los sensores de periodo corto de la Red Sísmica Local de la Universidad de Alicante se tiene una señal que debería estar comprendida entre 1 Hz y 25 Hz. Esta última frecuencia es debida a un filtro pasa baja analógico Butterworth que actúa como filtro anti-aliasing. Sin embargo la señal obtenida presenta un espectro mucho más amplio. Si se considera toda la parte de la señal con contenido en frecuencias inferior a 1 Hz o superior a los 25 Hz como ruido, entonces una forma de eliminarlo sería mediante el uso de un filtro pasa banda. Por ese motivo, como un primer paso, se desarrolló un medio alternativo al de Scherbaum para conseguir un filtrado pasa banda carente de distorsión tanto en fase como en amplitud. Este método implementa un filtrado pasa banda mediante diferentes etapas de filtrado pasa baja y diezmado. No obstante, la mejora conseguida en la SNR no es tan grande como sería deseable, lo cual indica claramente que el contenido espectral del ruido también se encuentra dentro de la banda de frecuencias de 1 Hz a 25 Hz. ¿Y cómo eliminar este ruido con un filtrado pasa banda?

Es entonces cuando hay que empezar a pensar en otros medios diferentes del filtrado pasa banda para eliminar el ruido de los registros sismológicos. Douglas (1997) propone una alternativa basada en la utilización de filtros óptimos. Estos son filtros lineales y su criterio de optimización esta basado en la minimización del error cuadrático medio entre la salida obtenida y la salida deseada. A este filtro óptimo, en el sentido del mínimo error cuadrático medio, se le denomina filtro de Wiener. El inconveniente es que una de las suposiciones básicas para poder obtener este filtro óptimo es que la señal original (sin ruido), la señal de ruido y la señal deseada después del filtrado deben ser señales de media cero y estacionarias. Y esto último es un requerimiento que no cumplen los registros sísmicos. No obstante, la utilización de este tipo de filtros, basados en la minimización del error cuadrático medio, ha sido tratada por varios investigadores entre los que destacan Claerbout (1976) y Ray Abma (1995). En concreto, en la tesis doctoral de Ray Abma (1995) las señales

sísmicas no estacionarias son partidas o divididas en varias secuencias de datos más pequeñas, en las cuales si se puede aplicar la suposición de que son señales estacionarias. Aún así, como bien él mismo comenta en su propia tesis, esta técnica puede, en algunos casos, dar lugar a eventos espurios dentro de la señal sísmica.

Quizás se puede pensar en nuevos artificios que den solución a estos problemas que surgen dentro del filtrado pasa banda y el filtrado óptimo. Sin embargo, cualquier solución que se busque no dejará de ser un parche más a unos métodos de análisis de la señal que son totalmente inapropiados al tipo de datos con los que se está tratando. Cualquier tipo de filtro que se diseñe tendrá una determinada respuesta en frecuencia y por tanto se encargará de dejar inalterado parte del espectro de la señal y de suprimir el resto. En el caso de señales estacionarias el espectro de la señal será constante con el tiempo por lo cual el filtro diseñado se podrá aplicar con éxito a todo el conjunto de datos. Sin embargo, en el caso de señales no estacionarias el contenido espectral de la señal varía con el tiempo y por tanto el filtro más adecuado en cada instante no será siempre el mismo.

Parece bastante claro que el tratamiento de las señales no estacionarias en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia de forma separada, no es la herramienta más adecuada. Es momento de cambiar hacia un nuevo tipo de análisis más acorde con a este tipo de señales: un análisis tiempo-frecuencia donde la señal es tratada a la vez en ambos dominios. Como se menciona en la tesis de Peter Steeghs (1997) el análisis de señales no estacionarias requiere el uso de nuevas técnicas que cambien la noción de espectro de frecuencias global por una descripción en frecuencias local. Mediante la transformada de Fourier se pasa del dominio temporal al dominio en frecuencia y se obtiene información acerca de todas las frecuencias que están presentes en la señal. Sin embargo no se obtiene información sobre en que instantes cambia el contenido en frecuencias. Por ello se necesita un tipo de representación tiempo-frecuencia en la cual se muestre esta variación espectral.

Existen muchos tipos de transformaciones mediante los cuales se puede pasar del dominio meramente temporal a un dominio tiempo-frecuencia. A su vez, todas

estas transformaciones se pueden agrupar en función de alguna característica común para formar grupos o clases superiores. Estos grupos o clases de distribuciones tiempo-frecuencia son principalmente los siguientes:

- Distribuciones de primer orden, distribuciones lineales o descomposiciones atómicas.
 - Transformada de Fourier dependiente del tiempo ('Short Time Fourier Transform', STFT).
 - Transformada de wavelet.
- Distribuciones de segundo orden, distribuciones cuadráticas o distribuciones de energía.
- Distribuciones de tercer orden y grado superior.

En las distribuciones de primer orden se crea un espacio de bases en función de las cuales se descompone la señal. Dependiendo de las propiedades de estas bases tendremos un tipo de transformación u otra.

El segundo tipo de distribuciones tiempo-frecuencia son distribuciones cuadráticas en el sentido que tienen una dependencia con la señal de entrada de segundo orden. Cada distribución se caracteriza por una función núcleo (kernel) de dos dimensiones, la cual determina las propiedades de la distribución. Dependiendo de estas propiedades la distribución se puede englobar dentro de una clase u otra.

Por último figuran las distribuciones de tercer orden (o superior) en las cuales la dependencia con la señal es de orden tres (o superior).

Las distribuciones de segundo orden dan una idea de cómo se distribuye la energía de la señal en el espacio tiempo-frecuencia. Sin embargo, la comprensión de los nuevos datos no es tarea fácil. Cuando la señal de entrada esta formada por la suma de varias componentes armónicas, la dependencia cuadrática de estas distribuciones con la señal de entrada produce la aparición de unos términos

cruzados que ocultan o distorsionan la interpretación de la representación obtenida. Además, tampoco es fácil interpretar la existencia de distribuciones de energía en las cuales existen áreas con valores negativos. Y esto es lo que ocurre para todas estas distribuciones con excepción de las distribuciones positivas. Por otro lado, una vez aplicada la transformada directa ya no se puede recuperar de nuevo la señal. En la tesis de Peter Steeghs (1997) se utiliza este tipo de distribuciones para estudiar determinadas características de las señales sísmicas. No obstante, el hecho de que no exista una transformada inversa reduce bastante el campo de aplicación de estas distribuciones.

Las distribuciones de tercer orden o grado superior surgen como consecuencia de la aparición de las nuevas técnicas estadísticas de alto orden ('Higher Order Statistics', HOS). En concreto, se intenta ver si alguna de las propiedades de la estadística de alto orden se cumple también para este tipo de distribuciones. Sin embargo, como se muestra en la tesis de Flemming Pedersen (1997), la mejora obtenida respecto a las distribuciones de segundo orden es mínima y por tanto la carga computacional extra que hay que realizar no está justificada.

Las distribuciones tiempo-frecuencia lineales son las más intuitivas y fáciles de comprender, pues simplemente lo que se hace es expresar la señal original en función de unas funciones base que se determinan previamente a la descomposición.

Dentro de este tipo de distribuciones y como primera solución aparece la STFT, la cual consiste en convolucionar la señal de entrada con una función ventana y calcular el espectro de la señal resultante. Y esto para cada instante de tiempo. La resolución tiempo-frecuencia obtenida mediante esta transformada está fijada por la anchura de la ventana escogida; con lo cual, nos encontramos con el dilema de que tipo de ventana escoger. Una ventana estrecha nos dará una alta resolución en el tiempo y una baja resolución en frecuencia, mientras que una ventana ancha nos dará una alta resolución en frecuencia a cambio de una pobre resolución temporal. El principal problema de la STFT es que, una vez determinada la ventana, esta se aplica durante todo el análisis, con lo cual la resolución se mantiene constante. Por tanto, el

tipo de ventana que se deberá escoger dependerá de las características de la señal que se deseen analizar. Como dice Robi Polikar (1998), encontrar una buena ventana que proporcione una resolución aceptable tanto en el tiempo como en la frecuencia puede ser más difícil que encontrar un buen valor bursátil en el cual invertir los ahorros.

La transformada de wavelet supone una alternativa mediante la cual se resuelven los problemas de resolución de los que aducía la STFT. En concreto, la transformada discreta de wavelet ('discrete wavelet transform', DWT) nos permite trabajar con una resolución tiempo frecuencia variable que se adapta de forma muy adecuada a las características de la mayoría de señales naturales: presenta baja resolución espectral y alta resolución en el tiempo para frecuencias altas y al revés para frecuencias bajas..

Además, existen muchas modificaciones a la simple transformada discreta de wavelet que nos permiten, aún más, adaptar nuestro análisis al tipo de señal que se quiere estudiar. Por ejemplo, mediante la transformada discreta de wavelet packet ('discrete wavelet packet transform', DWPT) se puede conseguir, dentro de unos límites¹, la resolución tiempo-frecuencia que más nos interese, independientemente de que sean frecuencias bajas o altas.

En esta tesis se estudia la DWT y la DWPT con el fin de aplicar, en cada momento del procesado de la señal sísmica, aquella que nos proporcione los mejores resultados.

Las aplicaciones en concreto que se tratan son:

- Filtrado de la señal para eliminar las componentes de ruido indeseadas y facilitar las posteriores tareas de análisis.
- Deconvolución de la respuesta instrumental para eliminar las distorsión que los diferentes equipos introducen sobre la señal en su camino desde el sensor al ordenador central de registro.

¹ El principio de incertidumbre de Heisenberg-Gabor nos dice que una señal no puede tener simultáneamente una gran resolución en el tiempo y en la frecuencia. El producto ventana temporal-ancho de banda está acotado inferiormente por la unidad (Auger et al., 1996).

- Estimación del ángulo azimut a partir de una única estación de tres componentes, lo cual, junto con la diferencia de los tiempos de llegada de las ondas P y S, proporciona la localización de un evento dado.

1.2 Contenidos.

Las características de las señales sísmicas registradas, con las que se va a trabajar, dependen principalmente de la fuente, de la estructura y composición de la corteza terrestre que rodea la red local, y también del equipo de adquisición y registro de la URSPA. Por este motivo, en el capítulo 2 se realiza un estudio de los condicionantes geológicos y materiales que afectan a la señal.

En un primer lugar es necesario conocer las características principales de la zona geológica sobre la que se encuentra ubicada la red. Aunque no es el propósito de esta tesis realizar un estudio en profundidad de la geología local, sí que es importante conocer las particularidades del lugar sobre el que se está trabajando. Con este motivo, se estudian: un modelo de corteza local y el comportamiento estadístico del ruido asociado a cada uno de los emplazamientos.

La segunda parte de este capítulo está dedicada a la parte instrumental de la red. En la actualidad, la URSPA dispone de cuatro estaciones analógicas (formadas por sensores verticales de periodo corto), y por dos estaciones digitales (formadas por sensores triaxiales de periodo corto). En esta sección se estudiarán las características más importantes de estos equipos, haciendo hincapié en la respuesta instrumental asociada a cada uno de ellos. Por último, se analiza lo que es propiamente la unidad de registro y control, y se muestra la estructura general de la red.

Una vez que se conocen las características de las señales con las se tiene que trabajar, es hora de determinar la herramienta matemática de análisis que mejor

puede servir para nuestros propósitos. Como ya se ha explicado en el apartado 1.1, el estudio de una señal no estacionaria nos conduce a utilizar transformadas que nos proporcionen una descomposición tiempo-frecuencia de la señal. Y dentro del grupo de transformadas de este tipo, la (DWT) es la que mejores propiedades presenta. Por ello, esta será la herramienta matemática que se utilice en las aplicaciones de los capítulos 5 (deconvolución y filtrado de la señal sísmica) y 6 (determinación del ángulo de azimut).

Para comprender mejor como actúa la DWT en las aplicaciones que se presentan en esta tesis, es muy importante disponer previamente de un marco teórico en el que se analicen los conceptos más importantes que rodean a esta clase de transformada. Este es el motivo por el cual en el capítulo 3 se presenta una introducción teórica al análisis de wavelets. En este estudio teórico se opta por una nueva nomenclatura más global, en la que se tiene en cuenta el carácter particular que el análisis de multiresolución y la DWT tienen frente a otras variedades de esta transformada, como es la DWPT. Una vez conocidos los fundamentos teóricos, se muestran diferentes algoritmos de eliminación de ruido basados en wavelets que han sido propuestos en la bibliografía.

Con el objeto de evaluar de manera cuantitativa el método de deconvolución propuesto en el capítulo 5 se debería poder comparar la señal obtenida con la señal pura, tal y como llega al sensor. Sin embargo, para cualquiera de los eventos reales registrados, la única información de la que se dispone es de los datos tal y como llegan a la unidad de registro. Una manera de solucionar esto es evaluar el método a través de señales sintéticas, las cuales se pueden convolucionar con la respuesta instrumental, contaminar con ruido característico del emplazamiento y después volver a deconvolucionar y filtrar para comparar con la señal inicial. Con el fin de obtener una evaluación del método lo más ajustada a la aplicación de interés, se lleva a cabo la generación de sismogramas sintéticos locales que se asemejen lo máximo posible, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, a los eventos locales reales registrados por la URSPA.

Para llegar a generar estos sismogramas sintéticos es necesario estudiar previamente algunos de los fundamentos básicos sobre propagación de ondas de volumen, efectos de las interfases, etc. Estos conocimientos se exponen en el capítulo 4. También se estudia la generación y propagación de ondas de superficie, en particular de ondas Rayleigh, pues estas contienen la mayor parte de la energía en los eventos de tipo local. Con esta información teórica, y utilizando un método de trazado de rayos sobre el modelo local de corteza mostrado en el capítulo 2, se aborda la generación de los sismogramas sintéticos locales.

En el capítulo 5, antes de presentar el método de deconvolución propuesto, se analiza el método utilizado actualmente en la URSPA. Este método se conoce como deconvolución mediante corrección de filtro de nivel ('water level correction', WLC) y es propuesto por Sherbaum (1996). Con la intención de mejorar los resultados, se propone un nuevo método de deconvolución basado en la DWPT y se explica tanto el razonamiento teórico seguido como el algoritmo utilizado. Los siguientes apartados de este capítulo están enfocados al estudio de la viabilidad práctica del método propuesto y a su eficacia frente al método actual. Como ya se ha comentado anteriormente, con el fin de comprobar la eficacia del método diseñado, primero se aplica sobre sismogramas sintéticos locales. Esto permite evaluar de forma cuantitativa los resultados, y después compararlos de una manera más objetiva con los obtenidos con el método actual. Por último, se aplica este procedimiento a señales reales y se muestran los resultados obtenidos sobre sismogramas verticales de periodo corto registrados por la propia red local.

Otra aplicación de la DWT se estudia en el capítulo 6. En este caso se trata de obtener el ángulo de azimut de los eventos registrados por las estaciones triaxiales de la red. En primer lugar se muestran las características principales de los métodos propuestos en la bibliografía para el cálculo de azimut de eventos regionales y se propone un método alternativo basado en la DWT. Con el fin de estudiar la viabilidad del método propuesto en una red sísmica local, se evalúa el funcionamiento sobre sismogramas locales de azimut conocido, que es donde los métodos tradicionales propuestos en la bibliografía fallan.

En el último capítulo de la tesis se exponen las conclusiones que se pueden extraer de este trabajo, haciendo hincapié en los resultados obtenidos. Aquí se destaca en primer lugar el desarrollo de un software propio para la generación de sismogramas sintéticos locales con características tiempo-frecuencia similares a los eventos reales. Después, el desarrollo de un nuevo método de deconvolución y la programación del software correspondiente. Y por último, la implementación de un nuevo algoritmo para el cálculo del ángulo de azimut en eventos locales y el desarrollo del software asociado.

La memoria concluye con una relación de reseñas bibliográficas utilizadas en la misma, una lista de abreviaturas y seis apéndices.

En el apéndice A se presentan los datos referentes a la simulación de dos sismogramas sintéticos. Estos datos indican para cada una de las trayectorias simuladas la siguiente información: el tiempo de viaje, el espacio recorrido, el ángulo de salida de la fuente, el ángulo de llegada al sensor, las pérdidas de energía y las posiciones relativas a cada tramo de la trayectoria.

En el apéndice B se proporcionan unas tablas con los parámetros de entrada, correspondientes al método de deconvolución propuesto, más adecuados para cada una de las estaciones analógicas de la red.

En el apéndice C se aplica el método de deconvolución propuesto sobre los sismogramas de periodo corto registrados por la red local durante el año 2000. En concreto se muestran gráficamente los sismogramas registrados junto con el sismograma deconvolucionado asociado a cada uno de ellos.

Por último, en los apéndices D, E y F se presentan las funciones y scripts que se han programado en entorno Matlab para la realización de los sismogramas sintéticos, el filtrado y deconvolución, y la estimación del azimut.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CARACTERÍSTICAS DE LA RED SÍSMICA LOCAL

2.1 Introducción.

Las características de las señales sísmicas registradas dependen en gran medida de las rasgos geológicos de la zona que comprende la red local, del ruido asociado a cada una de las estaciones y de la respuesta instrumental de los equipos de adquisición, comunicación y registro.

Por ello en este capítulo se abordan estos tres factores de gran influencia en el perfil final de la señal. En los dos primeros apartados se muestran las características geológicas y tectónicas de la provincia de Alicante. En el tercer apartado se presenta un modelo de estructura de corteza local propuesto por Jáuregui (1997) y que será utilizado en un posterior capítulo. En el siguiente punto se estudia el comportamiento estadístico del ruido asociado a cada uno de los emplazamientos. Por último se

describen las características técnicas de los equipos de adquisición y registro, y se muestran las funciones de transferencia global asociada a cada uno de ellos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.2 Características geológicas de la provincia.

La provincia de Alicante se encuentra situada al sureste de la península Ibérica entre los 30°47' N y 38°57' N de latitud y los 1°10' O y 0° 18' E de longitud. A grandes rasgos se compone de una amplia llanura litoral, vegas de los ríos Segura y Vinalopó, con altitud media de 20 metros en ligero descenso hacia el SE, dando lugar a una costa baja y pantanosa, lagunas de Santa Pola, Torrevieja y La Mata, y limitada al NO por una serie de relieves abruptos de orientación general SO-NE que llegan a alcanzar cotas superiores a 1000 metros.

El objetivo del presente apartado es ofrecer una visión general del relieve y los suelos de la provincia de Alicante, ámbito de aplicación de la red local. Para ello se comienza con un breve análisis de la estructura geológica, y se continua con un estudio de los materiales, tanto desde el punto de vista cronológico como de las características físicas de las litofacies.

2.2.1 Estructura geológica.

Desde el punto de vista geológico, la región pertenece al sector nororiental de las Cadenas Béticas que formando parte del sistema alpino, del mediterráneo occidental, ocupan el sur y sureste de la península Ibérica a lo largo de una longitud de cerca de 1000 km desde Cádiz hasta las Islas Baleares, y de 600 km si prescindimos de estas últimas.

2.2.2 La edad de los materiales.

Observando el mapa geológico (figura 2.2) se puede apreciar la prácticamente ausencia de afloramientos de materiales pertenecientes al Paleozoico o Era Primaria, que son los más antiguos, y supuesto zócalo sobre los que descansan los más modernos, pertenecientes ya a las eras Secundaria, Terciaria y Cuaternaria. Sólo se aprecian unos reducidos afloramientos en la sierra de Orihuela y Callosa de Segura, datados del Pérmico.

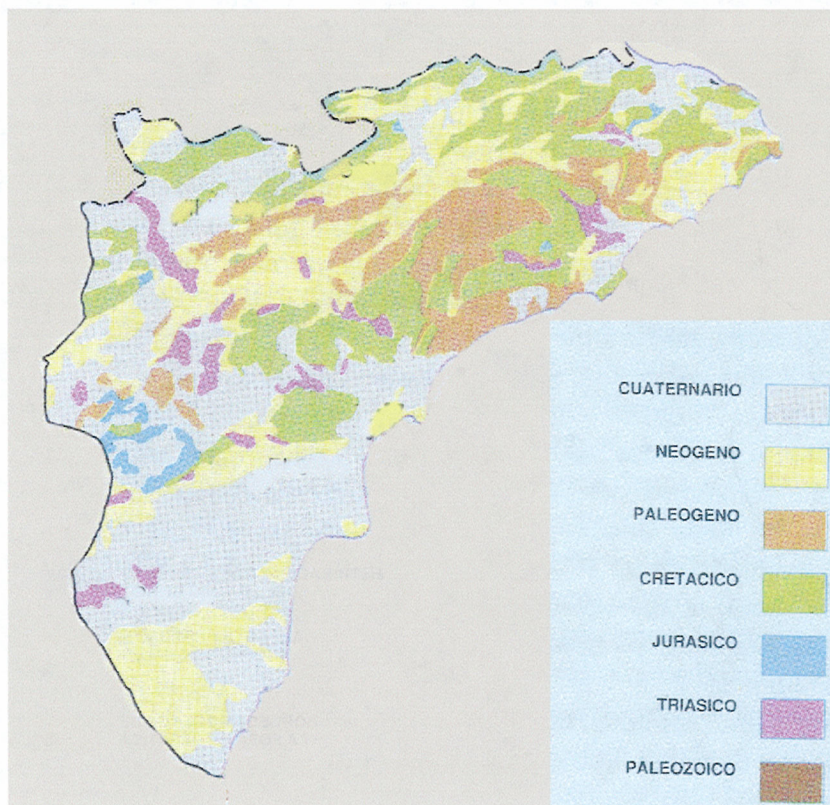


Figura 2.2 *Edad geológica de la provincia de Alicante.*

Se puede decir que la provincia de Alicante está constituida por una cobertera sedimentaria más o menos espesa, según el lugar, compuesta por materiales del

secundario en adelante. Dentro de la Era Secundaria o Mesozoico se distinguen tres periodos: Triásico, Jurásico, y Cretácico. Mientras que en el Terciario se diferencia entre Paleógeno y Neógeno. Por último, los materiales más recientes son los pertenecientes al Cuaternario.

Los materiales triásicos pertenecen en su práctica totalidad a la denominada facies alpina. Por lo general estos materiales mesozoicos se localizan siguiendo grandes accidentes tectónicos, destacando por su extensión las zonas de Guadalest, Montnegre, Vinalopó, y Orihuela.

En cuanto a los terrenos del Jurásico, existen algunos asomos intrusivos como los del Puig Campana o Fontcalent, aunque los más importantes son los de las sierras de Crevillente, Reclot y Algayat.

El Cretácico se caracteriza por determinar afloramientos alargados, dispuestos de SO a NE, que se corresponden generalmente con los elementos más destacados del relieve como las sierras de Solana, Mariola o Benicadell, llegando hasta las inmediaciones de Crevillente, Elche y Alicante.

De los dos periodos terciarios diferenciados: Paleógeno y Neógeno, es el segundo el que se encuentra con mayor frecuencia y extensión.

Los materiales paleógenos son escasos y en afloramientos de poca continuidad espacial. Con mayor frecuencia los encontramos en una zona comprendida entre el cabo de la Nao, Morro de Toix y la sierra de Serrella.

Los afloros neógenos aparecen con mayor continuidad en una franja situada al norte de Crevillente y Elche, pero sobre todo en la porción más meridional de la provincia, al sur del río Segura.

2.2.3 Litofacies.

La mayor parte de los materiales son de origen marino, dando lugar a litofacies ricas en bases, con elevadas concentraciones de carbonatos. En la figura 2.3 se observa la distribución geográfica de estas litofacies.

En primer lugar, como materiales más antiguos, figuran las arcillas con yesos y sales del Keuper, cuya principal característica es la plasticidad, importante desde el punto de vista tectónico. Son también materiales blandos, deleznales, fácilmente erosionables por la escorrentía superficial.

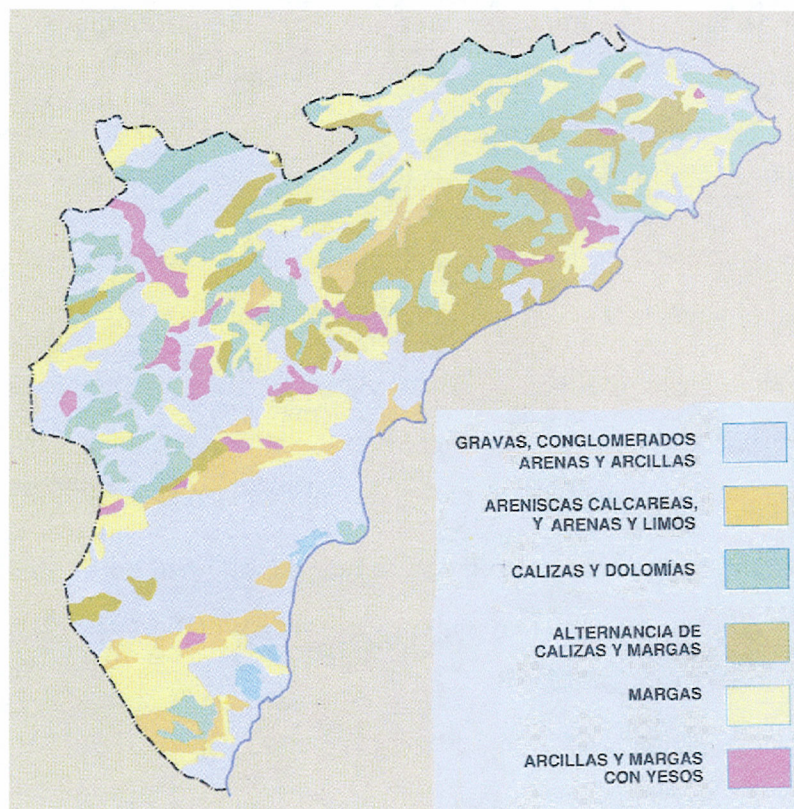


Figura 2.3 *Litofacies de la provincia de Alicante.*

Las calizas puras, o más o menos dolomíticas, son de edades muy diferentes, aunque las más abundantes son del Cretácico Superior y son las que se encuentran en las sierras septentrionales de la provincia.

Las calizas también comparten pisos con otro tipo de litofacies de naturaleza claramente opuesta: las margas. Determinan series alternantes en las que predominan unas o otras. Desde el Muschelkalk hasta el Oligoceno se encuentran períodos constituidos por la alternancia de materiales duros y blandos: calizas y margas. De estas formaciones se pueden destacar dos cosas: suelen ser bastante plásticas cuando son afectadas por movimientos tectónicos; y al estar formadas por materiales contrapuestos, la erosión actúa de manera diferencial, vaciando los estratos margosos y dejando en resalte las capas duras de caliza, si bien esto depende de la inclinación de las capas.

También son frecuentes las áreas constituidas exclusivamente por margas. Estas son en gran porcentaje de la edad Miocena, aunque también las hay cretácicas. Su localización más común son las zonas deprimidas, las hoyas o los valles.

De edad miocena y pliocena son los terrenos formados por areniscas y arenas que alcanzan su mayor extensión en la zona más meridional de la provincia: entre Alicante y el extremo sur.

Por último, están los terrenos formados por gravas, conglomerados, arenas y arcillas, que en gran medida son de la Edad Cuaternaria. Estos materiales son resultado de la acción de distintos agentes erosivos, que transportados por la escorrentía se acumulan en las áreas deprimidas del interior o en los llanos litorales.

2.2.4 Geología local de los emplazamientos.

La unidad de registro sísmico de la provincia de Alicante (URSPA) dispone en la actualidad de cuatro sensores verticales de periodo corto (estaciones analógicas), y

dos sensores triaxiales (estaciones digitales), también de periodo corto. Cada una de estas estaciones se encuentra ubicada en un punto determinado de la provincia de Alicante (figura 2.4) y por tanto su entorno geológico más inmediato difiere de una estación a otra (ver tabla 2.1).

Teniendo en cuenta las principales características geológicas de la provincia de Alicante, indicadas en los apartados anteriores, y la localización de las estaciones dentro de este marco geográfico, se pueden obtener los rasgos geológicos más importantes asociados a cada uno de los emplazamientos.

Estación analógica UNIP (38°23'21" N – 0° 30'42" O)

Ubicada en la plana de San Vicente en las inmediaciones de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Alicante, a 100 metros de altitud sobre el nivel del mar. Este emplazamiento se sitúa sobre depósitos cuaternarios de entre 15 y 20 metros de espesor (Jáuregui y Pina, 1995). En cuanto a los terrenos sobre los que se encuentra la estación, estos se clasifican como holocenos constituidos por gravas, limos y arcillas de un espesor medio del orden de un metro. La estación en concreto se encuentra situada a 12 metros de profundidad con el fin de mejorar la relación señal ruido ('signal to noise ratio', SNR). Esta situación se encuentra cerca del nivel estático de la zona, el cual está en torno a los 15 metros.

Estación analógica MAIG (38°31'30" N – 0° 39'45" O)

Esta estación está ubicada en la sierra del Maigmo. En el cabezo inmediato al NO del pico del Maigmo, en una cota de 1090 metros sobre el nivel del mar. Estos terrenos se clasifican como cretácicos y están formados por calizas amarillentas en bancos de 1 metro, con juntas margosas y pasadas de margocalizas.

Estación analógica CREV (38°16'45" N – 0° 51'00" O)

Se encuentra en las inmediaciones del vértice geodésico de la Sierra de Crevillente, en una cota de 835 metros. Los terrenos se clasifican como jurásicos, constituidos por calizas y dolomías del Lías inferior y medio, que en el techo terminan en un conjunto margoso.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Sustrato
MAIG	38°31'30"	0° 39'45"	1090	Calizas
CREV	38°16'45"	0° 51'00"	835	Dolomías
PUJA	37°59'29"	0° 56'05"	290	Areniscas
UNIP	38°23'21"	0° 30'42"	88	Margocalizas
CRE	38°16'45"	0°51'00"	835	Dolomías
ROM	38°23'31"	0°55'09"	350	Dolomias

Tabla 2.1 Localización y sustrato de las estaciones.

Estación analógica PUJA (37°59'29" N – 0° 56'5" O)

Es la estación más meridional de la red y se encuentra en el límite de las provincias de Alicante y Murcia, sobre los terrenos Terciarios de la sierra de Pujálvarez, en una cota aproximada de 290 metros. En esta sierra aparecen frecuentes intercalaciones margosas con algunos terrenos aflorantes de areniscas y conglomerados de edad Tortonense.

Estación digital CRE (38°16'45" N – 0°51'0" O):

Esta estación triaxial se encuentra a escasos metros de la estación analógica CREV. Por tanto se encuentra en la sierra de Crevillente, en una cota de 835 metros y con unas características geológicas locales idénticas a la de la estación analógica.

Estación digital ROM (38°23'31" N – 0°55'9" O):

Situada en la sierra del Reclot, cerca de La Romana, en una cota de 350 metros. Esta situada sobre afloramientos del Jurásico y sus terrenos más próximos

están formados principalmente por calizas y dolomías, con ciertas incursiones de margas en la parte más oriental de la estación.

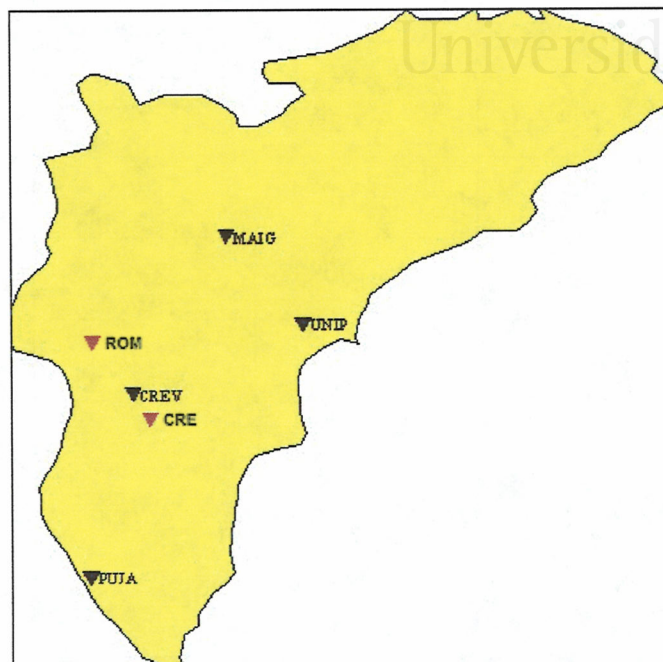


Figura 2.4 Estaciones de la URSPA.

2.3 Características tectónicas de la provincia.

En el marco de lo que el Geophysics Study Committee (1986) considera como tectónica activa o movimientos que van a ocurrir en el futuro en un lapso de tiempo que afecta a la sociedad, Alfaro (1995) pone de manifiesto la existencia de una actividad moderada-baja en la depresión del Bajo Segura, que se cuantifica en un movimiento vertical en torno a 0.1-0.2 mm/año, enmascarado por una serie de sedimentos holocenos no deformados.

Alfaro (1995) identifica también estas estructuras activas en la zona sur de la provincia de Alicante, destacando:

- Accidente del Bajo Segura, formado por un Conjunto de fallas inversas enterradas a las que se asocian pliegues sintectónicos en superficie. Este es el accidente más activo de la zona.
- Fallas de salto en dirección NO-SE, entre las que destaca la de San Miguel de Salinas.
- Fallas inversas, como el accidente de Crevillente.
- Accidente de los Hondones, que funciona como falla vertical o inversa en profundidad.

Los mecanismos focales disponibles hasta el presente en el área de estudio revelan una situación actual de esfuerzos compresivos en dirección NNO-SSE, funcionando los accidentes de Crevillente y del Bajo Segura como fallas inversas y los accidentes en dirección NO-SE como fallas dextrosas o normales (Jáuregui, 1997).

2.4 Modelo de estructura local.

Para distancias locales ($\Delta < 1^\circ$), y para focos superficiales ($h < 30$ Km), las fases directas P o las canalizadas por la capa granítica P_g son las primeras en llegar a la estación. A distancias epicentrales del orden de los 100 Km, estas ondas van seguidas por la fase refractada en la base de la corteza y propagada a través del manto superior, P_n . (Carreño, 1994). Por tanto, la zona de estudio de la propagación de las

ondas sísmicas para distancias locales y regionales, y focos superficiales, es sobre todo la corteza y la zona de contacto de esta con el manto superior.

Aunque no existe un estudio exhaustivo de la estructura cortical asociada a la provincia de Alicante, Jáuregui (1997) propone un modelo de corteza local asociado al ámbito de actuación de la red basado en estudios de gravimetría (Castaño y Carbó, 1995), en los perfiles de refracción sísmica Adra-Cartagena-Adra (Banda y Ansorge, 1980) y en los sondeos sísmicos profundos en Baleares (Banda et al., 1980).

Basándose en la previsible transición entre ambos modelos y en la observación de las primeras llegadas, la estructura de la corteza, en la zona de detección de la red, responde a un modelo de corteza continental adelgazada, con un espesor del orden de 20 km, en la que no existe una clara diferenciación entre la corteza superior e inferior, y con una velocidad relativamente baja en la zona de transición al manto.

Jáuregui (1997) propone dos modelos locales diferentes, ambos con idénticos resultados.

El primero de ellos, más próximo al modelo Balear, está formado por cuatro capas paralelas homogéneas con las siguientes características:

- Capa sedimentaria, desde la superficie hasta aproximadamente 5 km de profundidad, con una velocidad media de 4.8 km/s.
- Corteza superior, desde 5 a 9 km de profundidad con una velocidad de propagación de 6.1 km/s.
- Corteza inferior, desde 9 a 18 km de profundidad con una velocidad de 6.7 km/s.
- Manto superior, que actúa como un refractor de velocidad 8.1 km/s y que se sitúa a 18 km de profundidad.

El segundo modelo propuesto sigue una estructura de tres capas paralelas

homogéneas con características más similares al modelo Bético:

- Capa sedimentaria incluida en la corteza superior, con un espesor de 9 km y una velocidad media de 5.6 km/s.
- Corteza inferior, con un espesor de 9 km. y una velocidad de 6.7 km/s.
- Manto superior, con las mismas propiedades que en el modelo anterior.

En el capítulo 4 se utiliza este último modelo como base para la generación de sismogramas sintéticos con características locales.

2.5 Ruido de los emplazamientos.

Las señales sísmicas obtenidas están en mayor o menor medida contaminadas con ruido, el cual depende principalmente de fenómenos muy locales propios de cada emplazamiento. A este ruido, que se podría clasificar como local, se le conoce como ruido cultural o ruido ambiente. Uno de los factores más importantes que contribuyen a este ruido es la actividad humana, la cual se trata de evitar colocando las estaciones en lugares de acceso restringido. Otro factor importante y mucho menos controlable es el debido a la fauna y vegetación que se desarrolle en los alrededores de la estación. Otro tipo de ruido, muy distinto al cultural y de menos influencia en nuestra situación, es el ruido electrónico asociado a todo el equipo de instrumentación.

A continuación se va a realizar un estudio estadístico de la señal de ruido obtenida en cada una de las estaciones. Esta señal es el resultado de la convolución de la respuesta instrumental con el ruido cultural, más la contribución del ruido electrónico.

Para analizar el ruido asociado a cada uno de los emplazamientos de las

estaciones analógicas¹ se han utilizado 85 eventos registrados desde el año 1996 hasta el 2000, de los cuales se escogieron 15 segundos de preevento como señal de ruido. Esto es posible gracias al modo en que funciona el algoritmo de detección y adquisición².

Una vez seleccionadas estas muestras, se calcula el valor medio y la desviación estándar del ruido para cada una de las estaciones analógicas.

	MAIG	CREV	PUJA	UNIP
Valor Medio (niveles)	0.93	1.55	2.57	1.80
Desviación Estándar (niveles)	21.36	29.93	31.46	9.43

Tabla 2.2 *Parámetros estadísticos del ruido*³.

En la tabla 2.2 se pueden observar los resultados obtenidos para cada uno de los emplazamientos. Antes de comentar estos datos hay que indicar que las estaciones MAIG, CREV y PUJA tienen asociado un factor de amplificación de 78dB, mientras que la señal de UNIP está amplificada en sólo 60dB debido a su proximidad a la unidad de registro. Teniendo esto en cuenta, se puede deducir que la estación UNIP es la más ruidosa (en términos de desviación estándar) de la red. Esto es lógico, pues esta estación se encuentra ubicada en la propia Universidad de Alicante y por tanto está muy contaminada por el ruido cultural. Respecto a las otras

¹ El estudio del ruido no se ha realizado para las estaciones digitales debido a que éstas llevan muy poco tiempo operativas y no se dispone de demasiados registros como para realizar un buen estudio estadístico.

² El algoritmo de registro guarda varios segundos previos al momento de detección de la primera llegada.

³ Estos niveles están tomados sobre un rango dinámico de 12 bits (± 2048 niveles).

tres estaciones, MAIG es la que presenta el menor nivel de ruido, mientras que CREV y PUJA están en niveles similares. Estas estaciones se encuentran ubicadas en pozos superficiales situados en zonas bastante aisladas de la actividad humana.

Con objeto de mostrar la evolución de las propiedades estadísticas del ruido a lo largo de estos cinco años, se han agrupado los datos por años y se han representado los valores medios de la media y la desviación estándar de la señales de ruido (figuras 2.5-2.8). En estas figuras también se representa mediante una línea roja el promedio global asociado al conjunto de todos los años.

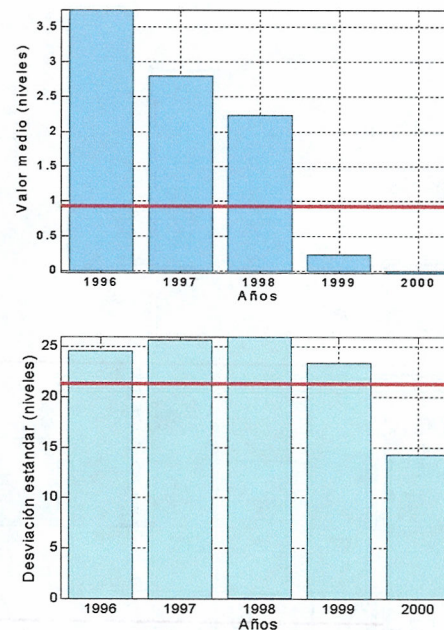


Figura 2.5 Ruido asociado a la estación MAIG.

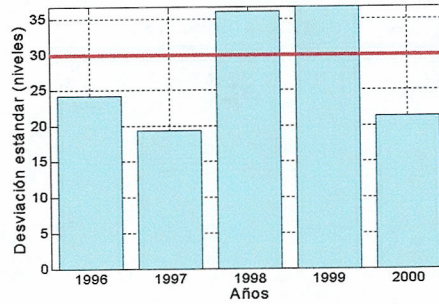
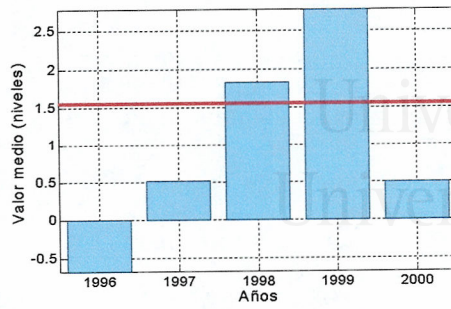


Figura 2.6 Ruido asociado a la estación CREV.

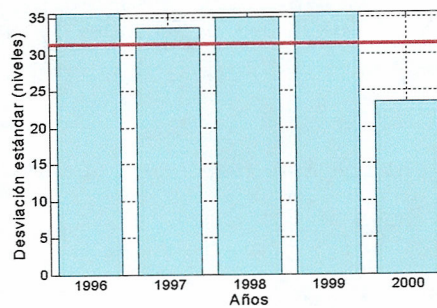
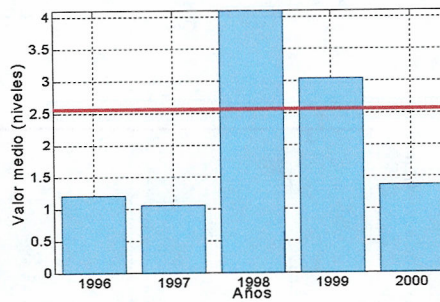


Figura 2.7 Ruido asociado a la estación PUJA.

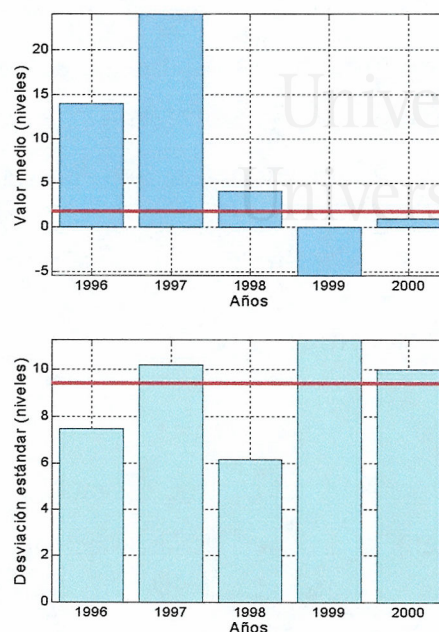


Figura 2.8 Ruido asociado a la estación UNIP.

Los datos asociados a los años 1996 y 1997 pueden inducir a valoraciones algo erróneas debido a que no se dispone de muchos registros de estos años. Esto sin embargo no altera en demasía los resultados que se dan como media y desviación estándar global.

2.6 La respuesta instrumental.

Uno de los problemas específicos de la sismología de observatorio consiste en la obtención de la señal sísmica a su llegada al sensor, es decir, la representación del movimiento del suelo antes de ser modificado por el conjunto de sistemas que conforman el proceso de adquisición y proceso.

Sin embargo, la señal de la que se dispone, la señal registrada, ya está modificada por todos estos sistemas. Con el fin de poder ir hacia atrás y anular los efectos introducidos por cada uno de estos equipos, es necesario previamente conocer cuales son estos equipos y cual es su respuesta al impulso.

2.6.1 La red analógica.

Esta red está integrada por cuatro estaciones analógicas, un sistema de comunicaciones que enlaza cada una de las estaciones con la unidad de registro, una tarjeta de adquisición incluida en un PC para registrar y almacenar de manera temporal los eventos y un PC central que se encarga, mediante el software apropiado (Jáuregui,1997), del almacenamiento y análisis de los registros obtenidos. En la figura 2.9 se muestra de forma esquemática la composición de esta red.

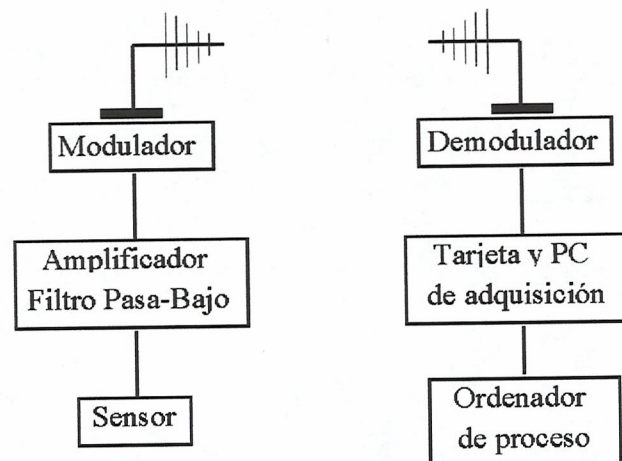


Figura 2.9 Diagrama de bloques de la red analógica.

A continuación se describen las características más importantes de cada uno de estos bloques de la red.

Sensor Mark L4-C:

Las estaciones constan de un sensor de componente vertical introducido en un nicho excavado en la roca. La armadura de éste está fijada al suelo con yeso y el emplazamiento está cubierto con materiales sueltos.

Todos los sensores están equipados con una bobina de calibración a través de la cual se puede hacer circular una determinada corriente. El efecto de esta corriente sobre el sensor es equivalente al efecto que produciría una determinada aceleración del suelo. Ambas magnitudes están relacionadas por lo que se conoce como constante de calibración. El valor de esta constante es propio de cada sensor y es suministrado por el fabricante junto con otro tipo de características estables del mismo (ver tabla 2.3).

Sistema Modulador-Demodulador:

La tensión generada por el sensor es amplificada, filtrada y modulada en frecuencia por el equipo emisor sobre una frecuencia intermedia central de 2380 ± 2 Hz con desviaciones máximas de ± 125 Hz. Esta señal intermedia es modulada a una frecuencia de VHF o UHF (dependiendo de la estación) y transmitida a la URSPA. En el caso de la estación UNIP los datos son transmitidos directamente a través de cable.

En la unidad de registro, cada uno de los canales analógicos de comunicaciones va a parar a un receptor de banda estrecha de VHF (o UHF) que se encarga de realizar el proceso de demodulación, obteniendo la conversión continua frecuencia-tensión. La señal obtenida es filtrada con un filtro Butterworth de tercer orden con una frecuencia de corte de 25 Hz con el fin eliminar el ruido de alta frecuencia.

El conjunto global, modulador-demodulador, presenta un rango dinámico de 60 dB para frecuencias inferiores a 30 Hz y una salida de ± 2500 mV (según los

datos proporcionados por el fabricante). Esto nos da una sensibilidad de 5 mV, para un desplazamiento en frecuencia de 0.25 Hz. Además esta sensibilidad es mayor que el máximo nivel de ruido generado por el propio equipo (1mV) con lo cual nos aseguramos la prácticamente ausencia de ruido electrónico.

Tarjeta de adquisición:

En la unidad de registro, la señal demodulada es enviada a una tarjeta de adquisición que se encarga de realizar la conversión analógico-digital (A/D) y almacenar los datos en un PC.

<i>Código</i>	<i>MAIG</i>	<i>CREV</i>	<i>PUJA</i>	<i>UNIP</i>
<i>Sensor</i>	Mark L4-C	Mark L4-C	Mark L4-C	Mark L4-C
<i>Nº de serie</i>	8536	8537	9775	9773
<i>Latitud</i>	38°31'30"	38°16'45"	37°59'29"	38°23'21"
<i>Longitud</i>	00°39'45"	00°51'00"	00°56'05"	00°30'42"
<i>Ganancia</i>	66 dB	66 dB	66 dB	42 dB
<i>Previo</i>	x4	x4	x4	x8
<i>Total</i>	78 dB	78 dB	78 dB	60 dB
<i>Rb (bobina)</i>	5560 Ω	5350 Ω	5250 Ω	5325 Ω
<i>Ra (shunt)</i>	9930 Ω	8880 Ω	9930 Ω	9930 Ω
<i>Rcal</i>	7.3 Ω	6.5 Ω	7.1 Ω	6.5 Ω
<i>Ccal</i>	0.491 N/A	0.452 N/A	0.384 N/A	0.391N/A
<i>h₀</i>	0.28	0.266	0.292	0.303
<i>Masa</i>	969.0 g	972.5 g	968.0 g	967.3
<i>G (V· s/m)</i>	271.7	263.8	276.8	279.9
<i>f₀</i>	0.976 Hz	0.959 Hz	0.970 Hz	0.960 Hz
<i>h</i>	0.68	0.68	0.72	0.74

Tabla 2.3 Características técnicas de las estaciones de la red analógica.

El conversor A/D admite entradas de hasta ± 10 V y presenta un rango dinámico de 12 bits (4096 niveles). Esto nos proporciona una sensibilidad de 4.88 mV por nivel. Con el fin de aprovechar todo el margen dinámico del conversor (± 10 V), la señal de salida del demodulador (± 2.5 V) es amplificada. Está función

es realizada por la propia tarjeta, la cual lleva incorporada un preamplificador controlable por software para cada uno de los canales.

El programa XRTP (incluido en el software de IASPEI) controla el funcionamiento de la tarjeta y se encarga de almacenar los ficheros de datos en el propio PC local.

El tiempo de llegada de cada uno de los eventos es asignado a través del reloj interno del propio PC de adquisición. Con objeto de ajustar este tiempo con el patrón de tiempo UTC se incorpora una señal analógica más, que consiste de un pulso por minuto sincronizado con el pulso por segundo generado por un receptor de señales GPS. Esta señal es digitalizada junto con las procedentes de las estaciones analógicas y permite la corrección del tiempo de llegada de la primera muestra.

Ordenador de proceso:

Por último los ficheros de datos registrados en el PC de adquisición son copiados a través de una red de área local (LAN) a un PC más potente y con mucha más capacidad, que se encarga del almacenamiento y posterior análisis de los eventos registrados.

Como software de análisis se utiliza el realizado por Jáuregui (1997). Este software funciona bajo entorno Matlab, lo cual permite, de una modo muy fácil, la continua incorporación de nuevas herramientas de procesado de la señal.

Después de todo este periplo, la señal registrada no se parece en nada a la señal sísmica que inicialmente llegó al sensor. El propio sensor, junto con el resto de equipos (amplificadores, modulador-demodulador, filtros, etc.) presentan una determinada respuesta instrumental que distorsiona la señal de interés. En la tesis de Jáuregui (1997) se realiza un completo estudio de la función de transferencia asociada a cada uno de los elementos por los que pasa la señal, proporcionando una función de transferencia global que nos relaciona la señal registrada (expresada en niveles) con la señal sísmica de interés (expresada en metros).

$$H(s) = \frac{K_a s^3}{(s^5 + 527s^4 + 140306s^3 + 219570094s^2 + 2016045417s + 93608369127) \cdot (s^2 - 2h\omega_0 s + \omega_0^2)} \quad (2.1)$$

Donde h y ω_0 son parámetros característicos de cada sensor (ver tabla 2.3) y K_a es una constante que depende de la estación. En concreto se tiene $K_a=1638400$ niveles/m para las estaciones MAIG, CREV, y PUJA, y $K_a=204800$ niveles/m para la estación UNIP.

En la figura 2.10 se muestra un ejemplo gráfico de esta función de transferencia para la estación MAIG.

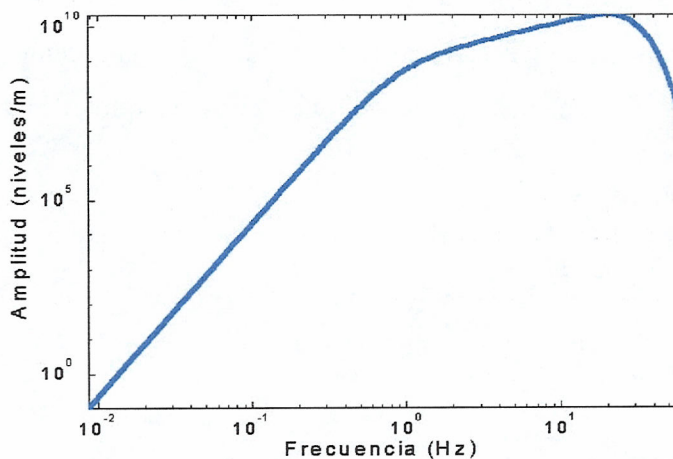


Figura 2.10 *Función de transferencia en desplazamiento de la estación MAIG.*

2.6.2 La red digital.

Esta red está compuesta por dos estaciones digitales que, in situ, se encargan de todo el proceso de adquisición, detección y registro. Estas estaciones están comunicadas

via radio con la unidad central de registro, desde donde en cualquier momento se pueden obtener los datos recogidos por cada estación.

En la figura 2.11 se muestran cada uno de los equipos que intervienen en el proceso de adquisición y registro de los datos. A continuación se detallan los puntos más característicos de cada uno de estos equipos.

Sensor:

Tipo Mark-L4-3D. Es un sensor triaxial con características similares a las explicadas para los sensores de la red analógica (ver tabla 2.4).

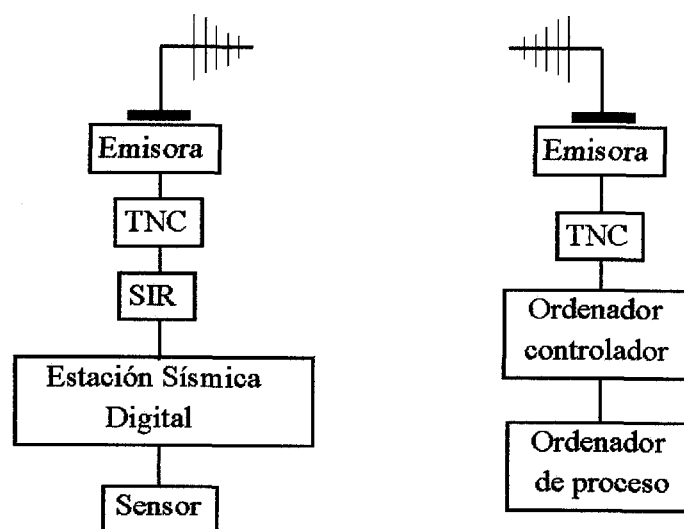


Figura 2.11 Diagrama de bloques de la red digital.

Estación digital:

La estación sísmica digital utilizada es la IDS-3602A (o IDS-16) que admite como sensores tanto acelerógrafos como transductores de velocidad verticales o triaxiales. La estación se puede dividir básicamente en cuatro módulos.

Primer módulo: tarjeta analógica que se encarga de los procesos de amplificación, filtrado, y conversión A/D. La resolución de este conversor es de 16 bits para un rango de entrada de ± 2.5 V.

Segundo módulo: tarjeta digital con un microprocesador, reloj interno y una memoria CMOS RAM para el almacenamiento de los parámetros de inicialización y los datos. La deriva del reloj interno es corregida cada tres horas por la hora UTC que es suministrada regularmente por un receptor GPS.

Tercer módulo: contiene los circuitos necesarios para la alimentación interna, calibración del sensor, conexión de resistencias de amortiguamiento, un preamplificador opcional para la conexión con sensores de velocidad y conectores para las resistencias de balance del preamplificador.

Cuarto módulo: interface PCMCIA con alojamientos para una tarjeta de memoria de 4 a 32 megabytes.

Sistema informático remoto (SIR) (Rosa, 1997):

Este dispositivo es un sistema de control local que supervisa la estación digital, envía de forma automática los eventos recogidos a la unidad de registro y permite la actuación remota, sobre los elementos de la estación de campo, desde la consola ubicada en la unidad de registro de la red.

El SIR dispone de dos puertos series. Por el primero se comunica con la estación sísmica, por lo que incorpora su protocolo de enlace específico, así como todas aquellas funciones que puedan realizarse con ésta (conexión, petición de estado, solicitud de fichero de datos, parametrización, etc.). Por el otro puerto serie, y a través de la red de comunicaciones (TNC's y emisoras), enlaza con el ordenador controlador situado en la unidad central de registro.

Controlador de modo terminal (TNC):

Este equipo se encarga de convertir las señales digitales, que provienen del SIR o del ordenador controlador, en señales analógicas que suministra a la emisora de radio para su envío. También realiza el proceso inverso, transformando las señales analógicas

que recibe de la emisora en información digital reconocible por los sistemas informáticos. La comunicación entre TNC's se realiza a través del protocolo AX25 que incorpora corrección de errores a nivel de enlace y resuelve las posibles colisiones de información que puedan producirse en el medio.

Emisora de radio:

Trabaja en la banda de UHF y permite una velocidad de transmisión de datos entre los sistemas conectados a la misma de 9600 bps.

Ordenador controlador:

En la unidad central de registro, un PC se encarga de gestionar la comunicación con las estaciones de campo para el intercambio de mensajes de control y datos. Para ello, dispone de un software (Rosa, 1997) que facilita al usuario tanto el control de la red como la adquisición de los ficheros de datos.

Los modos de trabajo que contempla este software son tres. En el modo normal, la SIR interroga continuamente a la estación sísmica y cuando ésta tiene un evento se envía automáticamente a la unidad central de registro. En modo transparente, el usuario dispone de una serie de comandos que le permiten actuar con la estación, emulando una conexión directa con la misma sin necesidad de desplazarse a su lugar de ubicación. De esta forma se puede obtener su estado, su fichero de diagnóstico, trasladar ficheros de datos, apagarla y encenderla, etc. Por último, en el modo de parametrización se puede cambiar la configuración de la estación, generar ficheros de calibración, actualizar el reloj interno, limpiar la memoria, etc.

Ordenador de proceso:

Este ordenador es común para la red analógica y la red digital. Los datos adquiridos por el ordenador controlador son enviados a través de la red local al ordenador de proceso, el cual se encarga del almacenamiento y posterior análisis de las señales registradas. El software utilizado para este análisis es el mismo que el indicado en el apartado 2.6.1.

Código	CRE-V	CRE-E	CRE-N	ROM-V	ROM-E	ROM-N
Nº de serie	6883	6884	6885	7726	7727	7728
Latitud	38°16'45"	38°16'45"	38°16'45"	38°23'31"	38°23'31"	38°23'31"
Longitud	00°51'00"	00°51'00"	00°51'00"	00°55'09"	00°55'09"	00°55'09"
ganancia	x4	x4	x4	x4	x4	x4
previo	x32	x32	x32	x32	x32	x32
total	42 dB	42 dB	42 dB	42 dB	42 dB	42 dB
Rb	5435 Ω	5522 Ω	5517 Ω	5428 Ω	5446 Ω	5428 Ω
Ra	9930 Ω	9930 Ω	9930 Ω	9930 Ω	9930 Ω	9930 Ω
Rcal	19.4 Ω	19.4 Ω	19.4 Ω	19.4 Ω	19.4 Ω	19.4 Ω
Ccal	0.408 N/m	0.421 N/m	0.429 N/m	0.439 N/m	0.440 N/m	0.433 N/m
h₀	0.290	0.271	0.302	0.298	0.266	0.274
Masa	964.2 g	958.0 g	965.1 g	956.8 g	961.7 g	963.4 g
G (V· s/m)	281.5	282.3	281.5	280.7	279.5	275.9
f₀	0.970 Hz	1.01 Hz	0.980 Hz	0.970 Hz	1.00 Hz	0.970 Hz
h	0.73	0.69	0.73	0.74	0.69	0.69

Tabla 2.4 Características técnicas de las estaciones de la red digital.

En este caso, los sistemas de adquisición y comunicación son diferentes a los utilizados por la red analógica, con lo cual la distorsión introducida en la señal sísmica de interés también será diferente. Jáuregui (1997) obtiene la función de transferencia asociada a cada uno de los elementos por los que pasa la señal, proporcionando una función de transferencia global que nos relaciona la señal registrada con la señal sísmica de interés.

$$H(s) = \frac{K_a s^3}{(s^5 + 1017s^4 + 516479s^3 + 162103935s^2 + 31444679828s + 3050902602107) \cdot (s^2 - 2h\omega_0s + \omega_0^2)}$$

(2.2)

Donde h y ω_0 son parámetros característicos de cada sensor (ver tabla 2.4) y K_a es una constante cuyo valor de ganancia se puede regular mediante software y que actualmente está configurada con un valor igual a 1677722 niveles/m.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

LA TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELET

3.1 Introducción.

El análisis de señales no estacionarias nos obliga a utilizar métodos de análisis tiempo-frecuencia, mediante los cuales se puede disponer a la vez de información temporal y espectral. Un ejemplo de este tipo de análisis es la transformada de Fourier dependiente del tiempo ('Short Time Fourier Transform', STFT), (Gabor, 1946; Allen y Rabinet, 1977). En este caso la elección de la ventana es bastante importante y supone un compromiso entre la localización de transiciones o discontinuidades (ventanas estrechas), y la detección de comportamientos de larga duración (ventanas anchas). Esto es debido a que una vez elegida la ventana, esta permanece constante para todo el análisis, con lo cual la resolución temporal (o espectral) obtenida permanece fija. Como método alternativo surge la transformada de wavelet. En este caso, la señal es analizada a diferentes escalas o resoluciones: en

una primera aproximación, la señal es vista como si fuera estacionaria, mientras que a mayores niveles de resolución o de detalle las discontinuidades de la señal comienzan a aparecer. Este estudio a varias escalas de la señal es la esencia de la transformada de wavelet.

El análisis de wavelets se realiza a través de una función prototipo llamada wavelet madre, la cual puede ser vista como un filtro paso banda. Las versiones comprimidas (alta frecuencia) de esta función wavelet proporcionan un análisis en el tiempo de gran resolución, mientras que las versiones dilatadas (baja frecuencia) proporcionan un análisis de gran resolución en el dominio de la frecuencia.

Aunque esta idea fue desarrollada de forma independiente en muchos campos de la ciencia, sólo a partir de la década de los 80 es cuando se llega a una formalización de la teoría de wavelets. Esta formalización fue iniciada con los trabajos de varios geofísicos en el análisis de señales sísmicas (Goupillaud, et al., 1984; Grossmann y Morlet, 1984). Esta teoría inicial ha sido refinada posteriormente por la comunidad matemática (Meyer, 1990; Daubechies, 1992) y por expertos en el área de procesado de la señal (Mallat, 1989; Vetterly y Herley, 1992; Vetterli y Kovacevic, 1995). En estos trabajos se puede apreciar como las wavelets, los bancos de filtros y el análisis de multiresolución convergen hacia una única teoría.

En este capítulo, se pretende mostrar de la forma más clara posible la interconexión existente entre la teoría de bancos de filtros, el análisis de multiresolución y la transformada discreta de wavelet (DWT). A partir de aquí se estudiará la transformada discreta de wavelet packet (DWPT), generalización de la anterior, que permite una descomposición tiempo-frecuencia más selectiva y que se adapta mejor a las señales objeto de estudio.

3.2 Filtros de cuadratura.

El término de filtro de cuadratura ('quadrature filter', QF) se utiliza para denotar un operador que realiza las operaciones de convolución y diezmado. Si la secuencia del filtro es finita entonces se tiene un filtro FIR, mientras que en caso contrario se trata de un filtro IIR. Un filtro de cuadratura no es invertible debido a la pérdida de información asociada con la etapa de diezmado. Sin embargo, es posible encontrar dos filtros complementarios, de forma que cada uno de ellos contenga la información perdida por el otro. Cada uno de estos filtros complementarios tiene asociado un filtro adjunto. Mientras que la pareja de filtros complementarios permite descomponer una secuencia dada en diferentes partes, la pareja de filtros adjuntos permite volver a reconstruir la secuencia inicial.

En el caso particular de que la transformada de Fourier de estos filtros presente simetría respecto a la frecuencia normalizada $f = 1/2$ entonces se hablará de filtros especulares ('quadrature mirror filters', QMF) (Esteban y Galand, 1977).

Dada una secuencia de entrada $x = \{x(n) : n \in \mathbb{Z}\}$ y un filtro $h = \{h(n) : n \in \mathbb{Z}\}$ absolutamente sumable, se define el operador de convolución-diezmado H asociado a dicho filtro como:

$$H x(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) x(2n - k), \quad n \in \mathbb{Z} \quad (3.1)$$

De forma similar el operador adjunto vendrá dado por:

$$H^* x(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \bar{h}(2n - k) x(k), \quad n \in \mathbb{Z} \quad (3.2)$$

Donde $H^* = h_{nk}^*$ es el adjunto o traspuesto conjugado de H , definido como

$h_{nk}^* \stackrel{\text{def}}{=} \bar{h}_{kn}$, y \bar{h}_{kn} es simplemente el complejo conjugado de h_{kn} .



Figura 3.1 Operador convolución – diezmando por 2 .

3.2.1 QF ortogonales.

Una pareja de operadores complementarios, H y G , forman una pareja de filtros en cuadratura ortogonales si satisfacen las siguientes condiciones:

1. Autodualidad:

$$H H^* = G G^* = I \quad (3.3)$$

2. Independencia:

$$H G^* = G H^* = 0 \quad (3.4)$$

3. Reconstrucción exacta:

$$H^* H + G^* G = I \quad (3.5)$$

4. Normalización:

$$H \hat{1} = \sqrt{2} \hat{1}, \quad \text{donde } \hat{1} = \{\dots, 1, 1, 1, \dots\} \quad (3.6)$$

Si H y G son los operadores asociados a las secuencias (filtros) h y g , entonces las condiciones de autodualidad e independencia son equivalentes a las siguientes ecuaciones:

$$\sum_k h(k) \bar{h}(k+2n) = \delta(n) = \sum_k g(k) \bar{g}(k+2n) \quad (3.7)$$

$$\sum_k g(k) \bar{h}(k+2n) = 0 = \sum_k h(k) \bar{g}(k+2n) \quad (3.8)$$

En estas definiciones, los operadores H y G están asociados a un filtro pasa-baja y a un filtro pasa alta respectivamente.

Dada una secuencia $h(n)$ que satisfaga la ecuación (3.7), es posible generar un filtro complementario (o conjugado) $g(n)$ que satisfaga el resto de condiciones de los QF ortogonales seleccionando sus coeficientes a través de la siguiente relación (Daubechies, 1988):

$$g(n) = (-1)^n h(2M+1-n), \quad \forall n, M \in \mathbb{Z} \quad (3.9)$$

En el caso de utilizar un QF ortogonal, la señal original es descompuesta en dos partes sin ningún tipo de redundancia.

3.2.2 QF biortogonales.

La propiedad de ortogonalidad impone fuertes limitaciones en la construcción de bancos de filtros. La generalización a filtros biortogonales permite una mayor flexibilidad. Estos filtros se caracterizan por cumplir las siguientes propiedades:

1. Dualidad:

$$H' H^* = G' G^* = I = H H'^* = G G'^* \quad (3.10)$$

2. Independencia:

$$G' H^* = H' G^* = 0 = G H'^* = H G'^* \quad (3.11)$$

3. Reconstrucción exacta:

$$H^* H' + G^* G' = I = H'^* H + G'^* G \quad (3.12)$$

4. Normalización:

$$H \hat{1} = H' \hat{1} = \sqrt{2} \hat{1} \text{ y } G \hat{1} = G' \hat{1} = \hat{0}, \text{ donde } \hat{1} = \{..,1,1,1,.. \} \text{ y } \hat{0} = \{..,0,0,0,.. \} \quad (3.13)$$

Las dos primeras condiciones pueden ser expresadas en términos de las secuencias de los filtros h, h', g, g' asociados a los operadores H, H', G, G' :

$$\sum_k h'(k) \bar{h}(k + 2n) = \delta(n) = \sum_k g'(k) \bar{g}(k + 2n) \quad (3.14)$$

$$\sum_k g'(k) \bar{h}(k + 2n) = 0 = \sum_k h'(k) \bar{g}(k + 2n) \quad (3.15)$$

La condición de normalización permite decir que H y H' son filtros paso bajo, mientras que G y G' son filtros paso alto. Además, esta condición se puede describir de la siguiente manera:

$$\sum_{k \in Z} h(k) = \sqrt{2} \quad \sum_{k \in Z} g(2k) = - \sum_{k \in Z} g(2k + 1) \quad (3.16)$$

$$\sum_{k \in Z} h'(k) = \sqrt{2} \quad \sum_{k \in Z} g'(2k) = - \sum_{k \in Z} g'(2k + 1)$$

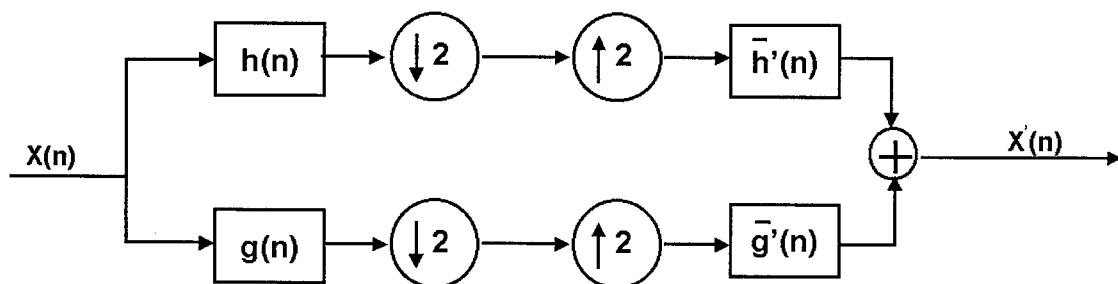


Figura 3.2 Banco de filtros biortogonal.

De forma parecida a como ocurría en el caso de filtros ortogonales, conocidos los filtros h y h' , se pueden obtener los filtros g y g' a través de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} g(n) &= (-1)^n \bar{h}'(2M+1-n) \quad \forall n, M \in \mathbb{Z} \\ g'(n) &= (-1)^n \bar{h}(2M+1-n) \quad \forall n, M \in \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.3 Wavelets y análisis de multiresolución.

La idea de análisis de multiresolución ('multiresolution analysis', MRA) ha sido usada en muchas áreas. Intuitivamente consiste en representar una señal (o imagen) a diferentes resoluciones¹ formando con todas ellas una estructura piramidal donde se va desde una resolución inicial pequeña hacia una resolución cada vez mayor.

La conexión entre el análisis de multiresolución y la transformada continua de wavelets fue formulada por Mallat (1989) y Meyer (1990). En este caso particular, desde el momento en el que las señales con las que se va a trabajar son señales discretas, el estudio se ocupa de la DWT, la cual también da lugar a un análisis de multiresolución discreto.

Un análisis de multiresolución de $L^2(\mathcal{R})$ se define como una secuencia de subespacios cerrados $\sigma^j A_0$ de $L^2(\mathcal{R})$, $j \in \mathbb{Z}$ con las siguientes propiedades:

¹ En el caso de una señal de una dimensión se distingue entre resolución temporal y resolución en frecuencia. Una señal dada $\{x(n): n=0, \dots, N\}$ presenta una determinada resolución en el dominio del tiempo, la cual dependerá del periodo de muestreo elegido, pero ninguna resolución espectral. Mientras, su transformada discreta de Fourier, $X(f)$, presenta una determinada resolución en frecuencia a cambio de ninguna resolución temporal. El principio de incertidumbre de Heisenberg-Gabor dice que no se puede tener a la vez gran resolución temporal y gran resolución en frecuencia.

1.- Propiedad de inclusión:

$$\sigma^{j+1} \Lambda_0 \subset \sigma^j \Lambda_0 \subset L^2 \quad \forall j \in \mathbb{Z} \quad (3.18)$$

2.- Propiedad de dilatación:

$$x(2n) \in \sigma^j \Lambda_0 \Leftrightarrow x(n) \in \sigma^{j+1} \Lambda_0 \quad (3.19)$$

3.- Propiedad de decrecimiento:

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \sigma^j \Lambda_0 = 0, \quad \bigcap_{j > N} \sigma^j \Lambda_0 = \{0\} \quad \forall N \quad (3.20)$$

4.- Propiedad de crecimiento:

$$\lim_{j \rightarrow -\infty} \sigma^j \Lambda_0 = L^2, \quad \bigcup_{j < N} \sigma^j \Lambda_0 = L^2 \quad \forall N \quad (3.21)$$

5.- Propiedad de función generador:

Existe una función $\psi_0(n) \in \sigma^0 \Lambda_0$ cuyo conjunto de traslaciones $\{\psi_0(n-k) : k \in \mathbb{Z}\}$ forma una base de Riesz para $\sigma^0 \Lambda_0$.

Utilizando la propiedad de dilatación repetidamente se puede llegar a la conclusión que el conjunto $\psi_{j,0,k}(n) = \{\psi_0(2^{-j}n - k) : k \in \mathbb{Z}\}$ es una base de Riesz para $\sigma^j \Lambda_0$. Sin pérdida de generalidad se puede escoger una base ortonormal, $\|\psi_0(n)\| = 1$, como base de Riesz para $\sigma^0 \Lambda_0$, con lo cual se tendrá un análisis de multiresolución ortogonal.

En la nomenclatura anterior, la función $\psi_0(n) \equiv \psi_{0,0,0}(n)$ se conoce como función de escalado y es comúnmente identificada en las principales referencias (Daubechies, 1992; Wickerhauser, 1994) con el símbolo $\phi(n)$. No obstante, pensando en una nomenclatura más global que sea capaz de abarcar análisis más generales, nos referiremos a las diferentes funciones base con la siguiente nomenclatura: $\psi_{j,r,k}(n)$, donde j es el índice de escala; r es el índice de

frecuencia, que en análisis de wavelets sólo tomará los valores 0 y 1; y k es el índice de posición (o traslación).

A partir de las propiedades de inclusión, dilatación y función generador se deduce que existe una secuencia $\{h(k)\} \in L^2(\mathbb{Z})$ que relaciona las funciones de escalado entre dos subespacios consecutivos de la siguiente manera:

$$\psi_{j,0,0}(n) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) \psi_{j-1,0,k}(n) \stackrel{\text{def}}{=} H \psi_{j-1,0,0}(n) \quad (3.22)$$

Esta última ecuación se conoce como ecuación de refinamiento, ecuación de dilatación, o ecuación diferencia de dos escalas. En esta ecuación se introduce también el operador lineal H asociado con la secuencia de coeficientes $\{h(k)\}$.

Ahora se define el subespacio complementario a $\sigma^j \mathcal{A}_0$ en $\sigma^{j-1} \mathcal{A}_0$ como $\sigma^j \mathcal{A}_1$, de forma que:

$$\sigma^{j-1} \mathcal{A}_0 = \sigma^j \mathcal{A}_0 + \sigma^j \mathcal{A}_1 \quad (3.23)$$

donde $\sigma^j \mathcal{A}_1$ es llamado subespacio de wavelet.

Teniendo esto en cuenta, la propiedad de crecimiento se puede expresar de forma equivalente como:

$$L^2 = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sigma^j \mathcal{A}_1 \quad (3.24)$$

A igual que ocurría con los subespacios $\sigma^0 \mathcal{A}_0$, el subespacio $\sigma^1 \mathcal{A}_1$ tendrá una base de Riesz generada por un conjunto de traslaciones de una función $\psi_1(n)$, $\{\psi_1(n-k) : k \in \mathbb{Z}\}$, donde esta función es conocida como wavelet madre. Aplicando la propiedad de dilatación repetidamente a la función wavelet se llega a la conclusión de que el conjunto $\psi_{j,1,k} = \{\psi_1(2^{-j}n-k) : k \in \mathbb{Z}\}$ es una base de Riesz

para $\sigma^j \mathcal{A}_1$. Además teniendo en cuenta (3.24) se puede generalizar más y decir que el conjunto $\{2^{-j/2} \psi_1(2^{-j}n - k) : j, k \in \mathbb{Z}\}$ forma una base de Riesz para L^2 .

Como la wavelet $\psi_{j,1,k}$ es un elemento del subespacio $\sigma^j \mathcal{A}_1$, que a su vez está incluido en el subespacio $\sigma^{j-1} \mathcal{A}_0$, entonces existe una secuencia $\{g(k)\} \in L^2(\mathbb{Z})$ tal que:

$$\psi_{j,1,0}(n) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) \psi_{j-1,0,k}(n) \stackrel{\text{def}}{=} G \psi_{j-1,0,0}(n) \quad (3.25)$$

A esta última ecuación se le conoce como ecuación de wavelet. Y G se define como un operador lineal asociado a los coeficientes $g(k)$.

Si la función wavelet utilizada es tal que proporciona una base de wavelet ortonormal para L^2 entonces se tendrá un MRA ortogonal. En este caso la descomposición $\sigma^{j-1} \mathcal{A}_0 = \sigma^j \mathcal{A}_0 \oplus \sigma^j \mathcal{A}_1$ es una suma directa² ortogonal y la ecuación (3.24) se puede expresar como:

$$L^2 = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} \sigma^j \mathcal{A}_1 \quad (3.26)$$

Si se compara la ecuación (3.1) con las ecuaciones (3.22) y (3.25) se puede observar como el análisis de multiresolución para secuencias discretas está relacionado con la descomposición mediante bancos de filtros especulares. En ambos casos el operador utilizado es un operador lineal que realiza las funciones de convolución y diezmado.

² Definición (Burgos, 1983): Dado un espacio vectorial V y varios subespacios suyos, U_1, U_2, \dots, U_n , se dice que la suma de éstos es suma directa y se indica como $U_1 \oplus U_2 \oplus \dots \oplus U_n$ si todo vector de dicha suma puede expresarse de manera única como suma de vectores de los espacios sumandos. Si la suma de estos subespacios es directa entonces se dice que son subespacios independientes.

3.4 Wavelets y bancos de filtros.

A continuación vamos a ver como la DWT puede ser calculada usando un banco de filtros.

Supongamos que se tiene una señal discreta en el tiempo $x = \{x(n) : n \in \mathbb{Z}\}$ perteneciente al subespacio $\sigma^{j-1} \mathcal{A}_0$ de $L^2(\mathbb{R})$, $j \in \mathbb{Z}$. En este caso existe una función $\psi_0(n) \in \sigma^0 \mathcal{A}_0$ a partir de la cual se puede obtener una base de Riesz para $\sigma^j \mathcal{A}_0 \subset \sigma^{j-1} \mathcal{A}_0$ formada por un conjunto de funciones trasladadas y escaladas, $\psi_{j,0,k}(n)$. Si ahora denotamos por $\lambda_{j,0}(k)$ los coeficientes de expansión de la secuencia $x(n)$ en el subespacio $\sigma^j \mathcal{A}_0$ entonces se tendrá la siguiente relación:

$$\lambda_{j,0}(k) = \langle x, \psi_{j,0,k} \rangle = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \psi_{j,0,k}(n) \bar{x}(n) \quad (3.27)$$

Substituyendo en la ecuación anterior el valor de $\psi_{j,0,k}(n)$ por el valor obtenido en la ecuación (3.22), donde se relacionan las funciones de escalado de dos subespacios consecutivos, se obtiene:

$$\begin{aligned} \lambda_{j,0}(k) &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} (H \psi_{j-1,0,k}(n)) \bar{x}(n) \\ \lambda_{j,0}(k) &= H \sum_{n \in \mathbb{Z}} \psi_{j-1,0,k}(n) \bar{x}(n) \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\lambda_{j,0}(k) = H \lambda_{j-1,0}(k)$$

A los coeficientes $\lambda_{j,0}(n)$ se les denomina coeficientes de escalado o de aproximación.

La secuencia $x(n)$ también podrá ser expandida al subespacio $\sigma^j \mathcal{A}_1 \subset \sigma^{j-1} \mathcal{A}_0$ haciendo uso de una base $\psi_{j,1,k}(n)$, formada por funciones trasladadas y escaladas de una función wavelet madre.

$$\lambda_{j,1}(k) = \langle x, \psi_{j,1,k} \rangle = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \psi_{j,1,k}(n) \bar{x}(n) \quad (3.29)$$

Sustituyendo la función base $\psi_{j,1,k}(n)$ por la ecuación (3.25) se puede llegar a una relación similar a la obtenida en (3.28).

$$\begin{aligned} \lambda_{j,1}(k) &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} (G \psi_{j-1,0,k}(n)) \bar{x}(n) \\ \lambda_{j,1}(k) &= G \sum_{n \in \mathbb{Z}} \psi_{j-1,0,k}(n) \bar{x}(n) \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\lambda_{j,1}(k) = G \lambda_{j-1,0}(k)$$

En este caso los coeficientes obtenidos se conocen como coeficientes de wavelets o coeficientes de detalle.

En la figura 3.3 se muestra el esquema de filtrado equivalente a las ecuaciones (3.28) y (3.30). Si se conocen los coeficientes de escalado en un subespacio $\sigma^{j-1} \Lambda_0$, entonces se pueden obtener los coeficientes de escalado y de wavelets correspondientes a escalas mayores $\sigma^j \Lambda_0$ con sólo aplicar las ecuaciones (3.28) y (3.30).

Por otro lado, el proceso inverso también es posible. Conocidos los coeficientes de escalado y de wavelets de un subespacio $\sigma^j \Lambda_0$, es posible conocer los coeficientes de escalado asociados al subespacio $\sigma^{j-1} \Lambda_0$.

$$\lambda_{j-1,0}(n) = H^* \lambda_{j,0}(n) + G^* \lambda_{j,1}(n) \quad (3.31)$$

En ese caso se tiene una estructura como la mostrada en la figura 3.4 y el proceso es llamado transformada discreta inversa de wavelet ('inverse discrete wavelet transform', IDWT).

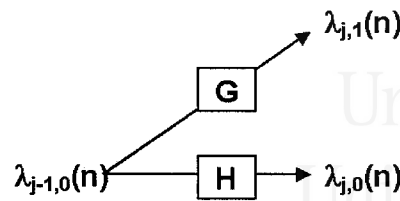


Figura 3.3 Esquema de descomposición.

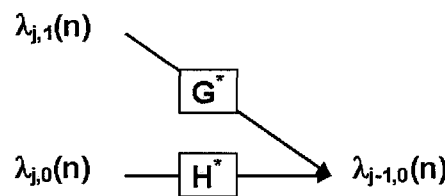


Figura 3.4 Esquema de reconstrucción.

La función wavelet madre y la función de escalado determinan los filtros paso bajo y paso alto asociados, H y G , y por supuesto también los filtros inversos. La señal a analizar, $x(n)$ se identifica directamente con los coeficientes $\lambda_{0,0}(n)$ correspondientes al subespacio $\sigma^0 A_0$. A partir de aquí se aplica de forma iterativa las ecuaciones (3.28) y (3.30) y se van obteniendo diferentes representaciones de la señal. Por ejemplo si se aplica el banco de filtros L veces la representación de la señal pasará de ser $\lambda_{0,0}(n)$ a ser $\{\lambda_{L,0}(n), \lambda_{L,1}(n), \lambda_{L-1,1}(n), \dots, \lambda_{1,1}(n)\}$ (Ver figura 3.5).

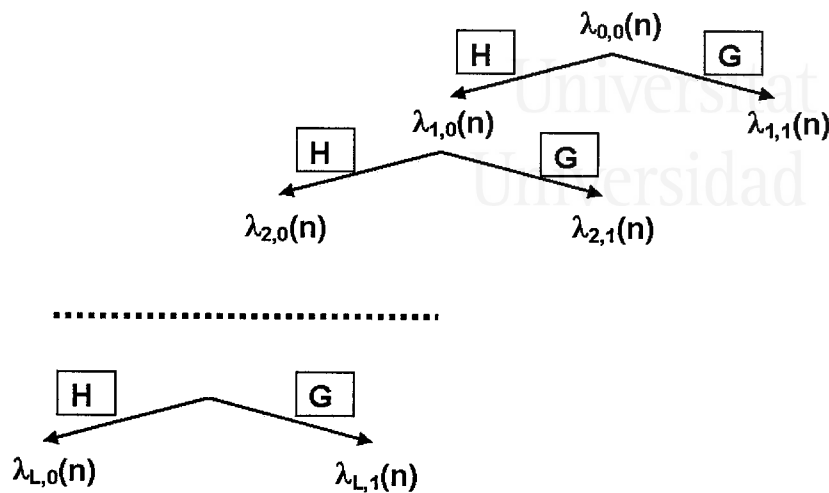


Figura 3.5 Coeficientes asociados a la DWT..

3.4.1 Codificación en subbandas.

Con estos coeficientes lo que se obtiene es una representación tiempo-frecuencia diferente a la representación de la señal original. De hecho, con $x(n)$ (o $\lambda_{0,0}(n)$) sólo se tiene información acerca de la evolución temporal de la señal, a la vez que se carece de cualquier tipo de información del espectro. En realidad, la interpretación directa de la DWT devuelve una representación tiempo-escala, donde el término escala, relacionado con el subíndice L , es inversamente proporcional a la frecuencia.

Dado que los filtros derivados de las wavelets ortogonales o biortogonales son del tipo QMF, en cada interacción se aplica un filtro pasa baja y un filtro pasa alta (con su correspondiente etapa de diezmado), de tal forma que el espectro total de la señal de entrada es dividido en dos partes iguales. De este modo, en cada etapa de la descomposición la resolución en el tiempo es dividida por dos mientras que la resolución en frecuencia aumenta el doble. En la figura 3.6 se puede observar el plano de descomposición tiempo-frecuencia. Este plano está dividido en diferentes

cajas de área constante donde la anchura está relacionada con la resolución temporal y la altura está relacionada con la resolución en frecuencia. A bajas frecuencias, la altura de las cajas es más pequeña (mejor resolución en frecuencia), mientras que la anchura es mayor (peor resolución en el tiempo).

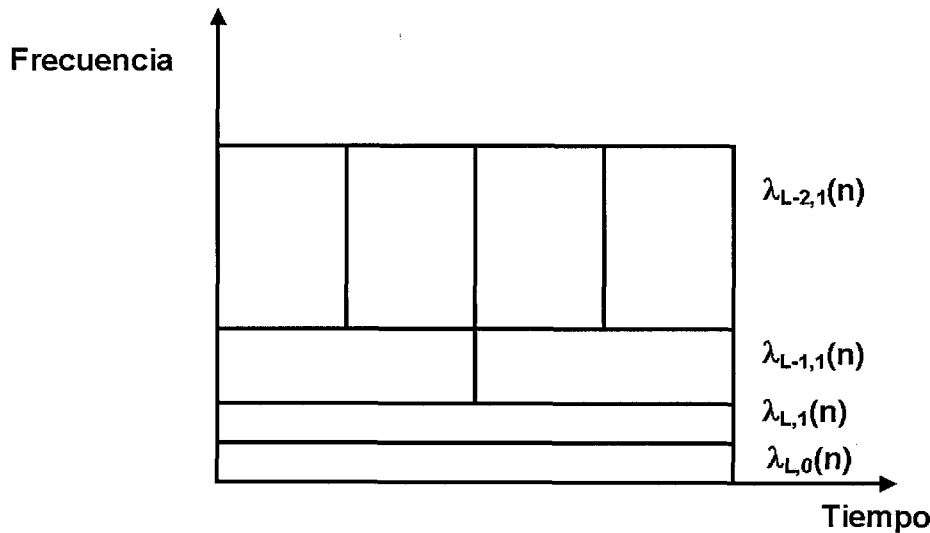


Figura 3.6 Descomposición tiempo frecuencia de la DWT.

Supongamos una señal de entrada $x(n)$ de 512 muestras, con un ancho de banda de 0 a $f_s/2$ Hz, siendo f_s la frecuencia de muestreo. Supongamos que sobre esta señal se aplica un esquema de descomposición como el indicado en la figura 3.7. En la primera etapa de la descomposición, a la señal de entrada se le aplica un filtro pasa alta y un filtro pasa baja. Después de pasar la señal por el filtro QMF pasa baja, la máxima frecuencia de la señal resultante será $f_s/4$, lo cual implica, siguiendo el criterio de Nyquist, que la mínima frecuencia de muestreo efectiva será de $f_s/2$. Esto hace que la mitad de las muestras sean redundantes y permite que se pueda reducir la frecuencia de muestreo a la mitad (diezmar por dos) sin que con ello se pierda información de la señal. En conclusión, a la salida de la primera etapa se tendrán dos

señales de 256 muestras, las cuales cubrirán un espectro de frecuencias de 0 a $f_s/4$ y de $f_s/4$ a $f_s/2$ correspondientes a las salidas de los filtros pasa baja y pasa alta, respectivamente. No obstante, el resultado de esta etapa vendrá dado por los coeficientes de wavelets, resultado del proceso pasa alta. Los coeficientes de escalado serán los que se utilicen como señal de entrada para la segunda etapa de la DWT. El proceso de filtrado y diezmado se podría continuar hasta que se llegue a una secuencia resultante de longitud igual a 2 muestras. El proceso explicado es lo que también se conoce como codificación en subbandas (ver figura 3.7).

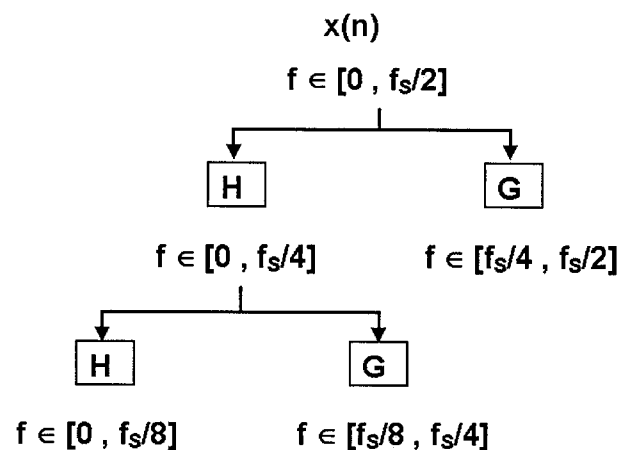


Figura 3.7 Codificación en subbandas de frecuencia..

En cada una de las etapas el filtrado paso bajo elimina la mitad superior de la banda de frecuencias, lo cual afecta a la resolución de la señal resultante, pues reduce la información disponible de la señal a la mitad. Por tanto la resolución de la señal se va reduciendo conforme se van aplicando etapas consecutivas, o de forma equivalente, conforme se va aumentando de escala. El proceso de diezmado no afecta a la resolución de la señal, pues la misma información se tiene antes y después de dicho proceso. Con el proceso de diezmado lo que se consigue es doblar en cada etapa el valor de la escala, lo cual, en términos de frecuencias, es equivalente a dividir por dos la frecuencia de muestreo efectiva. Resumiendo, se puede decir que

conforme se va aumentando de nivel, la resolución temporal se va reduciendo mientras que la resolución en frecuencias va aumentando. Esto da lugar a una descomposición tiempo-frecuencia como la indicada en la figura 3.6.

En la figura 3.8 se muestra una señal de ejemplo $x(n)$ y su representación después de aplicarle la DWT con 4 niveles, escalas o etapas de filtrado-diezmo.

3.5 Propiedades de la función wavelet.

Las propiedades más importantes de la función wavelet son la admisibilidad y la regularidad. Como se muestra en el libro de Sheng (1996) y en otros muchos anteriores, una función $\psi_1(t)$, cuyo cuadrado es integrable, satisface la condición de admisibilidad si se cumple:

$$\int \frac{|\Psi_1(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (3.32)$$

Donde $\Psi_1(\omega)$ es la transformada de Fourier de $\psi_1(t)$. En esta situación la función wavelet puede ser utilizada para analizar (o descomponer) una señal dada, y después reconstruirla sin pérdida de información. La condición de admisibilidad lleva implícito que la transformada de Fourier de $\psi(t)$ se hace nula cuando la frecuencia es cero.

$$|\Psi_1(\omega)|^2 \Big|_{\omega=0} = 0 \quad (3.33)$$

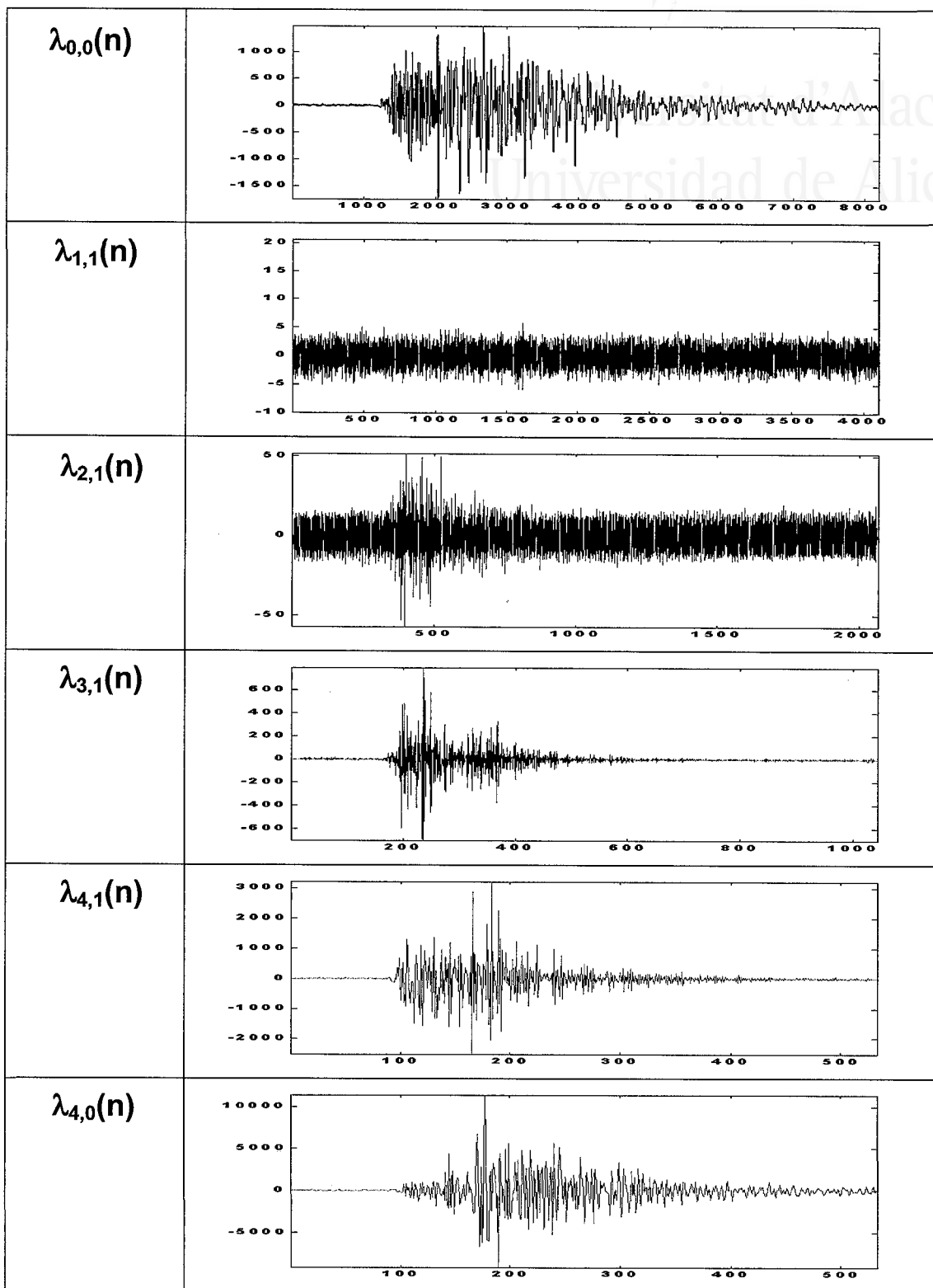


Figura 3.8 DWT ($j=4$) de un evento sísmico.

Esto significa que la wavelet debe tener un espectro pasa banda. Además un valor nulo a la frecuencia cero también significa que el valor medio de la wavelet en el dominio del tiempo debe ser cero, lo cual a su vez implica que la función debe ser oscilatoria.

$$\int \psi_1(t) dt = 0 \quad (3.34)$$

Otra propiedad importante asociada con la función wavelet es la regularidad, la cual está asociada con la pendiente de decrecimiento de los coeficientes de la DWT. La condición de regularidad establece que la función wavelet debe estar lo más concentrada posible tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Esta propiedad está relacionada con el concepto de momentos de decaimiento ('vanishing moments').

Se dice que una función wavelet tiene un momento k nulo (o de decaimiento) en un punto t_0 si se cumple la siguiente condición:

$$\int (t - t_0)^k \psi_1(t) dt = 0 \quad (3.35)$$

Además si sus primeros d momentos son nulos, entonces se dirá que $\psi_1(t)$ tiene d momentos nulos. Cuanto mayor sea el número de momentos nulos mayor será la pendiente de decrecimiento de los coeficientes de DWT, facilitando de esta forma un gran número de aplicaciones relacionadas sobre todo con el filtrado de ruido y la compresión. Una demostración de esto puede encontrarse en el libro de Wickerhauser (1994).

Otra propiedad que distingue un tipo de wavelets de otras es la ortogonalidad. Las wavelets ortogonales presentan la ventaja de que la DWT es una transformación unitaria (su adjunto es su inverso) y de que los subespacios obtenidos son ortogonales.

Además, en el caso de utilizar una familia de wavelets ortogonales se cumple que la norma L^2 de una función $x(n)$ es igual a la norma de los coeficientes de wavelets.

$$\|x\| = \sqrt{\sum_{j,r} (\lambda_{j,r})^2} \quad (3.36)$$

No obstante, esta última propiedad no es muy deseable en muchas aplicaciones prácticas, sobre todo de compresión. En el caso biortogonal esta última ecuación no se cumple, proporcionando en ciertas aplicaciones mejores resultados.

En aplicaciones de procesamiento de la señal también es importante que cumplan la propiedad de simetría. Si la función de escalado y la wavelet son simétricas entonces los filtros asociados tienen fase lineal. La ausencia de esta propiedad puede llevar a una distorsión de fase.

3.6 Wavelet packets

La transformada de wavelet es una herramienta muy útil para el análisis de señales no estacionarias, como es el caso de las señales objeto de estudio: las señales sísmicas. Sin embargo, el análisis de wavelets supone de forma intrínseca que la mayor parte de la información espectral está contenida en las bajas frecuencias y la descomposición tiempo-frecuencia llevada a cabo por la codificación en subbandas es una descomposición fija con una estructura de tipo árbol logarítmico (ver figura 3.7). Sin embargo esto no es cierto para todas las señales. La DWPT generaliza el análisis de wavelets y permite descomponer el plano tiempo-frecuencia de una manera que se adapte eficientemente al tipo de señal bajo estudio.

Fijándose en la figura 3.5, se puede observar como los filtros paso bajo y paso alto de cada etapa son aplicados siempre sobre la señal de salida del filtro paso bajo (más diezmado) de la etapa anterior. En el análisis de wavelet packets, las señales de salida de los filtros paso bajo y paso alto son ambas tomadas como señales de entrada de la siguiente etapa. Esto da como resultado una descomposición tiempo-frecuencia con una estructura arbórea completa como la que se muestra en la figura 3.9.

Matemáticamente, el análisis de wavelet packets permite descomponer el espacio $L^2(\mathfrak{R})$ en un conjunto de subespacios ortonormales $\{\sigma^j \Lambda_f\}$ con las siguientes propiedades:

$$1.- \quad \sigma^j \Lambda_f = \sigma^{j+1} \Lambda_{2f} \oplus \sigma^{j+1} \Lambda_{2f+1}$$

2.- Existe un conjunto de subespacios $\sigma^j \Lambda_f$ tales que:

$$L^2(\mathfrak{R}) = \bigoplus \sigma^j \Lambda_f \quad (j \geq 0; 0 \leq f < 2^j)$$

3.- Existe una función $\psi_0 \in L^2(\mathfrak{R})$ tal que el conjunto de funciones trasladadas $\psi_{0,0,k} = \{\psi_0(n-k) : k \in \mathbb{Z}\}$ forma una base de Riesz para el subespacio $\sigma^0 \Lambda_0$.

La función $\psi_0(n) \equiv \psi_{0,0,0}(n)$ es denominada función de escalado.

A partir de una función de escalado y de una pareja de filtros QMF se puede obtener también la siguiente función:

$$\psi_{1,1,0}(n) = G \psi_{0,0,0}(n) \quad (3.37)$$

Donde la función $\psi_1(n) \equiv \psi_{1,1,0}(n)$ es la función wavelet madre.

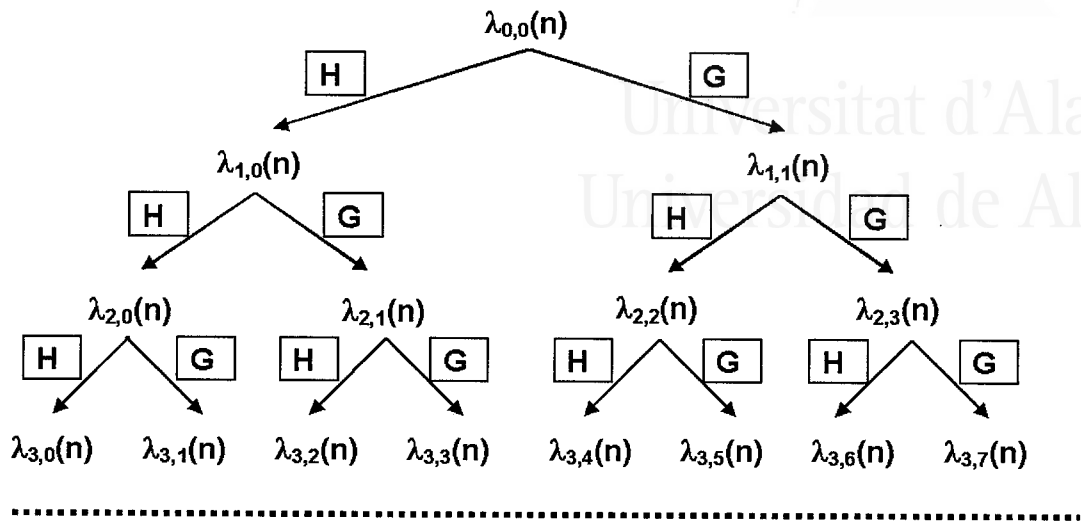


Figura 3.9 Estructura arbórea del análisis de wavelet packets.

De forma general, a partir de cualquier función $\psi_{j,r,0}(n) \in \sigma^j \Lambda_r$ se pueden obtener dos funciones base para los subespacios $\sigma^{j+1} \Lambda_{2r}$ y $\sigma^{j+1} \Lambda_{2r+1}$:

$$\begin{aligned} \psi_{j+1,2r,0}(n) &= H \psi_{j,r,0}(n) \\ \psi_{j+1,2r+1,0}(n) &= G \psi_{j,r,0}(n) \end{aligned} \tag{3.38}$$

A estas funciones se les denomina funciones de wavelet packets.

Un conjunto de funciones wavelet packets trasladadas $\{\psi_{j,r,k}(n) : k \in \mathbb{Z}\}$ forma una base del subespacio $\sigma^j \Lambda_r$. Un conjunto de funciones escaladas y trasladadas $\{\psi_{j,r,k}(n) : j \geq 0, 0 \leq r \leq 2^j, k \in \mathbb{Z}\}$ forma una base para $L^2(\mathfrak{R})$.

Una colección de wavelet packets comprende una librería de funciones base. Éstas forman un árbol binario cuyos nodos son los subespacios $\sigma^j \Lambda_r$. La raíz está formada por el subespacio $\sigma^0 \Lambda_0$ y las hojas a una escala L determinada son:

$\sigma^L \Lambda_0, \dots, \sigma^L \Lambda_{2^{L-1}}$. Cada nodo es la suma de sus inmediatos descendientes, o hijos. Si los QMF son ortonormales, entonces la suma será una suma directa ortonormal (ver figura 3.9).

Una vez realizada la descomposición total en wavelet packets se puede escoger una gran variedad de subconjuntos base tales que su unión de lugar al subespacio inicial. De esta forma se puede escoger aquel subconjunto base que mejor se adapte a la señal bajo estudio. La DWPT puede proporcionar una base formada por la agrupación de varios subespacios, por ejemplo $\sigma^0 \Lambda_0 = \sigma^3 \Lambda_0 \oplus \sigma^3 \Lambda_1 \oplus \sigma^2 \Lambda_1 \oplus \sigma^1 \Lambda_1$. Pero esta no será la única posible.

Si se define una secuencia³ $\lambda_{j,r}(k)$ como el conjunto de coeficientes de expansión de una señal dada $x(n)$ en el subespacio $\sigma^j \Lambda_r$, entonces se cumplirá la siguiente relación:

$$\lambda_{j,r}(k) = \langle x, \psi_{j,r,k} \rangle = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \psi_{j,r,k}(n) \bar{x}(n) \quad (3.39)$$

De forma parecida a como ocurría en las ecuaciones (3.28) y (3.30) para el análisis de wavelets, en este caso también es posible obtener, a partir de los coeficientes de expansión de un subespacio dado, los coeficientes de expansión de los dos subespacios derivados de éste con sólo conocer los filtros QMF. De esta forma se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_{j+1,2r}(n) = H \lambda_{j,r}(n) \quad (3.40)$$

$$\lambda_{j+1,2r+1}(n) = G \lambda_{j,r}(n) \quad (3.41)$$

³ Llamaremos coeficientes a cada uno de los elementos que forman $\lambda_{j,r}(k)$, mientras que a la agrupación de esos coeficientes en un nodo lo llamaremos secuencia de coeficientes o simplemente secuencia $\lambda_{j,r}(k)$.

Es útil tener en mente la descomposición en estructura de árbol asociada con el análisis de wavelet packets y sobre todo el significado de los índices j y r , asociados con la escala y la banda de frecuencia, respectivamente.

Supongamos una secuencia $x = \{x(n) : 1 \leq n \leq 8\}$. Esta secuencia puede ser directamente identificada con una secuencia de coeficientes $\lambda_{0,0}(n) \equiv x(n)$. La estructura arbórea completa puede ser vista como se muestra en la figura 3.10. El número de la fila (situado a la izquierda de la misma) es el índice de escala j , comenzando desde la fila 0 como raíz. El número de bloques contando desde la izquierda proporciona el índice de frecuencia. Es también importante tener en cuenta que la longitud de cada una de las secuencias de coeficientes es menor conforme se va aumentando de escala. Como se muestra en la figura 3.10 cada fila de secuencias es calculada a partir de la fila de arriba con la única aplicación de los operadores H y G .

Una vez que se ha obtenido la descomposición completa de la señal, se escogerá un subconjunto de coeficientes (asociados con sus respectivos subespacios) de forma que en conjunto sean capaces de representar completamente la señal inicial. El conjunto de las funciones wavelet packets asociadas con estos subespacios formarán una base para $L^2(\mathfrak{R})$. No será necesario que todas las secuencias asociadas con los elementos de la base (funciones wavelet packets) tengan la misma longitud. El único requerimiento es que el ancho de banda de la señal original debe ser cubierto por la base escogida, sin solapamiento, de forma que cada elemento de la base corresponderá a una banda de frecuencia.

Los nodos del árbol obtenido estarán formados por las secuencias de wavelet packets obtenidas tras la aplicación del banco de filtros QMF. Para que sea posible la reconstrucción de la señal, a partir de las secuencias de coeficientes de wavelet packets, debe seleccionarse un subconjunto admisible de nodos formando una base. Si se ven los nodos como correspondientes a diferentes bandas de frecuencia, entonces una base cubrirá todo el espectro de la señal $x(n)$ sin solapamiento. Con esto, si un nodo determinado se escoge como parte de la base, entonces ninguno de

sus nodos ‘hijos’ podrá incluirse en la base, debido a que dicha banda de frecuencias ya está cubierta.

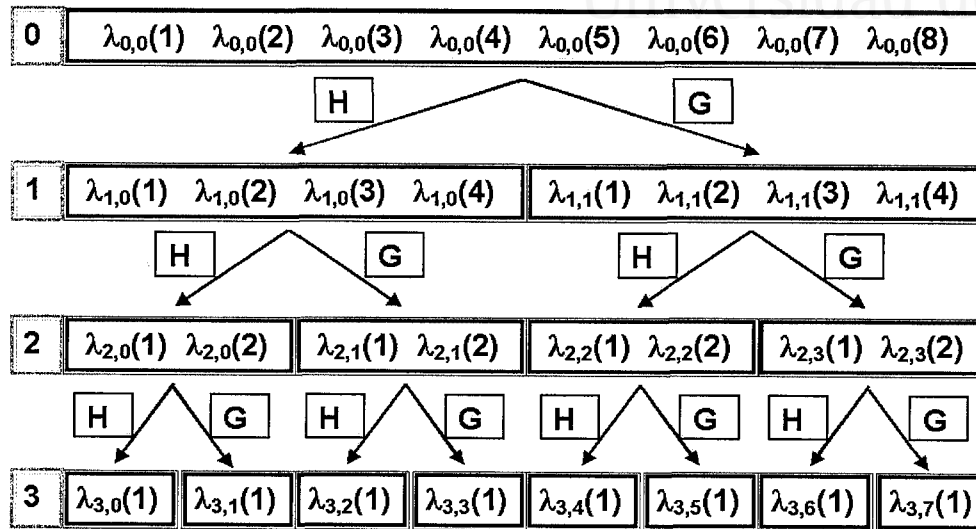


Figura 3.10 Estructura arbórea de los coeficientes de wavelet packets para la señal $x(n)$, $n=1, \dots, 8$.

3.7 Determinación de la base de wavelet packets.

Como ahora se tiene un conjunto de bases posibles para representar la señal, entonces es posible buscar la que mejor se adaptará a una señal dada bajo la aplicación de un cierto criterio. Cuando una secuencia $x(n)$ es expresada bajo una nueva base, la nueva representación debería cumplir principalmente las dos siguientes propiedades: Primeramente, sólo un número relativamente pequeño de coeficientes debe ser no despreciable; y segundo, la suma global de todos los coeficientes que se pueden considerar despreciables debe también poderse despreciar

(Coifman y Wickerhauser, 1994). Con este propósito se busca una base cuyos coeficientes decrezcan lo más rápido posible cuando son reordenados en orden decreciente. Para medir esa pendiente de decrecimiento y determinar cuan de buena es la base escogida se calculará, en cada uno de los nodos de la descomposición de wavelet packets, el valor de una determinada función de coste o entropía. El objetivo es obtener una base tal que el valor de la función de coste global sea mínimo.

Las funciones de coste y los algoritmos utilizados para seleccionar una base adecuada a la señal de interés se pueden clasificar de varias maneras.

3.7.1 Funciones de coste.

En primer lugar, en cuanto a la función de coste, éstas se pueden clasificar en funciones aditivas y no aditivas.

Una función de coste aditiva para secuencias de números reales se define como cualquier función real M que satisfaga la condición de aditividad siguiente (Coifman y Wickerhauser, 1992):

$$M(\lambda_{j,r}(n)) = \sum_{n \in Z} \mu(|\lambda_{j,r}(n)|) \quad \text{con } \mu(0) = 0 \quad (3.42)$$

La función de coste definida debe además cumplir ciertas restricciones: M debe ser finita y la medida de información debe ser aditiva, de forma que un nodo específico puede ser comparado con la suma de sus respectivos nodos derivados (o hijos).

Se podría elegir toda clase de funciones de coste M , pero las más útiles son aquellas capaces de medir el nivel de concentración de los coeficientes. M debería ser grande cuando todos los coeficientes de un nodo dado son prácticamente del mismo tamaño, y debería ser pequeño cuando todos, excepto unos pocos coeficientes son despreciables. Algunos ejemplos de funciones de coste o entropía son los siguientes:

- Entropía de Shannon:

$$\mu(\lambda_{j,r}(n)) = -\lambda_{j,r}(n)^2 \cdot \log(\lambda_{j,r}(n)^2) \quad (3.43)$$

Esta función entropía cumple el requerimiento de aditividad puesto que se calcula como un sumatorio sobre todos los coeficientes. En la figura 3.11 se muestra como contribuye cada coeficiente a la suma total, suponiendo una secuencia normalizada. Como se puede observar, la contribución a la entropía total del nodo es pequeña si los coeficientes tienen una amplitud pequeña (cercana a 0) o una amplitud grande (cercana a 1).

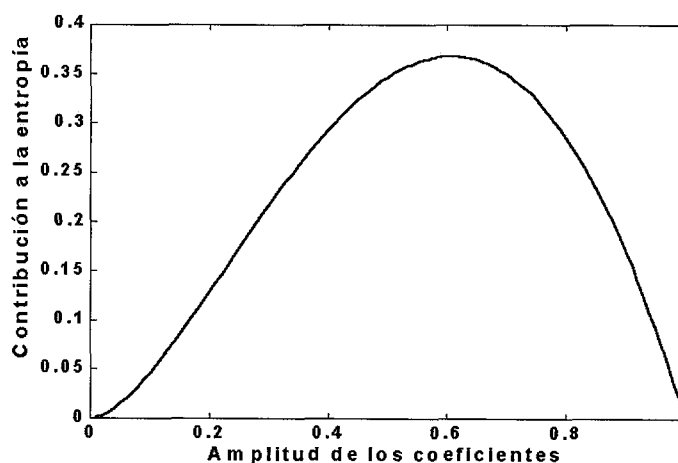


Figura 3.11 Entropía de Shannon: contribución de cada coeficiente de una secuencia normalizada.

Como ya se dijo anteriormente, el objetivo es encontrar una base que proporcione unos pocos coeficientes de amplitud elevada y el resto de amplitud despreciable. Por tanto, esta función de entropía es bastante buena, al menos teóricamente. Sin embargo, experimentalmente, se puede comprobar que conseguir este objetivo no es nada fácil. En el caso particular de señales sísmicas nos encontramos con secuencias de coeficientes poco comprimidas, donde es difícil distinguir entre coeficientes asociados a ruido y coeficientes asociados a la señal.

- Coeficientes por encima de un umbral:

Consiste en seleccionar un umbral arbitrario ε y sumar todos los elementos de la secuencia cuyo valor absoluto exceda del umbral:

$$\mu(\lambda_{j,r}(n)) = \begin{cases} |\lambda_{j,r}(n)| & \text{si } |\lambda_{j,r}(n)| \geq \varepsilon \\ 0 & \text{si } |\lambda_{j,r}(n)| < \varepsilon \end{cases} \quad (3.44)$$

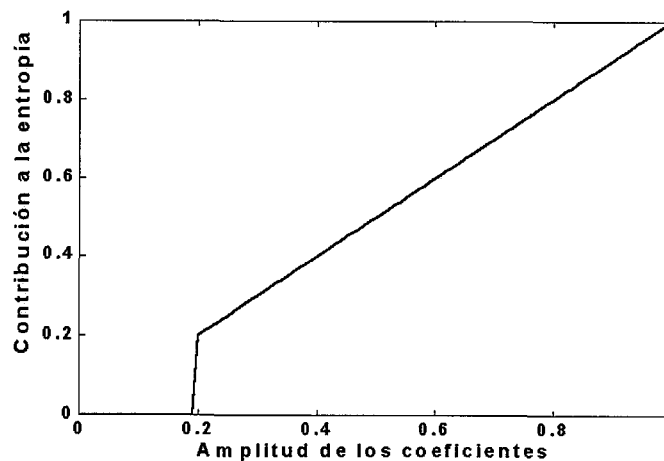


Figura 3.12 Entropía de umbral: Contribución de cada coeficiente de una secuencia normalizada.

Como se puede observar en la figura 3.12, lo que se pretende conseguir con este tipo de entropía es que la mayor parte de los coeficientes tengan una amplitud por debajo de un cierto umbral.

- Norma ℓ^m :

$$\mu(\lambda_{j,r}(n)) = |\lambda_{j,r}(n)|^m \quad \text{con } m \in]0, 2[\quad (3.45)$$

En este caso la función de coste es $M(\lambda_{j,r}(n)) = \left\| \lambda_{j,r}(n) \right\|_m^m$. Con este tipo de función, se pueden tener dos secuencias de coeficientes con la misma energía,

$$\|\lambda_{j,r}(n)\|_1 = \|\lambda_{j,r}(n)\|_2, \text{ pero con } M(\lambda_{j,r}(n)|_1) < M(\lambda_{j,r}(n)|_2). \text{ En}$$

este caso se dirá que la energía de la primera secuencia está concentrada en menos coeficientes. Ver figura 3.13.

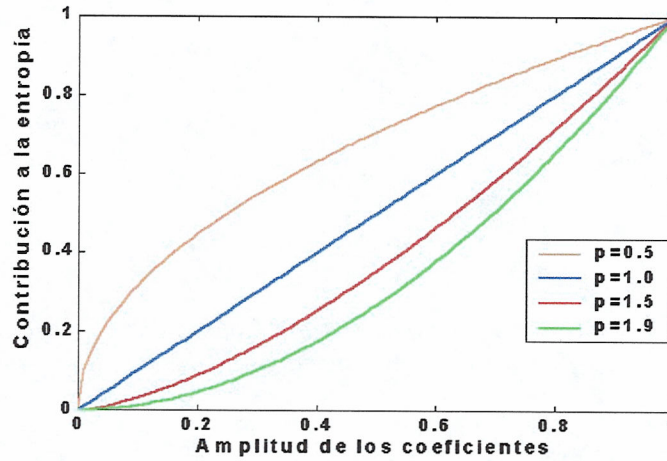


Figura 3.13 Norma l^m : Contribución de cada coeficiente de una secuencia normalizada.

- Energía por debajo de un umbral:

$$\mu(\lambda_{j,r}(n)) = \begin{cases} |\lambda_{j,r}(n)|^2 & \text{si } |\lambda_{j,r}(n)| < \varepsilon \\ 0 & \text{si } |\lambda_{j,r}(n)| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (3.46)$$

Storm (1997) propone esta función de coste. Con ella lo que se pretende minimizar es la energía que se perdería en una operación de filtrado por umbralización.

Esta función minimiza la suma de los coeficientes al cuadrado que están por debajo de un determinado nivel umbral (figura 3.14). En este caso los nodos escogidos consistirán de “grandes” coeficientes, y un proceso de filtrado de ruido basado en técnicas de umbralización eliminará la menor energía posible.

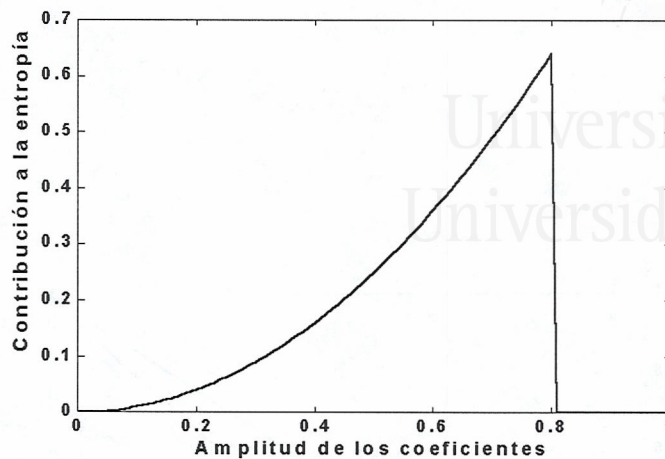


Figura 3.14 *Entropía de mínima energía: Contribución de cada coeficiente de una secuencia normalizada.*

En contraposición a este tipo de funciones de entropía están las llamadas funciones de coste no aditivas propuestas por Taswell (1994a). En este caso las funciones de coste sirven como criterio de selección para el algoritmo de búsqueda de la base, pero no son aditivas. Una definición más formal de las funciones de coste tanto aditivas como no aditivas se puede encontrar en los artículos de Taswell (1994a; 1996).

Como ejemplo de este tipo de funciones de coste se encuentra la entropía de Coifman-Wickerhauser (1992)

$$\mu(\lambda_{j,r}(n)) = - \frac{|\lambda_{j,r}(n)|^2}{\|\lambda_{j,r}(n)\|_2^2} \cdot \ln \left(\frac{|\lambda_{j,r}(n)|^2}{\|\lambda_{j,r}(n)\|_2^2} \right) \quad (3.47)$$

Esta función de coste es similar a la entropía de Shannon (3.43) con la diferencia que ahora cada uno de los coeficientes se ha normalizado respecto a la energía de la secuencia.

Otros ejemplos de funciones de coste no aditivas son también explicados por Taswell (1994b,1996).

En el capítulo 5 se aplicarán, sobre sismogramas sintéticos, las funciones de coste aditivas mostradas en este apartado y se verá hasta que punto pueden influir en la selección de la base de wavelet packets y sobre todo hasta que punto influyen en el resultado de la aplicación propuesta.

3.7.2 Algoritmos de búsqueda.

A la hora de seleccionar una base de entre todas las posibles habrá que recorrer el árbol de descomposición e ir aplicando sobre sus secuencias de coeficientes alguna de las funciones de coste vistas en el apartado anterior. Este árbol se puede recorrer o bien empezando desde la base e ir subiendo hacia arriba ('Botton-Up Tree Search', BUTS), o bien comenzando desde la raíz (señal inicial) e ir descendiendo hacia la base ('Top-Down Tree Search', TDTS).

Con este segundo método de búsqueda se pueden ir calculando los costes asociados a los nodos al mismo tiempo que se van creando. De esta forma, a la vez que se va realizando la descomposición en wavelet packets se va realizando la selección de la base.

Con el método de búsqueda BUTS y utilizando una función de coste aditiva Coifman y Wickerhauser (1992) definieron la mejor base relativa a una función de coste dada.

En este último caso, la clave del proceso de selección es comparar el coste de un nodo dado con la suma de costes de sus respectivos nodos hijos. En la figura 3.15 se muestra un bloque básico de selección de nodos. El nodo padre contiene una secuencia de coeficientes $\lambda_{j,r}(n)$, mientras que los nodos hijos contienen las secuencias $\lambda_{j+1,2r}(n)$ y $\lambda_{j+1,2r+1}(n)$, obtenidos tras las etapas de filtrado y

diezmado. Dado que la información contenida en el nodo padre es la misma que la información contenida en la unión de los nodos hijos, se encuentra que existen dos modos diferentes de representar la misma información. Con el fin de obtener la mejor base de wavelet packets, se escoge aquella representación que proporcione un valor de la función entropía menor.

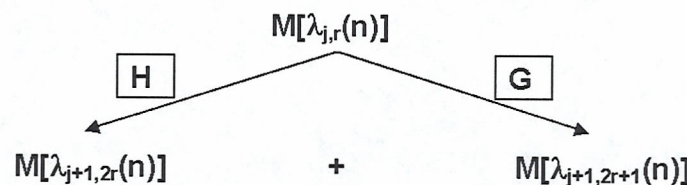


Figura 3.15 *Bloque básico de selección de los nodos.*

Un algoritmo rápido de búsqueda de la mejor base de wavelet packets esta basado en el método de programación dinámica (Bellman, 1957), y su implementación se puede ver en el libro de Wickerhauser (1994). La teoría de programación dinámica (TPD) dice que cualquier subcamino de la solución óptima es óptimo para ese subproblema. Supongamos que se ha determinado el árbol óptimo comenzando desde la raíz, entonces la TPD nos dice que para cualquier nodo del árbol óptimo, el segmento del árbol óptimo original que comienza en ese nodo es óptimo para el problema de encontrar el óptimo árbol comenzando desde ese nodo. Teniendo esto en cuenta, para obtener el árbol óptimo se comenzará por los nodos de la base y se irá ascendiendo hacia la raíz, buscando la solución óptima para cada subproblema (o subcamino).

El modo de proceder es el siguiente. Primeramente se obtiene el valor de la función de coste para cada nodo de la base del árbol y se marcan todos esos nodos como seleccionados. Si la suma de las medidas de coste de dos nodos de la base es menor que la medida de coste de su respectivo nodo padre, entonces se mantienen esos dos nodos como seleccionados. Si la medida de coste proporcionada por el nodo padre es menor, entonces se deseleccionan los nodos hijos y se marca el nodo padre

como seleccionado. Aplicando este procedimiento de forma recursiva se obtiene un subconjunto de nodos con un valor de la función de coste global mínimo.

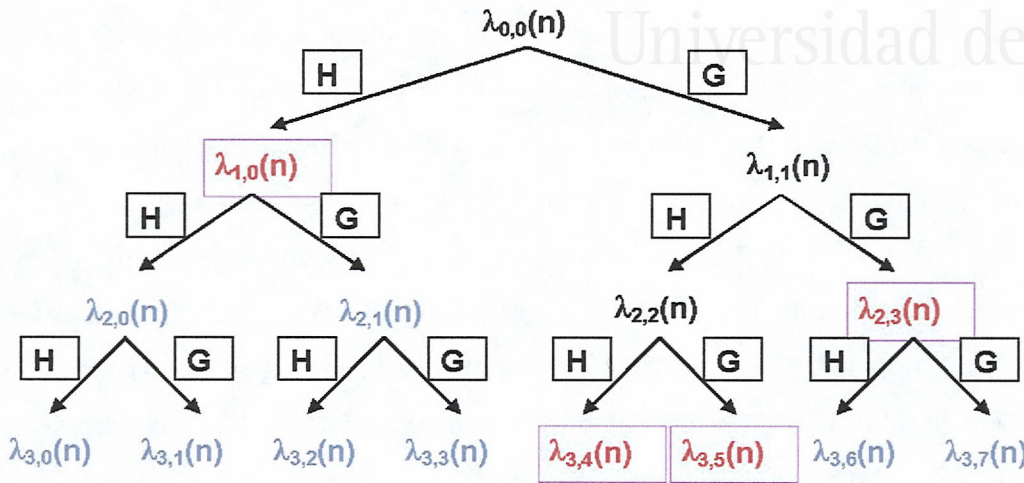


Figura 3.16 Coeficientes asociados a la mejor base de wavelet packets.

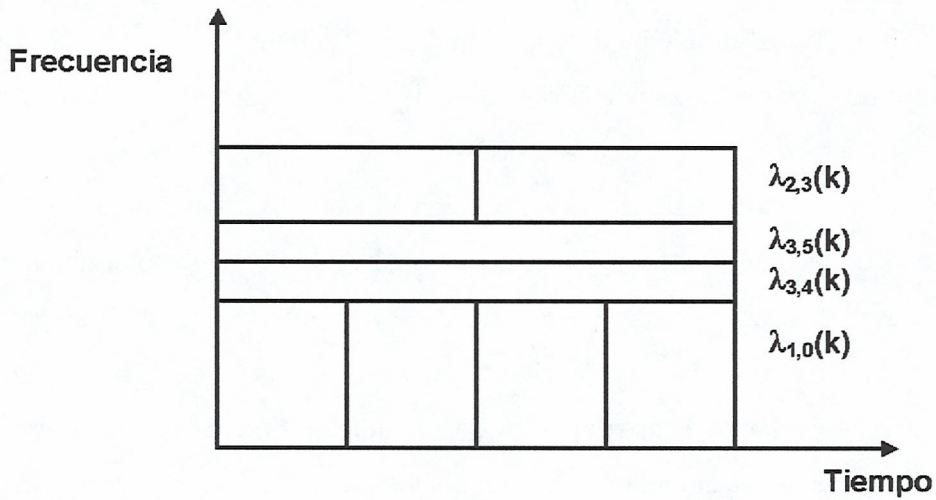


Figura 3.17 Descomposición tiempo-frecuencia asociada a la estructura de la figura 3.16.

En las figuras 3.16 y 3.17 se muestra un ejemplo de descomposición con la mejor base de wavelet packets.

En el caso explicado anteriormente se estudia cada uno de los nodos del árbol de descomposición y es por esta razón que la base seleccionada para esa función de coste aditiva es la mejor posible. No obstante, esta técnica de búsqueda no es la mejor desde el punto de vista computacional. En muchas aplicaciones se pueden obtener resultados comparables a los de la mejor base sin necesidad de examinar cada uno de los nodos del árbol. Estos algoritmos de búsqueda no proporcionan siempre la base óptima pero sin embargo proporcionan una base apropiada a la señal de estudio. Se puede decir que proporcionan casi la mejor base ('Near Best Basis') (Taswell, 1994a). Los algoritmos de búsqueda de estas últimas bases pueden ser del tipo BUTS o TDTS, y pueden utilizar funciones de coste aditivas como no aditivas.

Estas bases pueden ser tan buenas, o incluso mejor, que la denominada mejor base cuando nos encontramos en situaciones prácticas donde la complejidad computacional tiene que ser considerada. En este sentido los algoritmos del tipo TDTS proporcionan los menores costes. Algunos algoritmos de búsqueda y resultados comparativos pueden verse en Taswell (1996).

Por último, el problema de selección de la base también puede verse como un problema de búsqueda satisfactoria. Simon (1957) desarrolló el concepto de búsqueda satisfactoria, el cual viene a decir básicamente que la clave para simplificar el proceso de elección está en la sustitución del objetivo "minimización" por el objetivo "satisfacción" o búsqueda, en nuestro caso, de una base lo suficientemente buena. Basado en este principio Taswell (1996) propone algoritmos de búsqueda satisfactoria. De esta forma, la selección de la casi mejor base consiste en seleccionar unos criterios en cuanto a los resultados que se quieren obtener y parar la búsqueda de la base en cuanto se cumplan dichos requisitos.

3.8 Métodos de filtrado de ruido

Actualmente existen diversas técnicas basadas en wavelets que nos permiten eliminar el ruido presente en una señal. La mayoría de estos algoritmos siguen los siguientes pasos: Aplicación de la transformada directa sobre la señal; modificación de las secuencias de coeficientes de wavelets, de manera que se eliminen los coeficientes no deseados; y finalmente, reconstrucción de las secuencias para obtener la señal buscada.

El paso crucial en el que se distinguen unos métodos de otros es el paso intermedio, donde se deben modificar los coeficientes de una manera adecuada.

El criterio más común para decidir como modificar los coeficientes se basa en seleccionar un nivel de umbral y diferenciar entre los que superan este nivel y los que no. Dependiendo de cómo se calculan y cómo se aplican estos umbrales se tiene un método u otro.

La selección de un nivel umbral se basa siempre en minimizar cierto criterio de optimización. De esta forma nos encontramos con el umbral ‘universal’ y ‘minimax’ (Donoho y Johnstone, 1994), y SURE (Donoho y Johnstone, 1995).

En cuanto a la manera de aplicar esos umbrales sobre los coeficientes de wavelets también existen varios métodos. Destacan los conocidos ‘hard thresholding’ (Donoho y Johnstone, 1994), ‘soft thresholding’ (Donoho, 1995a), ‘semisoft shrinkage’ (Gao y Bruce, 1995), y otros métodos menos conocidos pero que no dejan de ser interesantes como el método ‘Non-Negative Garrote’ propuesto por Gao (1998).

La combinación de los criterios para determinar un umbral dado y los métodos para aplicar ese umbral sobre los coeficientes da como resultado algoritmos para el filtrado de ruido con nombre propio, como se puede observar en la tabla 3.1.

Método de umbralización	Tipo de umbral	Nombre
'Soft thresholding'	Umbral Universal	VisuShrink
'Soft thresholding'	Umbral Minimax	RiskShrink
'Soft thresholding'	Umbral SURE	SureShrink

Tabla 3.1 Algoritmos de filtrado de ruido comunes.

La estimación Bayesiana de los coeficientes de wavelets (Chipman et al., 1997; Abramovich et al., 1998) también es una buena opción para eliminar el ruido. No obstante, la función de transferencia entre los coeficientes reales y los coeficientes estimados (Chipman et al., 1997) no difiere mucho de la función que se obtiene con los métodos de umbralización de “semisoft thresholding” y “non-negative garrote”

Otro método alternativo para el filtrado de ruido consiste en la combinación de la transformada de wavelet y el filtrado óptimo de Wiener (Ghael et al., 1997; Choi y Baraniuk, 1998). En este caso, el filtro de Wiener es aplicado sobre cada una de las secuencias de coeficientes de wavelets consiguiendo en teoría minimizar el error cuadrático medio ('mean square error', MSE). La aplicación de este tipo de filtros requiere el conocimiento de una cierta estimación de la señal y de las propiedades estadísticas del ruido asociado.

Hasta ahora todos los métodos nombrados tratan las secuencias de wavelets de forma independiente, lo cual no es cierto para la mayoría de señales reales. Con objeto de tener en cuenta estas dependencias se ha desarrollado en los últimos años un nuevo marco para el procesamiento estadístico de la señal basado en la aplicación de modelos ocultos de Markov ('Hidden Markov Models', HMM) en el dominio de las wavelets (Crouse et al., 1998; Romberg et al., 1999).

El mayor inconveniente de estos dos últimos métodos de filtrado es el excesivo coste computacional. Lo cual a su vez no implica que los resultados obtenidos sean excesivamente mejores respecto a los obtenidos con el resto de métodos.

Por esta razón, el siguiente apartado se centra en el estudio de los métodos basados en la umbralización de los coeficientes, los cuales serán utilizados posteriormente en la práctica.

3.8.1 Umbralización de los coeficientes de wavelets.

Supongamos que se tiene una señal del tipo:

$$x(n) = s(n) + z(n) \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (3.48)$$

Donde $x(n)$ es la señal registrada, $s(n)$ es la señal de interés, y $z(n)$ es el ruido, que en principio no se supondrá de ningún tipo determinado.

El objetivo es encontrar una estimación de la señal, $\hat{s}(n)$, que sea lo más parecida posible a $s(n)$. Una forma de medir el error cometido entre la señal verdadera y la señal estimada es a través de la norma ℓ^2 (Donoho y Johnstone, 1994). Esto da una expresión para el error de la forma:

$$\frac{1}{N} E \|\hat{s}(n) - s(n)\|_{\ell_2}^2 = \frac{1}{N} E \sum_{n=1}^N (\hat{s}(n) - s(n))^2 \quad (3.49)$$

Tal y como se indicó al principio del punto 3.8, el primer paso consiste en la aplicación de la transformada de wavelet sobre la secuencia registrada. En este caso en concreto se utiliza la DWPT pues ésta permite una descomposición tiempo-frecuencia de la señal mucho más selectiva. No obstante esto no variará el planteamiento de los métodos de filtrado.

Como ya se mostró en la ecuación (3.39), cada nodo de la descomposición

tiempo-frecuencia tiene asociado un determinado elemento de la base de wavelets packets, $\psi_{j,r,k}(n) \in \mathcal{A}_r$, la cual a su vez da lugar a una secuencia de coeficientes $\lambda_{j,r}(k)$. La aplicación de la DWPT sobre la señal $x(n)$ da como resultado un conjunto de secuencias de coeficientes, $\lambda_{j,r}(k)|_x$, donde cada una de ellas está asociada a un nodo de la base. En nuestro caso en concreto, como la señal registrada está contaminada con ruido, las secuencias de coeficientes obtenidas tras la DWPT también estarán contaminadas con ruido. Por esta razón se puede realizar una distinción similar a (3.48) y separar los coeficientes obtenidos en dos grupos: los correspondientes a la señal de interés y los correspondientes a la señal de ruido. De esta forma, el resultado de aplicar la DWPT sobre nuestra señal $x(n)$ se podrá expresar de la siguiente manera:

$$\lambda_{j,r}(k)|_x = \lambda_{j,r}(k)|_s + \lambda_{j,r}(k)|_z \quad (3.49)$$

Donde obviamente $\lambda_{j,r}(k)|_x$ representa el conjunto de coeficientes asociados con la señal registrada, $\lambda_{j,r}(k)|_s$ representa el conjunto de coeficientes asociados con la señal de interés, y por último $\lambda_{j,r}(k)|_z$ representa el conjunto de coeficientes relacionados con la señal de ruido.

Ahora el objetivo vuelve a ser muy parecido al inicial. Se trata de realizar una estimación de los coeficientes, $\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_s$, y minimizar el error cuadrático medio entre esta estimación y los coeficientes reales.

El motivo para trabajar en el dominio transformado y no directamente con la propia señal es doble (Donoho y Johnstone, 1994): por un lado, la mayoría de las señales presentan la mayor parte de la información concentrada en un pequeño conjunto de coeficientes; y por otro lado, el ruido contamina a todos los coeficientes de wavelets por igual. De esta forma todos los coeficientes contribuyen a la señal de ruido, pero sólo unos pocos contribuyen a la señal de interés. Si además se selecciona una buena base (apartado 3.7), entonces se puede conseguir también que cada una de

las secuencias esté formada por un pequeño grupo de coeficientes de gran amplitud, relacionados con la señal de interés, y un gran grupo de coeficientes de pequeña amplitud, asociados con la señal de ruido.

Bajo estas características, los métodos de umbralización funcionan muy bien. La razón para ello es que su funcionamiento básico consta de las dos siguientes características: anulan las componentes pequeñas, y mantienen o disminuyen las componentes grandes.

Veamos a continuación algunos de los métodos de umbralización que se nombraron en el apartado 3.8.

- ‘Hard thresholding’.

$$\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_x = \begin{cases} 0 & \text{si } \lambda_{j,r}(k)|_x \leq \lambda_{Th} \\ \lambda_{j,r}(k)|_x & \text{si } \lambda_{j,r}(k)|_x > \lambda_{Th} \end{cases} \quad (3.50)$$

Donde $\lambda_{j,r}(k)|_x$ son los coeficientes después de aplicar la DWPT y $\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_x$ son los coeficientes estimados después de aplicar el método de umbralización.

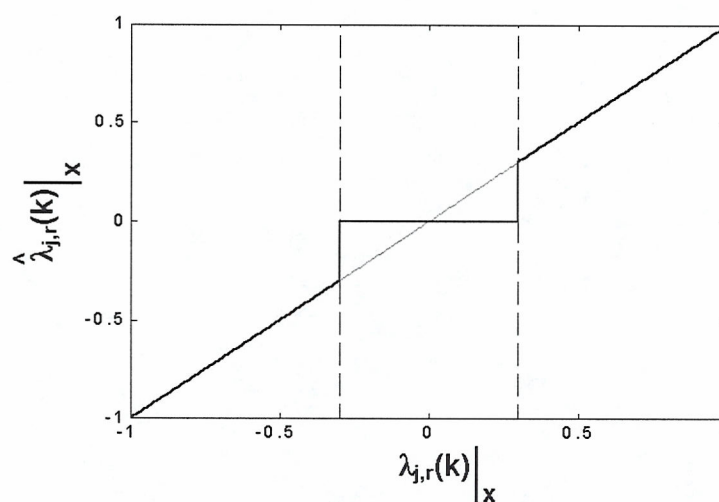


Figura 3.18 Función ‘hard thresholding’ con $\lambda_{Th}=0.3$.

Este procedimiento es el más sencillo de aplicar. Consiste simplemente en eliminar todas aquellas componentes con una amplitud menor o igual a un umbral dado. En este caso los coeficientes estimados presentan una gran varianza pues después del proceso de umbralización no queda ninguna componente con amplitud pequeña. Por tanto, este método es bastante sensible a los coeficientes de pequeña amplitud, presentando en esos casos mayor distorsión que otros métodos.

- ‘Soft thresholding’.

$$\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_x = \begin{cases} 0 & \text{si } |\lambda_{j,r}(k)|_x \leq \lambda_{Th} \\ \lambda_{j,r}(k)|_x - \lambda_{Th} & \text{si } \lambda_{j,r}(k)|_x > \lambda_{Th} \\ \lambda_{j,r}(k)|_x + \lambda_{Th} & \text{si } \lambda_{j,r}(k)|_x < -\lambda_{Th} \end{cases} \quad (3.51)$$

En este caso también se eliminan todas las componentes por debajo de un umbral. Sin embargo las nuevas componentes obtenidas si que presentan valores de amplitud pequeña debido a que lo que se produce es una disminución (‘shrinkage’) de la amplitud del resto de componentes.

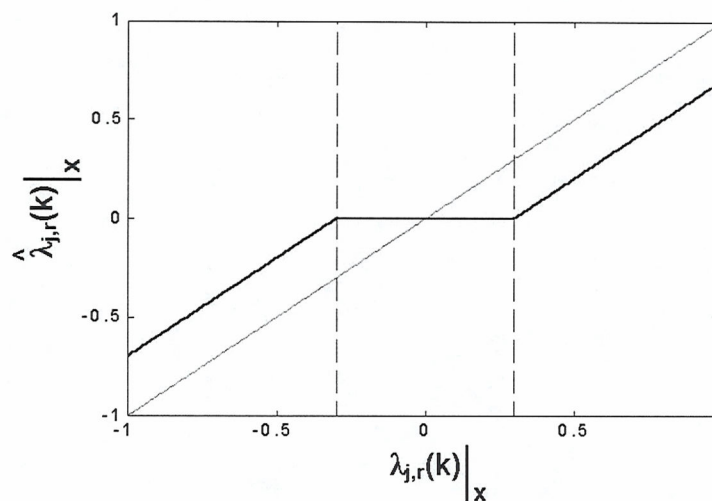


Figura 3.19 Función ‘soft thresholding’ con $\lambda_{Th}=0.3$.

El resultado final es equivalente a como si se agruparan o encogieran todas

las componentes hacia el valor cero. Esto puede dar lugar a desviaciones o inclinaciones de la señal respecto a la línea de abscisas.

En este caso se puede minimizar el error cuadrático medio mediante la elección del umbral universal, $\lambda_{Th} = \sigma \sqrt{2 \log(N)}$, el cual es asintóticamente óptimo (Donoho y Johnstone, 1994). Como se puede observar el valor de este umbral depende de la varianza del ruido, σ , así como de la longitud de la señal, N . Donoho y Johnstone (1994) proponen una estimación de la varianza del ruido como el cociente entre la desviación media absoluta de la secuencia de wavelet⁴ de la última escala, $\lambda_{j,0}(n)$, y la constante 0.6745. Además, también sugieren mantener los coeficientes asociados a las primeras escalas sin modificar, incluso aunque estos coeficientes no superen el nivel de umbral. La razón para ello es que los primeros niveles suelen presentar unos coeficientes con media no nula, con lo cual no parece lógico agrupar todas sus componentes entorno a cero. En su artículo ellos utilizaron como escala inicial $j_0=5$.

- ‘Semisoft thresholding’ (o ‘Firm shrinkage’):

$$\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_x = \begin{cases} 0 & \text{si } |\lambda_{j,r}(k)|_x \leq \lambda_{Th_1} \\ \text{sgn}(\lambda_{j,r}(k)|_x) \cdot \frac{\lambda_{Th_2} (|\lambda_{j,r}(k)|_x - \lambda_{Th_1})}{\lambda_{Th_2} - \lambda_{Th_1}} & \text{si } \lambda_{Th_1} < |\lambda_{j,r}(k)|_x \leq \lambda_{Th_2} \\ \lambda_{j,r}(k)|_x & \text{si } |\lambda_{j,r}(k)|_x > \lambda_{Th_2} \end{cases} \quad (3.52)$$

⁴ Su desarrollo se basa en la DWT y por esta razón sólo se habla de escalas o niveles. No obstante gracias a la notación adoptada, el coeficiente $\lambda_{j,0}(n)$ es también claramente identificable en un análisis de wavelet packets.

El método de ‘semisoft thresholding’ engloba los métodos anteriores: ‘hard thresholding’ ($\lambda_{Th_1} = \lambda_{Th_2}$) y ‘soft thresholding’ ($\lambda_{Th_2} = \infty$). Escogiendo unos umbrales adecuados, este método presenta todo lo bueno de los métodos anteriores sin sus inconvenientes. El problema de este método es que requiere determinar dos umbrales, lo cual hace el proceso de selección bastante más costoso.

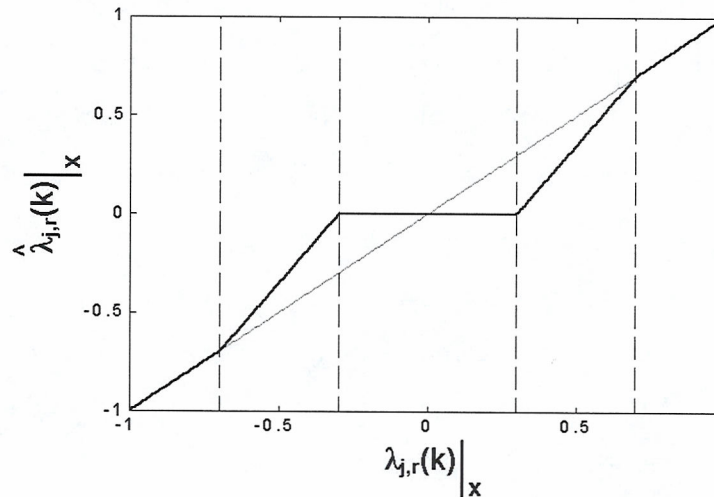


Figura 3.20 Función ‘semisoft thresholding’ con $\lambda_{Th1}=0.3$ y $\lambda_{Th2}=0.7$.

- ‘Non Negative Garrote Shrinkage’:

$$\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_x = \begin{cases} 0 & \text{si } |\lambda_{j,r}(k)|_x \leq \lambda_{Th} \\ \lambda_{j,r}(k)|_x - \left(\frac{\lambda_{Th}}{|\lambda_{j,r}(k)|_x} \right)^2 & \text{si } |\lambda_{j,r}(k)|_x > \lambda_{Th} \end{cases} \quad (3.53)$$

Con este método también se pretende remediar los inconvenientes del ‘hard’ y ‘soft thresholding’ proporcionando un buen compromiso entre ambos métodos de umbralización. Si bien su comportamiento es muy similar al obtenido con el

‘semisoft thresholding’, en este caso sólo es necesario determinar un valor de umbral.

En el capítulo 5 se aplicarán estos métodos de umbralización sobre sismogramas sintéticos y se comprobará experimentalmente cuales son los más apropiados para la aplicación descrita.

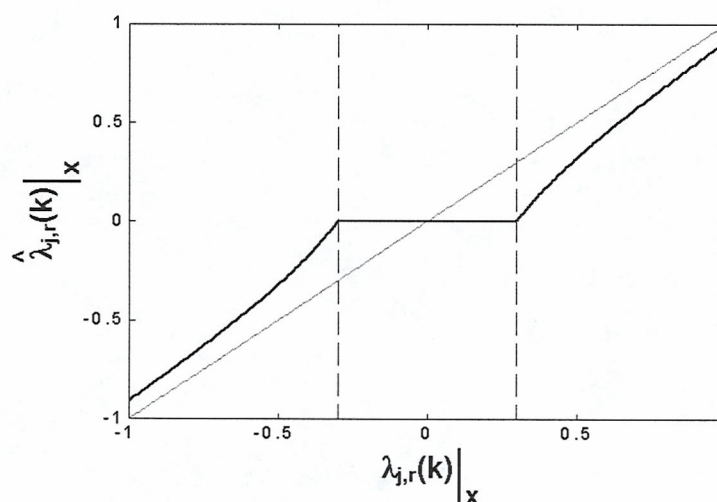


Figura 3.21 Función ‘non-negative garrote’ con $\lambda_{Th1}=0.3$.

Hasta este momento, hemos visto los principales algoritmos basados en el método de umbralización para filtrar o eliminar el ruido. Ahora hay que determinar el valor del nivel umbral.

Para conseguir un satisfactorio filtrado de la señal es muy importante realizar una buena elección del nivel de umbral. Donoho y Johnstone (1994) propusieron el llamado umbral universal, $\lambda_{Th} = \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \log(N)}$, donde σ^2 es la varianza del ruido y N es la longitud de la señal $x(n)$.

No obstante, este nivel de umbral es un umbral fijo que fue obtenido suponiendo ruido blanco de media cero y varianza σ^2 , lo cual no es necesariamente

nuestro caso. Johnstone y Silverman (1997) propusieron un umbral variable, que dependía del nivel de descomposición, para reducir el ruido no blanco.

En esta tesis, se propone un nuevo tipo de umbral basado en el umbral universal, cuyo valor depende del nodo donde se esté analizando la señal.

$$\lambda_{j,r}|_{Th} = \sigma_{j,r} \cdot \sqrt{2 \cdot \log(N_{j,r})} \quad (3.54)$$

En la ecuación anterior, $\sigma_{j,r}$ es la desviación estándar media de la secuencia de ruido asociada al nodo (j,r) y $N_{j,r}$ es la longitud de la secuencia correspondiente a dicho nodo.

En el capítulo 5 se explicará en detalle cómo se obtiene para cada uno de los nodos la desviación estándar media de la señal de ruido y, por tanto, el correspondiente nivel de umbral.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

GENERACIÓN DE SISMOGRAMAS SINTÉTICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE TRAZADO DE RAYOS

4.1 Introducción.

La mejor forma de comprobar cuan de bueno es un determinado método de filtrado de ruido, o como en nuestro caso, un método de deconvolución de la respuesta instrumental, es mediante la comparación de la señal resultante con la señal ideal o deseada. Sin embargo, cuando se trabaja con señales reales, la única información de la que se dispone es la de la propia señal, convolucionada con la respuesta instrumental y contaminada con ruido. De esta forma no resulta nunca fácil evaluar en que medida la señal obtenida es similar a la deseada. Para poder realizar esta

comparación y evaluar de una forma lo más objetiva posible un método dado se debería trabajar con señales sintéticas.

En nuestro caso concreto, las señales reales bajo estudio son sismogramas locales de periodo corto y componente vertical, y el método empleado es un nuevo método de deconvolución que se propone en el capítulo 5. Con el fin de realizar una evaluación del mismo se podría emplear una señal sintética cualquiera. Sin embargo, cuanto más parecida sea esta señal sintética al tipo de señales reales con las que se tiene que trabajar, más fiable será el proceso de evaluación. Con este motivo se aborda el tema de la generación de sismogramas sintéticos locales.

Para ello se utiliza el método de trazado de rayos que, aunque presenta ciertas limitaciones a la hora de realizar estudios acerca de la estructura de la corteza, es más que suficiente para nuestros propósitos.

En este capítulo se analizan primero los fundamentos teóricos utilizados para la generación de sismogramas sintéticos mediante el método de trazado de rayos. Después se explica el software que se ha diseñado y se muestran los resultados obtenidos.

4.2 Propagación de ondas de volumen en medios homogéneos estratificados.

4.2.1 Ondas P y S. Ecuaciones de onda.

Las ondas de volumen son ondas sísmicas que viajan a través del interior de la Tierra. La propagación de estas ondas es similar a la propagación de la luz: son reflejadas y refractadas cuando encuentran una interfase donde se produce un cambio

de densidad o velocidad, y obedecen la ley de Snell. Existen dos tipos de onda de volumen:

Onda P:

También se conoce como onda de dilatación, longitudinal, irrotacional, de compresión o primaria. Este tipo de onda provoca la compresión y dilatación del material conforme pasa a través de él (ver figura 4.1). La ecuación de onda de compresión es:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \alpha^2 \nabla^2 \phi \quad (4.1)$$

Donde ϕ es el potencial de desplazamiento escalar y α es la velocidad de propagación de la onda.

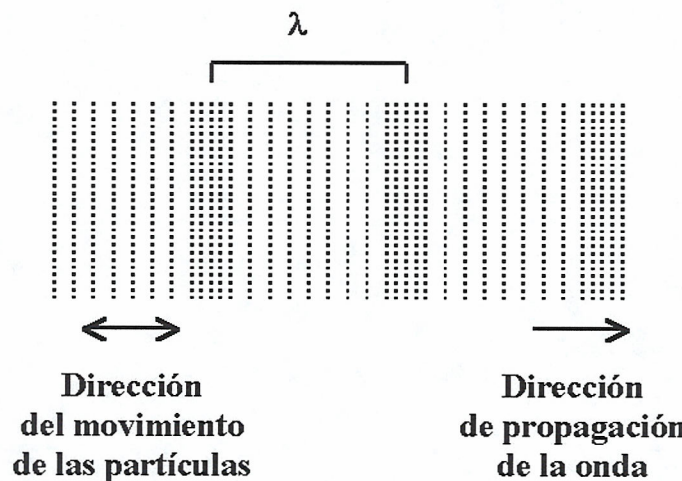


Figura 4.1 Sentido del movimiento de las partículas provocado por el paso de una onda P.

Una solución general de esta ecuación diferencial es (Lay y Wallace, 1995):

$$\phi(\mathbf{r}, t) = A \cdot \exp[\pm i(\omega t \pm k_x x \pm k_y y \pm k_z z)] \quad (4.2)$$

con

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{\alpha^2} \quad (4.3)$$

Esta solución corresponde a un conjunto de ondas planas¹ donde el vector $\mathbf{k}_\alpha = (\omega/\alpha) \mathbf{k}$ es llamado vector número de onda y define la dirección de propagación (normal al frente de onda).

Supongamos ahora que se tiene una onda plana propagándose con vector de número de onda \mathbf{k}_α contenido completamente en el plano x - z ($k_y = 0$) (figura 4.2). Definiendo el ángulo entre el vector \mathbf{k}_α y el eje z como i , se tiene que:

$$k_x = \omega \frac{\sin(i)}{\alpha} = \omega p \quad (4.4)$$

El término p se conoce como parámetro de la trayectoria del rayo sísmico (o ‘horizontal slowness’).

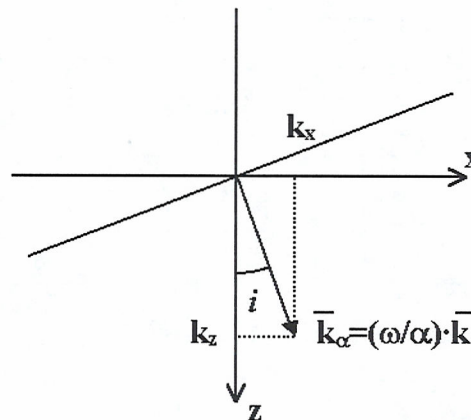


Figura 4.2 Rayo en el plano x - z en la dirección del vector $\bar{\mathbf{k}}_\alpha$.

Por supuesto también se cumplirá:

$$k_z = \omega \frac{\cos(i)}{\alpha} = \omega \eta_\alpha \quad (4.4)$$

donde η_α es llamado ‘vertical slowness’.

¹ La suposición de ondas incidentes planas es suficientemente buena para grandes distancias de la fuente, lo cual quiere decir distancias mucho mayores que la longitud de onda.

Onda S:

También conocida como onda cortante, transversal, rotacional o secundaria. Estas ondas producen en el material un movimiento transversal a la dirección de propagación de la onda (ver figura 4.3). El movimiento producido por la onda S puede dividirse en un movimiento polarizado horizontalmente, SH (plano x - y), y un movimiento polarizado verticalmente, SV (plano x - z). En este caso se tiene una ecuación de onda rotacional como la siguiente:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \beta^2 \nabla^2 \Psi \quad (4.5)$$

Donde Ψ es el potencial vector de desplazamiento y β es la velocidad de propagación de la onda S. La solución de la ecuación diferencial nos da:

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B} \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_\beta \cdot \mathbf{x})] \quad (4.6)$$

con

$$|\mathbf{k}_\beta| = \frac{\omega}{\beta} \quad (4.7)$$

Hasta el momento se han obtenido dos potenciales de desplazamiento que nos permiten tratar por separado las ondas P y las ondas S. Para obtener la amplitud del desplazamiento producido por esos potenciales se puede utilizar el teorema de Helmholtz, por el cual este desplazamiento se expresará como:

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \Psi \quad (4.8)$$

cumpléndose

$$\nabla \times \phi = 0 \quad ; \quad \nabla \cdot \Psi = 0 \quad (4.9)$$

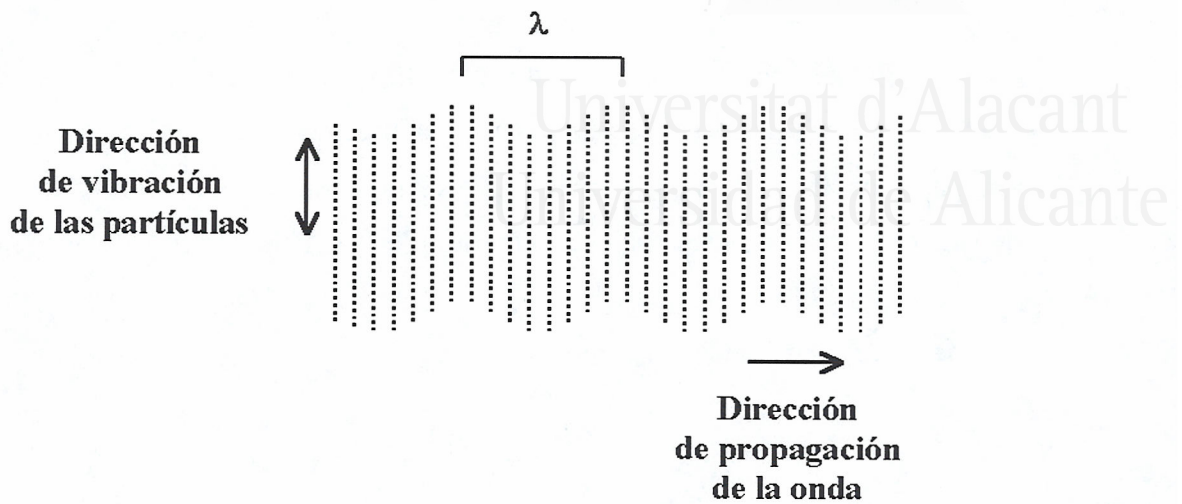


Figura 4.3 *Sentido del movimiento de las partículas provocado por el paso de una onda S.*

4.2.2 Teoría de rayos.

Los rayos se definen como vectores normales al frente de onda y apuntan en la dirección de propagación. La teoría de rayos proporciona un marco muy intuitivo para conocer la trayectoria que seguirá una determinada onda. En este caso concreto, la teoría de rayos permite seguir la trayectoria seguida por un pulso desde la fuente al receptor. Para ello basta saber que la geometría de estos rayos está gobernada por el principio de Fermat y que por tanto el parámetro del rayo, p , será constante a lo largo de toda la trayectoria.

Si la onda se propaga a través de un medio homogéneo, el vector asociado al rayo, k , no cambiará. Entonces, se puede aplicar la teoría de rayos y además estos seguirán una línea recta.

Para medios heterogéneos, con velocidad dependiente de la posición, se podrá aplicar la teoría de rayos sólo si la variación de la velocidad por unidad de longitud de onda es mucho más pequeña que la velocidad de la onda (Lay y Wallace, 1995).

En este caso, se supone un medio estratificado formado por capas homogéneas, de modo que será aplicable la teoría de rayos.

4.2.3 Efectos del medio en la propagación de las ondas.

La propagación de una onda por un medio material homogéneo está sometida a varios factores de distorsión. Este apartado se centra en dos de estos factores: la dispersión geométrica y la absorción.

4.2.3.1 Dispersión geométrica.

Conforme avanza la onda, el frente de ondas esférico es cada vez mayor y por tanto, el flujo de energía por unidad de área es cada vez menor.

Teniendo en cuenta que el área de una esfera de radio r (distancia a la fuente) es $4\pi r^2$, entonces el flujo de energía por unidad de área será igual a $E_{Total} / 4\pi r^2$. La energía global, E_{Total} , es proporcional al cuadrado de la amplitud en desplazamiento de la onda. Por tanto se puede concluir que la amplitud en desplazamiento decrece directamente con la distancia a la fuente.

$$A = \frac{A_0}{r} \quad (4.10)$$

donde A_0 es la amplitud de la onda en la zona fuente.

4.2.3.2 Absorción.

El movimiento que provoca la onda sobre las partículas del material conlleva un calentamiento del mismo. De este modo, parte de la energía de la onda sísmica es convertida en calor. El efecto que esta absorción produce sobre la amplitud en desplazamiento de la onda puede ser expresado mediante la siguiente expresión:

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{\omega r}{2\nu Q}} \quad (4.11)$$

donde ν representa la velocidad de la onda P o SV, según corresponda, y Q se conoce como factor de atenuación, tomando valores diferentes para las ondas P y SV.

El factor de atenuación se puede considerar constante en un rango de frecuencias entre 0.0001 y 10 Hz (Liu et al., 1976). El hecho de que este factor sea constante, provoca que la velocidad de fase sea dispersiva (Aki, 1980). De esta forma, el valor de la velocidad de fase debe ahora substituirse por una velocidad dependiente de la frecuencia como la siguiente:

$$\nu \rightarrow \nu_0 \left[1 + \frac{1}{\pi Q} \ln \left(\frac{\omega}{2\pi} \right) \right] \quad (4.12)$$

Donde ν_0 es la velocidad de fase de la onda de volumen a la frecuencia de 1 Hz.

4.2.4 Efectos de una interfase sobre las ondas.

Cuando una onda P o SV incide sobre una interfase que separa dos medios sólidos de características diferentes se producen cuatro nuevas ondas: una onda P refractada, una onda P reflejada, una onda SV refractada, y una onda SV reflejada. Por otro lado, cuando es una onda SH la que incide sobre la interfase sólo se producen dos ondas:

una SH reflejada y una SH refractada. En nuestro caso, este apartado se centra sólo en las ondas P y SV, pues éstas son las únicas que tienen influencia sobre el perfil final de un sismograma vertical (componente z).

En la figura 4.4 se muestra un ejemplo de una onda P incidiendo sobre una interfase sólido-sólido, donde cada capa está caracterizada por la velocidad de la onda P, α_i , la velocidad de la onda S, β_i , y la densidad, ρ_i . En la nomenclatura empleada para las ondas resultantes, la primera letra hace referencia al tipo de onda incidente (en este caso P), y la segunda letra hace referencia al tipo de onda generada (P o SV). Los subíndices *d* y *u* ('down' y 'up') indican si la onda se desplaza hacia abajo o hacia arriba, respectivamente.

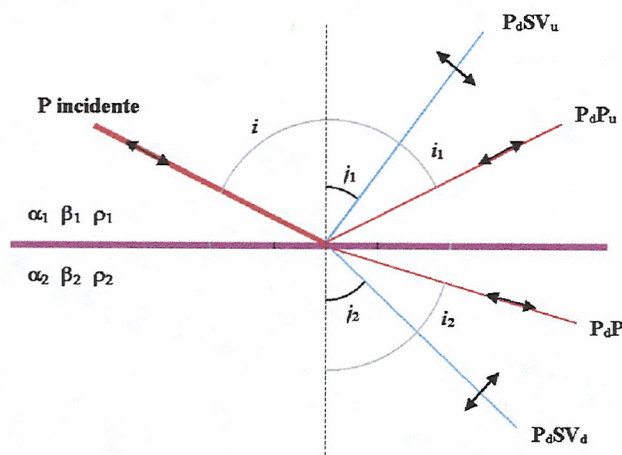


Figura 4.4 Rayos generados por la incidencia de un rayo P (desde el medio 1) sobre una interfase sólido-sólido.

Cada una de las nuevas ondas tiene asociada una dirección y una amplitud (o energía). En los siguientes apartados se muestra como determinar esos valores en función de los parámetros de la onda incidente.

4.2.4.1 Trayectorias.

La dirección de propagación de los nuevos rayos se puede determinar mediante la ley de Snell, por la cual todos ellos deben conservar el mismo 'horizontal slowness', p , que el rayo incidente.

Por ejemplo, para la situación mostrada en la figura 4.4 se cumplen las siguientes relaciones.

$$\frac{\sin(i)}{\alpha_1} = \frac{\sin(i_1)}{\alpha_1} = \frac{\sin(i_2)}{\alpha_2} = \frac{\sin(j_1)}{\beta_1} = \frac{\sin(j_2)}{\beta_2} \quad (4.13)$$

4.2.4.2 Amplitudes.

Para determinar la amplitud de las nuevas ondas generadas hay que aplicar unas determinadas condiciones de frontera, que requieren que exista a lo largo de la interfase continuidad de las tres componentes del desplazamiento y continuidad de los esfuerzos.

Aki (1980) aplica estas condiciones y obtiene la relación entre la amplitud de desplazamiento de la onda incidente y la amplitud de desplazamiento de las ondas generadas.

Supongamos una onda que incide, tal y como se muestra en la figura 4.4, sobre una interfase sólido-sólido. La amplitud en desplazamiento asociada a cada una de las ondas generadas será justamente la amplitud en desplazamiento de la onda incidente, A , multiplicada por el factor correspondiente : P_dSV_u , P_dP_u , P_dSV_d , y P_dP_d . Para esta situación en concreto, estos factores se pueden calcular a través de las siguientes formulas:

$$\begin{aligned}
P_d SV_u &= \frac{-2 \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} \left(ab + cd \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} \frac{\cos(j_2)}{\beta_2} \right) p \alpha_1}{\beta_1 D} \\
P_d P_u &= \frac{\left[\left(b \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} - c \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} \right) F - \left(a + d \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} \frac{\cos(j_2)}{\beta_2} \right) H p^2 \right]}{D} \\
P_d SV_d &= \frac{2 \rho_1 \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} F p \alpha_1}{\beta_2 D} \\
P_d P_d &= \frac{2 \rho_1 \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} F \alpha_1}{\alpha_2 D}
\end{aligned} \tag{4.14}$$

donde las constantes a, b, c, d, E, F, G, H , y D son:

$$a = \rho_2 (1 - 2\beta_2^2 p^2) - \rho_1 (1 - 2\beta_1^2 p^2)$$

$$b = \rho_2 (1 - 2\beta_2^2 p^2) - 2\rho_1 \beta_1^2 p^2$$

$$c = \rho_1 (1 - 2\beta_1^2 p^2) - 2\rho_2 \beta_2^2 p^2$$

$$d = 2(\rho_2 \beta_2^2 - \rho_1 \beta_1^2)$$

$$E = b \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} + c \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2}$$

$$F = b \frac{\cos(j_1)}{\beta_1} + c \frac{\cos(j_2)}{\beta_2}$$

$$G = a - d \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} \frac{\cos(j_2)}{\beta_2}$$

$$H = a - d \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} \frac{\cos(j_1)}{\beta_1}$$

$$D = EF + GHp^2 \quad (4.15)$$

Para una interfase de este tipo, sólido-sólido, se pueden dar tres situaciones más, dependiendo del tipo de onda incidente (P o SV) y del sentido del rayo (hacia abajo o hacia arriba) (figuras 4.5-7). Esto da lugar a 12 nuevas ecuaciones correspondientes a los diferentes factores de amplitud. Siguiendo la nomenclatura indicada, estos factores serán los siguientes:

Onda SV incidente desde el medio 1 (figura 4.5)

$$SV_d P_u = \frac{-2 \frac{\cos(j_1)}{\beta_1} \left(ab + cd \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} \frac{\cos(j_2)}{\beta_2} \right) p \beta_1}{\alpha_1 D}$$

$$SV_d SV_u = \frac{- \left[\left(b \frac{\cos(j_1)}{\beta_1} - c \frac{\cos(j_2)}{\beta_2} \right) E - \left(a + d \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} \frac{\cos(j_1)}{\beta_1} \right) G p^2 \right]}{D}$$

$$SV_d P_d = \frac{-2 \rho_1 \frac{\cos(j_1)}{\beta_1} G p \beta_1}{\alpha_2 D}$$

$$SV_d SV_d = \frac{2 \rho_1 \frac{\cos(j_1)}{\beta_1} E \beta_1}{\beta_2 D} \quad (4.16)$$

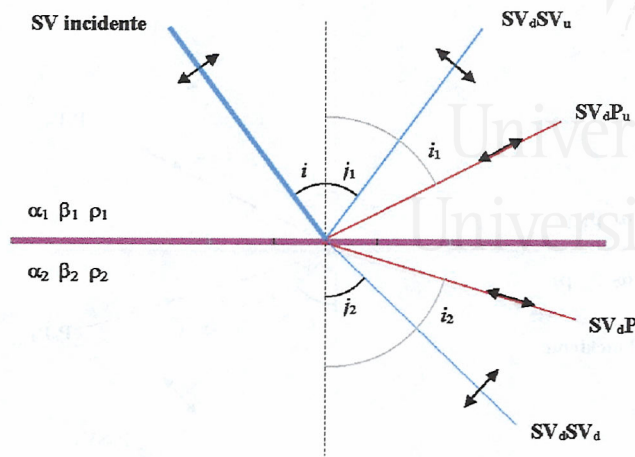


Figura 4.5 Rayos generados por la incidencia de un rayo SV (desde el medio 1) sobre una interfase sólido-sólido.

Onda P incidente desde el medio 2 (figura 4.6)

$$P_u P_u = \frac{2\rho_2 \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} F\alpha_2}{\alpha_1 D}$$

$$P_u SV_u = \frac{-2\rho_2 \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} Gp\alpha_2}{\beta_1 D}$$

$$P_u P_d = \frac{-\left[\left(b \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} - c \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2}\right)F - \left(a + d \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} \frac{\cos(j_1)}{\beta_1}\right)Gp^2\right]}{D}$$

$$P_u SV_d = \frac{2 \frac{\cos(i_2)}{\alpha_2} \left(ac + bd \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} \frac{\cos(j_1)}{\beta_1}\right)p\alpha_2}{\beta_2 D} \tag{4.17}$$

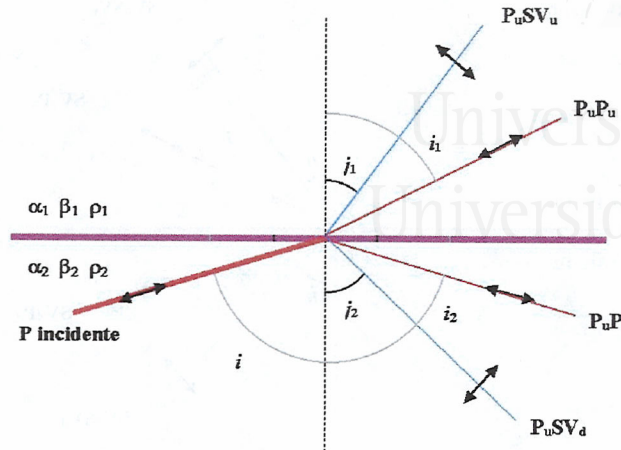


Figura 4.6 Rayos generados por la incidencia de un rayo P (desde el medio 2) sobre una interfase sólido-sólido.

Onda SV incidente desde el medio 2 (figura 4.7)

$$SV_u P_u = \frac{2\rho_2 \frac{\cos(j_2)}{\beta_2} Hp\beta_2}{\alpha_1 D}$$

$$SV_u SV_u = \frac{2\rho_2 \frac{\cos(j_2)}{\beta_2} E\beta_2}{\beta_1 D}$$

$$SV_u P_d = \frac{2 \frac{\cos(j_2)}{\beta_2} \left(ac + bd \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} \frac{\cos(j_1)}{\beta_1} \right) p\beta_2}{\alpha_2 D}$$

$$SV_u SV_d = \frac{\left[\left(b \frac{\cos(j_1)}{\beta_1} - c \frac{\cos(i_2)}{\beta_2} \right) E - \left(a + d \frac{\cos(i_1)}{\alpha_1} \frac{\cos(j_2)}{\beta_2} \right) Hp^2 \right]}{D} \quad (4.18)$$

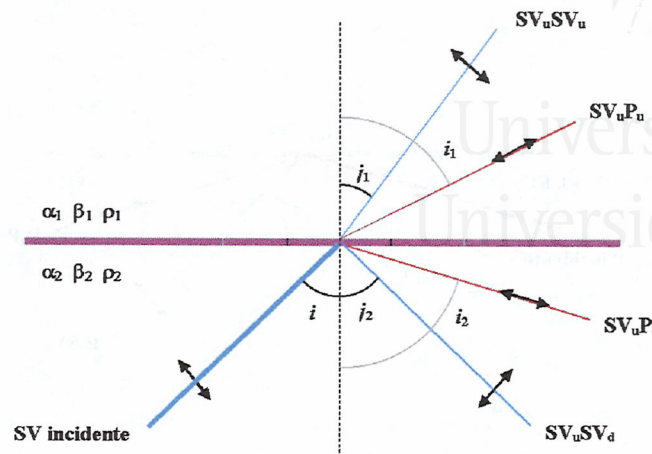


Figura 4.7 Rayos generados por la incidencia de un rayo SV (desde el medio 2) sobre una interfase sólido-sólido.

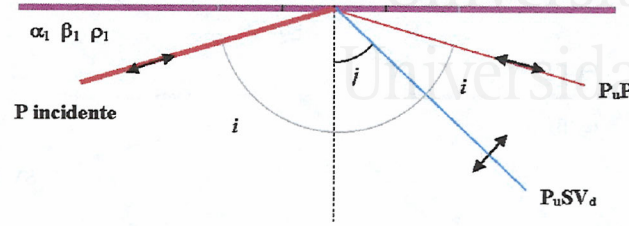
En el caso de tratarse de una interfase entre un sólido y la superficie libre, no habrá ondas refractadas (figura 4.8). De este modo, se pueden distinguir sólo cuatro casos posibles.

Onda P incidente sobre la superficie (figura 4.8a):

$$P_u P_d = \frac{-\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2\right)^2 + 4p^2 \frac{\cos(i)}{\alpha} \frac{\cos(j)}{\beta}}{\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2\right)^2 + 4p^2 \frac{\cos(i)}{\alpha} \frac{\cos(j)}{\beta}}$$

$$P_u SV_d = \frac{4 \frac{\alpha}{\beta} p \frac{\cos(i)}{\alpha} \left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2\right)}{\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2\right)^2 + 4p^2 \frac{\cos(i)}{\alpha} \frac{\cos(j)}{\beta}} \tag{4.19}$$

a.



b.

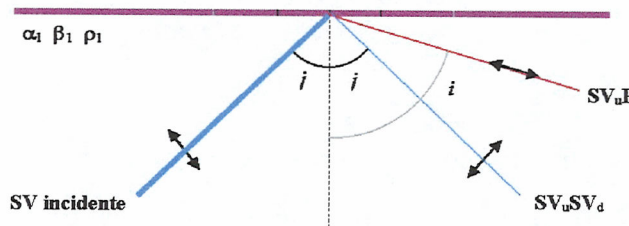


Figura 4.8 Rayos generados por la incidencia de un rayo P o SV sobre una interfase sólido-superficie.

Onda SV incidente sobre la superficie (figura 4.8b):

$$\begin{aligned}
 S V_u P_d &= \frac{4 \frac{\beta}{\alpha} p \frac{\cos(j)}{\beta} \left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2 \right)}{\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2 \right)^2 + 4p^2 \frac{\cos(i)}{\alpha} \frac{\cos(j)}{\beta}} \\
 S V_u S V_d &= \frac{\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2 \right)^2 - 4p^2 \frac{\cos(i)}{\alpha} \frac{\cos(j)}{\beta}}{\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2 \right)^2 + 4p^2 \frac{\cos(i)}{\alpha} \frac{\cos(j)}{\beta}}
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

4.2.4.3 Energías.

Cuando una onda incide sobre una interfase entre dos medios homogéneos, el flujo de energía que abandona esta interfase (en modo de cuatro ondas diferentes) debe ser igual a la energía de la onda incidente.

Por ejemplo, para el caso expuesto en la figura 4.4, se debe cumplir que el flujo de energía entrante sea igual al flujo de energía saliente (Aki, 1980):

$$\begin{aligned} \rho_1 \alpha_1 \cos(i) = & \rho_1 \alpha_1 \cos(i_1) (P_d P_u)^2 + \rho_1 \beta_1 \cos(j_1) (P_d S V_u)^2 \\ & + \rho_2 \alpha_2 \cos(i_2) (P_d P_d)^2 + \rho_2 \beta_2 \cos(j_2) (P_d S V_d)^2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

De manera muy parecida se puede obtener la relación entre energías para los diferentes casos vistos en el apartado 4.2.4.2.

4.2.5 Ondas precursoras.

Supongamos una onda P que incide sobre una interfase con un ángulo i , tal y como se mostraba en la figura 4.4. Esto producirá una onda P refractada que formará un ángulo i_2 con la vertical. Como ya se dijo en el apartado 4.2.4.1, este ángulo se puede calcular mediante la ley de Snell.

$$i_2 = \arcsin\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \sin(i)\right) \quad (4.22)$$

Observando la ecuación (4.22), se puede apreciar como conforme aumenta el valor del ángulo i , y siempre que $\alpha_2 > \alpha_1$, aumenta el valor del ángulo i_2 . Al ángulo de incidencia que hace que el ángulo del rayo refractado sea de 90° se le denomina ángulo crítico y su valor se calcula como:

$$i_c = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad (4.23)$$

donde v puede representar indistintamente a la velocidad de la onda P, o la velocidad de la onda S, y el único requerimiento para que haya ángulo crítico es que $v_2 > v_1$.

A la onda refractada generada por un ángulo de incidencia crítico se le denomina onda precursora ('head wave').

Después de la refracción esta onda viaja a lo largo de la interfase en el medio inferior con una velocidad de propagación v_2 . Conforme esta onda (de tipo P o SV) viaja por la interfase va produciendo ondas P y SV que se refractan hacia el medio superior con unos ángulos de salida que se obtienen por medio de la ley de Snell.

La amplitud de las ondas precursoras disminuye rápidamente con la distancia (Fowler, 1990):

$$A = \frac{A_0}{\sqrt{r(r-r_c)^3}} \quad (4.24)$$

donde r_c es la distancia recorrida por el rayo antes de llegar a la interfase.

Para el ángulo crítico, la distribución de energía en la interfase nos devuelve una energía para la onda refractada igual a cero, lo cual no se corresponde con la realidad. De hecho, las ondas refractadas producidas con ángulos de incidencia muy cercanos al ángulo crítico contienen una elevada energía, que es mayor conforme más cerca se está de la horizontal. De manera intuitiva, Sheriff (1991) muestra que el coeficiente de transmisión se anula para el ángulo crítico, no porque se anule la amplitud de la onda refractada, sino porque el ancho del rayo refractado se aproxima a cero conforme el ángulo de refracción se aproxima a 90° (figura 4.9).

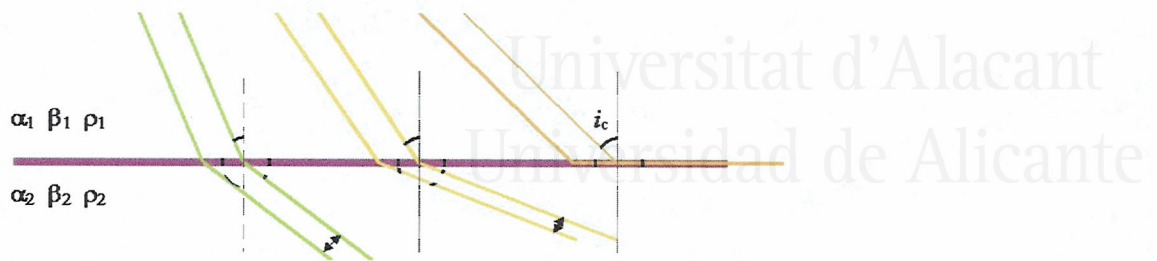


Figura 4.9 Anchura del rayo refractado en función del ángulo de incidencia.

4.3 Propagación de ondas Rayleigh.

Siempre que haya una superficie que separe medios de diferentes propiedades elásticas, pueden existir ondas superficiales. La onda superficial más importante, aunque no la única, es la onda Rayleigh que se propaga a lo largo de la superficie libre de un sólido.

Las ondas Rayleigh involucran la interacción entre dos ondas P y SV evanescentes². Lord Rayleigh muestra que las condiciones de contorno en la interfase sólido-superficie se pueden satisfacer con la presencia conjunta de estas dos ondas viajando a lo largo de la superficie con una velocidad inferior a la a la velocidad de la onda S y con una amplitud que decae exponencialmente con la profundidad.

Suponiendo un material de coeficiente de Poisson igual a 0.25, se tiene que la velocidad de fase de la onda Rayleigh es 0.919β (Sheriff, 1991). Con esta velocidad

² Para ángulos de incidencia superiores al ángulo crítico, la ley de Snell devuelve ángulos de refracción imaginarios, lo cual da lugar a las llamadas ondas evanescentes que se propagan a lo largo de la dirección horizontal, y cuya amplitud decrece exponencialmente con la profundidad.

de fase, el desplazamiento producido por la onda Rayleigh en el plano de propagación x - z se puede expresar como (Lay y Wallace, 1995):

$$\begin{aligned} u_x &= -Ak \sin(kx - \omega t) \cdot \left[e^{-0.85kz} - 0.58e^{-0.39kz} \right] \\ u_z &= -Ak \cos(kx - \omega t) \cdot \left[0.85e^{-0.85kz} - 1.47e^{-0.39kz} \right] \end{aligned} \quad (4.24)$$

El desplazamiento producido por la onda Rayleigh depende de forma armónica de la distancia x , y de forma exponencial de la profundidad z . Como los movimientos asociados a u_x y a u_z están desfasados 90° , la combinación de ambos produce un movimiento elíptico retrogrado.

4.3.1 Pérdidas de energía.

Al igual que las ondas de volumen, las ondas Rayleigh presentan pérdidas de energía a lo largo de su trayectoria debido a la dispersión geométrica y a la absorción.

En este caso las ondas se expanden de forma cilíndrica sobre la superficie con lo cual la amplitud del desplazamiento en un punto dado será:

$$A = \frac{A_0}{\sqrt{r}} \quad (4.25)$$

Las pérdidas por absorción se rigen por las mismas expresiones, (4.11) y (4.12), que se dieron para las ondas de volumen, donde ahora el factor de atenuación Q se substituye por el factor de atenuación específico de la onda Rayleigh, Q_R .

4.3.2 Dispersión.

En el caso de un semiespacio homogéneo, la velocidad de las ondas Rayleigh no depende de la frecuencia. Sin embargo, para medios estratificados o heterogéneos verticalmente, las ondas Rayleigh son dispersivas.

Según la ecuación (4.24), las componentes del desplazamiento de la onda Rayleigh son dos funciones armónicas puras de frecuencia ω . Sin embargo, cualquier fuente sísmica producirá ondas con un determinado ancho de banda, lo cual implica tener un conjunto continuo de frecuencias donde cada una de ellas tendrá asociada un desplazamiento como el mostrado en (4.24). Además, la dispersión debida al medio estratificado produce que cada una de estas componentes armónicas se propague con distinta velocidad. El conjunto de ondas da lugar a patrones de interferencia constructivos, que se comportan como un paquete de ondas propagándose con una determinada velocidad de grupo.

El desplazamiento total de la onda Rayleigh se puede interpretar como la suma de un continuo de términos armónicos, con amplitud uniforme y velocidad dependiente de la frecuencia, sobre una banda finita de frecuencias $\Delta\omega$ centrada sobre la frecuencia media ω_0 (Lay y Wallace, 1995). Con esta consideración el desplazamiento total de la onda Rayleigh se puede expresar como:

$$\begin{aligned}
 U_x &= \Delta\omega \cdot \frac{\sin(Y)}{Y} \cdot u_x|_{\omega_0} \\
 U_z &= \Delta\omega \cdot \frac{\sin(Y)}{Y} \cdot u_z|_{\omega_0}
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

donde Y es un término dependiente de la velocidad de grupo, v_g , que se expresa como:

$$Y = \left(\frac{\Delta\omega}{2} \right) \cdot \left(t - \frac{x}{v_g} \right) \quad (4.26)$$

4.4 Generación de sismogramas sintéticos.

La Tierra en su conjunto se puede describir como un filtro que convierte una señal de entrada impulsiva en una serie de vibraciones que son registradas como un sismograma. El filtrado llevado a cabo por la Tierra consiste básicamente de cuatro procesos (Robinson, 1988):

- Conversión de un impulso en una onda dentro de la zona fuente.
- División de una onda en una sucesión de ondas como efecto de las reflexiones y refracciones en las interfases.
- Dispersión geométrica.
- Absorción.

En los apartados anteriores se han mostrado los tipos de onda que van a aparecer en un sismograma de componente vertical (P, SV, Rayleigh), se han visto los efectos que sobre estas ondas tiene las interfases, y por último también se han explicado como son las pérdidas de energía asociadas a los efectos de la dispersión geométrica y la absorción. En este apartado se combinan todos estos conceptos para dar lugar a un sismograma sintético.

Para ello se ha realizado una 'toolbox' para Matlab 5.3 llamada "Sismogramas_Sintéticos" (ver apéndice D) que incorpora todas las funciones necesarias para la generación de este tipo de sismogramas en un modelo estratificado

de tres capas homogéneas³.

Estas funciones se controlan a través de un interface del usuario, incluido con la 'toolbox' (figura 4.7). Esta interface se divide inicialmente en dos pantallas. En la primera, el usuario puede introducir para cada una de las tres capas los siguientes parámetros: profundidad; densidad; velocidad de propagación de las ondas P y S; y las constantes de atenuación asociadas con las ondas P y S. En la segunda pantalla se introducen datos referentes al tipo de pulso sísmico, las ondas Rayleigh, y la posición relativa fuente-sensor. El tipo de fuente sísmica se puede introducir en la simulación a través de un fichero de datos o un 'script' de Matlab. En cuanto a las ondas Rayleigh, los datos solicitados son la velocidad de fase, la velocidad de grupo, la frecuencia central, el ancho de banda para la simulación de la dispersión, y la constante de atenuación. Por último, permite seleccionar la posición x - z tanto de la fuente como del sensor, con la única restricción de que estos se han de encontrar sobre la primera capa.

Bajo esta interface se encuentra un conjunto de funciones que se encargan de generar el sismograma sintético, cuya forma final (a la llegada al sensor) depende fundamentalmente de tres cosas: las trayectorias escogidas para la simulación, el tipo de pulso fuente, y los parámetros característicos introducidos (velocidades, frecuencia de dispersión de la onda Rayleigh, etc.).

4.4.1 Selección de las trayectorias de los rayos.

Para generar los sismogramas sintéticos mediante el método de trazado de rayos se ha seleccionado un conjunto de 94 posibles trayectorias, a las que se le añadió la contribución de la onda Rayleigh. Estas trayectorias se han escogido de forma que el número total de reflexiones y refracciones no supere el número de tres.

³ Se ha elegido un modelo de tres capas porque, según se vio en el capítulo 2, es el que se aproxima al modelo de estructura de corteza local asociado a la provincia de Alicante.

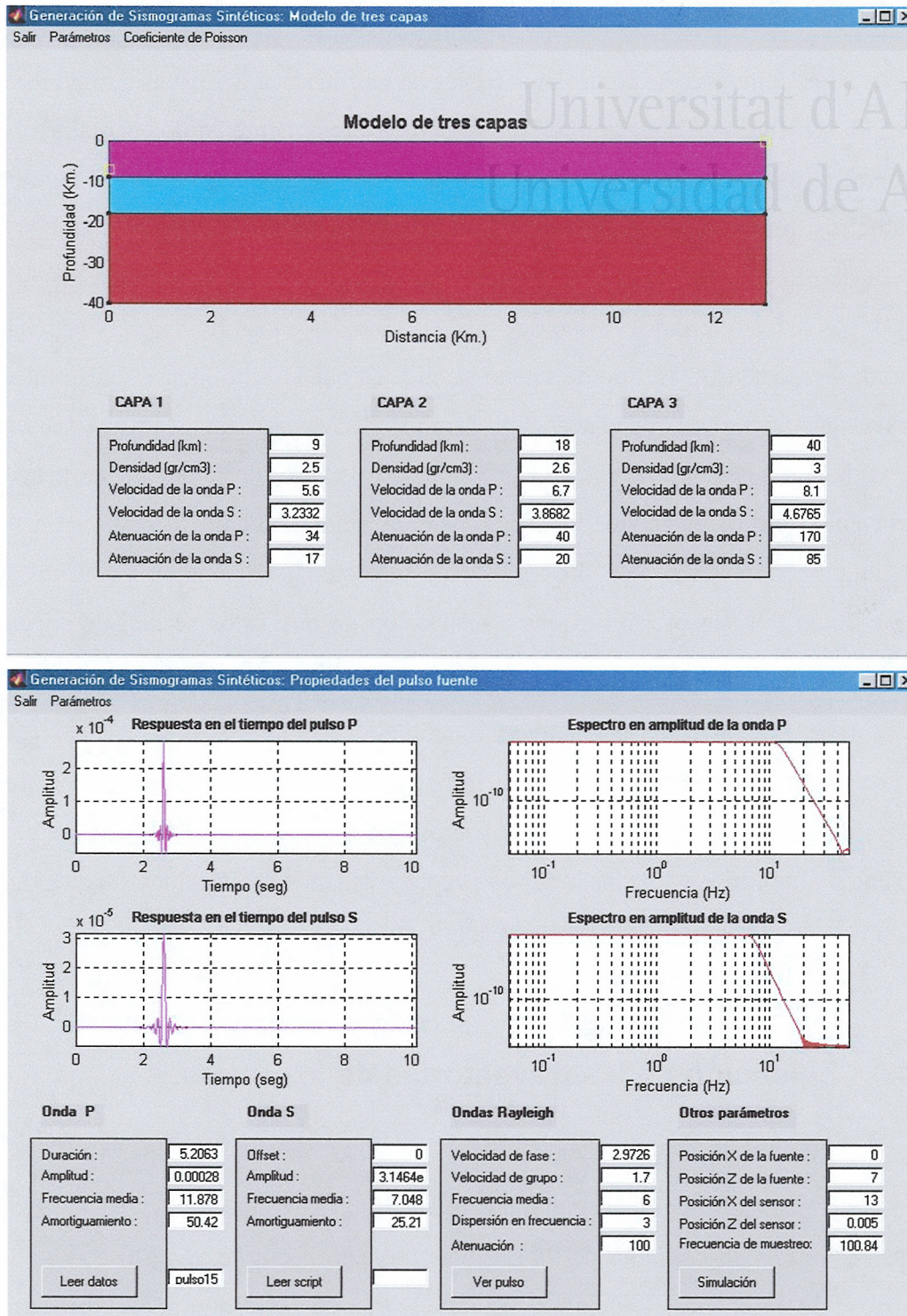


Figura 4.10 Interface del usuario del programa de simulación.

Rayos con mayor número de interacciones con interfases llegan con una amplitud muy pequeña y por eso ya no se han considerado.

El conjunto de rayos trazados se puede dividir en 10 tipos de trayectorias distintas (figura 4.11), las cuales se describen a continuación.

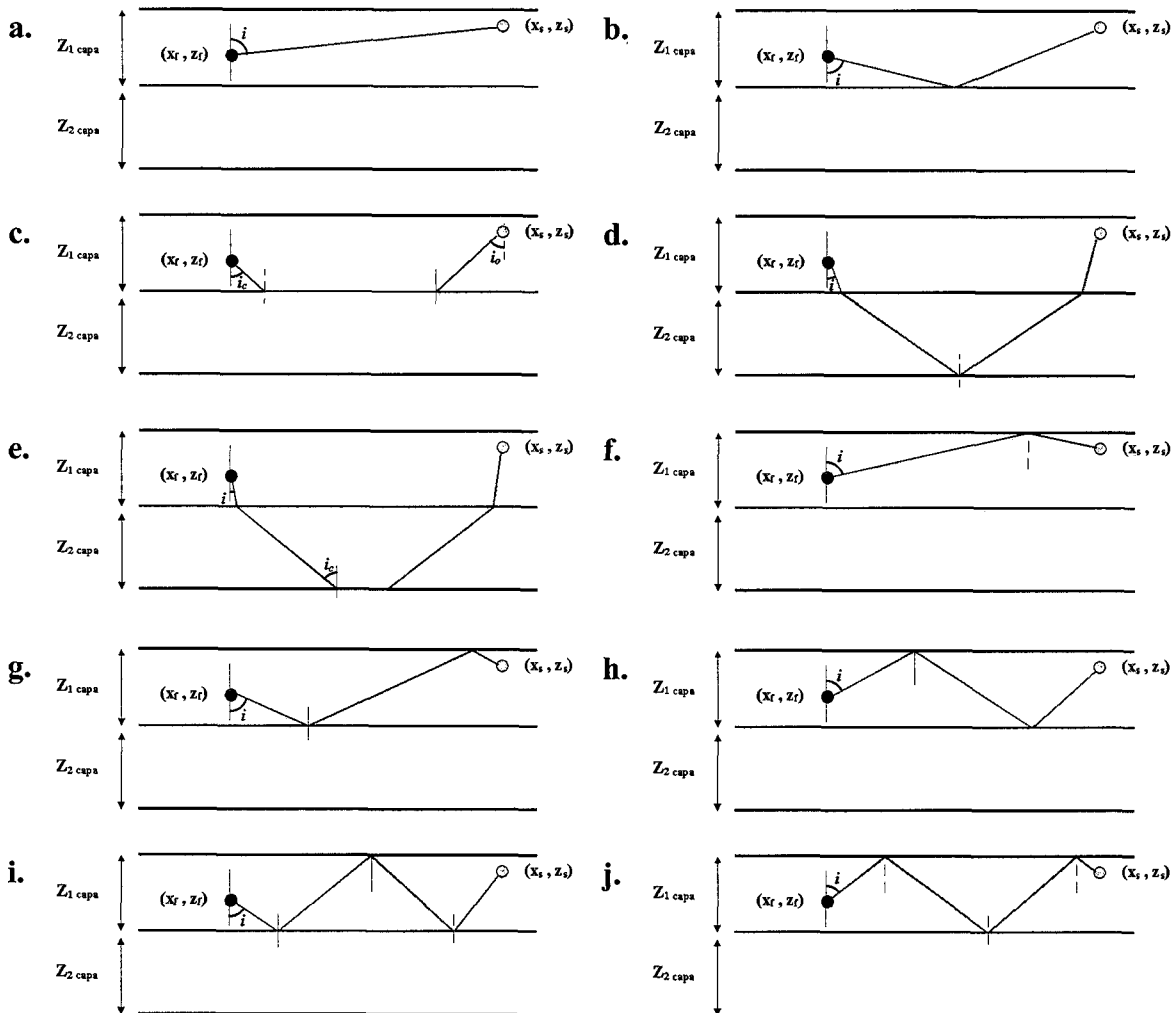


Figura 4.11 Trayectorias de los rayos.

Rayo directo (figura 4.12).

Rayo P o S que sigue una trayectoria recta entre la fuente y la estación o sensor.

El ángulo de salida del rayo se calcula directamente a partir de las coordenadas de la fuente y el sensor:

$$i = \frac{\pi}{2} - \text{abs} \left[a \tan \left(\frac{z_s - z_f}{x_s - x_f} \right) \right] \quad (4.27)$$

El tiempo de viaje es simplemente el cociente entre la distancia fuente-sensor y la velocidad de la onda.

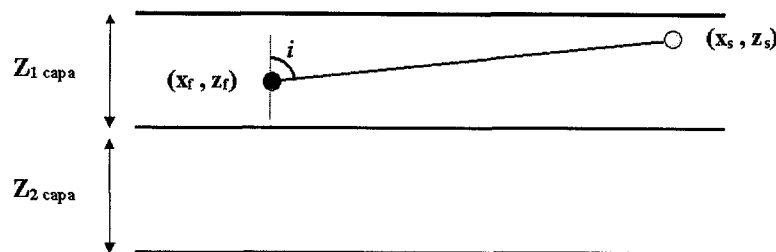


Figura 4.12 Trayectoria de un rayo directo.

La amplitud del desplazamiento en el sensor se obtiene aplicando las fórmulas (4.10), (4.11), y (4.12) correspondientes a las pérdidas por dispersión geométrica y absorción.

Una vez en el sensor, el vector del rayo hay que descomponerlo en sus componentes \$x\$ y \$z\$, para quedarse sólo con la componente \$z\$ (sismograma de componente vertical).

Rayo reflejado en la primera interfase (figura 4.13).

Este tipo de trayectoria da lugar a cuatro posibles situaciones pues la onda incidente puede ser P o S, y la onda reflejada también.

Para esta clase de trayectorias y todas las siguientes, lo primero que se calcula es el ángulo de partida del rayo. Para ello se aplica la ley de Snell en cada una de las interfases que pueda haber en la trayectoria (en este caso sólo hay una), dando lugar al final a una ecuación trascendente con una sola incógnita: el ángulo de partida. En este tipo de trayectoria el ángulo se puede obtener a partir de las ecuaciones siguientes:

$$z_1 = z_{1\text{capa}} - z_f$$

$$z_2 = z_{1\text{capa}} - z_s$$

$$dd = x_s - x_f$$

$$z_2 \cdot \tan \left[\arcsin \left(\frac{v_{01}}{v_{12}} \sin(i) \right) \right] + z_1 \cdot \tan(i) - dd = 0 \quad (4.28)$$

La velocidad v_{ab} se refiere a la velocidad con que se propaga la onda P o S en el tramo recto comprendido entre el punto a y el punto b . Ésta será la nomenclatura empleada en el resto de trayectorias, correspondiendo siempre el punto 0 a la fuente e incrementando cada nuevo vértice en uno hasta llegar al sensor.

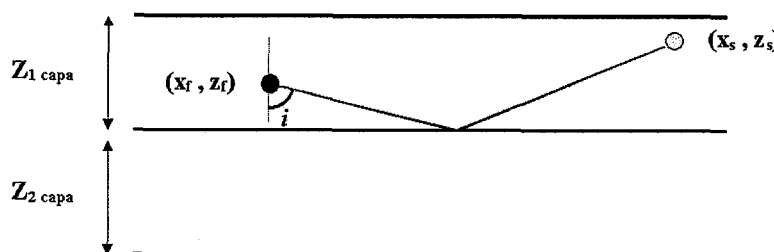


Figura 4.13 Trayectoria de un rayo reflejado en la primera interfase.

El tiempo de viaje total es la suma de los tiempos de viaje empleados en cada uno de los tramos rectos de la trayectoria, donde estos tiempos son calculados como el cociente entre el espacio recorrido y la velocidad de propagación correspondiente.

En cuanto a las pérdidas de energía, estas se calculan tramo por tramo, teniendo también en cuenta la distribución de energía que se produce en cada una de las interfases que separa un tramo del otro.

Esta forma de determinar los tiempos y amplitudes de llegada se aplica sobre el resto de trayectorias, independientemente del número de tramos rectos que tenga cada una de ellas.

Rayo crítico que se propaga a lo largo de la primera interfase (figura 4.14).

En este caso el rayo inicial (P o S) incide sobre la primera interfase con un ángulo crítico dando lugar a una onda precursora que se propaga a través de la propia interfase. El valor de este ángulo crítico es:

$$i_c = a \sin\left(\frac{v_{01}}{v_{12}}\right) \quad (4.29)$$

Mientras, el rayo que llega al sensor puede ser tanto P como S, y lo hará con un ángulo de salida igual a:

$$i_o = a \sin\left(\frac{v_{23}}{v_{01}} \sin(i_c)\right) \quad (4.30)$$

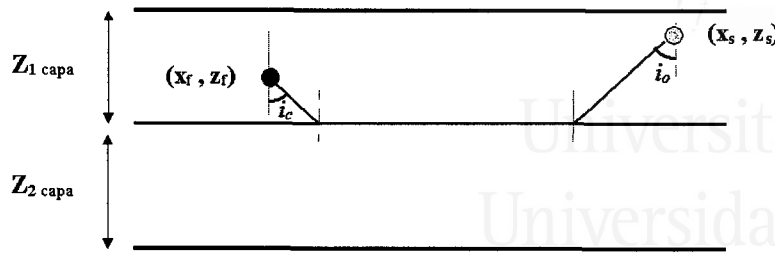


Figura 4.14 Trayectoria de un rayo que incide con ángulo crítico sobre la primera interfase y se propaga a lo largo de ésta.

Rayo incidente que se refracta en la primera interfase, se refleja en la segunda interfase, se vuelve a refractar en la primera interfase y finalmente llega al sensor (figura 4.15).

Este tipo de trayectoria da lugar a 16 posibles combinaciones ya que está compuesta por 4 tramos rectos y en cada uno de ellos se puede tener una onda P o una onda S.

El ángulo de salida del rayo incidente se obtendrá a partir de las siguientes ecuaciones:

$$d1 = (z_{1capa} - z_f) \cdot \tan(i)$$

$$d2 = (z_{2capa} - z_{1capa}) \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d3 = (z_{2capa} - z_{1capa}) \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{23}}{v_{12}} \sin \left(\text{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right) \right) \right]$$

$$d4 = (z_{1capa} - z_s) \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{34}}{v_{23}} \sin \left(\text{asin} \left(\frac{v_{23}}{v_{12}} \sin \left(\text{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right) \right) \right) \right) \right]$$

$$d1 + d2 + d3 + d4 - (x_s - x_f) = 0 \quad (4.31)$$

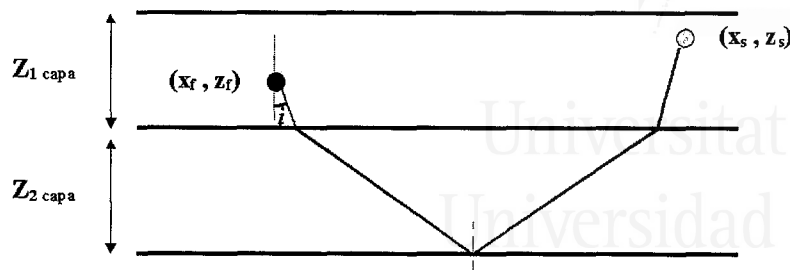


Figura 4.15 Rayo incidente que se refracta en la primera interfase, se refleja en la segunda interfase, y se vuelve a refractar en la primera interfase para llegar al sensor.

Rayo incidente que se refracta en la primera interfase, incide con un ángulo crítico sobre la segunda, y se vuelve a refractar en la primera interfase para llegar al sensor (figura 4.16).

En este caso también existen 16 posibles combinaciones de rayos P y S. La diferencia con las trayectorias anteriores es que ahora el rayo incide en la segunda interfase con un ángulo crítico provocando una onda precursora que viaja a la velocidad de la tercera capa.

El ángulo crítico y el ángulo de salida del rayo inicial se pueden calcular como:

$$i_c = \text{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{23}} \right) \quad (4.32)$$

$$i = \text{asin} \left(\frac{v_{01}}{v_{12}} \sin(i_c) \right) \quad (4.33)$$

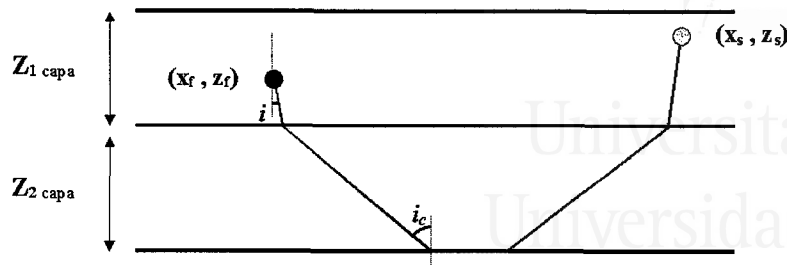


Figura 4.16 Rayo incidente que se refracta en la primera interfase, incide con un ángulo crítico sobre la segunda, y se vuelve a refractar en la primera interfase para llegar al sensor.

Rayo reflejado en la superficie (figura 4.17).

En este tipo de trayectorias se tiene una onda P o S que se refleja en la superficie y va a parar al sensor como P o S.

El ángulo de salida del rayo inicial se calcula a partir de las siguientes ecuaciones:

$$d1 = z_f \cdot \tan(i)$$

$$d2 = z_s \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d1 + d2 - (x_s - x_f) = 0 \tag{4.34}$$

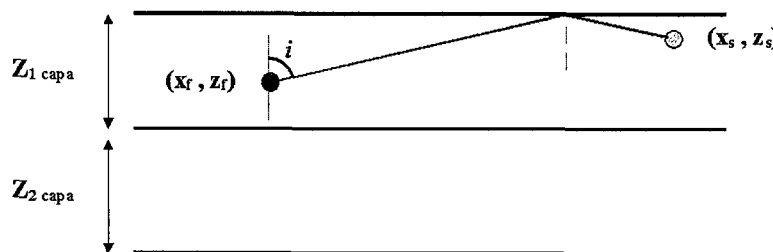


Figura 4.17 Trayectoria del rayo reflejado en la superficie.

Rayo reflejado en la primera interfase y después reflejado en la superficie (figura 4.18).

De esta clase de trayectoria se pueden presentar 8 casos diferentes, donde el ángulo de salida del rayo inicial se puede obtener mediante las ecuaciones que se exponen a continuación:

$$d1 = (z_{1\text{capa}} - z_f) \cdot \tan(i)$$

$$d2 = z_{1\text{capa}} \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d3 = z_s \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{23}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d1 + d2 + d3 - (x_s - x_f) = 0 \quad (4.35)$$

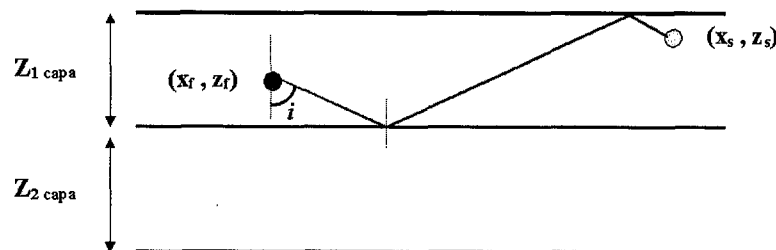


Figura 4.18 Trayectoria de un rayo que se refleja en la primera interfase y después en la superficie.

Rayo reflejado en la superficie y después reflejado en la primera interfase (figura 4.19).

Este caso es similar al anterior, con 8 posibles combinaciones de rayos P y S, y un ángulo de salida \$i\$ que se obtiene resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$d1 = z_f \cdot \tan(i)$$

$$d2 = z_{1\text{capa}} \cdot \tan \left[\operatorname{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d3 = (z_{1\text{capa}} - z_s) \cdot \tan \left[\operatorname{asin} \left(\frac{v_{23}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d1 + d2 + d3 - (x_s - x_f) = 0 \quad (4.36)$$

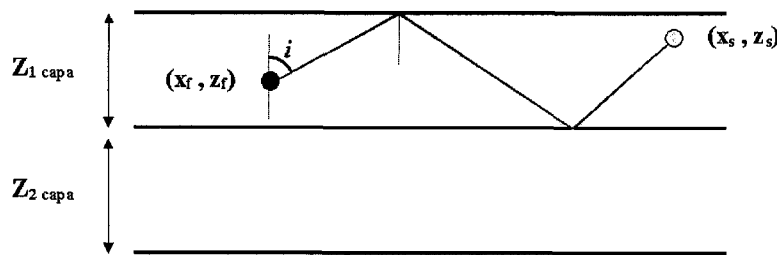


Figura 4.19 Trayectoria de un rayo que se refleja en la superficie y después en la primera interfase.

Rayo reflejado en la primera interfase, reflejado en la superficie, y finalmente reflejado de nuevo en la primera interfase (figura 4.20).

Como se deduce fácilmente, ahora hay tres interacciones con interfases y 16 posibles combinaciones. En este caso el ángulo de salida se obtiene del siguiente conjunto de ecuaciones:

$$d1 = (z_{1\text{capa}} - z_f) \cdot \tan(i)$$

$$d2 = z_{1\text{capa}} \cdot \tan \left[\operatorname{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d3 = z_{1\text{capa}} \cdot \tan \left[\operatorname{asin} \left(\frac{v_{23}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d4 = (z_{1\text{capa}} - z_s) \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{34}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d1 + d2 + d3 + d4 - (x_s - x_f) = 0 \quad (4.37)$$

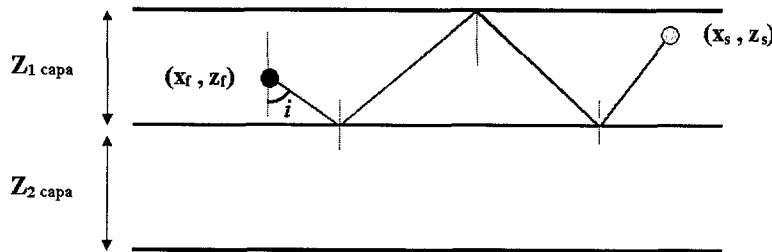


Figura 4.20 Rayo reflejado en la primera interfase, reflejado en la superficie, y finalmente reflejado de nuevo en la primera interfase

Rayo reflejado en la superficie, reflejado en la primera interfase, y finalmente reflejado de nuevo en la superficie (figura 4.21).

16 nuevas combinaciones de rayos P y S cuyo ángulo de salida es la solución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$d1 = z_f \cdot \tan(i)$$

$$d2 = z_{1\text{capa}} \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{12}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d3 = z_{1\text{capa}} \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{23}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d4 = z_s \cdot \tan \left[\text{asin} \left(\frac{v_{34}}{v_{01}} \sin(i) \right) \right]$$

$$d1 + d2 + d3 + d4 - (x_s - x_f) = 0 \quad (4.38)$$

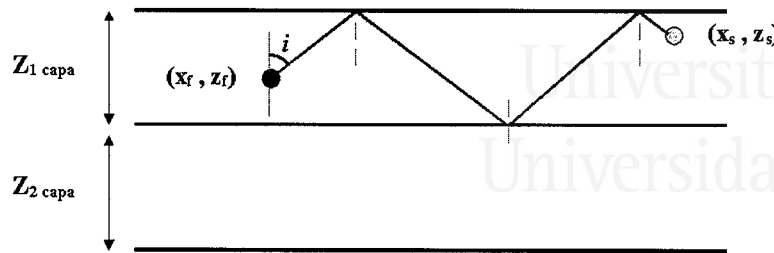


Figura 4.21 Rayo reflejado en la superficie, reflejado en la primera interfase y finalmente reflejado de nuevo en la superficie.

4.4.2 Selección del pulso de la fuente.

Para poder obtener el sismograma sintético en la posición del sensor es necesario convolucionar lo que se podría llamar filtro Tierra con un determinado pulso, que representa el desplazamiento producido por una explosión o ruptura en el área inmediata a la zona fuente.

La envolvente del espectro del pulso de desplazamiento de una onda S para campo lejano se puede modelizar como (Brune, 1970):

$$\langle u(\omega) \rangle = \langle \mathfrak{R}_{\theta\phi} \rangle \frac{\sigma\beta}{\mu} \frac{r}{R} F(\varepsilon) \frac{1}{\omega^2 + \delta^2} \quad (4.39)$$

donde $\langle \mathfrak{R}_{\theta\phi} \rangle$ es el patrón de radiación promedio que toma un valor de 0.4 (Brune, 1970); μ es el factor de rigidez; r es el radio de una superficie de dislocación circular equivalente; R es la distancia hipocentral, σ es el esfuerzo efectivo, $F(\varepsilon)$ es la fracción de la caída de esfuerzos, y $\delta = 2.34 \cdot (\beta / r)$ (Brune, 1971).

La función anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$\langle u(\omega) \rangle = \left[\langle \Re_{\theta \phi} \rangle \frac{\sigma \beta}{\mu} \frac{r}{R} F(\varepsilon) \frac{1}{\delta^2} \right] \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\delta} \right)^2} \quad (4.40)$$

donde para unos valores dados, el término entre corchetes será igual a una constante y por tanto la ecuación (4.40) se podrá escribir como:

$$\langle u(\omega) \rangle = \frac{A_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\delta} \right)^2} \quad (4.41)$$

La ecuación anterior se puede identificar con un filtro Butterworth de 1 orden, donde el parámetro δ se corresponde con la frecuencia de corte ω_c .

Sin embargo, en sismogramas reales se puede comprobar como la caída del espectro del primer pulso⁴ es de un orden bastante mayor que 1. Por este motivo, en varias referencias (Correig, 1996; Jáuregui, 1997) se utiliza una función como la siguiente:

$$\langle u(\omega) \rangle = \frac{A_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^\gamma} \quad (4.42)$$

El término A_0 se corresponde con el módulo de la región plana del espectro a frecuencias bajas, mientras que γ controla la pendiente de caída del espectro a frecuencias altas.

Para un sismograma real dado se pueden calcular los valores de A_0 , ω_c , y γ ajustando el espectro en desplazamiento real con la función (4.42) (Jáuregui, 1997). Esto nos sirve para realizar una estimación del rango en el que oscilan estos parámetros y así poderlos utilizar a la hora de generar un pulso sintético mediante (4.42).

⁴ Generalmente el primer pulso es una onda directa que no está muy contaminada por los efectos del camino y puede proporcionar una estimación del espectro de la fuente (Correig, 1996).

En nuestro caso se obtiene que A_0 es del orden de 10^{-3} a 10^{-4} m·s; f_c varía en torno a 8 Hz para las ondas S; y el factor γ suele ser superior a 15.

4.4.3 Selección de parámetros característicos.

Antes de llevar a cabo cualquier tipo de simulación hay que seleccionar el conjunto de parámetros que se va introducir en el programa. Con el fin de conseguir una situación lo más parecida a la real, es importante que los valores que se den a estos parámetros sean unos valores coherentes, acordes con las características del ámbito de la red local. No obstante, cada usuario es libre de introducir cualquier otro tipo de conjunto de parámetros.

En la tabla 4.1 se muestran los valores que se han asignado por defecto a los parámetros relativos al modelo estratificado.

La profundidad de cada una de las tres capas, y la velocidad de la onda P en cada una de ellas viene dado por el modelo de estructura de corteza propuesto por Jáuregui (1997) y previamente comentado en el apartado 2.2.4.

La velocidad de la onda S depende de la velocidad de la onda P a través de la relación de Poisson.

$$\frac{\beta}{\alpha} = \sqrt{\frac{0.5 - \sigma}{1.0 - \sigma}} \quad (4.43)$$

Para la mayoría de rocas, $\sigma \approx 0.25$ (Fowler, 1990), y por tanto la relación anterior se puede expresar como:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \alpha \quad (4.44)$$

En cuanto a los factores de atenuación, estos dependen de la profundidad y son diferentes para las ondas P y S. En la tabla 4.1 se muestran los valores aproximados de Q_S para la región bética (Lana et al., 1999). En cuanto a los valores de Q_P , estos se pueden obtener suponiendo que $Q_P \approx 2Q_S$ (Lana et al., 1999).

Parámetro	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Profundidad (km)	9	18	40
Densidad (kg/m³)	2500	2600	3000
Velocidad de la onda P (km/s)	5.60	6.70	8.10
Velocidad de la onda S (km/s)	3.23	3.87	4.68
Factor de atenuación de la onda P	34	40	170
Factor de atenuación de la onda S	17	20	85

Tabla 4.1 *Propiedades asociadas a las capas del modelo de corteza.*

La densidad de cada una de las capas se ha asignado teniendo en cuenta que la densidad de la corteza oscila entre 2600 y 2900 kg/m³ (Dziewonski y Anderson, 1981) y que además ésta es cada vez mayor conforme se aumenta la profundidad.

A continuación se indican también los parámetros referentes a la onda Rayleigh. La velocidad de fase de este tipo de onda superficial está relacionada con la velocidad de fase de las ondas P y S, y se puede obtener a través de la siguiente expresión (Lay y Wallace, 1995):

$$\frac{c^2}{\beta^2} \left[\frac{c^6}{\beta^6} - 8 \frac{c^4}{\beta^4} + c^2 \left(\frac{24}{\beta^2} - \frac{16}{\alpha^2} \right) - 16 \left(1 - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \right) \right] = 0 \quad (4.45)$$

Donde c es la velocidad de fase buscada. Para una relación de Poisson $\sigma \approx 0.25$, esta ecuación se reduce a:

$$c = 0.9194 \beta \quad (4.46)$$

La velocidad de grupo de las ondas Rayleigh depende de la propia velocidad de fase y de la variación de ésta con el número de onda k .

$$v_g = c + k \frac{dc}{dk} \quad (4.47)$$

En general, en la Tierra la velocidad de fase decrece monótonamente con la frecuencia, de manera que $dc/dk < 0$ (Lay y Wallace, 1995) y por tanto se puede escoger una velocidad de grupo tal que $v_g < c$.

En cuanto al factor de atenuación, éste es del orden de 100 para ondas de periodo corto (Lay y Wallace, 1995).

De manera experimental se puede estimar la frecuencia central de oscilación de las ondas Rayleigh, resultando que ésta es siempre algo menor que la frecuencia de la onda S.

Por último, con el fin de representar los sismogramas que se obtienen en función del tiempo, se ha escogido una frecuencia de muestreo de 100.84 Hz, que coincide con la real.

4.4.4 Ejemplos de sismogramas sintéticos locales.

En este apartado se muestran dos ejemplos de sismogramas sintéticos obtenidos mediante este programa.

Para el primer ejemplo (figura 4.22) se ha utilizado un pulso fuente con las siguientes características: $A_0 \approx 2.3 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}$; $f_c = 7 \text{ Hz}$, y $\gamma = 23$. Los parámetros relativos a la estructura de la corteza son los mismos que figuran en la tabla 4.1. Para la onda Rayleigh se ha supuesto una velocidad de grupo de 1.7 km/s , una frecuencia central de 6 Hz , un ancho de banda de dispersión de 3 Hz , y un factor de atenuación de 100 . Por último, el foco de la fuente se ha situado a una profundidad de 7 km , mientras que el sensor se ha situado a una profundidad de 5 m y a una distancia epicentral de 13 km .

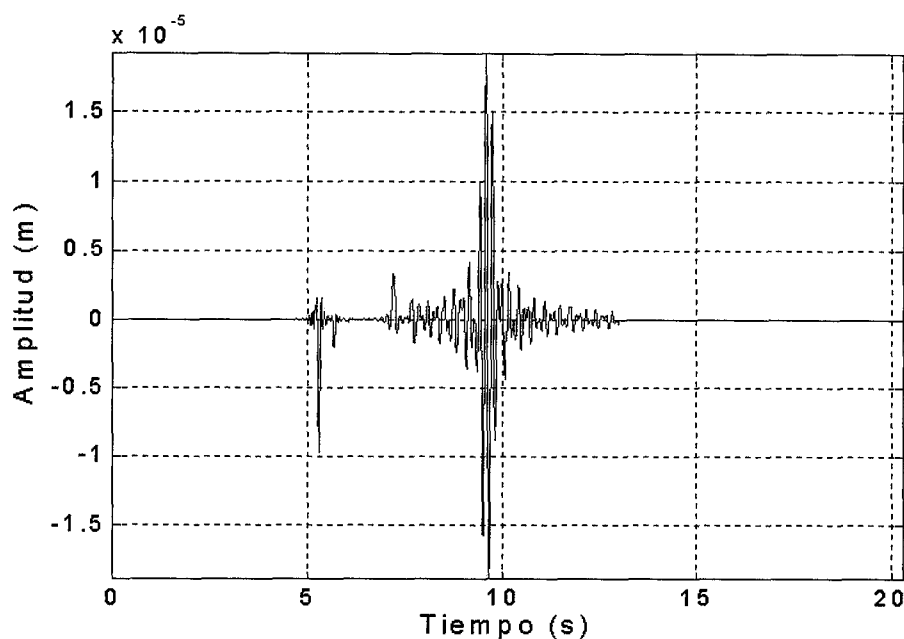


Figura 4.22 Sismograma sintético local $s_1(n)$.

Para el segundo ejemplo (figura 4.23) se han mantenido varios de los valores asignados en el caso anterior y sólo se han modificado los parámetros que se indican a continuación. Como pulso fuente se ha utilizado uno de características

$A_0 \approx 2.0 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}$; $f_c = 10 \text{ Hz}$, y $\gamma = 45$. Las constantes de amortiguamiento se han escogido como $Q_\alpha = 22$ y $Q_\beta = 13$ para la primera capa; y $Q_\alpha = 27$ y $Q_\beta = 16$ para la segunda capa. El foco de la fuente se ha situado a 1 km de profundidad y el sensor se ha ubicado a una distancia epicentral de 21 km.

Aparte del resultado gráfico, el programa de simulación devuelve un fichero de texto donde se encuentra información detallada acerca de cada uno de los rayos que han contribuido a la representación final. Esta información indica para cada tramo recto y para cada interfase de la trayectoria el porcentaje de flujo de energía final, el ángulo de incidencia, el espacio recorrido, el tiempo empleado, y la posición x - z final. En el apéndice A se muestran estos datos para los dos sismogramas sintéticos de ejemplo, $s_1(n)$ y $s_2(n)$. En ellos se puede observar como muchos de los rayos sufren una fuerte atenuación al reflejarse (o refractarse) sobre una interfase⁵. De ahí que su contribución al sismograma final sea muy pequeña. Además, también se puede notar la ausencia de alguna de las trayectorias comentadas en el apartado 4.4.1. Esto es debido a que el programa evalúa previamente para cada caso la posibilidad matemática de que pueda producirse una trayectoria dada. En nuestra situación en particular, para los ejemplos mostrados no llegan a producirse ondas precursoras en la interfase entre las capas segunda y tercera ya que la distancia fuente-sensor es muy pequeña.

⁵ Esta atenuación depende en gran medida del tipo de rayo incidente y del ángulo de incidencia, por lo cual no todos los rayos se ven atenuados en el mismo porcentaje.

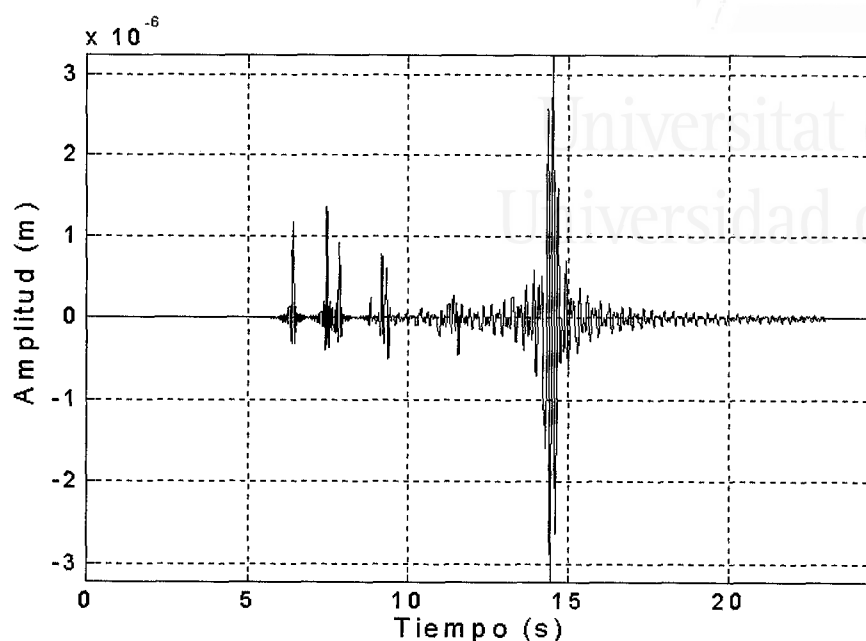


Figura 4.23 Sismograma sintético local $s_2(n)$.

Los dos sismogramas sintéticos obtenidos representan de forma teórica el movimiento del suelo que excita el sensor, pero no la señal que sería registrada por la red local. Para obtener esta última señal será necesario convolucionar los sismogramas $s_1(n)$ y $s_2(n)$ con la correspondiente respuesta instrumental (ver apartado 2.6) y añadirles una determinada señal de ruido.

$$x_{i,j}(n) = h_j(n) * s_i(n) + z_j(n) \quad (4.48)$$

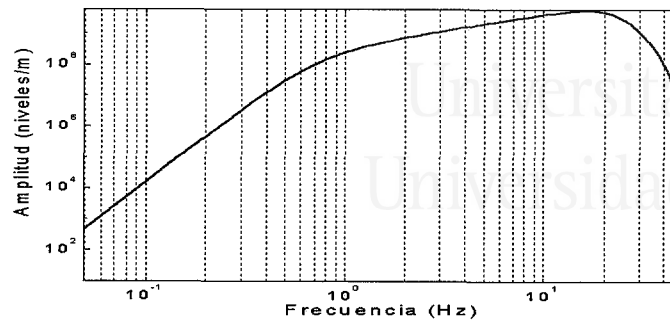
En esta ecuación, $h_j(n)$ representa la respuesta impulso asociada a cada una de las cuatro estaciones analógicas, $z_j(n)$ es una señal de ruido característica de cada uno de los emplazamientos, y $x_{i,j}(n)$ es la señal tal y como sería registrada.

En la figura 4.24 se representa la respuesta en frecuencia correspondiente a las cuatro estaciones analógicas. Como se puede observar la estación UNIP presenta

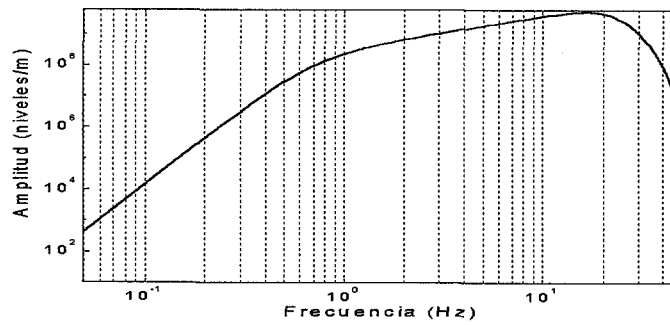
una factor de amplificación mucho menor que el resto de estaciones debido a su mayor proximidad a la unidad de registro.

Como señales de ruido se han utilizado señales reales obtenidas registrando durante unos minutos todo lo que detecta el sensor en ausencia de cualquier evento. En la figura 4.25 se muestran unos segundos de ruido correspondientes a cada una de las cuatro estaciones analógicas. Como se puede apreciar en estas gráficas, estas señales varían bastante en función del emplazamiento, diferenciándose especialmente del resto, el ruido asociado a la estación CREV.

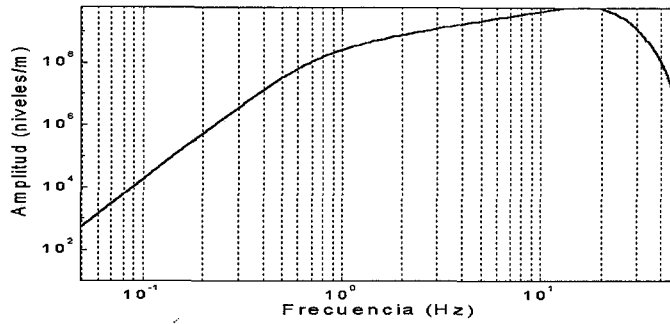
a.



b.



c.



d.

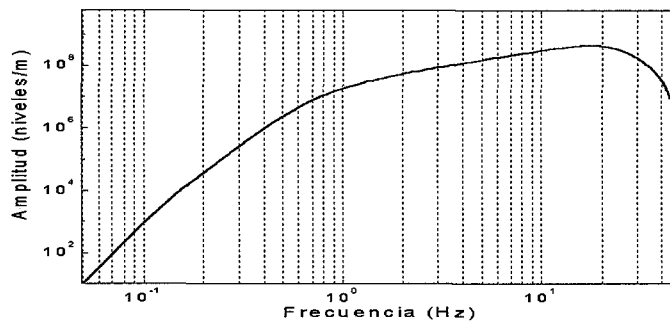


Figura 4.24 *Respuesta instrumental total de las estaciones MAIG (a), CREV (b), PUJA (c), y UNIP (d).*

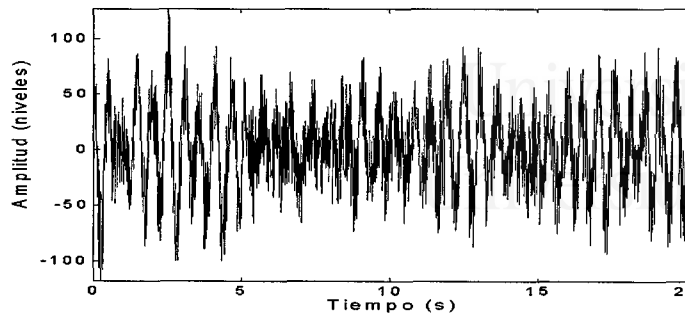
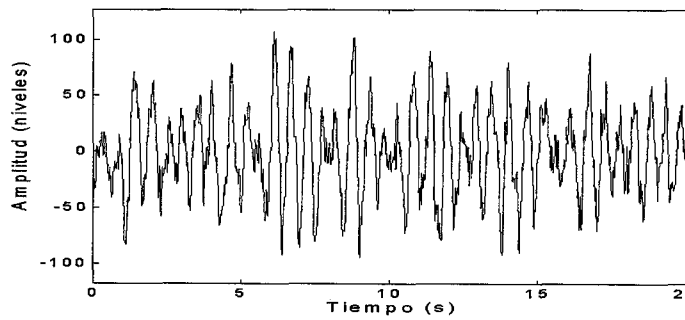
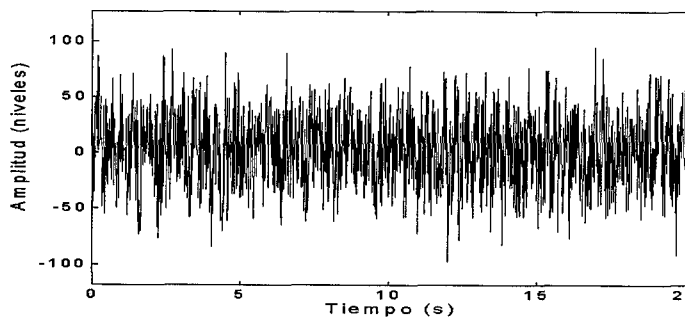
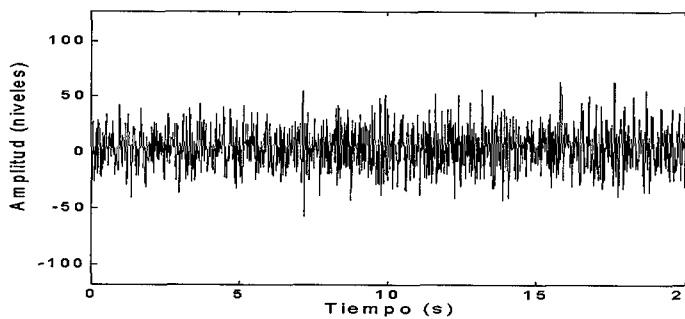
a.**b.****c.****d.**

Figura 4.25 Ruido característico de las estaciones MAIG (a), CREV (b), PUJA (c), y UNIP (d).

Una vez que se dispone de la respuesta instrumental y de la señal de ruido, se pueden obtener los sismogramas sintéticos tal y como serían registrados por la red local. En las figuras 4.26-29 se representa el sismograma $s_1(n)$ convolucionado con la respuesta instrumental de cada una de las estaciones y contaminado con el ruido característico de cada una de ellas. A la hora de añadirle la señal de ruido, el programa permite elegir la relación señal ruido (SNR) que se desea que tenga el sismograma final. Para este ejemplo se ha utilizado una SNR igual a 6. Lo mismo se ha realizado con la segunda señal de ejemplo, $s_2(n)$, obteniendo un sismograma final, $x_{2j}(n)$, con una SNR=5 (figuras 4.30-33).

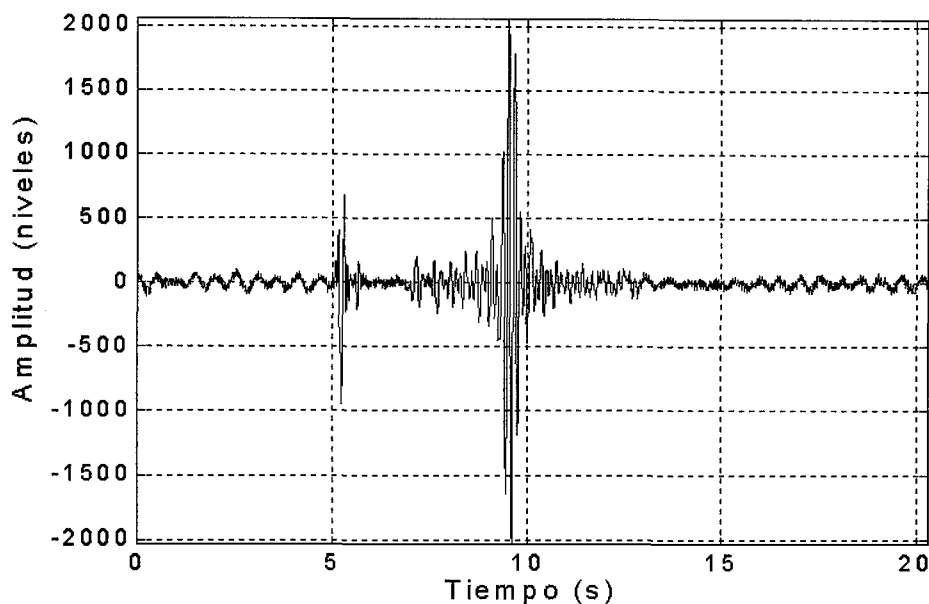


Figura 4.26 *Sismograma sintético $s_1(n)$ convolucionado con respuesta instrumental y con ruido asociado a la estación MAIG.*

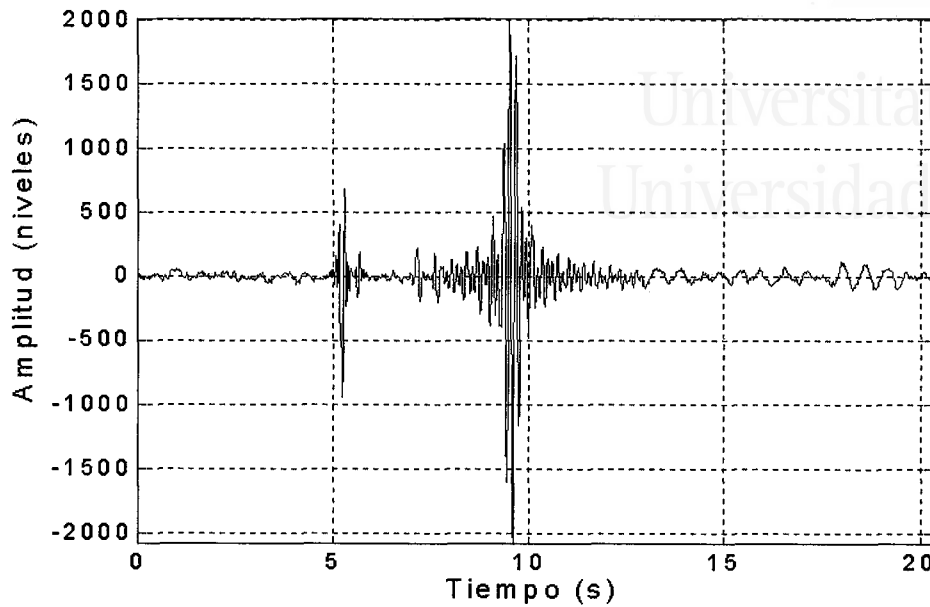


Figura 4.27 Sismograma sintético $s_1(n)$ convolucionado con respuesta instrumental y con ruido asociado a la estación CREV.

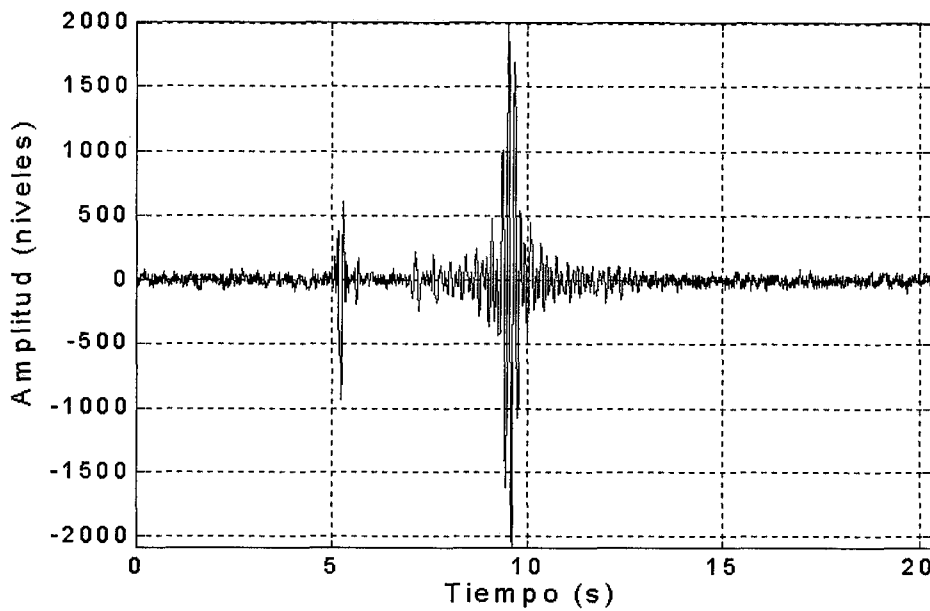


Figura 4.28 Sismograma sintético $s_1(n)$ convolucionado con respuesta instrumental y con ruido asociado a la estación PUJA.

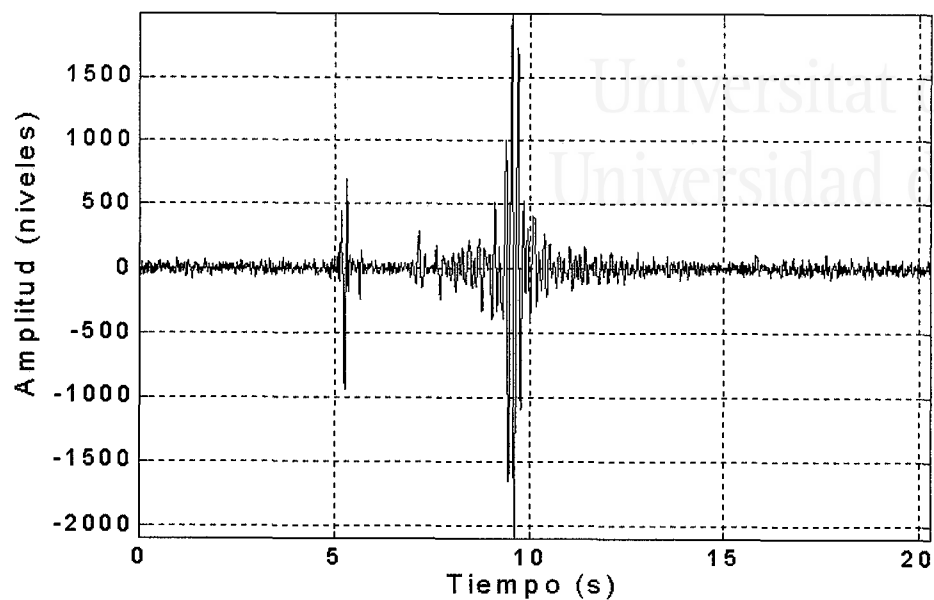


Figura 4.29 *Sismograma sintético $s_1(n)$ convolucionado con respuesta instrumental y con ruido asociado a la estación UNIP.*

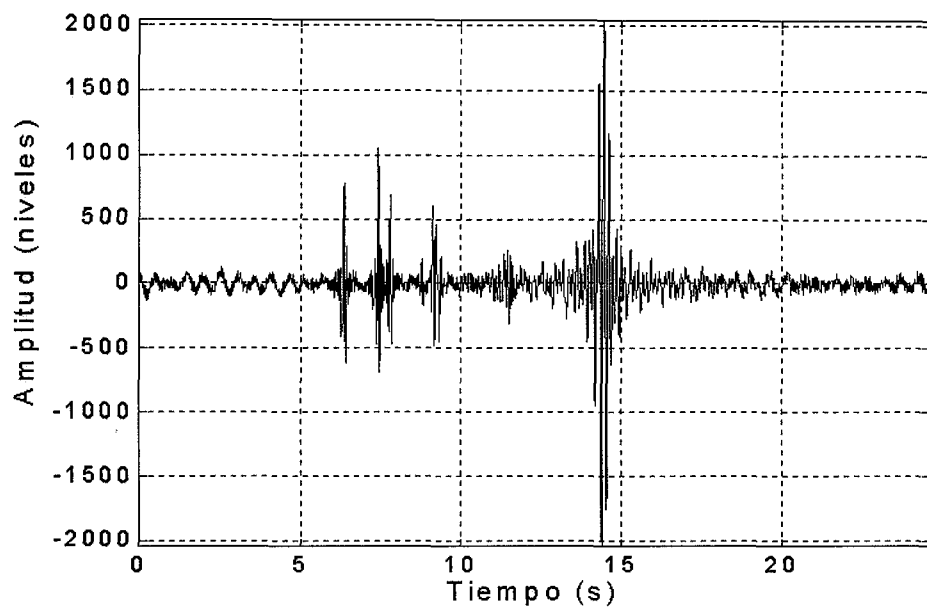


Figura 4.30 *Sismograma sintético $s_2(n)$ convolucionado con respuesta instrumental y con ruido asociado a la estación MAIG.*

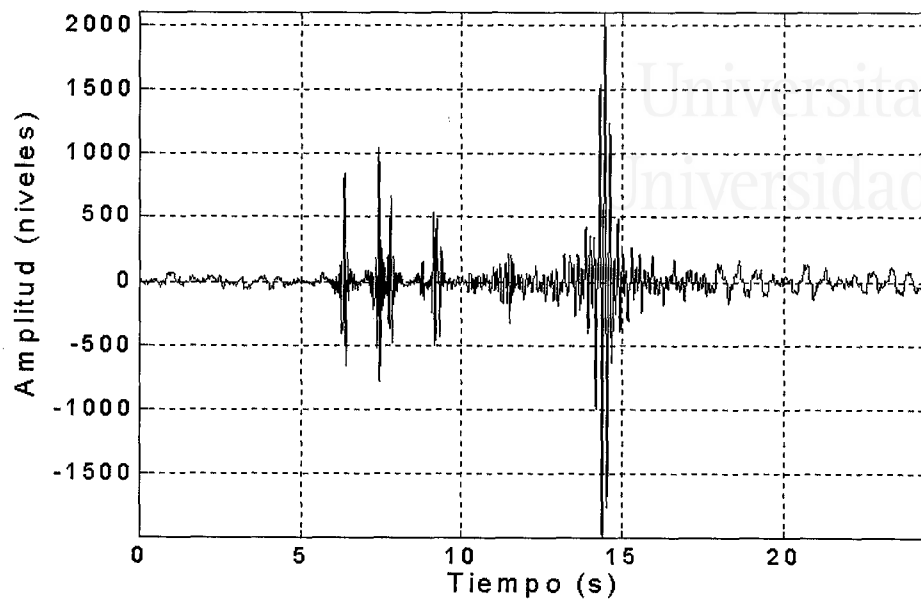


Figura 4.31 *Sismograma sintético $s_2(n)$ convolucionado con respuesta instrumental y con ruido asociado a la estación CREV.*

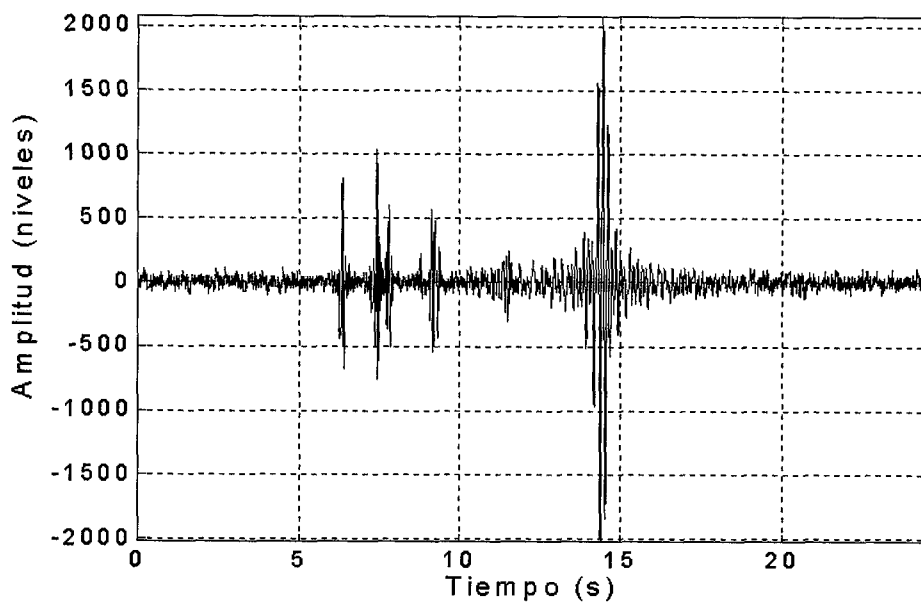


Figura 4.32 *Sismograma sintético $s_2(n)$ convolucionado con respuesta instrumental y con ruido asociado a la estación PUJA.*

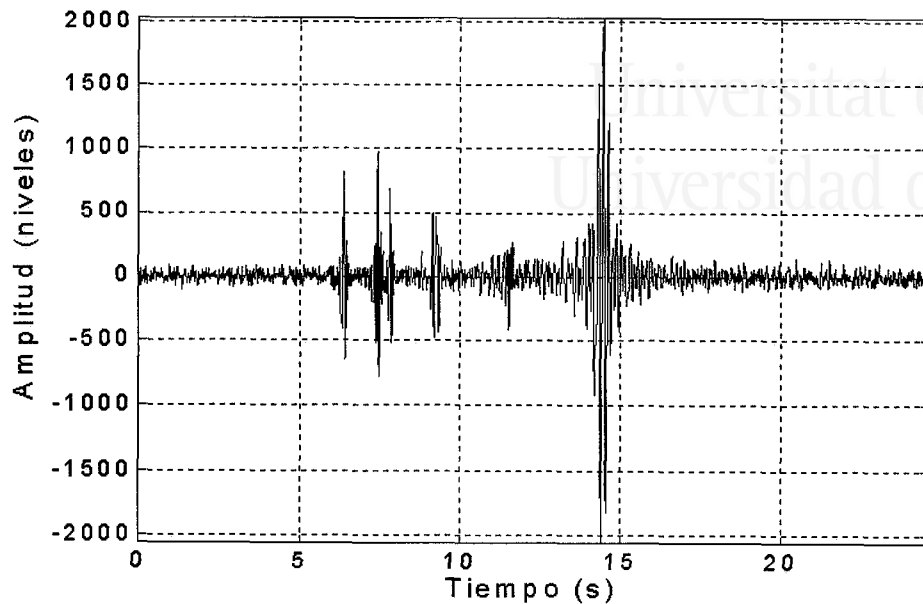
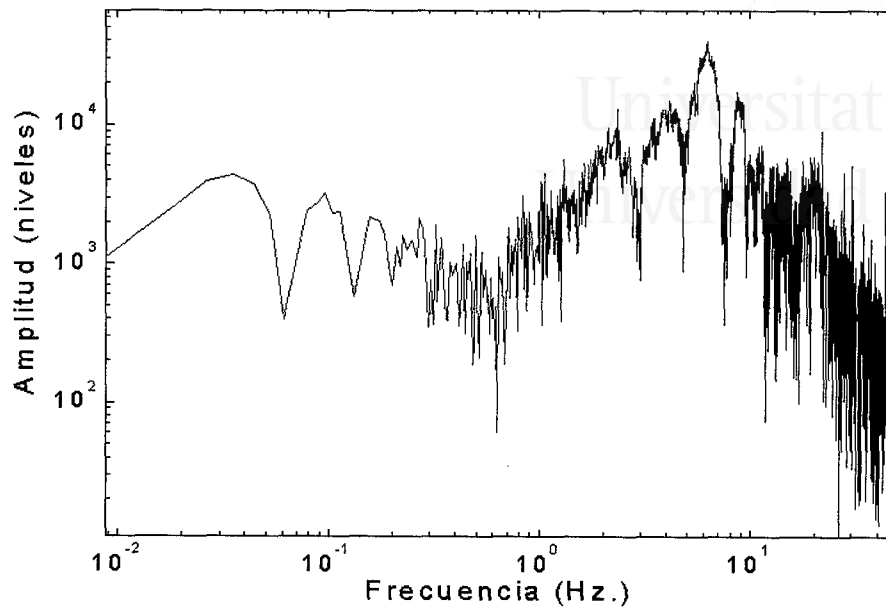


Figura 4.33 *Sismograma sintético $s_2(n)$ convolucionado con respuesta instrumental y con ruido asociado a la estación UNIP.*

El objetivo que se pretende alcanzar con estos sismogramas es obtener una señal similar (tanto en el tiempo como en la frecuencia) a los sismogramas reales registrados por la red, de forma que sirvan como señales de validación de ciertas aplicaciones de procesado de la señal. Con el fin de comprobar también la similitud existente entre los espectros sintéticos y reales, se presenta en la figura 4.34 el espectro de la señal $x_{2,4}(n)$ (registrada por UNIP) y se compara con el espectro de un sismograma real registrado por esta misma estación. En ambos casos la banda de mayor energía se encuentra entre los 4 y 7 Hz.

a.



b.

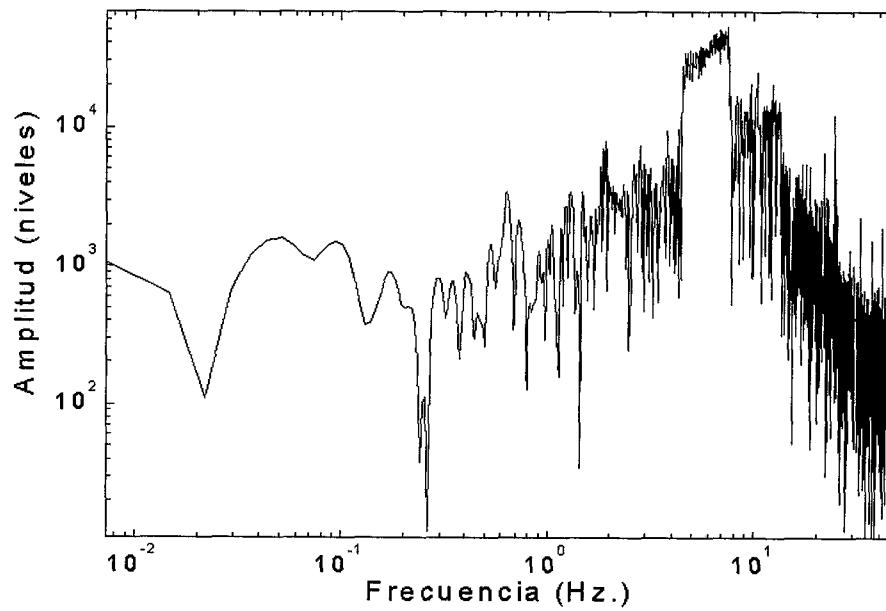


Figura 4.34 Comparación entre los espectros de un sismograma real (a) y un sismograma sintético (b).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

DECONVOLUCIÓN DE SISMOGRAMAS DE PERIODO CORTO

5.1 Introducción.

La deconvolución es un tema muy común en una amplia variedad de problemas de procesado de señal e imagen. Sus aplicaciones abarcan desde la restauración de imágenes satélite a la ecualización de canales de comunicación, y por supuesto también tiene su utilidad en el campo de la sismología.

En esta tesis, el proceso de deconvolución se centra sobre un problema real que afecta a los sismogramas registrados por la red local. Estos sismogramas están distorsionados por la respuesta instrumental de los equipos de adquisición y registro. Con el fin de obtener el movimiento real del suelo en el punto del sensor es necesario

eliminar previamente los efectos introducidos por el sistema instrumental completo. Conceptualmente, se trata de deconvolucionar la respuesta impulso de los equipos del sismograma obtenido. Una vez que se dispone de la señal deconvolucionada, entonces ésta puede ser vuelta a convolucionar con la respuesta instrumental de otro equipo diferente. Este proceso es importante en el sentido que permite realizar comparaciones de amplitud y tiempos de llegada con registros de otras estaciones o redes. Un caso concreto de especial interés es la convolución con la respuesta del Wood-Anderson para la determinación de magnitudes locales.

Teóricamente, conocida la respuesta impulso de los equipos, el proceso de deconvolución no debería ser algo muy complicado. Sin embargo, los sismogramas reales obtenidos están contaminados en mayor o menor medida con ruido, lo cual dificulta bastante este proceso. De hecho, la señal obtenida después de la deconvolución es una señal bastante distorsionada que en muchos casos se reduce directamente a ruido. Lo que ocurre es que la zona del espectro de la señal que se encuentra fuera de la banda pasante del sistema es amplificada y esta amplificación es mucho mayor conforme la pendiente del espectro de la respuesta instrumental se hace más abrupta. El problema es que generalmente esta parte del espectro de la señal que es amplificada se corresponde únicamente con una señal de ruido.

Como consecuencia de esto, y con el fin de evitar esta amplificación indeseada del ruido, los efectos de la respuesta instrumental sólo pueden ser eliminados dentro de una determinada banda de frecuencia. Esta banda de frecuencia válida no es fija y depende tanto del nivel de ruido como de la pendiente de la respuesta en frecuencia del sistema. Una manera de minimizar este problema es el método de corrección de nivel (Scherbaum, 1996) mediante el cual se acota la amplitud mínima de la respuesta espectral del sistema.

En esta tesis se propone como alternativa un método basado en la transformada discreta de wavelet packet (DWPT). Una ventaja de la descomposición en wavelet packet es que permite escoger la descomposición tiempo-frecuencia que mejor se adapte al tipo de señal bajo estudio. De esta forma se pueden detectar las

bandas de frecuencia contaminadas seriamente con ruido (con una baja SNR) y modificar adecuadamente la respuesta espectral del sistema de forma que en el posterior proceso de deconvolución no se amplifique el ruido.

A continuación se presenta una introducción teórica del problema y se explica la metodología propuesta. También se presentan resultados experimentales y se comparan con los obtenidos con el actual método de deconvolución empleado por la URSPA.

5.2 Deconvolución de señales contaminadas con ruido.

Una señal sísmica digital $x(n)$ puede ser representada como:

$$x(n) = h(n) * [s(n) + z_1(n)] + z_2(n) \quad (5.1)$$

donde $h(n)$ es la respuesta impulso del sistema global utilizado (sensor, amplificadores, filtros, etc.); $s(n)$ es la señal de movimiento de la tierra; $z_1(n)$ es ruido natural debido a diferentes efectos superficiales sobre la tierra; y $z_2(n)$ es el ruido intrínseco asociado a los diferentes elementos del sistema de adquisición. Agrupando las diferentes señales de ruido, se puede obtener una señal más simple a la anterior.

$$x(n) = h(n) * s(n) + z(n) \quad (5.2)$$

Uno de los trabajos de la sismología de observatorio consiste en obtener la señal $s(n)$ tal y como llega al sensor, eliminando lo máximo posible el ruido y los efectos introducidos por los equipos. Para este propósito se debe aplicar una combinación de filtrado y deconvolución.

Volviendo de nuevo a la expresión (5.2), ésta se puede expresar también en el dominio de la frecuencia como

$$X(f) = H(f) \cdot S(f) + Z(f) \quad (5.3)$$

Generalmente la respuesta instrumental es conocida y por tanto la señal $S(f)$ puede obtenerse de forma aproximada como:

$$S(f) = \frac{X(f)}{H(f)} - \frac{Z(f)}{H(f)} \quad (5.4)$$

En ausencia de ruido, la señal $S(f)$ se puede calcular sin ningún tipo de error. Sin embargo esto no se corresponde con una situación real. Cuanto más pequeño sea el término $Z(f)/H(f)$ más precisa será la determinación de la señal $S(f)$. Como el nivel de ruido registrado es aproximadamente el mismo para todas las frecuencias, entonces el valor de $Z(f)/H(f)$ depende completamente del perfil de la respuesta en frecuencia del sistema. Si $H(f)$ es muy pequeño para algún conjunto de frecuencias, entonces la señal de interés apenas será recuperada, quedando oculta por un elevado nivel de ruido. En la figura 5.1 se muestra un ejemplo donde se puede observar como el espectro de la señal obtenida después de la deconvolución está fuertemente dominado por las bajas y altas frecuencias, las cuales corresponden a la señal de ruido.

Para llevar a cabo el proceso de deconvolución evitando lo máximo posible la amplificación del ruido se han propuesto varios métodos alternativos a lo que sería simplemente la inversión pura en el dominio de Fourier (expresión 5.4). Estos métodos se pueden clasificar básicamente en dos grandes tipos según apliquen una inversión pura o una inversión regularizada en el dominio de Fourier.

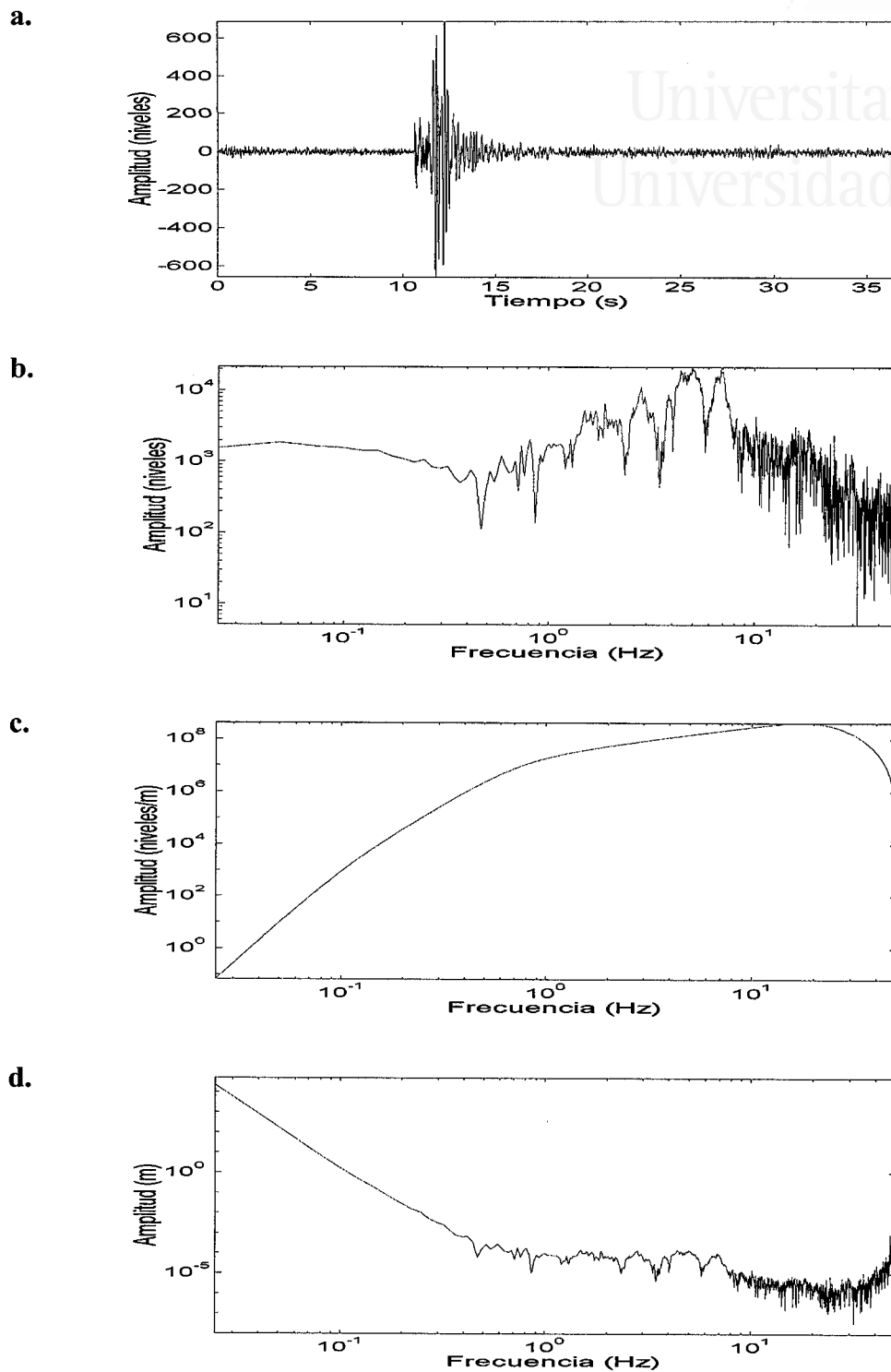


Figura 5.1 (a) Sismograma de periodo corto. (b) Espectro del sismograma (c) Respuesta en frecuencia del sistema (d) Espectro del sismograma después de la deconvolución.

5.2.1 Inversión pura en el dominio de Fourier.

El esquema básico de este tipo de métodos consiste en:

- 1) Realizar la deconvolución tal y como se muestra en la expresión (5.4) utilizando la respuesta en frecuencia del sistema $H(f)$.
- 2) Filtrar la señal obtenida para eliminar el ruido.

La forma más simple de realizar esto es mediante la aplicación de un filtro digital pasa-banda. Esto, sin embargo, no suele ser suficiente para eliminar satisfactoriamente el alto nivel de ruido adquirido por la señal después de la deconvolución. Además, una elección inapropiada del filtro podría dar lugar a nuevas distorsiones en la señal que se desea obtener.

Otra forma más efectiva de eliminar el ruido puede conseguirse mediante la aplicación de un filtro basado en wavelets. Esta técnica se deriva del método de descomposición de wavelet-vaguellete propuesto por Donoho (1995b). El mayor inconveniente de este método es que después de una inversión pura en el dominio de Fourier, la varianza del ruido obtenido puede llegar a ser muy elevada tanto en la propia señal como en las secuencias de coeficientes de wavelets, con lo cual el método de filtrado (apartado 3.8) se comporta de manera ineficiente.

5.2.2 Inversión regularizada en el dominio de Fourier.

En este caso, la respuesta espectral obtenida inmediatamente después de la deconvolución es modificada de una forma u otra para disminuir de peso las componentes en frecuencia asociadas con la señal de ruido. El esquema básico se puede resumir de la siguiente manera:

- 1) Inversión pura en el dominio de Fourier para obtener el espectro de la nueva señal contaminada de ruido.
- 2) Estimación de la señal en el dominio de Fourier. En este paso, cada componente de frecuencia es modificada mediante una determinada función de pesos.

Esta nueva variación del problema de deconvolución fue introducida por Tikhonov y Arsenin (1977) y el método propuesto por él se conoce como descomposición enventanada en valores singulares ('windowed singular value decomposition', w.-SVD).

Los pesos óptimos que se pueden utilizar para llevar a cabo la inversión regularizada es una función de la SNR asociada a cada frecuencia. Para señales estacionarias, la función de pesos óptima viene dada por el filtro LTI de deconvolución de Wiener:

$$R(f) = \frac{|H(f)|^2 P_s(f)}{|H(f)|^2 P_s(f) + \sigma^2} \quad (5.5)$$

donde $P_s(f)$ es la densidad de potencia espectral de la señal $s(n)$ y σ^2 es la varianza del ruido. Con esta nueva función de pesos, el espectro estimado de la señal deseada se puede expresar como:

$$\tilde{S}(f) = R(f) \frac{X(f)}{H(f)} - R(f) \frac{Z(f)}{H(f)} \quad (5.6)$$

Para señales estacionarias de ruido gaussiano, este método proporciona la estimación óptima en el sentido del error cuadrático medio. Sin embargo, no proporciona una buena solución para señales no estacionarias con determinadas características (pulsos, discontinuidades, etc.) bien localizadas en el dominio del tiempo.

Un paso adicional a este último método es propuesto por Neelamani (1999). Éste propone una función de regularización como la Wiener donde el término de la varianza del ruido es multiplicado por un parámetro $\alpha < 1$ que controla el proceso de

regularización en el dominio de Fourier. Como la modificación aplicada sobre el espectro es pequeña, la señal resultante está contaminada con ruido. Por ello, como paso final se aplica una etapa de filtrado en el dominio de las wavelets.

Para la aplicación de estos dos últimos métodos se requiere conocer una estimación de la señal deseada. Generalmente, en situaciones reales, no se dispone a priori de ese conocimiento de la señal deseada y se debe recurrir a métodos de estimación basados en una aplicación redundante del propio método de filtrado.

Otro método más sencillo de inversión regularizada es el método de corrección de nivel ('water level correction', WLC) propuesto para la aplicación sobre sismogramas reales por Scherbaum (1996). En este caso la respuesta espectral en amplitud asociada al sistema, $H(f)$, es acotada inferiormente por un valor umbral mientras que la fase permanece inalterada. No existe una regla general para determinar ese umbral y lo único que se indica es que debe ser sólo lo suficiente para asegurar la estabilidad del sistema.

Este método de deconvolución es el utilizado actualmente en la URSPA. En el algoritmo diseñado, el nivel de umbral se escoge de acuerdo con la magnitud del espectro obtenida para una determinada frecuencia inferior a la de Nyquist. Como proceso final se aplica un filtro paso banda para eliminar las componentes de ruido no deseadas.

En esta tesis se propone un nuevo método de deconvolución regularizada basada en wavelet packets (DReWP). La idea consiste en modificar la respuesta en frecuencia del sistema en función de la varianza del ruido asociada a cada uno de los nodos de la descomposición en wavelet packets. El proceso de regularización es acompañado de forma previa y posterior por una etapa de filtrado que se realiza también mediante el uso de la DWPT.

5.3 Deconvolución regularizada basada en wavelet packets (DReWP).

El método de deconvolución regularizado utilizado actualmente por la URSPA no proporciona los mejores resultados, en el sentido de obtener una señal de salida de elevada SNR. Además, la distorsión introducida en la señal da lugar a tiempos de llegada y perfiles del primer pulso erróneos.

El método de deconvolución regularizada basada en wavelet packets (DReWP) solventa los inconvenientes del método actual. En este caso el proceso de regularización se realiza en el dominio de las wavelet packets, y a diferencia del filtro de deconvolución de Wiener no se necesita disponer a priori de ninguna información sobre la señal que se desea estimar.

El procedimiento propuesto se puede descomponer en tres etapas. La primera y la última se corresponden con un proceso de filtrado en el dominio de las wavelet packets. En la etapa intermedia se realiza el proceso de regularización y deconvolución de la respuesta instrumental.

En los siguientes apartados se explica de forma detallada, y por orden de actuación, cada una de las etapas indicadas.

5.3.1 Filtrado del ruido.

La mayoría de métodos basados en wavelets utilizados para el filtrado de ruido blanco siguen un esquema muy similar al propuesto por Donoho y Johnstone (1994). En este caso el objetivo que se persigue es minimizar el error cuadrático medio ('mean square error', MSE) entre una estimación de la señal deseada $\hat{s}(n)$ y la propia señal $s(n)$. No obstante, en una situación real, la señal $s(n)$ no se conoce y además el

ruido $z(n)$ no es necesariamente ruido blanco.

El primer paso del algoritmo consiste en la extracción de una porción inicial de la señal $x(n)$, la cual se utilizará como muestra de ruido. Esto es así debido al modo en que el sistema de adquisición lleva a cabo el proceso de detección y registro. Estos sistemas utilizan como algoritmo de detección el método ‘short-term-average to long-term-average’ (STA/LTA) (Earle y Shearer, 1994) de IASPEI. Cuando el algoritmo detecta un evento en una muestra determinada comienza a almacenar los datos a partir de un número previo de muestras. Este número es un parámetro configurable y permite disponer de unos segundos previos a la llegada del primer pulso. De esta forma se pueden extraer los primeros segundos de la señal registrada $x(n)$ y obtener las características más importantes del ruido. Después de esto, la señal registrada $x(n)$ y la muestra de ruido $z'(n)$ son utilizadas como señales de entrada en las posteriores etapas.

En el próximo paso se debe escoger el tipo de wavelet madre que se va a utilizar y el máximo nivel de descomposición deseado. Con estos parámetros, se aplica la DWPT a $x(n)$ y $z'(n)$ y se obtiene una estructura en árbol completa. A continuación se debe elegir una determinada función de coste mediante la cual se selecciona la base (o subconjunto de nodos) que mejor se adapta a la señal. Este mismo conjunto de nodos se utilizará también para descomponer la señal de ruido, $z'(n)$.

Después de esto, se obtienen dos secuencias de coeficientes, $\lambda_{j,r}(k)|_x$ y $\lambda_{j,r}(k)|_z$, asociados con la base seleccionada para $x(n)$ y $z'(n)$ respectivamente. En el caso de $x(n)$, las secuencias de coeficientes están también contaminadas con ruido y por tanto se pueden expresar como una composición de coeficientes relacionados con la señal de interés, $s(n)$, y coeficientes relacionados con el ruido.

$$\lambda_{j,r}(k)|_x = \lambda_{j,r}(k)|_s + \lambda_{j,r}(k)|_z \quad (5.7)$$

Si se escoge una buena wavelet madre y una buena base, entonces los coeficientes $\lambda_{j,r}(k)|_s$ estarán agrupados en un pequeño conjunto de gran amplitud y el resto será despreciable. Basándose en esto se aplican los métodos de umbralización que se explicaron en el capítulo 3.

En nuestro caso se van aplicar en principio los métodos ‘soft-thresholding’, ‘hard-thresholding’ y ‘non-negative garrote’ con el fin de estimar cual de ellos resulta más idóneo. No obstante, en cualquiera de los tres casos hace falta definir el nivel de umbral que se va a utilizar. En esta tesis se propone un umbral dependiente del nodo cuya expresión está basada en el umbral universal (Donoho y Johnstone, 1994; Donoho, 1995a).

$$\lambda_{j,r}|_{Th} = \sigma_{j,r} \cdot \sqrt{2 \cdot \log(N_{j,r})} \quad (5.8)$$

donde $N_{j,r}$ y $\sigma_{j,r}$ son respectivamente la longitud de la secuencia y la varianza del ruido asociada a cada uno de los nodos.

Una diferencia importante con otros métodos es que la varianza del ruido, $\sigma_{j,r}$, se puede determinar para cada uno de los nodos a partir de las secuencias $\lambda_{j,r}(k)|_z$, y el valor obtenido es mucho más apropiado que cualquier otra estimación que se pudiera realizar.

Después del proceso de umbralización, se aplica la transformada inversa de wavelet packet a los nuevos coeficientes $\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_x$, y se obtiene una nueva señal $\hat{x}(n)$ filtrada.

5.3.2 Deconvolución.

Después de la etapa de filtrado el nivel de ruido se reduce considerablemente. A pesar de ello, la deconvolución basada en una pura inversión en el dominio de

Fourier da lugar a una expresión como la (5.9) y a menos que $\hat{Z}(f)$ sea nula se tendrán los mismos problemas que se explicaron anteriormente.

$$\hat{S}(f) = \frac{\hat{X}(f)}{H(f)} - \frac{\hat{Z}(f)}{H(f)} \quad (5.9)$$

Si la amplitud del espectro, fuera de la banda pasante del sistema, es muy pequeña, entonces, durante la división espectral se produce una considerable amplificación del nivel de ruido. Como se explicó en el apartado 5.2, este problema se puede suavizar utilizando lo que se conoce como inversión regularizada en el dominio de Fourier. El objetivo de la regularización es conseguir una mejor estimación de la señal deseada reduciendo el nivel de ruido a cambio de cierta distorsión en la señal (Tikhonov y Arsenin, 1977). Aquí se propone un algoritmo que utiliza una inversión regularizada en el dominio de Fourier y una estimación de la función de transferencia en el dominio de las wavelet packets. Como las bases de wavelet packets están bien localizadas, tanto en el tiempo como en la frecuencia, proporcionan una herramienta más que apropiada para trabajar con señales no estacionarias con ciertas características temporales bien determinadas.

A continuación se detallan cada uno de los pasos en los que se puede dividir el proceso de deconvolución propuesto:

a) En primer lugar, y tal y como se realizó en la primera etapa de filtrado, se extrae de la señal $\hat{x}(n)$ una muestra de ruido, denotado por $\hat{z}'(n)$.

b) En el siguiente paso se aplica la DWPT a las señales $\hat{x}(n)$ y $\hat{z}'(n)$ obteniendo dos nuevos conjuntos de coeficientes $\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_x$ y $\hat{\lambda}_{j,r}(k)|_{z'}$.

Esta descomposición proporciona una estructura tiempo-frecuencia adaptada a la señal, donde cada nodo está asociado con una banda de frecuencia diferente.

c) Seguidamente, se calcula la varianza de los coeficientes asociados a cada uno de los nodos de la señal y del ruido.

Los nodos de la descomposición de la señal seriamente contaminados con ruido presentan una varianza $\hat{\sigma}_{j,r}|_x$ muy similar a la varianza del ruido $\hat{\sigma}_{j,r}|_{z'}$, correspondiente a esos mismos nodos. Basándose en este criterio, se determinan aquellos nodos de la descomposición de la señal que están seriamente contaminados con ruido.

d) De acuerdo con la información obtenida en el paso anterior, la respuesta en frecuencia del sistema se modifica de la siguiente manera:

$$\text{Si } \hat{\sigma}_{j,r}|_x > \hat{\sigma}_{j,r}|_{z'}, \text{ entonces } \hat{H}_{j,r}(f) = |H_{j,r}(f)| \cdot e^{j\phi} \quad (5.10)$$

$$\text{Si } \hat{\sigma}_{j,r}|_x \leq \hat{\sigma}_{j,r}|_{z'}, \text{ entonces } \hat{H}_{j,r}(f) = |A| \cdot e^{j\phi}$$

Donde ϕ es la fase asociada con $H_{j,r}(f)$, y $|H_{j,r}(f)|$ significa que el cambio realizado sobre $H(f)$ sólo afecta a la banda de frecuencias asociada con el nodo (j,r) . Esto se puede realizar debido al modo en que se lleva a cabo la deconvolución en el dominio de la frecuencia (ecuación 5.9). Como se trata de una división punto por punto, se puede modificar uno o más puntos independientemente. $|A|$ es un límite máximo que se puede escoger como $\max\{|H(f)|\}$ y nos asegura que el ruido no será amplificado más que la propia señal por la respuesta en frecuencia de los instrumentos. En ambos casos, la fase se mantiene con el mismo valor con el fin de evitar retrasos (o adelantos) en la señal.

En el caso particular de sismogramas de periodo corto se sabe también que el ancho de banda está limitado. Esto es tenido en cuenta por el algoritmo, de manera que las frecuencias no correspondientes a la banda de trabajo son modificadas en el mismo modo.

e) A continuación se lleva a cabo la deconvolución dividiendo la respuesta en frecuencia de la señal filtrada, $\hat{X}(f)$ por la respuesta en frecuencia modificada de los equipos de instrumentación, $\hat{H}(f)$. En las bandas de frecuencia donde la señal $\hat{x}(n)$ puede ser considerada como ruido, el espectro es atenuado por una factor $|A|$.

En el resto de nodos, la división espectral se realiza con la banda de frecuencias del espectro del sistema asociada con esos nodos.

De esta forma se obtiene una estimación de la señal de interés en el dominio de la frecuencia, $\tilde{S}(f)$.

f) Por último, aplicando ahora la transformada inversa de Fourier, se obtiene la señal deconvolucionada, $\tilde{s}(n)$.

En algunos casos, la SNR de la señal obtenida puede mejorarse aún más mediante la aplicación de una nueva etapa de filtrado de las mismas características que las indicadas para el filtrado previo.

5.4 Evaluación del método DReWP.

Con el fin de determinar de manera objetiva la efectividad del método propuesto, el algoritmo implementado se aplica primeramente sobre señales sintéticas, las cuales han sido convolucionadas con la respuesta instrumental y contaminadas con ruido (ver apartado 4.4.4).

Por tanto, el método DReWP se aplica sobre las señales sintéticas $\{x_{i,j}(n)\}$: $i=1,2, j=1,\dots,4$ ¹ y en cada caso la señal de salida $\tilde{s}_i(n)$ es comparada con la señal original $s_i(n)$. El objetivo es obtener una señal con una alta SNR y una baja distorsión. Para ello se analizan los valores de cuatro tipos diferentes de medidas, incluida la SNR, que dan idea cuantitativa de cuanto se aproxima la señal de salida a la señal ideal. En este caso es importante que la forma global de la señal, y sobre todo la forma del primer pulso (generalmente una onda P directa) no se distorsionen

¹ Los subíndices i hacen referencia a los dos ejemplos de sismogramas sintéticos puros obtenidos en el apartado 4.4.4, mientras que los subíndices j hacen referencia a la estación con cuya respuesta instrumental han sido convolucionados.

en demasía. Obviamente, también es importante evitar cualquier tipo de variación de los tiempos de llegada de la señal. Con este objetivo en mente se han escogido las siguientes medidas de comparación: tanto por ciento de energía respecto a la señal inicial $s_i(n)$; SNR; coeficiente de autocorrelación entre la señal obtenida y la señal deseada; y coeficiente de autocorrelación entre los pulsos de llegada de ambas señales.

Ahora es momento de determinar los parámetros relativos a la DWPT y al tipo de filtrado de ruido que se van a utilizar. En el capítulo 3 se explicó este tipo de transformada y, como ya se vio, a la hora de implementarla es necesario elegir una wavelet madre, un máximo nivel de descomposición, y una función de entropía. Estos parámetros pueden ser además diferentes para el proceso de filtrado y para el proceso de deconvolución. Respecto a la eliminación de ruido, en el capítulo 3 también se presentaron varios tipos de filtrado basados en la umbralización de los coeficientes de wavelet packet.

Aunque a priori algunos de estos parámetros y funciones pueden parecer mejores que otros, es difícil discriminarlos sin antes comprobar su funcionamiento sobre el tipo de señales bajo estudio. Por esta razón, como paso previo se aplica el método de deconvolución sobre cada una de las ocho señales sintéticas obtenidas en el capítulo 4, utilizando diferentes combinaciones de función de wavelet madre, función de entropía, función de filtrado y máximo nivel de descomposición. De este análisis preliminar se extraen los parámetros que nos devuelven los mejores resultados. Estos se pueden resumir básicamente de la siguiente forma: wavelet madre del tipo Daubechies 10 (db10) o Daubechies 12 (db12); función de entropía Shannon, coeficientes por encima de un umbral ($thr_{0.2}$) o energía por debajo de un umbral ($dne_{0.8}$); máximo nivel de descomposición entre 5 y 6; y función de filtrado de ruido del tipo 'hard thresholding' (HT) o 'soft thresholding' (ST). En el caso de la entropía, para el método $thr_{0.2}$ se ha escogido un umbral igual al 20% del valor máximo de los coeficientes; y para el método $dne_{0.8}$ se ha escogido un umbral igual al 80% del valor máximo de éstos.

El hecho de que las características del ruido varíen de una estación a otra, hace que los mejores parámetros para una estación puedan diferir de los mejores parámetros para otra (ver tabla 5.1). No obstante la diferencia no es muy grande y podría utilizarse un mismo conjunto de estos parámetros para todas las estaciones.

Estación	Parámetros de entrada
'MAIG'	(HT, thr_0.2, db10, 5 ó 6, Shannon o dne_0.8, db10 o db12, 5 ó 6)
'CREV'	(ST, thr_0.2, db12, 5 ó 6, Shannon o dne_0.8, db10 o db12, 5 ó 6)
'PUJA'	(HT, thr_0.2 o dne_0.8, db10, 5 ó 6, Shannon o dne_0.8, db10 o db12, 5 ó 6)
'UNIP'	(HT, thr_0.2 o dne_0.8, db12, 5 ó 6, Shannon o dne_0.8, db10 o db12, 5 ó 6)

Tabla 5.1 *Parámetros de entrada que proporcionan los mejores resultados para cada una de las estaciones de la red.*

En las tablas 5.2 y 5.3 se presentan algunos de los resultados obtenidos para varias combinaciones de estos parámetros cuando se aplica el método de deconvolución sobre las señales sintéticas puras convolucionadas con la respuesta instrumental de la estación UNIP ($x_{i,4}(n)$). En el apéndice B se presentan unas tablas similares correspondientes al resto de estaciones.

El formato empleado para los parámetros de entrada de estas tablas es el siguiente: el primer elemento hace referencia al tipo de filtrado que se ha realizado; los tres siguientes elementos son la función de entropía, la wavelet madre, y el nivel máximo de descomposición utilizado en la etapa de filtrado; y los tres últimos

elementos hacen referencia a lo mismo que lo anterior, pero referidos a la etapa de deconvolución. En cuanto a los parámetros de medida, éstos representan: el tanto por ciento de energía respecto a la señal inicial (A), la SNR (B), el coeficiente de autocorrelación entre las señales completas (C), y el coeficiente de autocorrelación entre los pulsos de llegada (D).

La tabla 5.2 presenta los siguientes resultados interesantes. Primeramente el coeficiente de autocorrelación de toda la señal (C) está por encima de 0.98 para todas las combinaciones de parámetros presentadas. Segundo, el coeficiente de autocorrelación del primer pulso (D) es superior a 0.90, y justo en estos casos la diferencia de energía entre la señal obtenida y la señal deseada difiere en menos de un 3%. En cuanto al SNR (B), el peor resultado se obtiene cuando se emplea como función de entropía la función `dne_0.8`. No obstante, incluso en este caso, la SNR es más que aceptable, estando por encima de 17. Observando la tabla 5.3, se puede ver como los mejores resultados se obtienen cuando se emplea como función de filtrado un 'hard thresholding'. En este ejemplo, el coeficiente de autocorrelación de toda la señal (C) también se encuentra por encima de 0.98. El coeficiente de autocorrelación del primer pulso (D) llega en algunos casos a ser de 0.95 con una variación de energía respecto a la señal deseada de un 5%. Por último, la SNR (B) es superior en todos los caso a 20. La combinación de todos estos datos nos lleva a un conjunto de parámetros más o menos idóneos para estas señales (y para esta estación) que son los siguientes: para la etapa de filtrado los mejores resultados se obtienen con 'hard thresholding', `dne_0.8` o `thr_0.2`, `db12`, y niveles 5 ó 6; y en cuanto al proceso de deconvolución se puede utilizar Shannon o `dne_0.8`, `db10` o `db12`, y niveles 5 ó 6.

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(ST;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;6)	92.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;5)	92.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;6)	92.2%	>50.00	0.98	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	108.5%	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	108.5%	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;5)	108.5%	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;6)	108.5%	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	108.5%	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	108.5%	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;5)	108.5%	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;6)	108.5%	17.22	0.99	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;5)	93.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;6)	93.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;dne_0.8;db12;5)	93.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;dne_0.8;db12;6)	93.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db12;5)	93.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db12;6)	93.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;5)	93.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;6)	93.2%	>50.00	0.98	0.93
(ST;shannon;db10;6;shannon;db10;5)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;shannon;db10;6)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;shannon;db12;5)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;shannon;db12;6)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;dne_0.8;db12;5)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;dne_0.8;db12;6)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db10;5)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db10;6)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db12;5)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db12;6)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;dne_0.8;db12;5)	97.6%	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;dne_0.8;db12;6)	97.6%	>50.00	0.99	0.90

Tabla 5.2 *DReWP de la señal $x_{1,4}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(HT;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;5)	102.4%	>50.00	0.98	0.90
(HT;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;6)	102.4%	>50.00	0.98	0.90
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;5)	102.0%	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;6)	102.0%	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;5)	102.0%	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;6)	102.0%	>50.00	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	102.2%	48.25	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	102.2%	48.25	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;5)	102.2%	48.25	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;6)	102.2%	48.25	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;5)	101.8%	35.78	0.98	0.92
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;6)	101.8%	35.78	0.98	0.92
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;5)	101.8%	35.81	0.98	0.92
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;6)	101.8%	35.81	0.98	0.92
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db12;5)	104.9%	29.28	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db12;6)	104.9%	29.28	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;6;dne_0.8;db12;6)	104.9%	29.27	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db12;5)	104.9%	29.36	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db12;6)	104.9%	29.36	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;5;dne_0.8;db12;6)	104.9%	29.36	0.98	0.94
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;5)	104.4%	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;6)	104.4%	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db12;5)	104.4%	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db12;6)	104.4%	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;6)	104.4%	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;6)	104.4%	>50.00	0.98	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;dne_0.8;db12;6)	104.4%	21.05	0.99	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	104.5%	21.07	0.99	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	104.5%	21.07	0.99	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;5)	104.5%	21.07	0.99	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;6)	104.5%	21.07	0.99	0.95

Tabla 5.3 *DReWP de la señal $x_{2,4}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Para comparar el método DReWP con el método de corrección de nivel, WLC, se presentan las tablas 5.4 y 5.5, donde se evalúan los mismos parámetros de medida que antes (A,B, C, D).

% de la frecuencia de Nyquist	A.	B.	C.	D.
55	64.8%	9.38	0.78	0.29
60	98.4%	9.67	0.80	0.35
65	108.7%	8.24	0.81	0.37
70	109.8%	7.18	0.81	0.36
75	110.6%	6.01	0.80	0.34
80	110.9%	5.61	0.80	0.34
85	111.1%	5.39	0.80	0.34
90	111.5%	4.78	0.80	0.33
95	112.6%	4.01	0.79	0.33
98	124.9%	2.14	0.75	0.33

Tabla 5.4 *WLC de la señal $x_{1,4}(n)$. Resultados obtenidos para varias frecuencias de referencia.*

% de la frecuencia de Nyquist	A.	B.	C.	D.
55	60.3%	7.35	0.72	0.05
60	89.0%	7.44	0.75	0.11
65	97.8%	6.27	0.76	0.13
70	99.1%	5.40	0.75	0.12
75	100.6%	4.51	0.75	0.10
80	101.2%	4.21	0.74	0.11
85	101.4%	4.08	0.74	0.11
90	101.7%	3.93	0.74	0.12
95	103.2%	3.40	0.74	0.12
98	423.1%	0.79	0.37	0.11

Tabla 5.5 *WLC de la señal $x_{2,4}(n)$. Resultados obtenidos para varias frecuencias de referencia.*

Como ya se dijo anteriormente, en el método WLC la respuesta en frecuencia se acota inferiormente, y este límite se escoge de acuerdo con la magnitud del espectro obtenida para una determinada frecuencia inferior a la de Nyquist. Finalmente, se aplica un filtro paso banda para eliminar las componentes de ruido no deseadas.

En las tablas 5.4 y 5.5 se puede observar como los coeficientes de autocorrelación (C) apenas alcanzan el valor de 0.8 para el mejor de los casos (65% de la frecuencia de Nyquist). En cuanto al coeficiente de autocorrelación del primer pulso (D), éste no supera en ningún caso el 0.4. Esto es en parte debido a que este método no sólo no discrimina adecuadamente la señal del ruido, sino que además introduce cierto retraso en la señal. Por último la SNR (B) oscila en torno a 5, presentando incluso, en muchos casos, un valor mucho peor que el de la propia señal original.

En las figuras 5.2 y 5.3 se muestra el resultado de aplicar el algoritmo propuesto a las señales sintéticas $x_{1,4}(n)$ y $x_{2,4}(n)$ con los siguientes parámetros: (HT, dne_0.8, db12, 5, Shannon, db12, 5). Como muestra de ruido, se han seleccionado los primeros 4 segundos en la primera señal, y los primeros 5 segundos en la segunda. En estas figuras los resultados se comparan también con el método WLC, donde la frecuencia que fija el límite de la respuesta espectral se ha tomado como el 65% de la frecuencia de Nyquist. Para diferenciar entre el método DReWP y el método WLC, las señales de salida se denotan como $\tilde{s}_i(n)$ y $\check{s}_i(n)$, respectivamente.

En las figuras 5.4 y 5.5, se ha ampliado la zona correspondiente al primer pulso de las señales $s_i(n)$ y $\tilde{s}_i(n)$ con el fin de compararlos. La nueva señal obtenida $\tilde{s}_i(n)$ presenta pequeñas distorsiones en torno al pulso inicial. No obstante, este pulso está claramente identificado, y lo más importante es que tanto la polaridad como el tiempo de llegada del pulso se conservan. De esta forma se tiene un tiempo de llegada idéntico en ambos casos y de valor igual a 5.13 s para $\tilde{s}_1(n)$ y 6.27 s para

$\tilde{s}_2(n)$. En estas figuras también se realiza la comparación respecto al método WLC. En este caso, el pulso de llegada está mucho más distorsionado, apareciendo dos picos de gran amplitud y distinta polaridad donde debería haber uno sólo. Además la señal obtenida presenta un desfase respecto a la señal deseada que da lugar a tiempos de llegada erróneos. En concreto se obtiene un valor de 5.06 s para $\tilde{s}_1(n)$ y 6.20 s para $\tilde{s}_2(n)$. Como se puede comprobar la aplicación del método de deconvolución WLC ha adelantado la llegada del primer pulso en 0.07 s, cosa que no ocurre con el método DReWP.

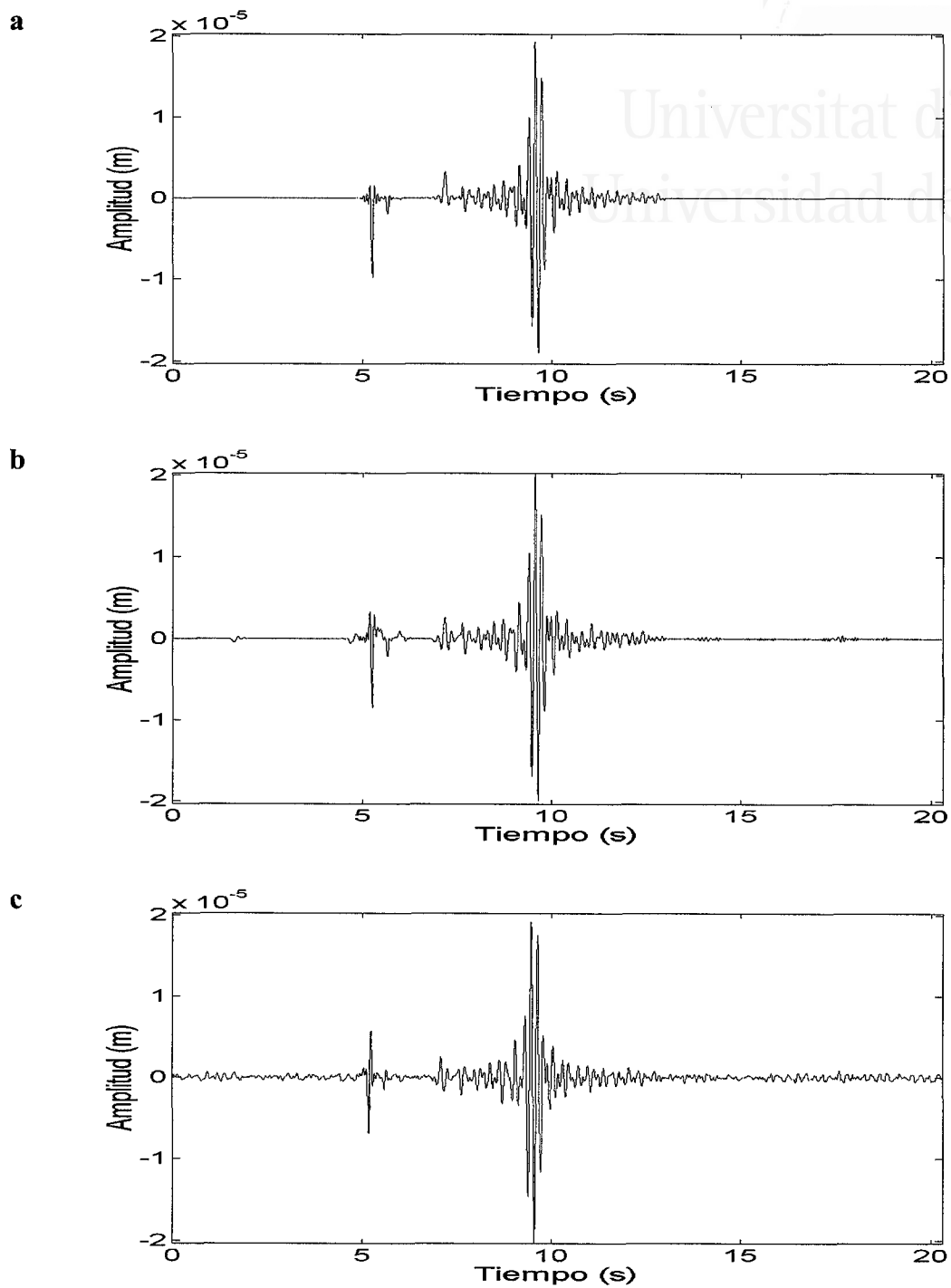


Figura 5.2 (a) Señal sintética pura $s_1(n)$ (b) Señal obtenida con el método DReWP, $\tilde{s}_1(n)$ (c) Señal obtenida con el método WLC, $\tilde{s}_1(n)$.

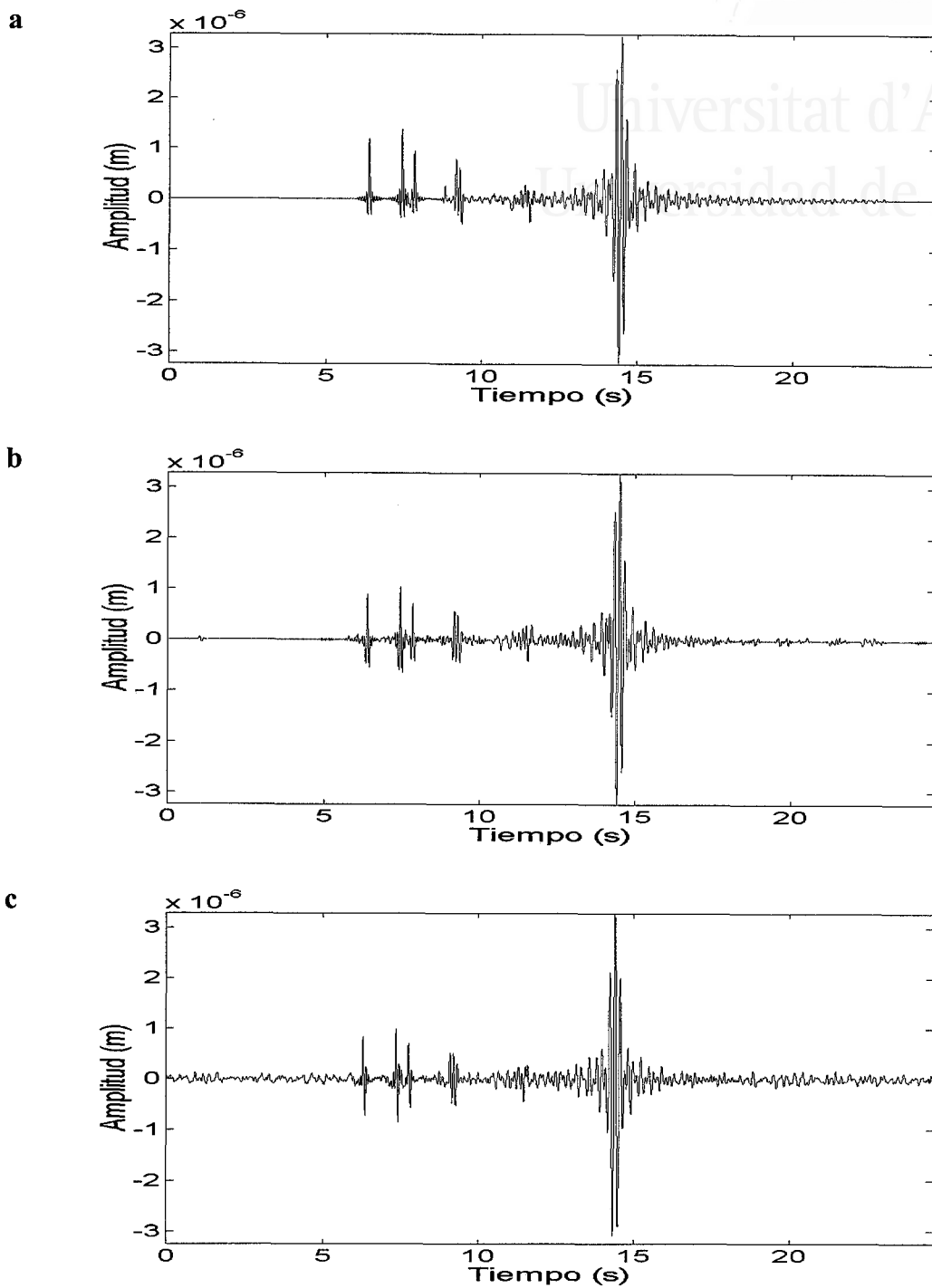


Figura 5.3 (a) Señal sintética pura $s_2(n)$. (b) Señal obtenida con el método DReWP, $\tilde{s}_2(n)$ (c) Señal obtenida con el método WLC, $\tilde{s}_2(n)$.

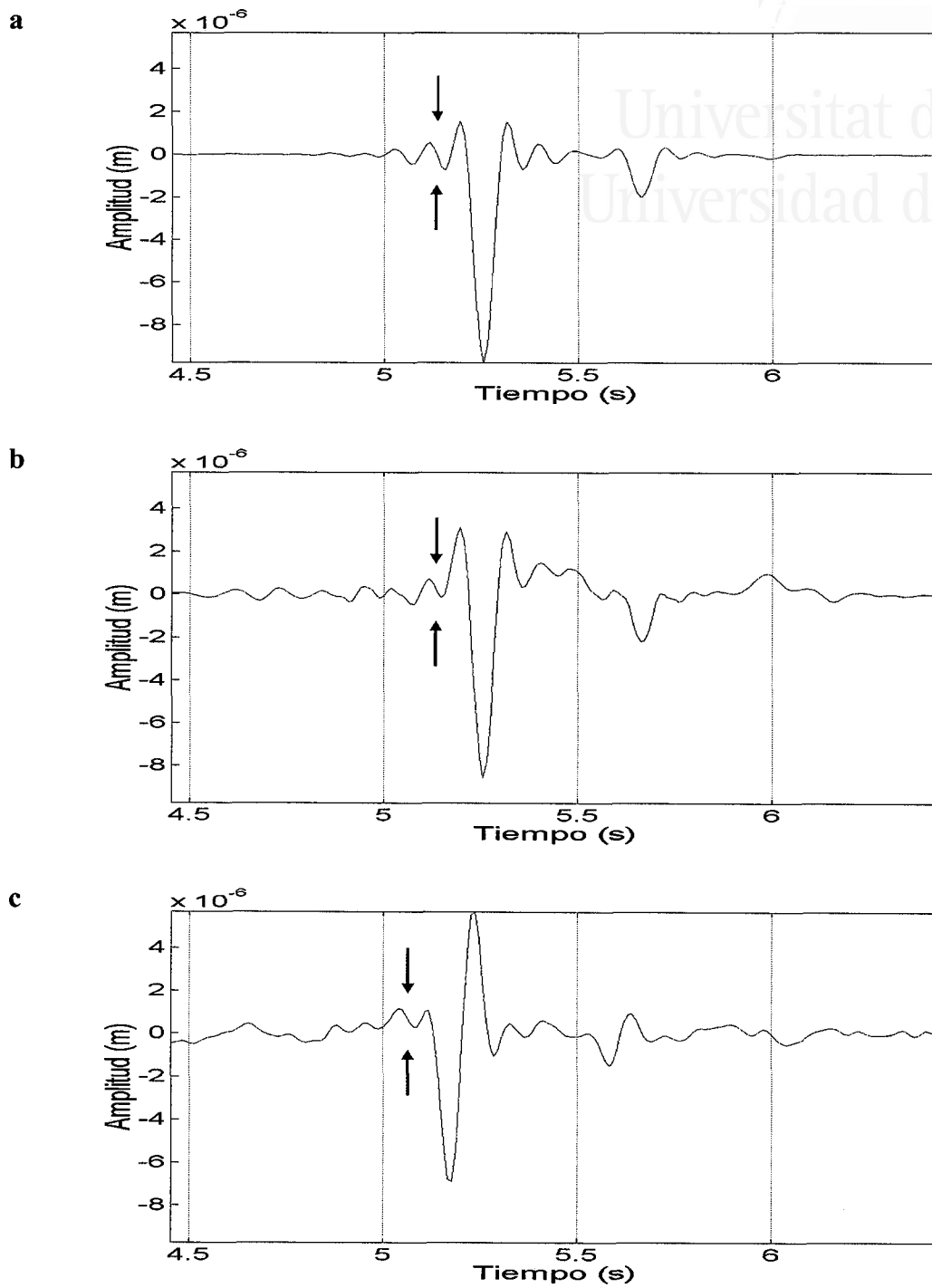


Figura 5.4 (a) Pulso sintético puro $s_1(n)$. (b) Pulso obtenido con el método *DReWP*, $\mathfrak{s}_1(n)$ (c) Pulso obtenido con el método *WLC*, $\mathfrak{s}_1(n)$.

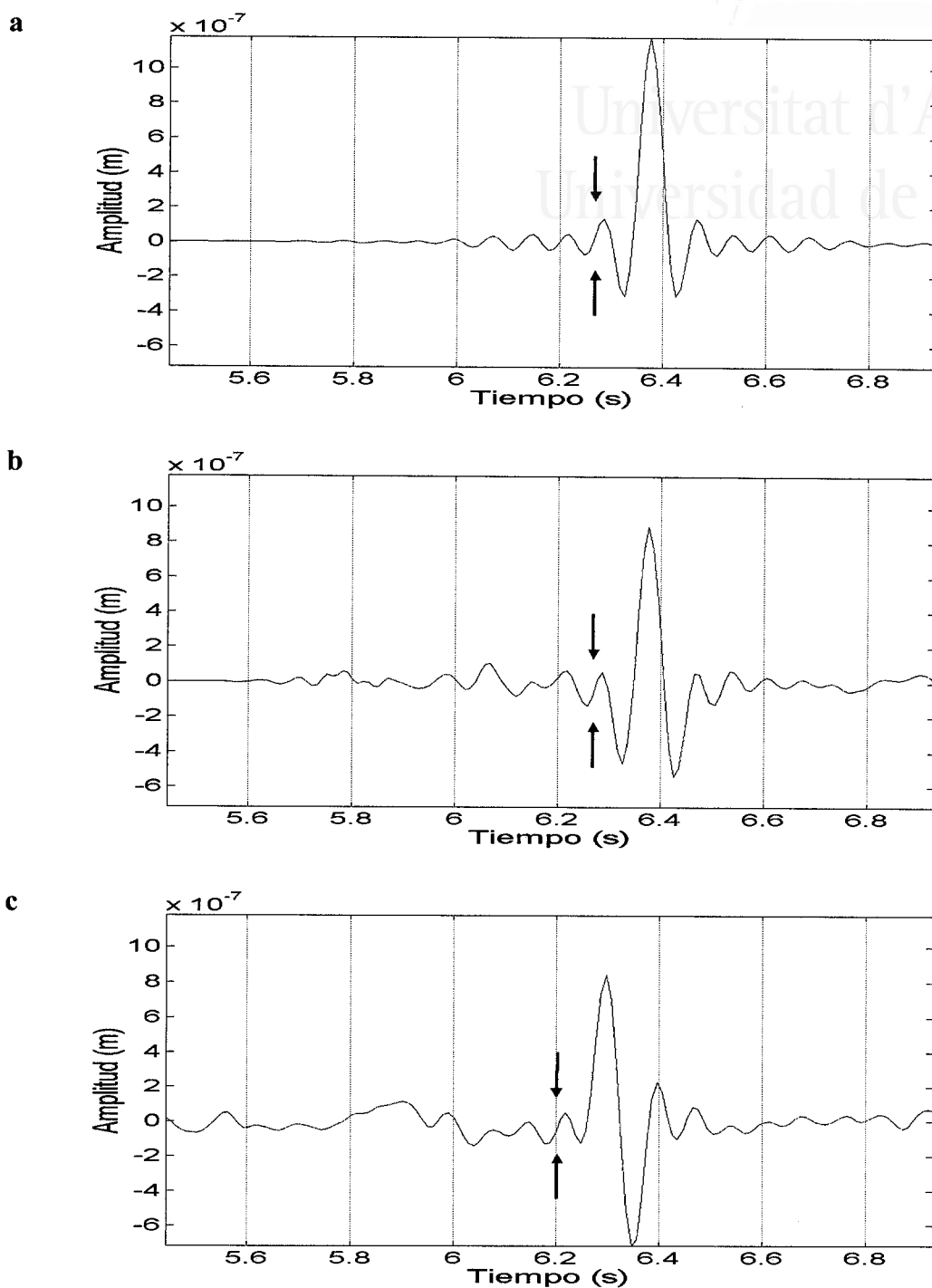


Figura 5.5 (a) Pulso sintético puro $s_2(n)$. (b) Pulso obtenido con el método DReWP, $\tilde{s}_2(n)$ (c) Pulso obtenido con el método WLC, $\hat{s}_2(n)$.

5.5 Aplicación del método DReWP a sismogramas de periodo corto reales.

En este apartado se aplica el método propuesto sobre un conjunto de eventos reales de la red local. Estos eventos son sismogramas de periodo corto de componente vertical registrados en la provincia de Alicante. En las figuras 5.6-13 se muestran algunos de estos resultados. A igual que se hizo en el apartado anterior, el método DReWP es comparado con el método utilizado actualmente, el WLC.

Cada uno de los eventos mostrados corresponde a un registro de una estación diferente. Los parámetros que se han utilizado para la deconvolución en cada caso dependen de la estación y son aquellos que se han remarcado como más idóneos en el apartado anterior. Como muestra de ruido se han seleccionado los 4 primeros segundos de cada ejemplo. En todos los casos presentados se ha aplicado una etapa posterior de filtrado, aunque en la mayoría de ellos los efectos de este proceso ya no han mejorado en mucho más la SNR. En cuanto al método de corrección de nivel, se ha escogido una frecuencia de referencia igual al 65% de la frecuencia de Nyquist.

En la figura 5.6 se muestra un evento de magnitud $M_L = 1.6$ localizado en Torrevieja (37.56° N, 0.37° O) y registrado por la estación CREV con una $SNR=17.89$. En este caso la aplicación del método propuesto consigue incrementar la SNR hasta un valor de 267.29, dejando bastante limpia la llegada de la señal. Los parámetros que se han utilizado son (ST, thr_0.2, db12, 5, Shannon, db12, 5). Por el contrario, el método WLC obtiene una señal global con una SNR igual a 13.52, que es algo menor que la SNR de la señal original. En la figura 5.7 se ha ampliado la zona correspondiente a la primera llegada con el objeto de comprobar las diferencias existentes entre la señal original (distorsionada por la respuesta instrumental), la señal obtenida con DReWP y la señal obtenida con el método WLC. Como se puede observar, no sólo existen diferencias en cuanto al perfil del pulso, sino que también existen diferencias en cuanto al tiempo de llegada. En este caso no es posible

comparar el resultado obtenido con el de la señal ideal que debería obtenerse. Sin embargo, de los datos obtenidos en el apartado 5.4 se puede deducir que el método WLC no consigue eliminar las distorsiones introducidas por la respuesta instrumental, aumentando incluso el nivel de ruido de la señal final.

La figura 5.8 es un ejemplo de registro de la estación PUJA. Se trata de un evento de magnitud $M_L = 1.7$ localizado en Crevillente (38.23° N, 0.90° O). En este caso la SNR de la señal inicial es de 4.63. El método WLC consigue superarlo ligeramente llegando a un valor de 5.22. El método DReWP obtiene de nuevo una SNR muy superior de 23.48. Los parámetros utilizados son (HT, thr_0.2, db10, 5, Shannon, db10, 5). En cuanto al pulso inicial (figura 5.9), ambos métodos de deconvolución han realizado un suavizado sobre el perfil de la señal registrada, aunque de nuevo los tiempos de llegada obtenidos difieren de un método a otro.

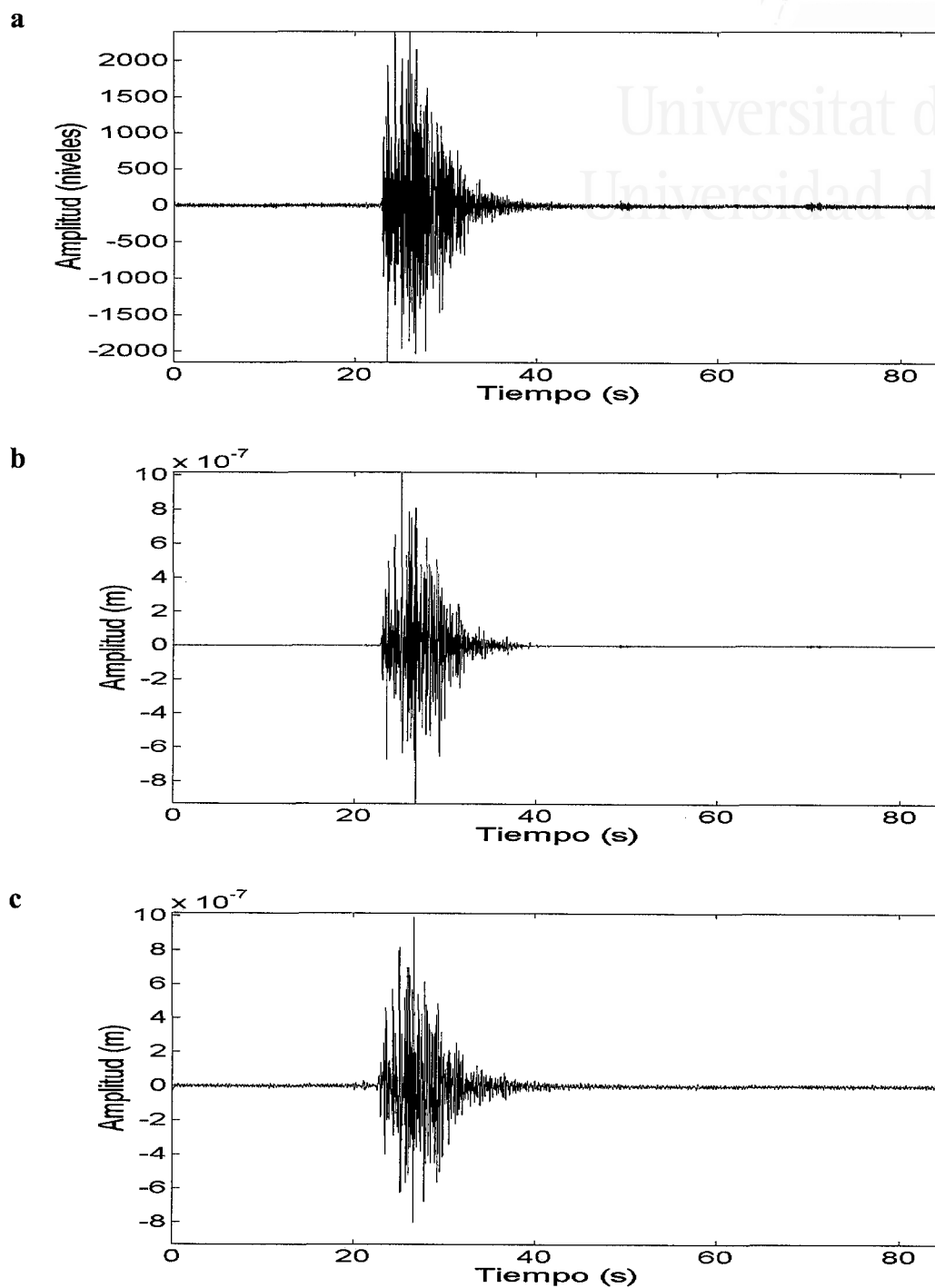


Figura 5.6 (a) *Componente vertical de un sismograma de periodo corto (37.56° N, 0.37°O).* (b) *Señal obtenida con DReWP* (c) *Señal obtenida con WLC.*

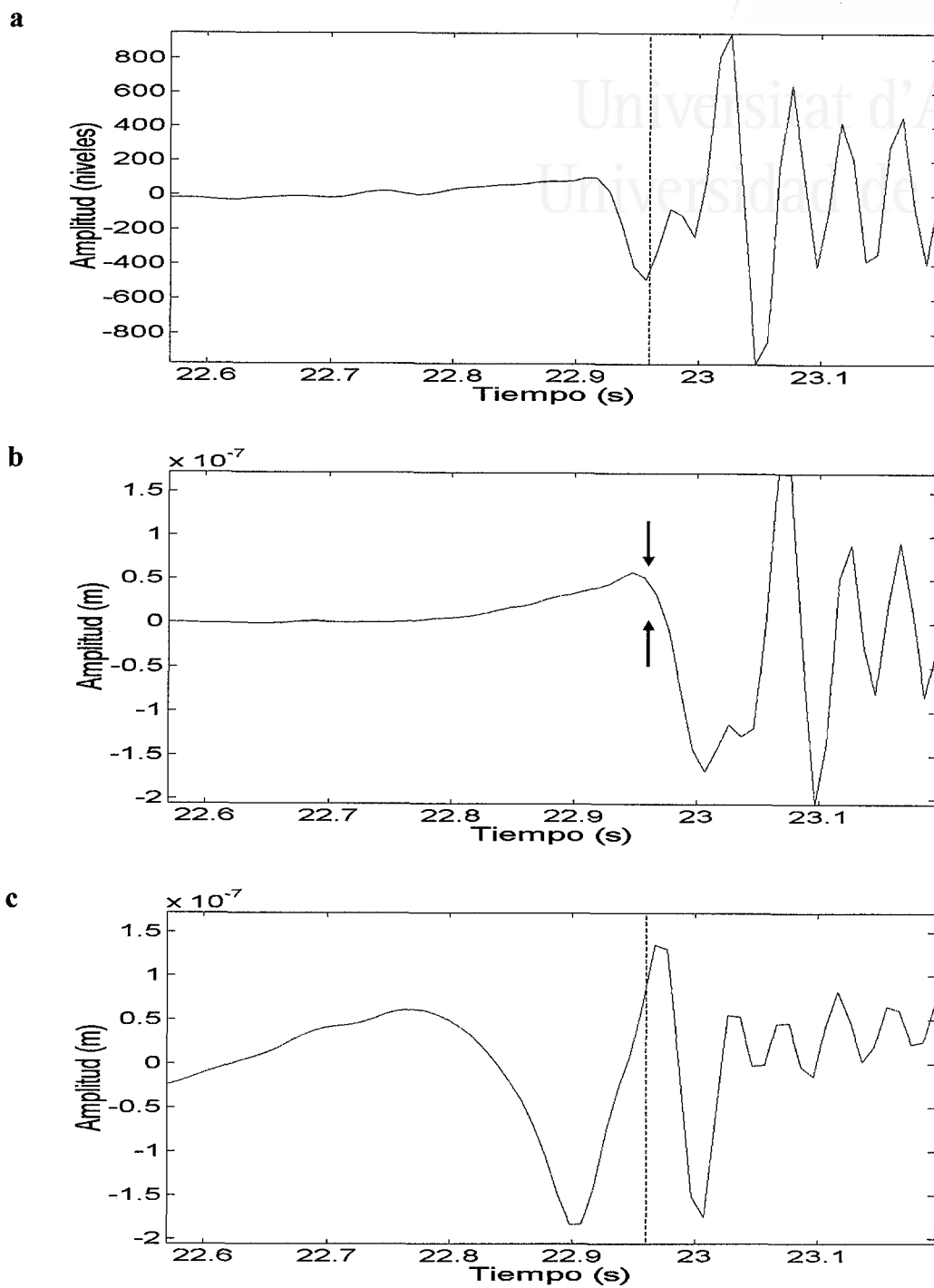


Figura 5.7 (a) Primera llegada del sismograma de periodo corto mostrado en la figura 5.6 (b) Llegada obtenida con DReWP (c) Llegada obtenida con WLC.

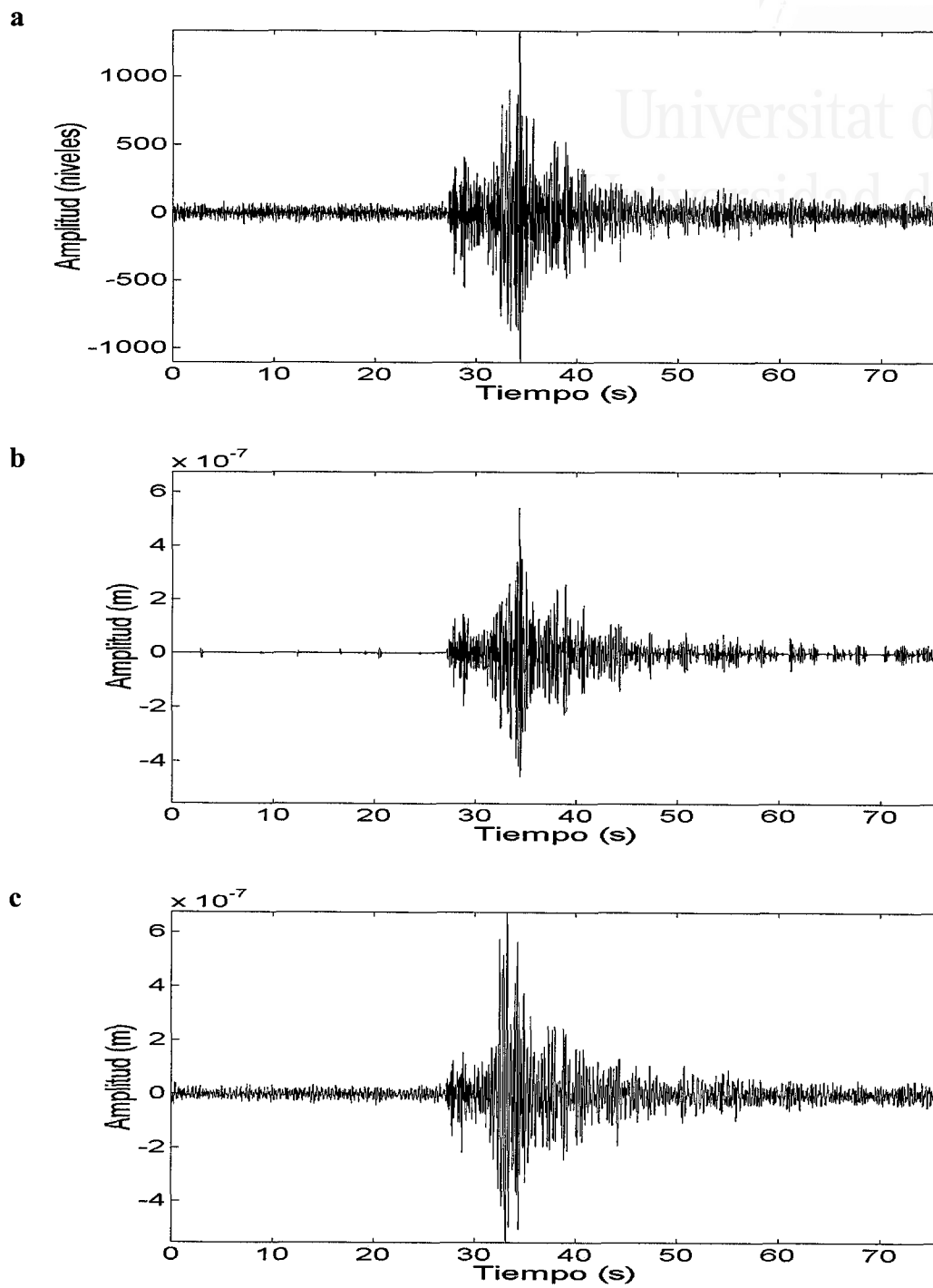


Figura 5.8 (a) *Componente vertical de un sismograma de periodo corto (38.60° N, 0.50° O).* (b) *Señal obtenida con DReWP* (c) *Señal obtenida con WLC.*

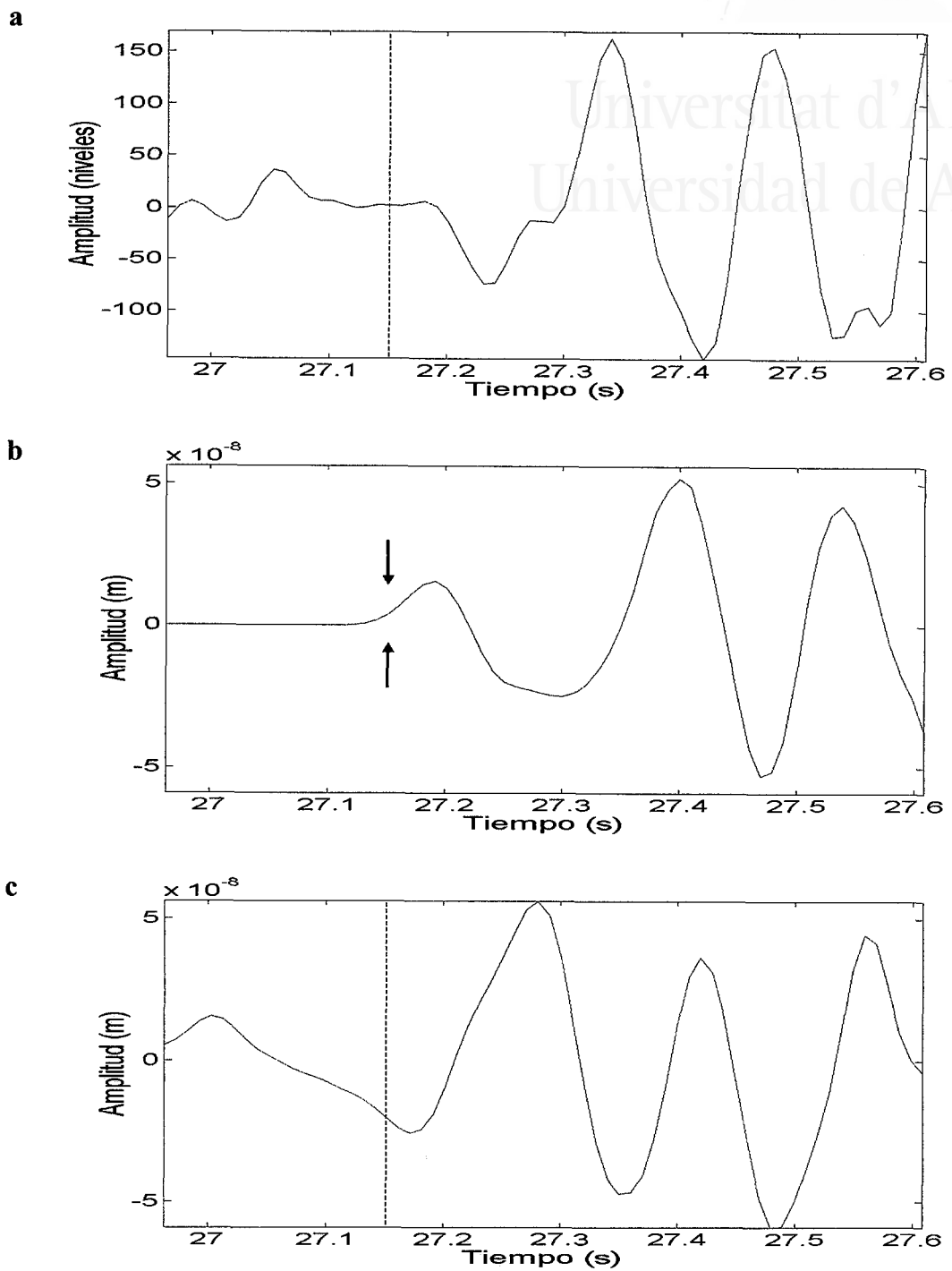


Figura 5.9 (a) Primera llegada del sismograma de periodo corto mostrado en la figura 5.8 (b) Llegada obtenida con DReWP (c) Llegada obtenida con WLC.

La figura 5.10 es un evento de magnitud $M_L = 2.0$ localizado en Ibi (38.60° N, 0.50° O) y registrado por la estación UNIP con una $SNR=5.00$. Ahora se utilizan como parámetros de entrada (HT, thr_0.2, db12, 5, Shannon, db10, 5) obteniendo una $SNR=115.00$. Con el método WLC se supera ligeramente la SNR de la señal inicial ($SNR=5.46$) pero aún así se queda muy corto comparado con los resultados obtenidos con nuestro método. En la figura 5.11 se compara el pulso de llegada correspondiente a la señal original con el correspondiente a los dos métodos de deconvolución. En este caso, el método WLC presenta el primer pulso más adelantado en el tiempo y bastante suavizado. Por el contrario, el método DReWP retrasa la llegada del pulso con respecto a la señal registrada, lo cual, como se verá más adelante, contrarresta el adelanto producido por la respuesta instrumental.

En el último ejemplo que se muestra, figura 5.12, se presenta un registro de la estación MAIG producido por un evento de magnitud $M_L = 2.4$ localizado en Abanilla (38.20° N, 1.03° O). En este caso la SNR de la señal registrada es de 13.74 y después de la deconvolución con el método WLC se reduce a 12.68. Sin embargo con el método DReWP se obtiene una $SNR=24.99$. Para ello se han utilizado como parámetros de entrada los siguientes: (HT, thr_0.2, db10, 5, Shannon, db10, 5). Al igual que en los ejemplos anteriores, en este caso también se muestra una nueva figura con una ampliación del primer pulso (figura 5.13).

En el apéndice C se presentan varios ejemplos más de aplicación sobre sismogramas reales. En concreto se muestran los resultados obtenidos con el método DReWP sobre los eventos registrados por la red local durante el pasado año 2000.

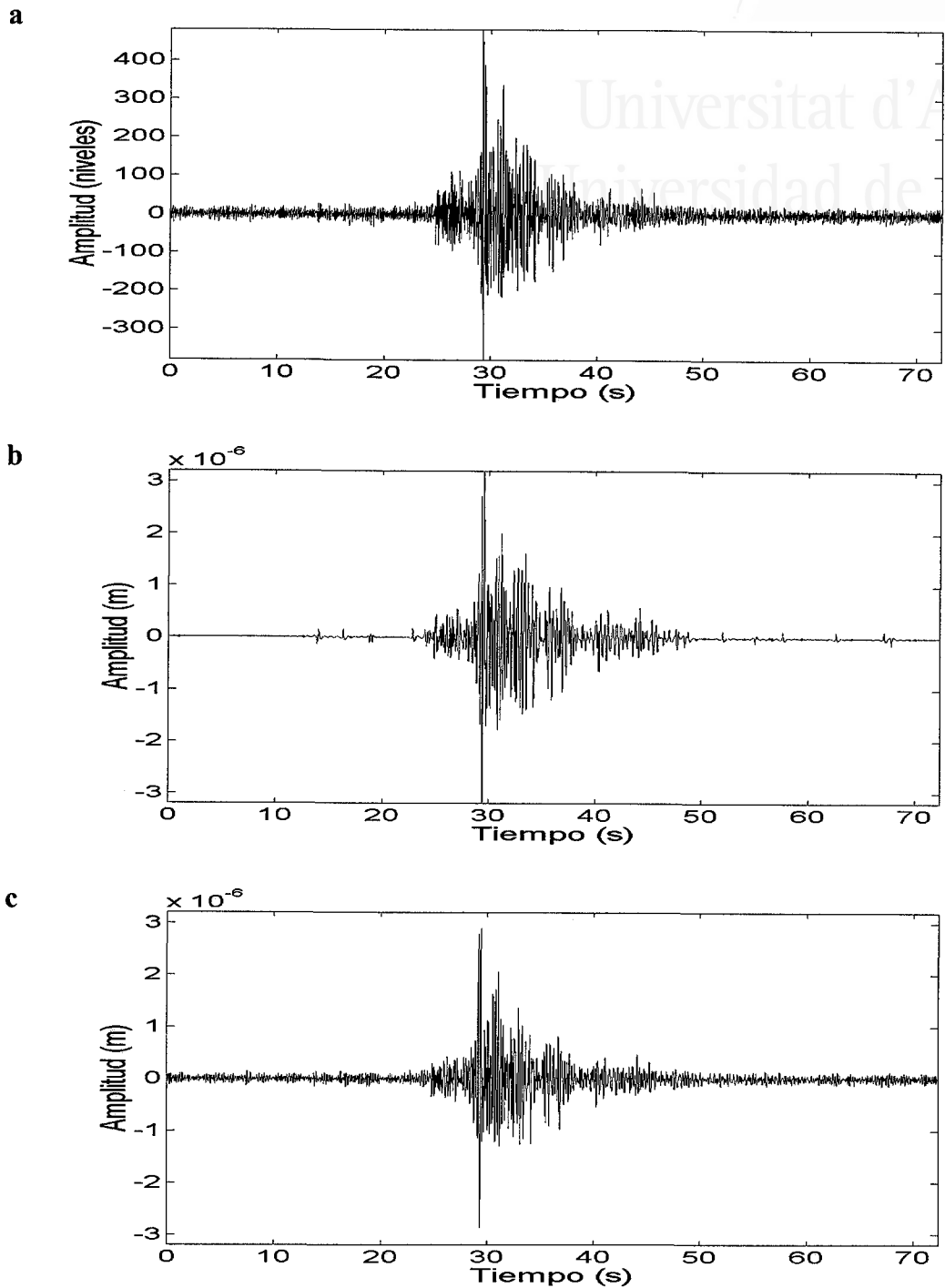


Figura 5.10 (a) *Comparte vertical de un sismograma de periodo corto (38.20° N, 1.03° O).* (b) *Señal obtenida con DReWP* (c) *Señal obtenida con WLC.*

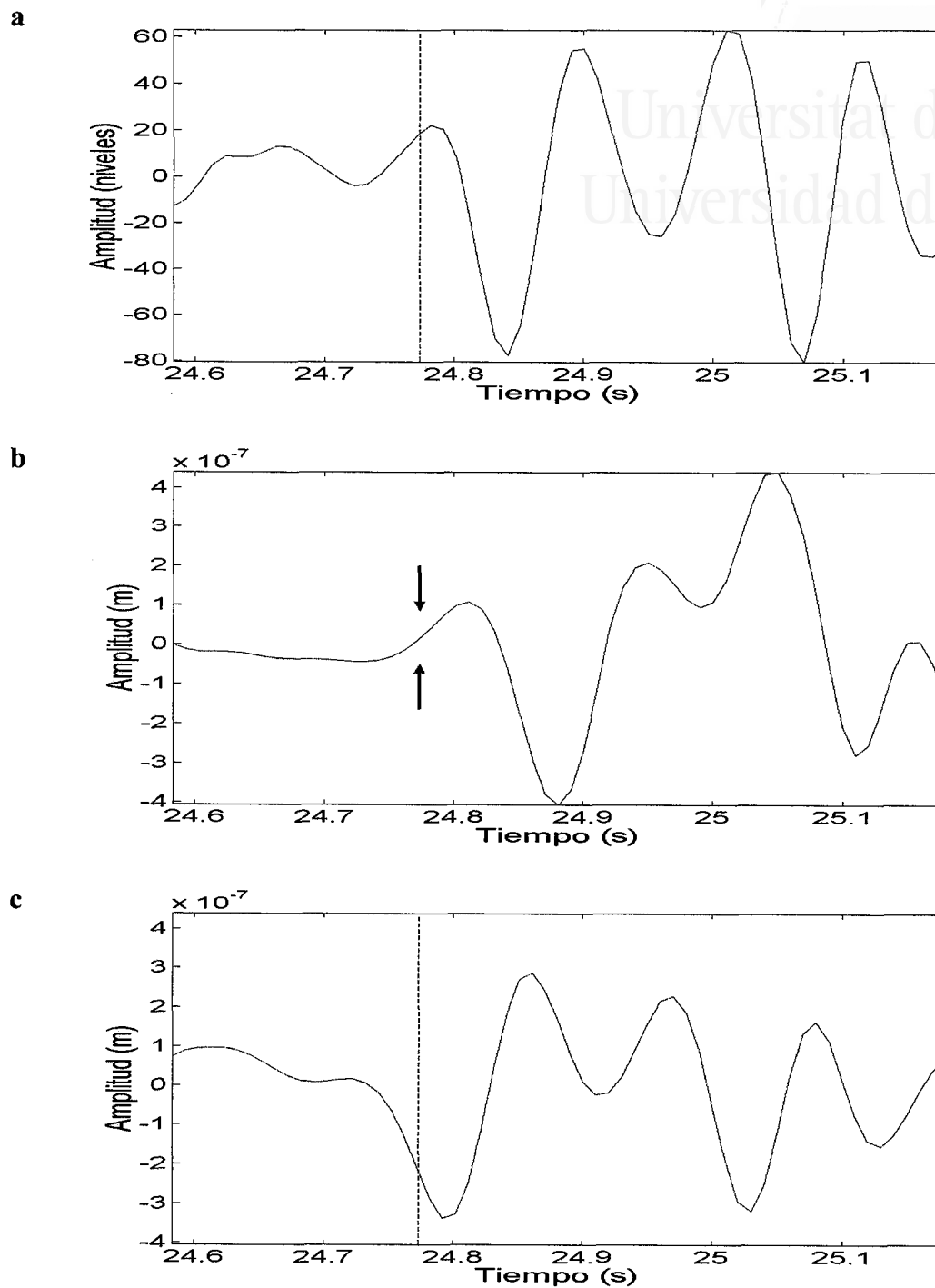


Figura 5.11 (a) Primera llegada del sismograma de periodo corto mostrado en la figura 5.10 (b) Llegada obtenida con DReWP (c) Llegada obtenida con WLC.

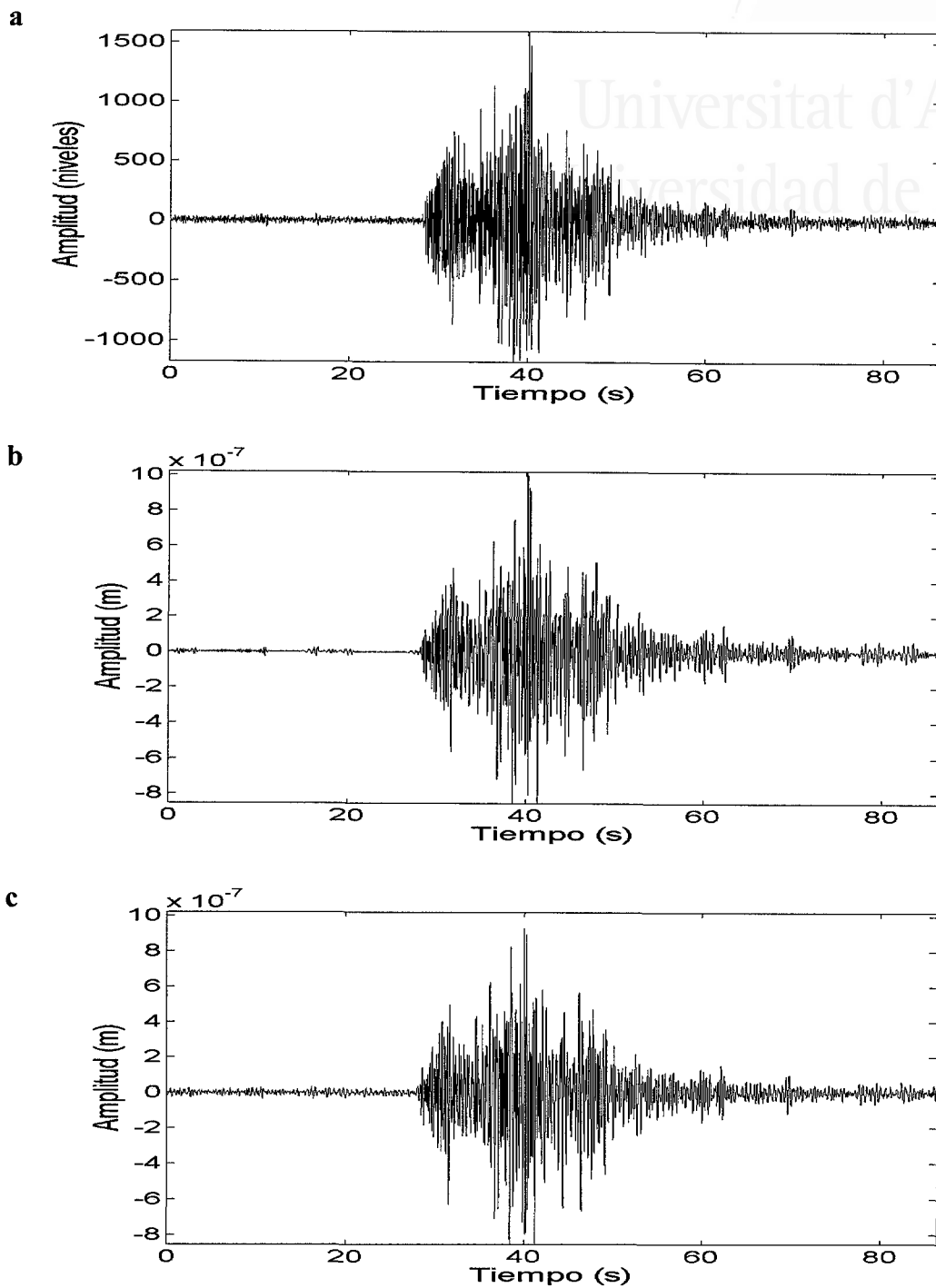


Figura 5.12 (a) *Comparte vertical de un sismograma de periodo corto (38.20° N, 1.03° O).* (b) *Señal obtenida con DReWP* (c) *Señal obtenida con WLC.*

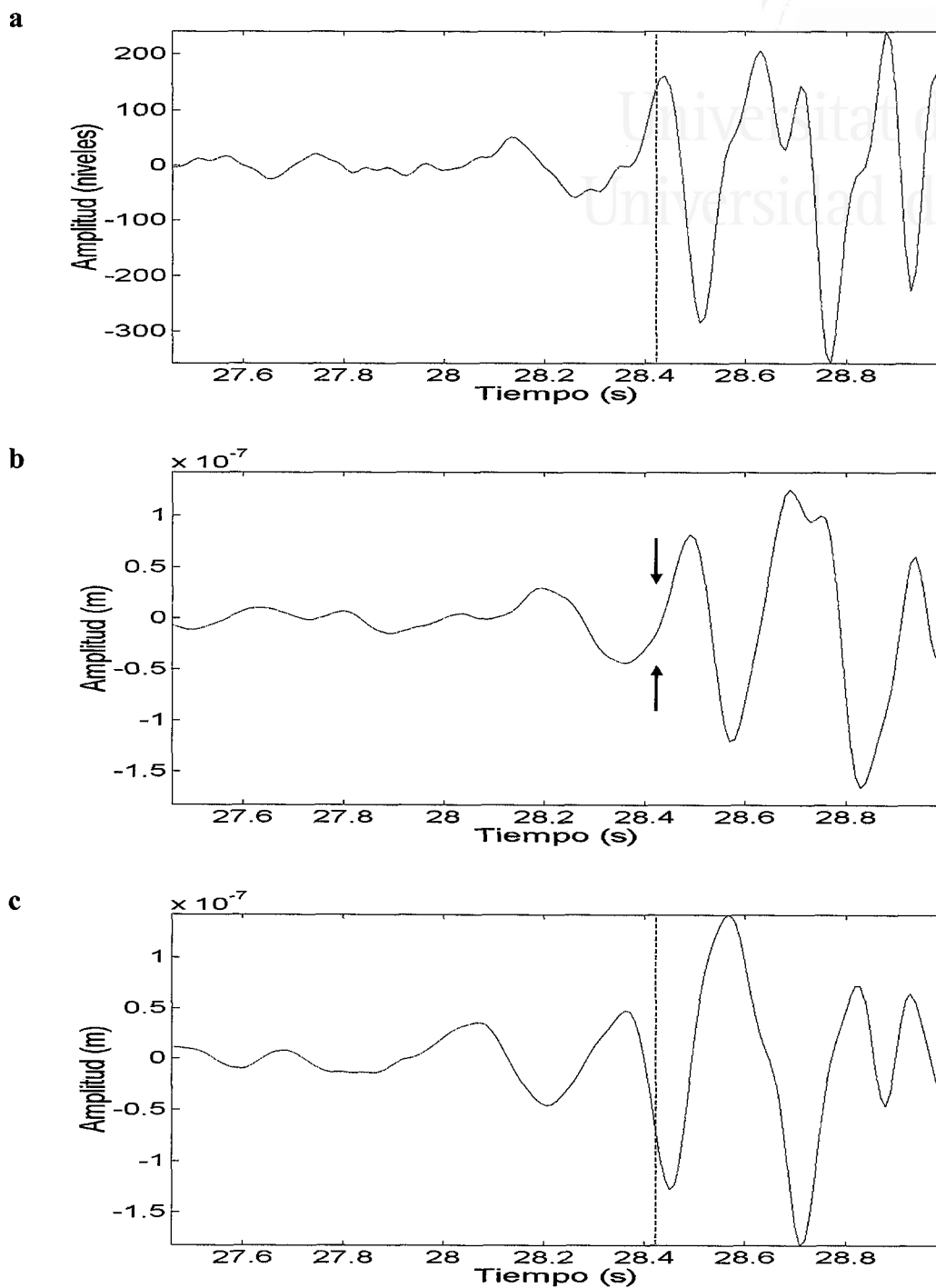


Figura 5.13 (a) Primera llegada del sismograma de periodo corto mostrado en la figura 5.12 (b) Llegada obtenida con DReWP (c) Llegada obtenida con WLC..

Llegado a este punto, es importante hacer una mención especial acerca de los pulsos de llegada correspondientes a los cuatro ejemplos reales mostrados. Como se puede comprobar, en todos los casos se reflejan notorias diferencias entre la llegada correspondiente a la señal registrada y la correspondiente a la obtenida con el método de deconvolución DReWP. Estas diferencias incluyen tanto al perfil de la señal como al tiempo de llegada.

En principio se puede pensar que el método propuesto introduce un desfase en la señal y que el tiempo de llegada que se obtiene no es el correcto. Sin embargo, no se debe olvidar que se está comparando el pulso obtenido con el pulso de la señal registrada, la cual está afectada por la respuesta instrumental.

En la figura 5.14 se compara el primer pulso del sismograma sintético puro $s_1(n)$, antes y después de ser convolucionado con la respuesta instrumental de la estación UNIP. Como se puede comprobar el pulso que se registra presenta un perfil bastante diferente de la señal que llega al sensor. Además, la señal obtenida está adelantada en 0.03 s respecto a la señal representativa del movimiento del suelo, $s_1(n)$.

Teniendo esto en cuenta, se puede concluir que en los ejemplos reales mostrados, el proceso de deconvolución propuesto consigue corregir el desfase introducido por la respuesta instrumental, mientras que el método WLC introduce un desfase adicional.

Para finalizar este apartado se puede decir que, a partir de estos ejemplos y del resto de resultados obtenidos sobre los eventos registrados por la red, el método propuesto consigue mejorar en gran medida los resultados obtenidos con el método WLC.

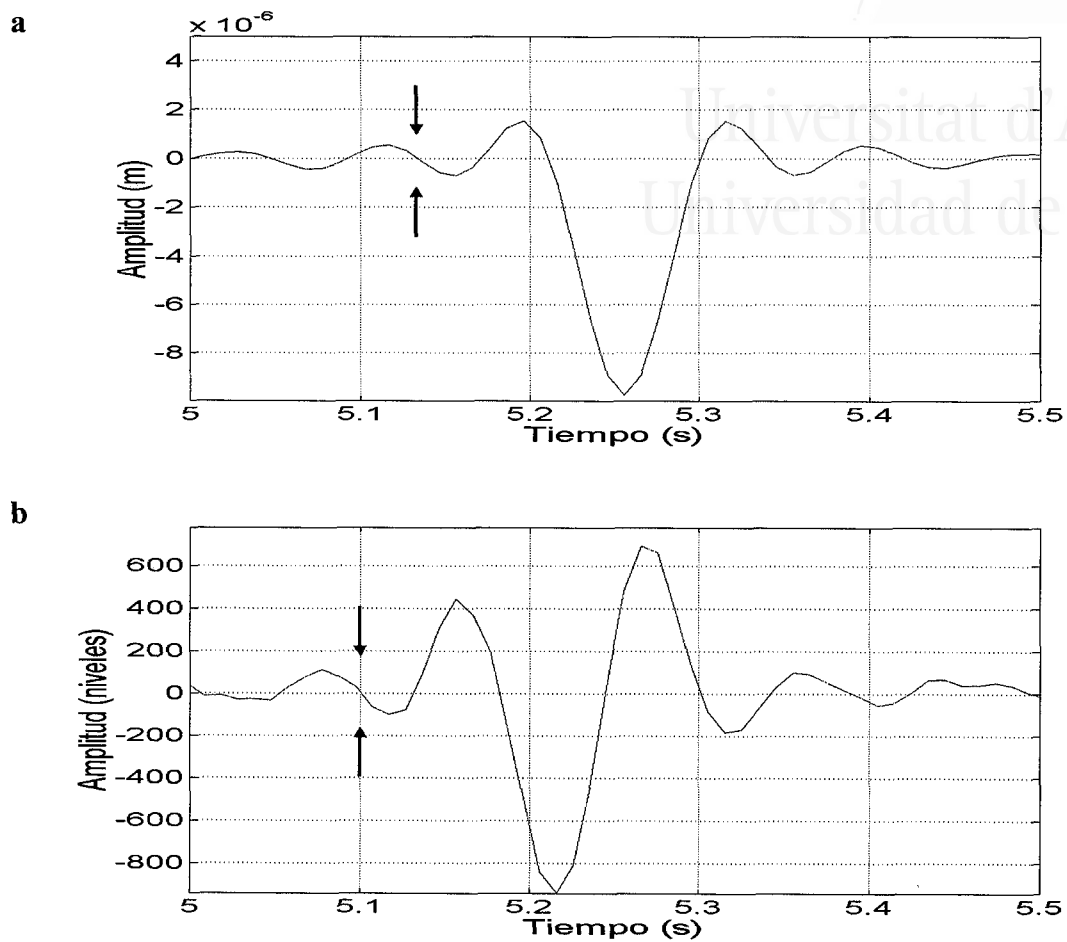


Figura 5.14 (a) Primer pulso de la señal sintética $s_1(n)$ (b) Primer pulso de la señal sintética $x_{1,4}(n)$ (señal $s_1(n)$ convolucionada con la respuesta instrumental de la estación UNIP).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ESTIMACIÓN DEL AZIMUT EN SISMOGRAMAS LOCALES

6.1 Introducción.

Una de las tareas de la sismología de observatorio consiste en la localización de la fuente sísmica que provoca un determinado evento. Generalmente esto se realiza utilizando datos de varias estaciones situadas en diferentes localizaciones dentro de la red. Sin embargo, también es posible obtener la localización de un evento a partir de los datos proporcionados por una única estación con sensor de tres componentes (Magotra et al., 1989; Jarpe y Dowla, 1991). Para ello se deben realizar dos cálculos básicos: estimación del ángulo de azimut, que nos indica el ángulo que sostiene la recta que une la fuente con la estación respecto a la componente norte; y estimación

de la distancia fuente-sensor, que se puede obtener mediante la diferencia entre los tiempos de llegada de la onda P y la onda S.

El error cometido en la localización de los eventos mediante una única estación es mucho mayor que el obtenido mediante los datos procedentes de varias estaciones. Sin embargo, en algunas situaciones sólo se dispone de la información proporcionada por una o dos estaciones de este tipo y por tanto es necesario la aplicación de estos métodos de localización.

Basándose en el alto grado de polarización que presenta el primer pulso en sismogramas regionales, se encuentran diferentes métodos de detección y estimación del azimut a través de una única estación (Magotra et al., 1989; Anant y Dowla, 1997). Estos métodos dan buenos resultados cuando se aplican sobre sismogramas regionales. Sin embargo, la extrapolación a eventos de tipo local deja de funcionar adecuadamente.

Por este motivo, en esta tesis se propone un nuevo método de estimación del azimut para sismogramas de tipo local.

6.2 Estimación del azimut en un sismograma de tres componentes.

La primera llegada de una señal sísmica para eventos regionales y locales es generalmente una onda P, la cual está polarizada linealmente a lo largo de la dirección de propagación. En este caso las componentes Z, N, y E del sismograma se pueden proyectar sobre la dirección de propagación de la onda y proporcionar una señal a lo largo de L (figura 6.1) de máxima varianza. En el caso ideal de disponer de una llegada P pura sin distorsión, la varianza en cualquier otra dirección debería ser igual a cero. No obstante en una situación real es de esperar que la varianza de la

señal a lo largo de la dirección L sea mucho más grande que la varianza en cualquier otra dirección.

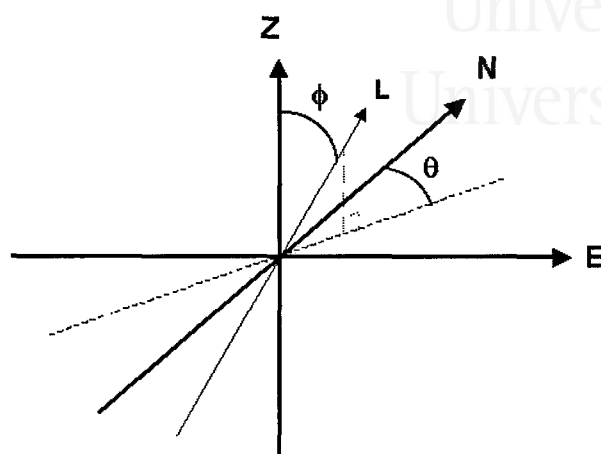


Figura 6.1 Trayectoria de la primera llegada (L) en el plano Z - N - E .

Magotra (1989) reformula el problema de la siguiente manera: Dado un vector X de dimensión 3×1 y media cero en el espacio Z - N - E , se pretende encontrar la dirección en la cual una proyección y de X tendrá la máxima varianza. El escalar y se puede expresar como un producto vectorial de la forma:

$$y = U^T X = [u_1 \quad u_2 \quad u_3] \begin{bmatrix} n \\ e \\ z \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

donde U es un vector normalizado ($U^T U = 1$) en la dirección en la cual se proyecta X .

Bajo la suposición de que X es de media cero, se pueden derivar los siguientes parámetros estadísticos referentes a y :

$$\bar{y} = E[y] = E[U^T X] = 0 \quad (6.2)$$

$$\sigma_y^2 = E[y^2] = U^T C U \quad (6.3)$$

donde $E[\cdot]$ representa la esperanza estadística y C es la matriz de covarianza de X , cuya expresión es:

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_n^2 & \sigma_{ne} & \sigma_{nz} \\ \sigma_{ne} & \sigma_e^2 & \sigma_{ez} \\ \sigma_{nz} & \sigma_{ez} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Como ya se dijo anteriormente, lo que se busca es maximizar σ_y^2 con respecto a U bajo la restricción de $U^T U = 1$. Utilizando los multiplicadores de Lagrange y denotando λ_m como la Lagrangiana, el problema de maximización se puede expresar como:

$$\max \left\{ \bar{\sigma}_y^2 \right\} \text{ con } \bar{\sigma}_y^2 = U^T C U - \lambda_m (U^T U - 1) \quad (6.5)$$

El máximo de $\bar{\sigma}_y^2$ se puede obtener derivando respecto a U e igualando el resultado a 0. Esto da lugar a la siguiente ecuación:

$$(C - \lambda_m I) U = 0 \quad (6.6)$$

donde I es la matriz identidad. Esta ecuación implica que λ_m es un autovalor de C y U es el correspondiente autovector.

Para asegurar que la solución anterior es en realidad un máximo se debe comprobar que la segunda derivada de $\bar{\sigma}_y^2$ con respecto a U es semidefinida negativa. La matriz H correspondiente a esta segunda derivada se puede expresar del siguiente modo:

$$H = C - \lambda_m I \quad (6.7)$$

Como la matriz H es la suma de una matriz C y un escalar λ_m multiplicado por la matriz identidad, sus autovalores se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\lambda_i^H = \lambda_i^C - \lambda_m \quad (6.8)$$

Para que H sea semidefinida negativa se debe cumplir que todos sus autovalores sean negativos o cero. Como λ_m es también un autovalor de C , entonces H sólo cumplirá esta condición si λ_m es el máximo autovalor.

Una vez obtenido el autovalor máximo y su correspondiente autovector se pueden calcular fácilmente los ángulos ϕ y θ .

$$\phi = \arccos(u_z) \quad (6.9)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{u_n}{\sqrt{u_n^2 + u_e^2}}\right) \quad (6.10)$$

Bajo este marco teórico Magotra (1989) propone un algoritmo para la detección y estimación del azimut a partir de tres (o dos) componentes del sismograma. En este método se realiza una estimación de la matriz de covarianza asociada a cada punto de la señal y se utiliza el máximo autovalor como parámetro de detección de la primera llegada.

Anant (1997) asocia a cada muestra de la señal una determinada ventana y sobre ella calcula la matriz de covarianza. Además aplica la transformada discreta de wavelet (DWT) a la señal original obteniendo una señal diferente asociada a cada nivel de la descomposición. Sobre cada una de estas señales vuelve a calcular la matriz de covarianza obteniendo mejores resultados que los que se obtenían con la señal original. Como parámetro de detección utiliza una métrica que mide el grado de polarización de la señal en cada una de las ventanas del análisis.

Ambos métodos basan el proceso de detección y estimación en las propiedades de polarización de la primera llegada, lo cual da buenos resultados para

sismogramas regionales, pero no para los sismogramas locales.

En el caso de eventos regionales, el valor estimado del azimut permanece constante durante aproximadamente diez segundos después de la primera llegada (Magotra, 1989). En el caso de sismogramas locales, diez segundos de la señal pueden ser suficientes para contener diferentes fases e incluir gran cantidad de llegadas. Por tanto se necesita estimar con mucha más precisión la muestra donde comienza el primer pulso así como su duración. Para estos sismogramas locales, los métodos basados en la polarización de la primera llegada proporcionan detecciones erróneas, lo cual se traduce en una falsa estimación del ángulo de azimut.

En el siguiente apartado se propone un nuevo algoritmo para determinar de forma automática el ángulo de azimut en sismogramas locales.

6.3 Estimación del azimut mediante filtrado y detección en el dominio de las wavelets.

En este apartado se propone un nuevo algoritmo para la estimación automática del ángulo de azimut el cual consta básicamente de tres etapas: filtrado, detección, y estimación del azimut.

Filtrado:

En la primera etapa se realiza un filtrado de las tres componentes del sismograma utilizando las técnicas basadas en wavelets que se estudiaron en el capítulo 3. En concreto se utiliza la transformada discreta de wavelet packet (DWPT) con cuatro niveles de descomposición, función de entropía Shannon, y wavelet madre del tipo Daubechies, 'db10'. Como método de filtrado se emplea el 'soft-thresholding'.

Esta etapa permite obtener una señal mucho más limpia y, sobre todo, permite distinguir de forma mucho más clara donde se produce la llegada del primer pulso (figura 6.2).

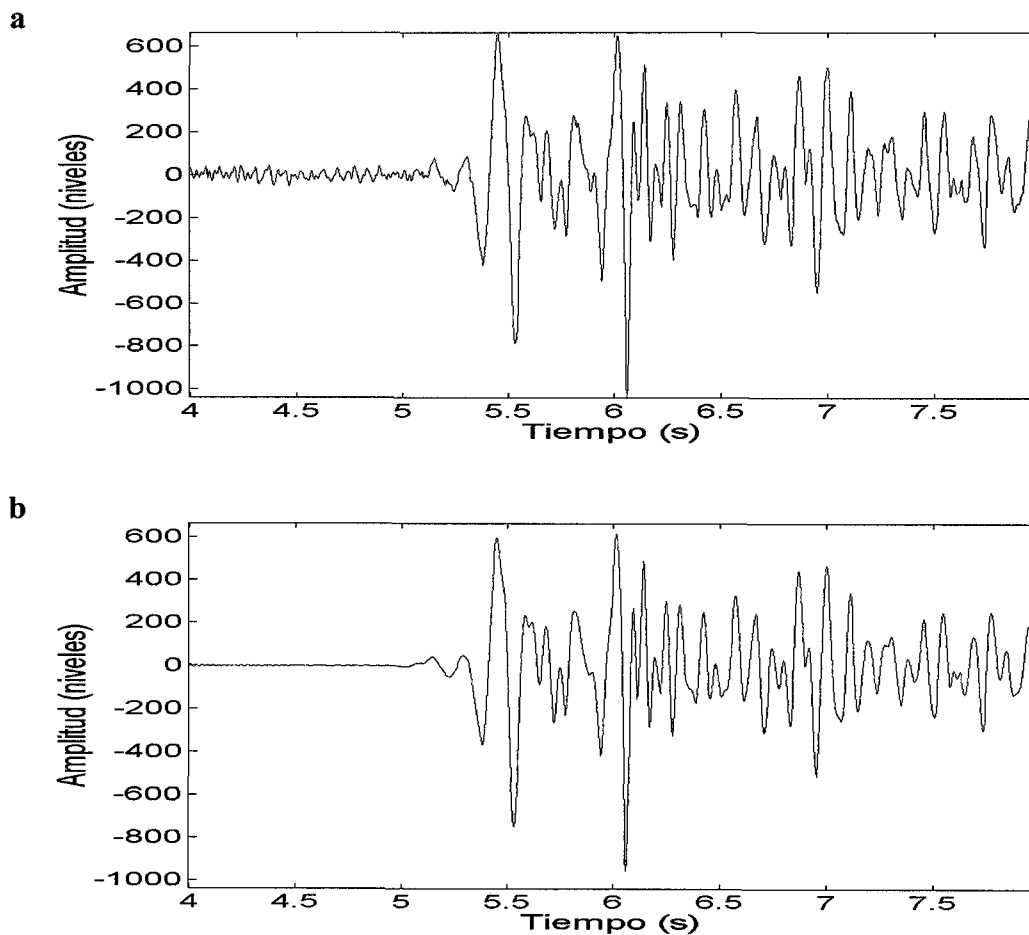


Figura 6.2 *Componente vertical registrada (a) y componente vertical filtrada (b).*

Detección:

Si sobre una señal dada se aplica la transformada de wavelet y después se reconstruye (mediante la transformada inversa) cada una de las secuencias de

coeficientes asociadas a cada nivel, de manera independiente (como si el resto de secuencias fuera igual a cero); entonces se obtiene lo que se conoce como coeficientes reconstruidos de wavelets. En concreto se obtienen varias señales (tantas como niveles más uno) de igual tamaño a la señal original, donde cada una de ellas está asociada a un nivel de descomposición de wavelet y cuya suma da lugar a la señal inicial.

El primer paso en el proceso de detección consiste en aplicar la DWT sobre la señal filtrada utilizando una wavelet madre del tipo 'haar' y quedarse con los coeficientes reconstruidos asociados al nivel 4 de la descomposición. Estos coeficientes constituyen una señal formada por pulsos cuadrados donde la primera llegada resalta de manera notable. En la figura 6.3 se muestra un ejemplo donde se ha ampliado la zona próxima al primer pulso.

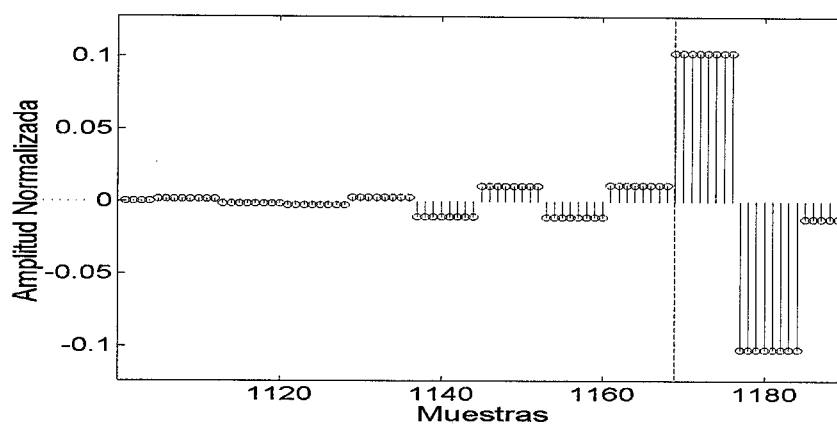


Figura 6.3 Señal reconstruida asociada al nivel 4 de la DWT con wavelet madre 'haar'.

En el segundo paso se normaliza la señal obtenida respecto a la máxima amplitud de ésta y a continuación se analiza toda la señal en busca de una discontinuidad bastante marcada que indique la presencia del primer pulso. Como criterios de detección se utilizan los siguientes: que la relación entre la amplitud del pulso cuadrado seleccionado y la amplitud del pulso cuadrado anterior a éste sea

superior a un factor f_A ; y que la amplitud del pulso seleccionado sea superior a un cierto factor f_B . Si se cumplen estas dos condiciones entonces se escogerá como 'pick'¹ la primera muestra del pulso cuadrado seleccionado en ese momento. En el caso de la figura 6.3 el 'pick' se marca en la muestra 1169.

No obstante este método de detección no es suficiente para realizar la posterior estimación del ángulo de azimut pues presenta una indeterminación de ocho muestras que es justo el ancho del pulso cuadrado. Para resolver esta indeterminación se desplaza la señal filtrada una muestra hacia la derecha y se vuelve a aplicar el segundo paso desde el comienzo. De esta forma se obtiene otro valor de 'pick' que puede coincidir con el obtenido anteriormente o no. Este proceso de desplazamiento y repetición del segundo paso se realiza durante seis veces más hasta llegar a un desplazamiento máximo de siete muestras. El 'pick' que se escoge como válido será el obtenido de promediar los ocho 'picks' anteriores. En el caso que el 'pick' de la señal registrada coincida con la primera muestra del pulso cuadrado seleccionado de la señal sin desplazamiento, entonces este valor de 'pick' se mantendrá constante y no variará con el desplazamiento realizado.

Estimación del azimut:

Una vez determinado el 'pick' se calcula el ángulo de azimut siguiendo el procedimiento indicado en el apartado 6.2. Para ello se calcula la matriz de covarianza sobre una ventana de 50 muestras, centrada en la muestra marcada como 'pick'. Experimentalmente se observa un primer pulso bastante limpio durante unos 0.2 s, intervalo de tiempo que incluye el rango de frecuencias dominantes de las primeras llegadas. Teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo es de 250 Hz, se obtiene que la anchura de este pulso inicial es de unas 50 muestras. La señal utilizada para determinar el ángulo de azimut es la señal filtrada mediante wavelet packets, la cual proporciona mejores resultados que la señal original.

En algunos sismogramas se da la situación que el 'pick' determinado está algo retrasado y, por tanto, la estimación del azimut no es correcta. Esto es debido

¹ Se denota como 'pick' a la muestra asociada con el inicio del primer pulso o llegada.

principalmente al perfil de la primera llegada, el cual se encuentra, por un lado distorsionado por la respuesta instrumental y el ruido (figura 6.4a), y por otro lado se encuentra distorsionado por la presencia de otro tipo de pulsos reflejados (figura 6.4b). En este segundo caso se hace necesario adelantar el 'pick' con el objetivo de realizar una buena estimación del ángulo de azimut.

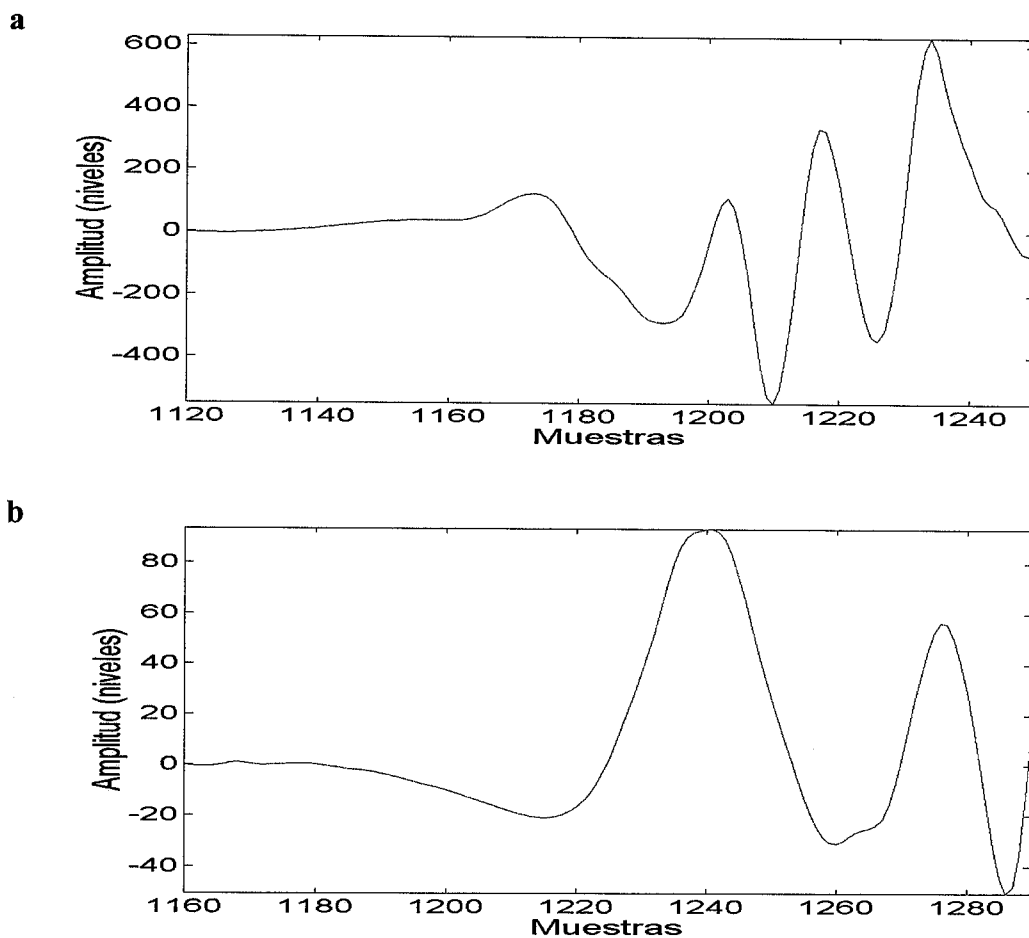


Figura 6.4 (a) Primera llegada distorsionada a su comienzo por la respuesta instrumental y por el ruido. (b) Primera llegada distorsionada por la presencia de otro pulso inmediato.

Para que este proceso sea automático se opta por estimar el ángulo de azimut en la posición dada por el 'pick' y en una posición retrasada 16 muestras. De esta forma se obtienen dos ángulos de elevación y dos ángulos de azimut, siendo el más adecuado aquel que proporcione una proyección sobre la dirección de llegada de menor varianza.

6.4 Aplicación a sismogramas locales.

El algoritmo desarrollado en el apartado anterior se ha evaluado sobre un conjunto de 19 sismogramas de tres componentes de periodo corto y de azimut conocido. En la tabla 6.1 se muestra la información relativa a estos eventos. Para la calcular la localización de éstos se utiliza el software HYPO71PC (Lee y Valdés, 1989) y los sismogramas obtenidos de las cuatro estaciones analógicas. Esto permite obtener el ángulo de azimut de forma más precisa y por tanto sirve para comparar con los resultados obtenidos con el algoritmo propuesto.

Ambos resultados, los proporcionados por el algoritmo propuesto y los proporcionados por la red analógica (denominados como ángulos 'modelo'), se comparan en la tabla 6.2.

Para la aplicación del algoritmo se han utilizado los valores de 3 y 0.005 para las constantes f_A y f_B , respectivamente. En el caso de los eventos número 7,8,14,18 y 19 estas constantes daban un 'pick' algo prematuro que inducía a un azimut erróneo. Para ellas se utilizaron los valores de 4 y 0.05.

Evento	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud	Distancia (km)
1	38.2973	0.9655	0.00	1.51	11.2553
2	38.2983	0.7973	0.65	1.10	11.8793
3	38.5143	0.7900	4.16	1.70	17.6757
4	38.2967	0.6942	4.35	1.50	13.7749
5	38.2972	0.6972	7.01	2.05	13.5231
6	38.2303	0.9730	0.00	1.46	12.0600
7	38.2788	0.9268	0.00	1.49	6.7245
8	38.5143	0.7900	4.16	1.70	26.6246
9	38.2973	0.9655	0.00	1.51	10.3046
10	38.4505	0.6477	0.00	1.42	24.6173
11	38.4495	0.6557	0.00	1.91	23.9137
12	38.4543	0.6550	0.29	1.74	24.1183
13	38.4443	0.6625	0.96	1.82	23.1884
14	38.4762	0.6028	2.88	1.05	29.1981
15	38.4497	0.6398	0.00	1.08	25.2548
16	38.4630	0.6642	1.47	2.30	23.6548
17	38.4482	0.6443	4.00	1.59	24.8322
18	38.4507	0.6448	4.00	1.61	24.8611
19	38.4645	0.6277	4.23	1.72	26.7333

Tabla 6.1 *Eventos utilizados en el test.*

En tabla 6.2 se puede apreciar como la mayoría de ángulos obtenidos están dentro de un margen de error de unos 10° , lo cual es similar a lo que se obtiene con otros métodos de estimación cuando se aplican sobre sismogramas regionales (Magotra, 1989). No obstante, es muy importante tener en cuenta que los ángulos tomados como ‘modelo’ también tienen asociado un determinado error que el software HYPO71PC proporciona a modo de error de latitud y error de longitud. Generalmente estos errores se traducen en una indeterminación del ángulo azimut que puede variar desde unas décimas de grado a varias unidades. Por ejemplo, mientras para el evento 13 el error es de 0.32° , para el evento 10 es de 4° . De todos los resultados obtenidos destacan negativamente sólo cuatro eventos con un error

entorno a 30° . Sin embargo en estos casos el error asociado al ángulo ‘modelo’ también es mucho mayor de lo esperado. Por ejemplo para el evento 6 el error cometido es ligeramente superior a 15° .

Evento	Distancia (km)	Modelo (grados)	Algoritmo (grados)
1	11.2553	21	17
2	11.8793	314	315
3	17.6757	220	216
4	13.7749	262	255
5	13.5231	262	269
6	12.0600	63	90
7	6.7245	90	79
8	26.6246	191	156
9	10.3046	101	108
10	24.6173	255	262
11	23.9137	254	269
12	24.1183	253	260
13	23.1884	255	265
14	29.1981	251	284
15	25.2548	255	269
16	23.6548	251	266
17	24.8322	255	267
18	24.8611	255	285
19	26.7333	252	265

Tabla 6.2 Resultados obtenidos con el algoritmo de estimación del ángulo de azimut.

En la figura 6.5 se muestran gráficamente los errores cometidos para este conjunto de sismogramas locales.

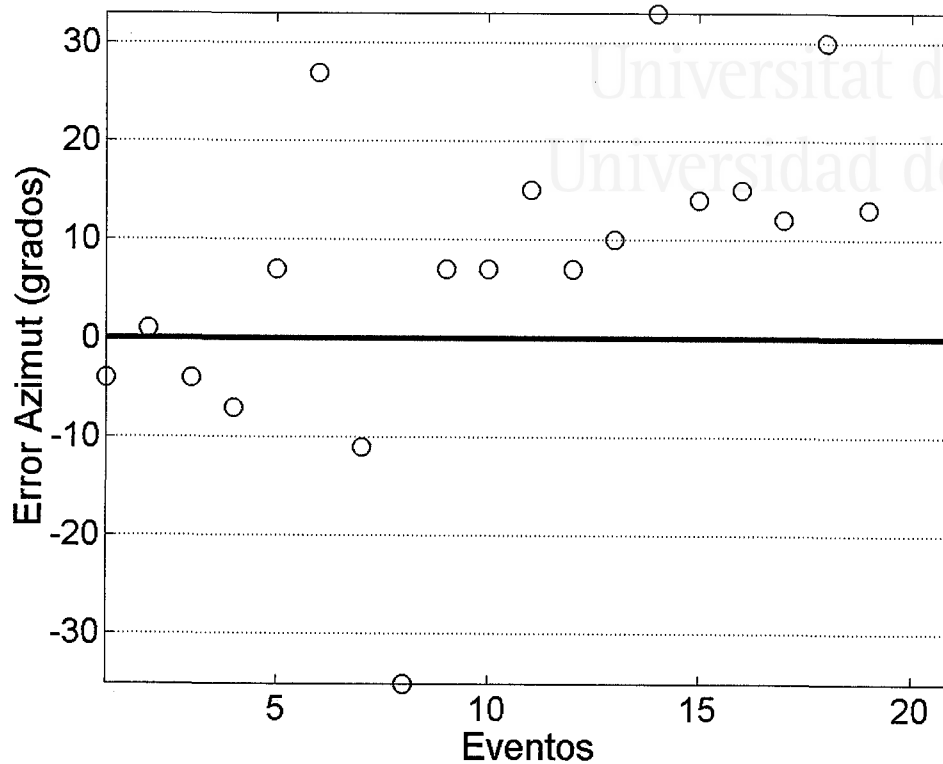


Figura 6.5 Error cometido en la estimación del ángulo de azimut.

Para concluir se puede decir que el algoritmo propuesto consigue estimar el ángulo de azimut de los sismogramas locales de manera automática, utilizando prácticamente un valor constante para los parámetros f_A y f_B , y cometiendo un error medio de 13° .



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CONCLUSIONES

7.1 Resultados.

A lo largo de esta tesis se han proporcionado varios resultados relevantes que conviene recordar a modo de síntesis. Estos resultados se pueden clasificar en dos apartados diferentes:

a) Resultados teóricos:

- Nuevo enfoque acerca del análisis de wavelets, donde se aborda la transformada discreta de wavelet como un fragmento particular de la transformada discreta de wavelet packet. De esta forma, todo el desarrollo teórico y la nomenclatura se engloban dentro de un contexto general, a diferencia de como se realiza habitualmente el estudio de esta transformada.

- Respecto a los algoritmos de filtrado de ruido basados en wavelets y en concreto en el método de umbralización, se define un nuevo tipo de umbral dependiente de las características del nodo bajo estudio.
- Se ha desarrollado un nuevo método de deconvolución regularizado que emplea las propiedades de las wavelet packets referentes a la buena localización tiempo-frecuencia y a la buena adaptabilidad a diferentes tipos de señales.
- Se ha desarrollado un nuevo algoritmo de detección y estimación del azimut para los sismogramas de tres componentes de la red local. Este nuevo algoritmo utiliza la transformada discreta de wavelet packets para filtrar las tres componentes y facilitar la detección de la primera llegada. Por otro lado, como procedimiento de detección de ésta se utiliza un nuevo método basado en la transformada discreta de wavelet, que utiliza las propiedades específicas de la wavelet de tipo ‘haar’ para estimar el ‘pick’ y posteriormente el ángulo de azimut.

b) Resultados prácticos:

- Desarrollo de un nuevo software de simulación de sismogramas locales que utiliza el método de trazado de rayos y la información geológica relativa al entorno restringido de actuación de la red local. Los sismogramas que se obtienen no sólo simulan el movimiento del suelo en la posición del sensor sino también los efectos que sobre éste tiene la respuesta instrumental y el ruido asociados a cada uno de los emplazamientos.
- Comprobación mediante sismogramas sintéticos de los efectos que la respuesta instrumental produce sobre la señal que llega al sensor. Estimación del desfase introducido en el primer pulso.
- Aplicación del método de deconvolución propuesto a sismogramas sintéticos y estimación de los parámetros de entrada (tipo de filtrado, función de entropía, tipo de wavelet madre y máximo nivel de descomposición) que proporcionan los mejores resultados para cada una de las estaciones.

- Evaluación cuantitativa del método DReWP a través de su aplicación a sismogramas sintéticos. Como parámetros de medida más idóneos se han escogido: el tanto por ciento de energía respecto a la señal inicial (A), la SNR (B), el coeficiente de autocorrelación entre las señales completas (C), y el coeficiente de autocorrelación entre los pulsos de llegada (D).
- Comparación cuantitativa entre el método de deconvolución utilizado actualmente (WLC) y el método propuesto. A modo de resumen, en la tabla 7.1 se comparan los parámetros de medida obtenidos con el método DReWP (HT; dne_0.8; db10; 5; Shannon; db10; 5), con los obtenidos con el método WLC (65% de la frecuencia de Nyquist), cuando se aplican sobre la señal sintética $x_{2,4}(n)$ (ver apartado 5.4).

Método de deconvolución	A	B	C	D
DReWP	101.8%	35.78	0.98	0.92
WLC	97.8%	6.27	0.76	0.13

Tabla 7.1 Comparación entre los parámetros de medida que se obtienen con los métodos de deconvolución DReWP y WLC cuando se aplican sobre la señal $x_{1,4}$

- Diseño de software en entorno Matlab para el filtrado y deconvolución de los sismogramas de periodo corto de la red local de manera casi automática.
- Estimación del ángulo azimut a partir de sismogramas locales, que es donde otros métodos, utilizados con éxito en sismogramas regionales, proporcionan resultados poco precisos.

- Diseño de software en entorno Matlab para la estimación automática del ángulo azimut a partir de un sismograma local de tres componentes.

7.2 Conclusiones.

A continuación se enumeran las conclusiones que se pueden extraer del conjunto de resultados conseguidos. Estas conclusiones se pueden agrupar básicamente en tres grupos:

a) Análisis de señales no estacionarias:

- Para el tratamiento de señales no estacionarias resulta más apropiado un análisis tiempo-frecuencia donde la señal es tratada a la vez en ambos dominios.
- Dentro de las descomposiciones tiempo-frecuencia, la transformada discreta de wavelet packet realiza una descomposición que se adapta eficientemente al tipo de señal bajo estudio.
- El tipo de umbral más apropiado para el filtrado de ruido en el dominio de las wavelets es un umbral dependiente del nivel.
- El tipo de umbral más apropiado para el filtrado de ruido en el dominio de las wavelet packets es un umbral dependiente del nodo.

b) Deconvolución de señales contaminadas con ruido:

- En el proceso de deconvolución, la inversión regularizada en el dominio de Fourier proporciona los mejores resultados cuando la señal a tratar está contaminada con ruido.

- Para señales estacionarias, la deconvolución óptima viene proporcionada por el filtro LTI de Wiener. En este caso la función de regularización es una función que depende de la señal que se desea obtener.
- El método de deconvolución utilizado actualmente por la red local, WLC, introduce distorsiones en la señal que dan lugar a tiempos de llegada y perfiles del primer pulso erróneos. En muchos caso este método tampoco mejora la SNR de la señal sin deconvolucionar.
- El método DReWP proporciona los tiempos de llegada correctos y apenas distorsiona el perfil de la señal. Además, consigue mejorar en gran medida la SNR. Por otro lado, a diferencia del filtro de deconvolución de Wiener, no se necesita disponer a priori de ninguna información sobre la señal que se desea estimar.
- La respuesta instrumental asociada a las estaciones de la red introduce un adelanto en la señal que se recibe a pie de sensor. Este adelanto es corregido después de realizar la deconvolución con el método DReWP. En el caso del método WLC este adelanto se convierte aún más significativo.
- Los parámetros de entrada del método DReWP que proporcionan los mejores resultados varían ligeramente de una estación a otra. No obstante se puede escoger un conjunto de parámetros fijo para todas las estaciones y seguir manteniendo los buenos resultados.
- Los parámetros de entrada del método DReWP más adecuados son los siguientes: wavelet madre del tipo Daubechies 10 (db10) o Daubechies 12 (db12); función de entropía Shannon, coeficientes por encima de un umbral (thr_0.2), energía por debajo de un umbral (dne_0.8); máximo nivel de descomposición entre 5 y 6; y función de filtrado tipo 'hard thresholding' o 'soft thresholding'.
- Los parámetros de medida que se obtienen para las señales sintéticas reflejan un coeficiente de correlación entre la señal obtenida y la señal deseada por encima del 0.98. También reflejan un coeficiente de autocorrelación entre los pulsos de llegada de la señal obtenida y la deseada superior al 0.90. En cuanto a la SNR,

ésta es superior en muchos casos a 50. Por último, la diferencia de energía entre la señal deconvolucionada y la señal deseada varía en torno a un 9%.

- En el caso de sismogramas reales, el método DReWP proporciona una señal deconvolucionada de elevada SNR, que permite identificar claramente la llegada del primer pulso.

- Por el contrario, la aplicación del método WLC sobre sismogramas reales proporciona en muchos casos señales con una peor SNR.

c) Estimación del ángulo azimut en sismogramas locales:

- Existen diferentes métodos para determinar el azimut a través de una única estación de tres componentes. Estos métodos realizan tanto la detección como la estimación del azimut basándose en las propiedades de polarización de la primera llegada. Proporcionan buenos resultados cuando se aplica sobre sismogramas regionales. Sin embargo, éstos fallan cuando se utilizan sobre sismogramas locales.

- En el caso de sismogramas locales todas las fases de llegada están muy comprimidas en el dominio del tiempo. Por esta razón, la estimación del comienzo y duración del primer pulso resulta mucho más crítica que cuando se trabaja con sismogramas regionales. Si el pulso seleccionado presenta cualquier pequeña distorsión, entonces el ángulo de azimut obtenido puede ser cualquiera.

- Para sismogramas locales resulta más apropiado realizar la detección y la estimación del azimut bajo diferentes criterios:

- Como algoritmo de detección se realiza un filtrado previo mediante wavelet packets, y se calcula la primera llegada por control de amplitudes en el dominio de las wavelets.

- El algoritmo de estimación se basa en las propiedades de polarización del primer pulso. En este caso la matriz de covarianza se aplica sobre una ventana de 50 muestras centrada en el punto donde se haya marcado el 'pick'.

- El procedimiento propuesto realiza una estimación del ángulo azimut con un error medio de 13° . Este error es del mismo orden que el obtenido por otros métodos para el caso de sismogramas regionales.

7.3 Líneas de trabajo futuro.

Como futuras líneas de trabajo figuran las siguientes:

- Dentro del marco teórico de la transformada discreta de wavelet packets se está estudiando como mejorar computacionalmente el método de filtrado, integrando en un único paso el proceso de selección de la mejor base y el proceso de filtrado. Para ello también se buscan otros métodos alternativos de selección de la base óptima, que estén apoyados en los criterios de selección de la base ‘más satisfactoria’ y no necesariamente de la ‘mejor base’.

- En cuanto al método de selección de la mejor base también se ha comenzado a estudiar como varía ésta en función de ciertos parámetros característicos de los sismogramas locales registrados, comprobando la gran dependencia que la SNR tiene en la base seleccionada. Si se consigue obtener una buena relación entre los parámetros de entrada seleccionados y la mejor base obtenida entonces se pueden introducir como datos de entrenamiento de una red neuronal. Esto permitirá obtener de manera casi inmediata la mejor base asociada a una señal dada a partir de sólo unos ciertos parámetros de entrada.

- Otro campo de futura investigación es la aplicación de nuevos métodos de simulación de sismogramas locales con el fin de que, además de servir como señales de validación para diferentes algoritmos de procesado de la señal, sirvan para realizar estudios más precisos sobre la estructura de la corteza en el marco geográfico que engloba la red local.

- Otra vía de posible estudio se centra en la determinación del ángulo de azimut. Por un lado verificar con muchos más eventos el buen funcionamiento del algoritmo presentado, lo cual en la actualidad todavía no es posible debido a la reciente operatividad de las estaciones de tres componentes en esta red. Por otro lado, llevar a cabo futuros refinamientos del algoritmo mostrado con el fin de eliminar lo máximo posible su incertidumbre y cometer errores aún más pequeños.

- Por último, otro camino de trabajo es la extrapolación del método de deconvolución propuesto a diferentes tipos de señales y diferentes tipos de sistemas, que no sean necesariamente pertenecientes al campo de la sismología.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

REFERENCIAS

- Abma, R. (1995). Least squares separation of signal and noise using multidimensional filters, *Ph.D. Thesis*, Stanford University.
- Abramovich, F., T. Sapatinas, and B.W. Silverman (1998). Wavelet thresholding via Bayesian approach, *Journal of the Royal Statistical Society*, **60**, 725-749.
- Aki, K. and P. Richards (1980). *Quantitative Seismology - Theory and Methods*, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Alfaro, P. (1995). Neotectónica en la Cuenca del Bajo Segura (Sector Oriental de la Cordillera Bética), *Tesis doctoral*, Universidad de Alicante.
- Allen, J., and L. Rabiner (1977). A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis, *Proceedings of the IEEE* **65**, 1558-1564.

- Anant, K. and F. Dowla (1997). Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, 1598-1612.
- Auger, F., P. Flandrin, P. Gonçalvès, and O. Lemoine (1996). *Time-frequency toolbox for use with Matlab. Tutorial*, Centre National de la Recherche Scientifique (France) and Rice University (USA).
- Banda, E., Ansorge, J., Boloix, M., y Córdoba, D. (1980). Structure of the crust and upper mantle beneath the balearic islands (western mediterranean). *Earth and planetary Science Letters*, **49**, 219-230.
- Banda, E., y Ansorge, J. (1980). Crustal structure under the central and eastern part of the Betic Cordillera, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **63**, 512-532.
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*, Princenton University Press.
- Brune, J. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **75-26**, 4997-5009.
- Brune, J. (1971). Correction to Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **76-20**, 5002.
- Carreño, E. (1994). Modelización de fases sísmicas regionales, *Tesis Doctoral*, Universidad Complutense de Madrid (in Spanish).
- Castaño Fernández, S., y Carbó Gorosabel, A. (1995). Modelización de la corteza terrestre en la zona de confluencia de las cordilleras Ibérica y Béticas en base a datos gravimétricos, *Geogaceta*, **17**, 60-63.
- Chipman, H., E. Kolaczyk, and R. McCulloch (1997). Adaptive Bayesian wavelet shrinkage, *Journal of the American Statistical Association*, **92**, 1413-1421.

- Choi, H. and R.G. Baraniuk. (1998). Analysis of wavelet domain Wiener filters, *Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-frequency and Time-scale Analysis*.
- Claerbout, J. (1976). *Fundamentals of geophysical data processing*, Blackwell Scientific Publishers.
- Coifman, R. and M. Wickerhauser, (1992). Entropy-based algorithms for best basis selection, *IEEE Transactions on Information Theory*, **38(2)**, 713-718.
- Correig, A. (1996). On the measurement of the predominant and resonant frequencies, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86-2**, 416-427.
- Crouse, M., R. Nowak and R.G. Baraniuk (1998). Wavelet-Based Statistical Signal Processing Using Hidden Markov Models, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **46-4**, 886-902.
- Daubechies, I. (1988). Orthonormal bases of compactly supported wavelets, *Communications on Pure and Applied Mathematics.*, **XLI**, 909-986.
- Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets* SIAM, Philadelphia.
- De Burgos, J. (1983). *Curso de algebra y geometría*, Ed. Alhambra.
- Donoho, D. (1995a). De-noising by soft-thresholding, *IEEE Trans. Inform. Theory*, **41**, 613-627.
- Donoho, D. (1995b). Nonlinear solution of linear inverse problems by wavelet-vaguellete decomposition, *App. Comp. Harmonic Anal.*, **2**, 101-126.
- Donoho, D. and Iain M. Johnstone (1994). Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage, *Biometrika*, **81**, 425-455.

- Donoho, D. and Iain M. Johnstone (1995). Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage, *Journal of the American Statistical Association*, **90**, 1200-1224.
- Douglas, A. (1997). Bandpass filtering to reduce noise on seismograms: Is there a better way?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87 (4)**, 770-777.
- Dziewonski, A., D. Anderson (1981). Preliminary reference earth model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297-356.
- Earle, P.S. and P.M. Shearer (1994). Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 366-376.
- Esteban, D. and Galand, C., (1977). Application of quadrature mirror filters to split band voice coding systems, *Proceedings of IEEE ICASSP-77*, 191-195.
- Fowler, M. (1990). *The solid earth. An introduction to global geophysics*, Cambridge University Press.
- Gabor, D. (1946). Theory of communication, *Journal IEE* **93**, 429-441.
- Gao, H.Y. (1998). Wavelet shrinkage denoising using the non-negative garrote, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, **7(4)**, 469-488.
- Gao, H.Y., and A.G. Bruce (1995). WaveShrink with semisoft shrinkage, *Technical Report*, **39**, StatSci Division of Mathsoft, Inc.
- Gao, H.Y., and A.G. Bruce (1997). WaveShrink with firm shrinkage, *Statistica Sinica*, **7**, 855-874.
- Ghael, S.P., A.M. Sayeed and R.G. Baraniuk. (1997). Improved wavelet denoising via empirical Wiener filtering, *Proceedings SPIE*, San Diego.

- Goupillaud, P., A. Grossmann, and J. Morlet, (1984). Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis, *Geoexploration*, **23**, 85-102.
- Grossmann, A. and J. Morlet, (1984). Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, *SIAM Journal of Math Analysis*, **15**, 723-736.
- Jarpe, S. and F. Dowla (1991). Performance of high-frequency three-component stations for azimuth estimation from regional seismic phases, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**, 987-999.
- Jáuregui, P. (1997). Estudio de la operatividad de redes sísmicas locales aplicado a la optimización de los recursos de la Red Sísmica Local de la Universidad de Alicante, *Tesis Doctoral*, Universidad de Alicante.
- Jáuregui, P. Y Pina, J. (1995). Prospección geofísica en zonas determinadas del campus de San Vicente. pp 1-10.
- Johnstone, I. and B. W. Silverman (1997). Wavelet threshold estimators for data with correlated noise, *J. Roy. Statist. Soc. B.*, **59**, 319-351.
- Lana, X., O. Caselles, J.A. Canas, J. Badal, L. Pujades, M.D. Martínez (1999). Anelastic structure of the Iberian Peninsula obtained from an automated regionalization algorithm and stochastic inversion, *Tectonophysics*, **304**, 219-239.
- Lay, T. and T. Wallace (1995). *Modern Global Seismology*, Academic Press.
- Lee and Valdes (1989). Hypo71PC, Toolbox for seismic data acquisition, processing and analysis, *IASPEI*, 203-236

- Liu, H., D. Anderson, H. Kanamori (1976). Velocity dispersion due to anelasticity; implications for seismology and mantle composition. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **47**, 41-58.
- Magotra, N., N. Ahmed, and E. Chael (1989). Single-station seismic event detection and location, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **27**, 15-23.
- Mallat, S. (1989). Multiresolution approximation and wavelets, *Trans. Of American Math. Soc.*, **315**, 69-88.
- Meissner, R. (1986) *The continental crust. A geophysical approach*. Academic Press.
- Meyer, Y. (1990). *Ondelettes et opérateurs* Hermann, Paris.
- Neelamani, R. (1999): Wavelet-Based deconvolution for ill-conditioned systems, *Thesis*, Rice University.
- Pedersen, F. (1997). Joint time-frequency analysis in digital signal processing, *Ph.D. Thesis*, Aalborg University, Denmark.
- Polikar, R. (1998). *The wavelet tutorial*, Rowan University, USA.
- Robinson, E. and C. Çoruh (1988). *Basic exploration geophysics*, John Wiley & Sons.
- Romberg, J.K., H. Choi and R.G. Baraniuk (1999). Shift-invariant denoising using wavelet-domain hidden Markov trees, *Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, **2**, 1277-1281.
- Rosa, J. (1997) Diseño de una red de ordenadores aplicada al control de procesos remotos, *Tesis Doctoral*, Universidad de Alicante.
- Scherbaum, F. (1996). *Of Poles and Zeros. Fundamentals of Digital Seismology*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

- Scherbaum, F. (1996). *Of Poles and Zeros. Fundamentals of Digital Seismology*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Sheng, Y. (1996). *The transforms and applications handbook*, CRC Press, USA.
- Sheriff, R. and L. Geldart (1991). *Exploración sísmológica. Volumen I: Historia, teoría y obtención de datos*, Editorial Limusa.
- Simon, H.A. (1957). *Models of Man: Mathematical Essays on Rational Behavior in a Social Setting*, New York, John Wiley & Sons.
- Steeghs, P. (1997). Local Power Spectra and Seismic Interpretation, *Ph.D. Thesis*, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Taswell, C. (1994a). Near-best basis selection algorithms with non-additive information cost functions, *Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, (M.G. Amin, ed.), (Philadelphia, PA), 13-16, IEEE Press 94TH8007.
- Taswell, C. (1994b). Top-down and bottom-up tree search algorithms for selecting bases in wavelet packet transforms, in *Wavelets and Statistics (Proceedings of the Villard de Lans Conference)*, *Lecture Notes in Statistics*, **103**, 345-359, (A. Antoniadis and G. Oppenheim, eds), Springer Verlag (1995).
- Taswell, C. (1996). Satisficing search algorithms for selecting near-best bases in adaptive tree-structured wavelet transform, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **44**, 713-718.
- Tikhonov, A. N. and V. Y. Arsenin (1977). *Solutions of ill-posed problems*, V.H. Winston & Sons, Washington.

Vetterli, M. and C. Herley, (1992). Wavelets and filter banks: theory and design, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **40**, 2207-2232.

Vetterli, M. and J. Kovacevic (1995). *Wavelets and Subband Coding*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Wickerhauser, M. V. (1994). *Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software*, A.K. Peters, Ltd., Wellesley.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ABREVIATURAS

A/D:	Analógico-digital.
BUTS:	'Botton-Up Tree Search'.
CRE:	Código de la estación digital situada en Crevillente.
CREV:	Código de la estación analógica situada en Crevillente.
DReWP:	Deconvolución Regularizada basada en Wavelet Packets.
DWPT:	Transformada Discreta de Wavelet Packet.
DWT:	Transformada Discreta de Wavelet.
FIR:	Filtro de respuesta impulso finita.
GPS:	'Greenwich mean time'.

HMM:	Modelos ocultos de Markov.
HOS:	Estadística de alto orden.
IASPEI:	'International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior'.
IIR:	Filtro de respuesta impulso infinita.
LAN:	Red de área local.
LTI:	'Linear Time Invariant'.
MAIG:	Código de la estación analógica situada en la sierra del Maigmo.
MRA:	Análisis de multiresolución.
MSE:	Error cuadrático medio.
PCMCIA:	'Personal Computer Memory Card International Association'.
PUJA:	Código de la estación analógica situada en Pujálvarez.
QF:	Filtro de cuadratura.
QMF:	Filtros especulares.
ROM:	Código de la estación digital situada en la sierra del Reclot.
SIR:	Sistema informático remoto.
STFT:	Transformada de Fourier dependiente del tiempo.
SURE:	'Stein's unbiased risk estimator'.
TDTS:	'Top-Down Tree Search'.
TNC:	Controlador de modo terminal.
TPD:	Teoría de programación dinámica.

UHF:	'Ultra High Frequency'.
UNIP:	Código de la estación analógica situada en la Universidad de Alicante.
URSPA:	Unidad de Registro Sísmico de la Provincia de Alicante.
UTC:	'Coordinated universal time'.
VHF:	'Very High Frequency'.
w.-SVD:	'Windowed singular value decomposition'.
WLC:	Deconvolución con corrección de filtro de nivel.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Apéndice A

Sismogramas sintéticos: Datos.

En este apéndice se muestran los datos de la simulación correspondientes a los dos sismogramas sintéticos de ejemplo , $s_1(n)$ y $s_2(n)$.

En estos datos se encuentra información detallada acerca de cada uno de los rayos que han contribuido a la representación final. Esta información indica para cada tramo recto y para cada interfase de la trayectoria el porcentaje de flujo de energía final, el ángulo de incidencia, el espacio recorrido, el tiempo empleado, y la posición x - z final.



Universitat d'Alacant
 Universidad de Alicante

Sismograma sintético $s_1(n)$.

EV1523S

Parámetros de entrada

Propiedades de las capas

	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Profundidad	9.0000	18.0000	40.0000
Densidad	2.5000	2.6000	3.0000
Velocidad de la onda P	5.6000	6.7000	8.1000
Velocidad de la onda S	3.2332	3.8682	4.6765
Atenuación de la onda P	34.0000	40.0000	170.0000
Atenuación de la onda S	17.0000	20.0000	85.0000

Características del pulso fuente

Duración	5.2063
Offset	0.0000
Amplitud de la onda P	0.0003
Frecuencia media de la onda P	11.8780
Factor de amortiguamiento de la onda P	50.4200
Amplitud de la onda S	0.0000
Frecuencia media de la onda S	7.0480
Factor de amortiguamiento de la onda S	25.2100

Características de las ondas Rayleigh

Velocidad de fase	2.9726
Velocidad de grupo	1.6979
Frecuencia media	6.0000
Dispersión en frecuencia	3.0000
Factor de atenuación	100.0000

Otros parámetros

Posición X de la fuente	0.0000
Posición Z de la fuente	7.0000
Posición X del sensor	13.0000
Posición Z del sensor	0.0050
Frecuencia de muestreo	100.8400

Resultados obtenidos en la simulación

Trayectoria : P directo
 Clave : Rayo P 1

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente	100.00	0.000	61.716	0.000	0.000000	-7.000000
Traza 0 - 1	6.57	2.636	61.716	14.762	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 P
 Clave : Rayo P 2

Sismogramas sintéticos. Datos

```

-----
Energía      Tiempo  Angulo  Espacio  Posición X  Posición Y
Fuente       :      100.00  0.000  49.776   0.000   0.000000   -7.000000
Trazo 0 - 1  :      32.09  0.553  49.776   3.097   2.364711   -9.000000
Interface 1/2 :       0.77  0.553  49.776   0.000   2.364711   -9.000000
Trazo 1 - 2  :       0.14  3.040  49.776  13.929  13.000000  -0.005000
-----

```

.....

Trayectoria : P ref 1/2 SV
Clave : Rayo P 3

```

-----
Energía      Tiempo  Angulo  Espacio  Posición X  Posición Y
Fuente       :      100.00  0.000  74.043   0.000   0.000000   -7.000000
Trazo 0 - 1  :      13.62  1.300  74.048   7.277   6.997046   -9.000000
Interface 1/2 :       0.58  1.300  33.719   0.000   6.997046   -9.000000
Trazo 1 - 2  :       0.05  4.644  33.718  10.814  13.000000  -0.005000
-----

```

.....

Trayectoria : P hwp 1/2 SV
Clave : Rayo P 5

```

-----
Energía      Tiempo  Angulo  Espacio  Posición X  Posición Y
Fuente       :      100.00  0.000  56.701   0.000   0.000000   -7.000000
Trazo 0 - 1  :      27.33  0.651  56.701   3.643   3.044873   -9.000000
Interface 1/2 :       0.24  0.651  89.943   0.000   3.044873   -9.000000
Trazo 1 - 2  :       0.03  1.397  90.000   4.999   8.044152   -9.000000
Interface 2/1 :       0.00  1.397  28.853   0.000   8.044152   -9.000000
Trazo 2 - 3  :       0.00  4.573  28.853  10.270  13.000000  -0.005000
-----

```

.....

Trayectoria : P tra 1/2 P ref 2/3 P tra 1/2 P
Clave : Rayo P 6

```

-----
Energía      Tiempo  Angulo  Espacio  Posición X  Posición Y
Fuente       :      100.00  0.000  21.339   0.000   0.000000   -7.000000
Trazo 0 - 1  :      46.37  0.383  21.339   2.147   0.781346   -9.000000
Interface 1/2 :      45.65  0.383  25.809   0.000   0.781346   -9.000000
Trazo 1 - 2  :       7.96  1.876  25.809   9.997   5.133800  -18.000000
Interface 2/3 :       0.12  1.876  25.809   0.000   5.133800  -18.000000
Trazo 2 - 3  :       0.06  3.368  25.809   9.997   9.486254   -9.000000
Interface 2/1 :       0.06  3.368  21.339   0.000   9.486254   -9.000000
Trazo 3 - 4  :       0.04  5.092  21.337   9.997  13.000000  -0.005000
-----

```

.....

Trayectoria : P tra 1/2 P ref 2/3 P tra 1/2 SV
Clave : Rayo P 7

```

-----
Energía      Tiempo  Angulo  Espacio  Posición X  Posición Y
Fuente       :      100.00  0.000  23.861   0.000   0.000000   -7.000000
Trazo 0 - 1  :      45.61  0.391  23.861   2.187   0.884649   -9.000000
Interface 1/2 :      44.86  0.391  28.946   0.000   0.884649   -9.000000
Trazo 1 - 2  :       7.80  1.926  28.946  10.285   5.862249  -18.000000
Interface 2/3 :       0.10  1.926  28.946   0.000   5.862249  -18.000000
Trazo 2 - 3  :       0.06  3.461  28.946  10.285  10.839849   -9.000000
Interface 2/1 :       0.00  3.461  13.506   0.000  10.839849   -9.000000
Trazo 3 - 4  :       0.00  6.322  13.504  10.285  13.000000  -0.005000
-----

```

.....

Trayectoria : P tra 1/2 P ref 2/3 SV tra 1/2 P

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Clave : Rayo P 8

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	24.757	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	45.20	0.393	24.757	2.202	0.922294	-9.000000
Interface 1/2 :	44.44	0.393	30.068	0.000	0.922294	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	7.65	1.945	30.068	10.399	6.132630	-18.000000
Interface 2/3 :	0.09	1.945	16.814	0.000	6.132630	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.05	4.376	16.814	10.399	8.852288	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	4.376	24.757	0.000	8.852288	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.145	24.755	10.399	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P tra 1/2 P ref 2/3 SV tra 1/2 SV
Clave : Rayo P 9

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	28.384	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	43.87	0.406	28.384	2.273	1.080680	-9.000000
Interface 1/2 :	43.06	0.406	34.664	0.000	1.080680	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	7.34	2.039	34.664	10.942	7.304148	-18.000000
Interface 2/3 :	0.10	2.039	19.170	0.000	7.304148	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.05	4.502	19.170	10.942	10.433007	-9.000000
Interface 2/1 :	0.05	4.502	15.930	0.000	10.433007	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.03	7.396	15.928	10.942	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P tra 1/2 SV ref 2/3 P tra 1/2 P
Clave : Rayo P 10

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	24.756	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	45.20	0.393	24.756	2.202	0.922247	-9.000000
Interface 1/2 :	0.26	0.393	16.813	0.000	0.922247	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.05	2.824	16.813	9.402	3.641780	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	2.824	30.066	0.000	3.641780	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	4.376	30.066	9.402	8.851823	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	4.376	24.756	0.000	8.851823	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.145	24.757	9.402	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P tra 1/2 SV ref 2/3 P tra 1/2 SV
Clave : Rayo P 11

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	28.383	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	43.87	0.406	28.383	2.273	1.080618	-9.000000
Interface 1/2 :	0.34	0.406	19.169	0.000	1.080618	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	2.869	19.169	9.528	4.209323	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	2.869	34.662	0.000	4.209323	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	4.502	34.662	9.528	10.432385	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	4.502	15.929	0.000	10.432385	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.396	15.931	9.528	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P tra 1/2 SV ref 2/3 SV tra 1/2 P
Clave : Rayo P 12

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	30.057	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	43.07	0.413	30.057	2.311	1.157345	-9.000000

Sismogramas sintéticos. Datos

Interface 1/2 :	0.37	0.413	20.241	0.000	1.157345	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.07	2.892	20.241	9.592	4.476038	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	2.892	20.241	0.000	4.476038	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	5.372	20.241	9.592	7.794731	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	5.372	30.057	0.000	7.794731	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.228	30.057	9.592	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P tra 1/2 SV ref 2/3 SV tra 1/2 SV
 Clave : Rayo P 13

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	36.819	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	39.91	0.446	36.819	2.498	1.497216	-9.000000
Interface 1/2 :	0.53	0.446	24.454	0.000	1.497216	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.10	3.002	24.454	9.887	5.590025	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	3.002	24.454	0.000	5.590025	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	5.558	24.454	9.887	9.682835	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	5.558	20.243	0.000	9.682835	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.523	20.243	9.887	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s P
 Clave : Rayo P 22

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	61.682	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	6.58	2.635	61.682	14.757	12.990721	0.000000
Superficie :	0.00	2.635	61.682	0.000	12.990721	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	2.637	61.682	0.011	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s SV
 Clave : Rayo P 23

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	61.694	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	6.66	2.636	61.694	14.762	12.997049	0.000000
Superficie :	6.65	2.636	30.552	0.000	12.997049	0.000000
Trazo 1 - 2 :	6.65	2.638	30.552	0.006	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s P
 Clave : Rayo P 24

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	49.751	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	32.10	0.553	49.751	3.095	2.362562	-9.000000
Interface 1/2 :	0.76	0.553	49.751	0.000	2.362562	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.13	3.040	49.751	13.929	12.994094	0.000000
Superficie :	0.00	3.040	49.751	0.000	12.994094	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	3.042	49.751	0.008	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s SV
 Clave : Rayo P 25

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	49.758	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	32.18	0.553	49.758	3.096	2.363190	-9.000000

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Interface 1/2 :	0.77	0.553	49.758	0.000	2.363190	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.14	3.041	49.758	13.932	12.997545	0.000000
Superficie :	0.13	3.041	26.149	0.000	12.997545	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.13	3.042	26.149	0.006	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s P
Clave : Rayo P 26

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	74.007	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	13.57	1.296	74.007	7.259	6.977829	-9.000000
Interface 1/2 :	0.58	1.296	33.711	0.000	6.977829	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.22	4.643	33.711	10.819	12.982559	0.000000
Superficie :	0.21	4.643	74.007	0.000	12.982559	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.21	4.646	74.003	0.018	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s SV
Clave : Rayo P 27

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	74.035	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	13.63	1.298	74.035	7.271	6.990723	-9.000000
Interface 1/2 :	0.58	1.298	33.716	0.000	6.990723	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.22	4.645	33.716	10.820	12.996667	0.000000
Superficie :	0.00	4.645	33.716	0.000	12.996667	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	4.647	33.684	0.006	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref s P ref 1/2 P
Clave : Rayo P 28

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.479	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.47	1.409	27.479	7.890	3.640728	0.000000
Superficie :	5.77	1.409	27.479	0.000	3.640728	0.000000
Trazo 1 - 2 :	2.47	3.220	27.479	10.145	8.321664	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	3.220	27.479	0.000	8.321664	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.031	27.479	10.139	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref s P ref 1/2 SV
Clave : Rayo P 29

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	32.233	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	11.97	1.478	32.233	8.275	4.413774	0.000000
Superficie :	3.98	1.478	32.233	0.000	4.413774	0.000000
Trazo 1 - 2 :	1.72	3.378	32.233	10.640	10.088626	-9.000000
Interface 1/2 :	0.01	3.378	17.935	0.000	10.088626	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	6.302	17.935	9.454	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 P
Clave : Rayo P 30

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	32.236	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	11.88	1.478	32.236	8.276	4.414321	0.000000
Superficie :	7.93	1.478	17.937	0.000	4.414321	0.000000
Trazo 1 - 2 :	3.46	4.404	17.937	9.460	7.327600	-9.000000

Apéndice A
Sismogramas sintéticos. Datos

Interface 1/2 : 0.02 4.404 32.236 0.000 7.327600 -9.000000
 Trazo 2 - 3 : 0.01 6.303 32.236 10.634 13.000000 -0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo P 31

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	39.828	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	10.85	1.628	39.828	9.115	5.838035	0.000000
Superficie :	9.10	1.628	21.702	0.000	5.838035	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.24	4.624	21.702	9.687	9.420014	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	4.624	21.702	0.000	9.420014	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	7.618	21.702	9.681	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV directo
 Clave : Rayo SV 1

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	61.716	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	6.36	4.566	61.716	14.762	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 2

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.478	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	43.64	0.697	27.478	2.254	1.040176	-9.000000
Interface 1/2 :	0.01	0.697	53.053	0.000	1.040176	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.370	53.053	14.965	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 3

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	49.776	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	31.87	0.958	49.776	3.097	2.364711	-9.000000
Interface 1/2 :	1.97	0.958	49.776	0.000	2.364711	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.21	5.266	49.776	13.929	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV hwp 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 5

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	28.853	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	43.37	0.706	28.853	2.283	1.101912	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	0.706	89.943	0.000	1.101912	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	1.742	90.000	6.942	8.044152	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	1.742	28.853	0.000	8.044152	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	4.919	28.853	10.270	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV tra 1/2 P ref 2/3 P tra 1/2 P

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Clave : Rayo SV 6

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	12.409	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	48.11	0.633	12.409	2.048	0.440073	-9.000000
Interface 1/2 :	0.22	0.633	26.444	0.000	0.440073	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	2.134	26.444	10.052	4.916337	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	2.134	26.444	0.000	4.916337	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	3.634	26.444	10.052	9.392600	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	3.634	21.852	0.000	9.392600	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	5.365	21.853	10.052	13.000000	-0.005000

Trayectoria : SV tra 1/2 P ref 2/3 P tra 1/2 SV
Clave : Rayo SV 7

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	13.855	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	48.12	0.637	13.855	2.060	0.493269	-9.000000
Interface 1/2 :	0.28	0.637	29.751	0.000	0.493269	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.05	2.184	29.751	10.366	5.637304	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	2.184	29.751	0.000	5.637304	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	3.732	29.751	10.366	10.781339	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	3.732	13.855	0.000	10.781339	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.597	13.856	10.366	13.000000	-0.005000

Trayectoria : SV tra 1/2 P ref 2/3 SV tra 1/2 P
Clave : Rayo SV 8

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	14.378	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	47.71	0.639	14.378	2.065	0.512700	-9.000000
Interface 1/2 :	0.30	0.639	30.970	0.000	0.512700	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.05	2.205	30.970	10.496	5.914022	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	2.205	17.283	0.000	5.914022	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	4.642	17.283	10.496	8.714345	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	4.642	25.474	0.000	8.714345	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.421	25.475	10.496	13.000000	-0.005000

Trayectoria : SV tra 1/2 P ref 2/3 SV tra 1/2 SV
Clave : Rayo SV 9

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	16.440	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	47.53	0.645	16.440	2.085	0.590151	-9.000000
Interface 1/2 :	0.41	0.645	35.907	0.000	0.590151	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	2.303	35.907	11.112	7.106858	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	2.303	19.792	0.000	7.106858	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	4.776	19.792	11.112	10.345604	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	4.776	16.440	0.000	10.345604	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.677	16.441	11.112	13.000000	-0.005000

Trayectoria : SV tra 1/2 SV ref 2/3 P tra 1/2 P
Clave : Rayo SV 10

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	14.378	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	47.71	0.639	14.378	2.065	0.512709	-9.000000

Sismogramas sintéticos. Datos

Interface 1/2 :	47.01	0.639	17.284	0.000	0.512709	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	8.05	3.075	17.284	9.426	3.313081	-18.000000
Interface 2/3 :	0.10	3.075	30.971	0.000	3.313081	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.05	4.642	30.971	9.426	8.714523	-9.000000
Interface 2/1 :	0.05	4.642	25.475	0.000	8.714523	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.04	6.421	25.474	9.426	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV tra 1/2 SV ref 2/3 P tra 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 11

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	16.440	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	47.53	0.645	16.440	2.085	0.590160	-9.000000
Interface 1/2 :	46.78	0.645	19.792	0.000	0.590160	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	8.14	3.118	19.792	9.565	3.828955	-18.000000
Interface 2/3 :	0.11	3.118	35.908	0.000	3.828955	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.06	4.776	35.908	9.565	10.345795	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	4.776	16.440	0.000	10.345795	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.677	16.440	9.565	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV tra 1/2 SV ref 2/3 SV tra 1/2 P
 Clave : Rayo SV 12

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	17.434	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	46.98	0.648	17.434	2.096	0.628068	-9.000000
Interface 1/2 :	46.21	0.648	21.006	0.000	0.628068	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	7.86	3.141	21.006	9.641	4.083855	-18.000000
Interface 2/3 :	0.01	3.141	21.006	0.000	4.083855	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.633	21.006	9.641	7.539643	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	5.633	31.261	0.000	7.539643	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.512	31.260	9.641	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV tra 1/2 SV ref 2/3 SV tra 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 13

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	21.339	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	46.15	0.664	21.339	2.147	0.781346	-9.000000
Interface 1/2 :	45.20	0.664	25.809	0.000	0.781346	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	7.76	3.249	25.809	9.997	5.133800	-18.000000
Interface 2/3 :	0.01	3.249	25.809	0.000	5.133800	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.833	25.809	9.997	9.486254	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	5.833	21.339	0.000	9.486254	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.820	21.337	9.997	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s SV
 Clave : Rayo SV 23

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	61.682	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	6.37	4.564	61.682	14.757	12.990721	0.000000
Superficie :	4.33	4.564	61.682	0.000	12.990721	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.33	4.567	61.682	0.011	13.000000	-0.005000

.....

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref_s P
 Clave : Rayo SV 24

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.466	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	43.65	0.697	27.466	2.254	1.039630	-9.000000
Interface 1/2 :	0.01	0.697	53.022	0.000	1.039630	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.369	53.022	14.962	12.992421	0.000000
Superficie :	0.00	3.369	53.022	0.000	12.992421	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	3.371	56.587	0.009	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s SV
 Clave : Rayo SV 25

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.470	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	43.94	0.697	27.470	2.254	1.039785	-9.000000
Interface 1/2 :	0.01	0.697	53.031	0.000	1.039785	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.370	53.031	14.965	12.996462	0.000000
Superficie :	0.00	3.370	27.470	0.000	12.996462	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	3.371	35.287	0.006	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s SV
 Clave : Rayo SV 27

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	49.751	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	31.88	0.957	49.751	3.095	2.362562	-9.000000
Interface 1/2 :	1.97	0.957	49.751	0.000	2.362562	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.34	5.266	49.751	13.929	12.994094	0.000000
Superficie :	0.34	5.266	49.751	0.000	12.994094	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.34	5.268	49.751	0.008	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 28

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	17.306	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.94	2.268	17.306	7.332	2.181092	0.000000
Superficie :	8.22	2.268	31.014	0.000	2.181092	0.000000
Trazo 1 - 2 :	3.31	4.143	31.014	10.501	7.591840	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	4.143	31.014	0.000	7.591840	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	6.017	31.016	10.496	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 29

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	20.684	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.95	2.314	20.684	7.482	2.642866	0.000000
Superficie :	10.32	2.314	37.719	0.000	2.642866	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.04	4.346	37.719	11.378	9.603601	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	4.346	20.684	0.000	9.603601	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	7.320	20.686	9.615	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 P

Sismogramas sintéticos. Datos

Clave : Rayo SV 30

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	20.687	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.66	2.314	20.687	7.482	2.643198	0.000000
Superficie :	2.57	2.314	20.687	0.000	2.643198	0.000000
Trazo 1 - 2 :	1.05	5.290	20.687	9.620	6.041595	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.290	37.724	0.000	6.041595	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	7.321	37.725	11.372	13.000000	-0.005000

Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 SV
Clave : Rayo SV 31

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.479	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.26	2.440	27.479	7.890	3.640728	0.000000
Superficie :	0.16	2.440	27.479	0.000	3.640728	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.07	5.578	27.479	10.145	8.321664	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.578	27.479	0.000	8.321664	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	8.714	27.479	10.139	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 P ref s P ref 1/2 P
Clave : Rayo P 32

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	24.149	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	45.42	0.391	24.149	2.192	0.896706	-9.000000
Interface 1/2 :	0.31	0.391	24.149	0.000	0.896706	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	2.153	24.149	9.863	4.931885	0.000000
Superficie :	0.03	2.153	24.149	0.000	4.931885	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.02	3.914	24.149	9.863	8.967063	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	3.914	24.149	0.000	8.967063	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	5.674	24.149	9.858	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 P ref s P ref 1/2 SV
Clave : Rayo P 33

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.688	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	44.16	0.403	27.688	2.259	1.049506	-9.000000
Interface 1/2 :	0.27	0.403	27.688	0.000	1.049506	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.05	2.218	27.688	10.164	5.772284	0.000000
Superficie :	0.02	2.218	27.688	0.000	5.772284	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	4.033	27.688	10.164	10.495062	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	4.033	15.562	0.000	10.495062	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.921	15.562	9.337	13.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 P ref s SV ref 1/2 P
Clave : Rayo P 34

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.691	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	44.07	0.403	27.691	2.259	1.049609	-9.000000
Interface 1/2 :	0.27	0.403	27.691	0.000	1.049609	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.05	2.218	27.691	10.164	5.772848	0.000000
Superficie :	0.03	2.218	15.563	0.000	5.772848	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.108	15.563	9.343	8.279386	-9.000000

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Interface 1/2 : 0.00 5.108 27.691 0.000 8.279386 -9.000000
 Trazo 3 - 4 : 0.00 6.922 27.691 10.158 13.000000 -0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo P 35

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	32.768	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	41.92	0.425	32.768	2.378	1.287341	-9.000000
Interface 1/2 :	0.22	0.425	32.768	0.000	1.287341	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	2.336	32.768	10.703	7.080378	0.000000
Superficie :	0.03	2.336	18.209	0.000	7.080378	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.266	18.209	9.474	10.041013	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.266	18.209	0.000	10.041013	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.195	18.209	9.469	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo P 36

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.691	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	44.07	0.403	27.691	2.259	1.049609	-9.000000
Interface 1/2 :	0.21	0.403	15.563	0.000	1.049609	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	3.293	15.563	9.343	3.556147	0.000000
Superficie :	0.02	3.293	27.691	0.000	3.556147	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.108	27.691	10.164	8.279386	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.108	27.691	0.000	8.279386	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.922	27.691	10.158	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s P ref 1/2 SV
 Clave : Rayo P 37

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	32.768	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	41.92	0.425	32.768	2.378	1.287341	-9.000000
Interface 1/2 :	0.21	0.425	18.209	0.000	1.287341	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	3.355	18.209	9.474	4.247977	0.000000
Superficie :	0.03	3.355	32.768	0.000	4.247977	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.266	32.768	10.703	10.041013	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.266	18.209	0.000	10.041013	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.195	18.209	9.469	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s SV ref 1/2 P
 Clave : Rayo P 38

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	32.772	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	41.84	0.425	32.772	2.379	1.287514	-9.000000
Interface 1/2 :	0.21	0.425	18.211	0.000	1.287514	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	3.355	18.211	9.475	4.248461	0.000000
Superficie :	0.01	3.355	18.211	0.000	4.248461	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	6.286	18.211	9.475	7.209408	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	6.286	32.772	0.000	7.209408	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.196	32.772	10.698	13.000000	-0.005000

.....

Sismogramas sintéticos. Datos

 Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo P 39

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	41.665	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	37.23	0.478	41.665	2.677	1.779756	-9.000000
Interface 1/2 :	0.13	0.478	22.570	0.000	1.779756	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.03	3.493	22.570	9.746	5.520532	0.000000
Superficie :	0.00	3.493	22.570	0.000	5.520532	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.507	22.570	9.746	9.261308	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	6.507	22.570	0.000	9.261308	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.520	22.570	9.741	13.000000	-0.005000

::

 Trayectoria : P ref s P ref 1/2 P ref s P
 Clave : Rayo P 40

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.470	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.47	1.409	27.470	7.890	3.639272	0.000000
Superficie :	5.77	1.409	27.470	0.000	3.639272	0.000000
Trazo 1 - 2 :	2.47	3.220	27.470	10.144	8.318336	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	3.220	27.470	0.000	8.318336	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	5.032	27.470	10.144	12.997400	0.000000
Superficie :	0.00	5.032	27.470	0.000	12.997400	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	5.033	27.470	0.006	13.000000	-0.005000

::

 Trayectoria : P ref s P ref 1/2 P ref s SV
 Clave : Rayo P 41

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.472	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.56	1.409	27.472	7.890	3.639613	0.000000
Superficie :	5.81	1.409	27.472	0.000	3.639613	0.000000
Trazo 1 - 2 :	2.51	3.220	27.472	10.144	8.319116	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	3.220	27.472	0.000	8.319116	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	5.032	27.472	10.144	12.998618	0.000000
Superficie :	0.01	5.032	15.447	0.000	12.998618	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.01	5.033	15.447	0.005	13.000000	-0.005000

::

 Trayectoria : P ref s P ref 1/2 SV ref s P
 Clave : Rayo P 42

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	32.223	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	11.88	1.478	32.223	8.274	4.412075	0.000000
Superficie :	3.96	1.478	32.223	0.000	4.412075	0.000000
Trazo 1 - 2 :	1.69	3.377	32.223	10.639	10.084743	-9.000000
Interface 1/2 :	0.01	3.377	17.930	0.000	10.084743	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	6.303	17.930	9.459	12.996850	0.000000
Superficie :	0.00	6.303	32.223	0.000	12.996850	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.304	32.211	0.006	13.000000	-0.005000

::

 Trayectoria : P ref s P ref 1/2 SV ref s SV
 Clave : Rayo P 43

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
--	---------	--------	--------	---------	------------	------------

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Fuente	:	100.00	0.000	32.226	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1	:	11.97	1.478	32.226	8.275	4.412621	0.000000
Superficie	:	3.98	1.478	32.226	0.000	4.412621	0.000000
Trazo 1 - 2	:	1.72	3.377	32.226	10.639	10.085991	-9.000000
Interface 1/2	:	0.01	3.377	17.932	0.000	10.085991	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.01	6.303	17.932	9.459	12.998383	0.000000
Superficie	:	0.00	6.303	17.932	0.000	12.998383	0.000000
Trazo 3 - 4	:	0.00	6.305	17.916	0.005	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 P ref s P
 Clave : Rayo P 44

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y	
Fuente	:	100.00	0.000	32.223	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1	:	11.88	1.478	32.223	8.274	4.412075	0.000000
Superficie	:	7.93	1.478	17.930	0.000	4.412075	0.000000
Trazo 1 - 2	:	3.46	4.403	17.930	9.459	7.324182	-9.000000
Interface 1/2	:	0.02	4.403	32.223	0.000	7.324182	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.01	6.303	32.223	10.639	12.996850	0.000000
Superficie	:	0.00	6.303	32.223	0.000	12.996850	0.000000
Trazo 3 - 4	:	0.00	6.304	32.211	0.006	13.000000	-0.005000

.....

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y	
Fuente	:	100.00	0.000	32.226	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1	:	11.97	1.478	32.226	8.275	4.412621	0.000000
Superficie	:	7.98	1.478	17.932	0.000	4.412621	0.000000
Trazo 1 - 2	:	3.58	4.403	17.932	9.459	7.325013	-9.000000
Interface 1/2	:	0.02	4.403	32.226	0.000	7.325013	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.01	6.303	32.226	10.639	12.998383	0.000000
Superficie	:	0.01	6.303	17.932	0.000	12.998383	0.000000
Trazo 3 - 4	:	0.01	6.305	17.916	0.005	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 SV ref s P
 Clave : Rayo P 46

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y	
Fuente	:	100.00	0.000	39.812	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1	:	10.77	1.627	39.812	9.113	5.834686	0.000000
Superficie	:	9.03	1.627	21.695	0.000	5.834686	0.000000
Trazo 1 - 2	:	4.08	4.623	21.695	9.686	9.415261	-9.000000
Interface 1/2	:	0.00	4.623	21.695	0.000	9.415261	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.00	7.619	21.695	9.686	12.995836	0.000000
Superficie	:	0.00	7.619	39.812	0.000	12.995836	0.000000
Trazo 3 - 4	:	0.00	7.620	39.786	0.007	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 SV ref s SV
 Clave : Rayo P 47

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y	
Fuente	:	100.00	0.000	39.818	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1	:	10.85	1.627	39.818	9.114	5.835871	0.000000
Superficie	:	9.10	1.627	21.697	0.000	5.835871	0.000000
Trazo 1 - 2	:	4.23	4.623	21.697	9.686	9.416942	-9.000000
Interface 1/2	:	0.00	4.623	21.697	0.000	9.416942	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.00	7.619	21.697	9.686	12.998014	0.000000
Superficie	:	0.00	7.619	21.697	0.000	12.998014	0.000000
Trazo 3 - 4	:	0.00	7.621	21.659	0.005	13.000000	-0.005000

Sismogramas sintéticos. Datos

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 32

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	14.039	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	47.79	0.638	14.039	2.062	0.500112	-9.000000
Interface 1/2 :	0.21	0.638	24.845	0.000	0.500112	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.03	2.409	24.845	9.918	4.667369	0.000000
Superficie :	0.02	2.409	24.845	0.000	4.667369	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	4.180	24.845	9.918	8.834627	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	4.180	24.845	0.000	8.834627	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	5.950	24.848	9.913	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s P ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 33

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	16.068	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	47.62	0.644	16.068	2.081	0.576066	-9.000000
Interface 1/2 :	0.23	0.644	28.646	0.000	0.576066	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	2.475	28.646	10.255	5.492423	0.000000
Superficie :	0.02	2.475	28.646	0.000	5.492423	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	4.306	28.646	10.255	10.408779	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	4.306	16.068	0.000	10.408779	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.202	16.070	9.361	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s SV ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 34

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	16.069	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	47.33	0.644	16.069	2.081	0.576116	-9.000000
Interface 1/2 :	0.23	0.644	28.649	0.000	0.576116	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	2.475	28.649	10.256	5.492981	0.000000
Superficie :	0.02	2.475	16.069	0.000	5.492981	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.372	16.069	9.366	8.085504	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.372	28.649	0.000	8.085504	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.202	28.650	10.250	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 35

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	18.964	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	46.86	0.654	18.964	2.115	0.687251	-9.000000
Interface 1/2 :	0.23	0.654	34.255	0.000	0.687251	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	2.599	34.255	10.889	6.816205	0.000000
Superficie :	0.03	2.599	18.964	0.000	6.816205	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.542	18.964	9.517	9.908834	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.542	18.964	0.000	9.908834	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.484	18.965	9.511	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 36

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      16.069      0.000      0.000000      -7.000000
Interface 1/2 :      47.33      0.644      16.069      2.081      0.576116      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.12      0.644      16.069      0.000      0.576116      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.02      3.541      16.069      9.366      3.168638      0.000000
Superficie  :      0.01      3.541      28.649      0.000      3.168638      0.000000
Trazo 2 - 3 :      0.01      5.372      28.649      10.256      8.085504      -9.000000
Interface 1/2 :      0.00      5.372      28.649      0.000      8.085504      -9.000000
Trazo 3 - 4 :      0.00      7.202      28.650      10.250      13.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s P ref 1/2 SV
Clave       : Rayo SV 37
    
```

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      18.964      0.000      0.000000      -7.000000
Trazo 0 - 1 :      46.86      0.654      18.964      2.115      0.687251      -9.000000
Interface 1/2 :      0.04      0.654      18.964      0.000      0.687251      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.01      3.598      18.964      9.517      3.779880      0.000000
Superficie  :      0.00      3.598      34.255      0.000      3.779880      0.000000
Trazo 2 - 3 :      0.00      5.542      34.255      10.889      9.908834      -9.000000
Interface 1/2 :      0.00      5.542      18.964      0.000      9.908834      -9.000000
Trazo 3 - 4 :      0.00      8.484      18.965      9.511      13.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s SV ref 1/2 P
Clave       : Rayo SV 38
    
```

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      18.966      0.000      0.000000      -7.000000
Trazo 0 - 1 :      46.57      0.654      18.966      2.115      0.687329      -9.000000
Interface 1/2 :      0.04      0.654      18.966      0.000      0.687329      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.01      3.598      18.966      9.517      3.780308      0.000000
Superficie  :      0.00      3.598      18.966      0.000      3.780308      0.000000
Trazo 2 - 3 :      0.00      6.541      18.966      9.517      6.873288      -9.000000
Interface 1/2 :      0.00      6.541      34.259      0.000      6.873288      -9.000000
Trazo 3 - 4 :      0.00      8.484      34.260      10.883      13.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s SV ref 1/2 SV
Clave       : Rayo SV 39
    
```

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      24.149      0.000      0.000000      -7.000000
Trazo 0 - 1 :      45.20      0.678      24.149      2.192      0.896706      -9.000000
Interface 1/2 :      0.02      0.678      24.149      0.000      0.896706      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.00      3.729      24.149      9.863      4.931885      0.000000
Superficie  :      0.00      3.729      24.149      0.000      4.931885      0.000000
Trazo 2 - 3 :      0.00      6.779      24.149      9.863      8.967063      -9.000000
Interface 1/2 :      0.00      6.779      24.149      0.000      8.967063      -9.000000
Trazo 3 - 4 :      0.00      9.828      24.149      9.858      13.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 P ref s P
Clave       : Rayo SV 40
    
```

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      17.300      0.000      0.000000      -7.000000
Trazo 0 - 1 :      12.94      2.268      17.300      7.332      2.180252      0.000000
Superficie  :      8.21      2.268      31.002      0.000      2.180252      0.000000
    
```

Sismogramas sintéticos. Datos

Trazo 1 - 2 :	3.31	4.143	31.002	10.500	7.588415	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	4.143	31.002	0.000	7.588415	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	6.018	31.002	10.500	12.996577	0.000000
Superficie :	0.00	6.018	31.002	0.000	12.996577	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.019	34.394	0.006	13.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 P ref s SV
Clave : Rayo SV 41

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	17.301	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	13.22	2.268	17.301	7.332	2.180454	0.000000
Superficie :	8.39	2.268	31.005	0.000	2.180454	0.000000
Trazo 1 - 2 :	3.41	4.143	31.005	10.500	7.589239	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	4.143	31.005	0.000	7.589239	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	6.018	31.005	10.500	12.998024	0.000000
Superficie :	0.01	6.018	17.301	0.000	12.998024	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.01	6.019	21.561	0.005	13.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 SV ref s P
Clave : Rayo SV 42

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	20.677	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.66	2.314	20.677	7.482	2.641903	0.000000
Superficie :	10.09	2.314	37.705	0.000	2.641903	0.000000
Trazo 1 - 2 :	3.91	4.345	37.705	11.376	9.599087	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	4.345	20.677	0.000	9.599087	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	7.321	20.677	9.620	12.995819	0.000000
Superficie :	0.01	7.321	37.705	0.000	12.995819	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.01	7.322	39.902	0.007	13.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 SV ref s SV
Clave : Rayo SV 43

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	20.680	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.95	2.314	20.680	7.482	2.642234	0.000000
Superficie :	10.31	2.314	37.710	0.000	2.642234	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.04	4.346	37.710	11.376	9.600639	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	4.346	20.680	0.000	9.600639	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	7.321	20.680	9.620	12.997797	0.000000
Superficie :	0.00	7.321	20.680	0.000	12.997797	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.323	23.779	0.005	13.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 P ref s P
Clave : Rayo SV 44

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	20.677	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.66	2.314	20.677	7.482	2.641903	0.000000
Superficie :	2.58	2.314	20.677	0.000	2.641903	0.000000
Trazo 1 - 2 :	1.05	5.289	20.677	9.620	6.038634	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.289	37.705	0.000	6.038634	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	7.321	37.705	11.376	12.995819	0.000000
Superficie :	0.00	7.321	37.705	0.000	12.995819	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.322	39.902	0.007	13.000000	-0.005000

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

.....

 Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 P ref s SV
 Clave : Rayo SV 45

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	20.680	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	12.95	2.314	20.680	7.482	2.642234	0.000000
Superficie :	2.63	2.314	20.680	0.000	2.642234	0.000000
Trazo 1 - 2 :	1.11	5.290	20.680	9.620	6.039392	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.290	37.710	0.000	6.039392	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	7.321	37.710	11.376	12.997797	0.000000
Superficie :	0.00	7.321	20.680	0.000	12.997797	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.323	23.779	0.005	13.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 SV ref s P
 Clave : Rayo SV 46

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	27.462	0.000	0.000000	-7.000000
Trazo 0 - 1 :	11.97	2.440	27.462	7.889	3.638141	0.000000
Superficie :	0.16	2.440	27.462	0.000	3.638141	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	5.577	27.462	10.143	8.315751	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.577	27.462	0.000	8.315751	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	8.714	27.462	10.143	12.993361	0.000000
Superficie :	0.00	8.714	53.012	0.000	12.993361	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.716	53.015	0.008	13.000000	-0.005000

.....

Sismograma sintético $s_2(n)$.

EV1545S

.....
Parámetros de entrada
.....

Propiedades de las capas

	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Profundidad	9.0000	18.0000	40.0000
Densidad	2.5000	2.6000	3.0000
Velocidad de la onda P	5.6000	6.7000	8.1000
Velocidad de la onda S	3.2332	3.8682	4.6765
Atenuación de la onda P	22.0000	27.0000	170.0000
Atenuación de la onda S	13.0000	16.0000	85.0000

Características del pulso fuente

Duración	: 5.2063
Offset	: 0.0000
Amplitud de la onda P	: 0.0003
Frecuencia media de la onda P	: 13.9481
Factor de amortiguamiento de la onda P	: 50.4200
Amplitud de la onda S	: 0.0000
Frecuencia media de la onda S	: 10.6952
Factor de amortiguamiento de la onda S	: 33.6133

Características de las ondas Rayleigh

Velocidad de fase	: 2.9726
Velocidad de grupo	: 1.6979
Frecuencia media	: 6.0000
Dispersión en frecuencia	: 3.0000
Factor de atenuación	: 100.0000

Otros parámetros

Posición X de la fuente	: 0.0000
Posición Z de la fuente	: 1.0000
Posición X del sensor	: 21.0000
Posición Z del sensor	: 0.0050
Frecuencia de muestreo	: 100.8400

.....
Resultados obtenidos en la simulación
.....

Trayectoria : P directo
Clave : Rayo P 1

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente	100.00	0.000	87.287	0.000	0.000000	-1.000000
Traza 0 - 1	4.38	3.754	87.287	21.024	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 P
Clave : Rayo P 2

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      51.017      0.000      0.000000      -1.000000
Interface 1/2 :      7.48      2.271      51.017      12.717      9.885260      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.25      2.271      51.017      0.000      9.885260      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.11      4.824      51.017      14.299      21.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : P ref 1/2 SV
Clave      : Rayo P 3
    
```

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      62.866      0.000      0.000000      -1.000000
Interface 1/2 :      5.40      3.133      62.869      17.543      15.612785      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.28      3.133      30.919      0.000      15.612785      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.00      6.376      30.918      10.485      21.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : P hwp 1/2 SV
Clave      : Rayo P 5
    
```

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      56.701      0.000      0.000000      -1.000000
Interface 1/2 :      6.56      2.602      56.701      14.572      12.179490      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.06      2.602      89.943      0.000      12.179490      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      0.03      3.179      90.000      3.865      16.044152      -9.000000
Interface 2/1 :      0.00      3.179      28.853      0.000      16.044152      -9.000000
Trazo 2 - 3 :      0.00      6.355      28.853      10.270      21.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : P tra 1/2 P ref 2/3 P tra 1/2 P
Clave      : Rayo P 6
    
```

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      27.734      0.000      0.000000      -1.000000
Interface 1/2 :      10.68      1.614      27.734      9.038      4.206153      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      10.48      1.614      33.833      0.000      4.206153      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      4.63      3.231      33.833      10.835      10.238714      -18.000000
Interface 2/3 :      0.05      3.231      33.833      0.000      10.238714      -18.000000
Trazo 2 - 3 :      0.03      4.848      33.833      10.835      16.271275      -9.000000
Interface 2/1 :      0.03      4.848      27.734      0.000      16.271275      -9.000000
Trazo 3 - 4 :      0.02      6.663      27.731      10.835      21.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : P tra 1/2 P ref 2/3 P tra 1/2 SV
Clave      : Rayo P 7
    
```

```

-----
Fuente      :      Energía      Tiempo      Angulo      Espacio      Posición X      Posición Y
Trazo 0 - 1 :      100.00      0.000      30.255      0.000      0.000000      -1.000000
Interface 1/2 :      10.49      1.654      30.255      9.261      4.666350      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      10.29      1.654      37.072      0.000      4.666350      -9.000000
Trazo 1 - 2 :      4.53      3.337      37.072      11.280      11.466033      -18.000000
Interface 2/3 :      0.05      3.337      37.072      0.000      11.466033      -18.000000
Trazo 2 - 3 :      0.03      5.021      37.072      11.280      18.265716      -9.000000
Interface 2/1 :      0.00      5.021      16.912      0.000      18.265716      -9.000000
Trazo 3 - 4 :      0.00      7.929      16.908      11.280      21.000000      -0.005000
    
```

.....

```

-----
Trayectoria : P tra 1/2 P ref 2/3 SV tra 1/2 P
    
```

Sismogramas sintéticos. Datos

Clave : Rayo P 8

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	31.377	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.29	1.673	31.377	9.370	4.878835	-9.000000
Interface 1/2 :	10.08	1.673	38.531	0.000	4.878835	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	4.39	3.390	38.531	11.505	12.045802	-18.000000
Interface 2/3 :	0.06	3.390	21.079	0.000	12.045802	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.03	5.884	21.079	11.505	15.514838	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	5.884	31.377	0.000	15.514838	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.765	31.375	11.505	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : P tra 1/2 P ref 2/3 SV tra 1/2 SV

Clave : Rayo P 9

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	34.836	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.95	1.740	34.836	9.747	5.567606	-9.000000
Interface 1/2 :	9.74	1.740	43.113	0.000	5.567606	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	4.19	3.581	43.113	12.329	13.993396	-18.000000
Interface 2/3 :	0.04	3.581	23.240	0.000	13.993396	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.03	6.113	23.240	12.329	17.858219	-9.000000
Interface 2/1 :	0.03	6.113	19.257	0.000	17.858219	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.02	9.060	19.253	12.329	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : P tra 1/2 SV ref 2/3 P tra 1/2 P

Clave : Rayo P 10

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	31.376	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.29	1.673	31.376	9.370	4.878595	-9.000000
Interface 1/2 :	0.10	1.673	21.078	0.000	4.878595	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	4.167	21.078	9.645	8.347489	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	4.167	38.530	0.000	8.347489	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	5.884	38.530	9.645	15.514036	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	5.884	31.376	0.000	15.514036	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.765	31.379	9.645	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : P tra 1/2 SV ref 2/3 P tra 1/2 SV

Clave : Rayo P 11

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	34.835	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.95	1.740	34.835	9.747	5.567305	-9.000000
Interface 1/2 :	0.12	1.740	23.239	0.000	5.567305	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	4.273	23.239	9.795	9.431961	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	4.273	43.111	0.000	9.431961	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.113	43.111	9.795	17.857174	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	6.113	19.256	0.000	17.857174	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.060	19.259	9.795	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : P tra 1/2 SV ref 2/3 SV tra 1/2 P

Clave : Rayo P 12

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	36.951	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.60	1.788	36.951	10.011	6.017679	-9.000000

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Interface 1/2 :	0.13	1.788	24.534	0.000	6.017679	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	4.345	24.534	9.893	10.125694	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	4.345	24.534	0.000	10.125694	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.903	24.534	9.893	14.233708	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	6.903	36.951	0.000	14.233708	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.913	36.952	9.893	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P tra 1/2 SV ref 2/3 SV tra 1/2 SV
 Clave : Rayo P 13

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	43.127	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	8.82	1.957	43.127	10.961	7.493362	-9.000000
Interface 1/2 :	0.17	1.957	28.178	0.000	7.493362	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.08	4.597	28.178	10.210	12.314712	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	4.597	28.178	0.000	12.314712	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	7.236	28.178	10.210	17.136061	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	7.236	23.246	0.000	17.136061	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	10.264	23.247	10.210	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s P
 Clave : Rayo P 22

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	87.260	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	4.40	3.736	87.260	20.919	20.895522	0.000000
Superficie :	1.47	3.736	87.260	0.000	20.895522	0.000000
Trazo 1 - 2 :	1.46	3.754	87.260	0.105	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s SV
 Clave : Rayo P 23

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	87.273	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	4.46	3.754	87.273	21.020	20.996470	0.000000
Superficie :	2.96	3.754	35.219	0.000	20.996470	0.000000
Trazo 1 - 2 :	2.96	3.756	35.219	0.006	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s P
 Clave : Rayo P 24

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	51.001	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	7.48	2.270	51.001	12.712	9.879447	-9.000000
Interface 1/2 :	0.25	2.270	51.001	0.000	9.879447	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.11	4.824	51.001	14.301	20.993825	0.000000
Superficie :	0.00	4.824	51.001	0.000	20.993825	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	4.825	51.001	0.008	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s SV
 Clave : Rayo P 25

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	51.006	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	7.56	2.270	51.006	12.714	9.881171	-9.000000

Sismogramas sintéticos. Datos

Interface 1/2 :	0.25	2.270	51.006	0.000	9.881171	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.11	4.824	51.006	14.303	20.997489	0.000000
Superficie :	0.11	4.824	26.662	0.000	20.997489	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.11	4.826	26.662	0.006	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s P
Clave : Rayo P 26

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	62.852	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	5.32	3.131	62.852	17.533	15.600987	-9.000000
Interface 1/2 :	0.27	3.131	30.913	0.000	15.600987	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.15	6.375	30.913	10.490	20.990253	0.000000
Superficie :	0.15	6.375	62.852	0.000	20.990253	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.15	6.377	62.844	0.011	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s SV
Clave : Rayo P 27

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	62.861	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	5.40	3.132	62.861	17.538	15.607143	-9.000000
Interface 1/2 :	0.28	3.132	30.916	0.000	15.607143	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.16	6.376	30.916	10.491	20.997009	0.000000
Superficie :	0.00	6.376	30.916	0.000	20.997009	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.378	30.888	0.006	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref s P ref 1/2 P
Clave : Rayo P 28

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	47.870	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	66.69	0.266	47.870	1.491	1.105554	0.000000
Superficie :	3.22	0.266	47.870	0.000	1.105554	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.31	2.662	47.870	13.416	11.055541	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	2.662	47.870	0.000	11.055541	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	5.056	47.870	13.409	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref s P ref 1/2 SV
Clave : Rayo P 29

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	57.922	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	52.80	0.336	57.922	1.883	1.595470	0.000000
Superficie :	0.05	0.336	57.922	0.000	1.595470	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.362	57.922	16.947	15.954699	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	3.362	29.288	0.000	15.954699	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.552	29.288	10.313	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 P
Clave : Rayo P 30

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	57.929	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	52.70	0.336	57.929	1.883	1.595933	0.000000
Superficie :	52.66	0.336	29.291	0.000	1.595933	0.000000
Trazo 1 - 2 :	7.20	3.528	29.291	10.319	6.644585	-9.000000

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Interface 1/2 : 0.15 3.528 57.929 0.000 6.644585 -9.000000
 Trazo 2 - 3 : 0.06 6.553 57.929 16.941 21.000000 -0.005000

.....

Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo P 31

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	83.218	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	11.50	1.512	83.218	8.468	8.408489	0.000000
Superficie :	10.89	1.512	34.981	0.000	8.408489	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.28	4.910	34.981	10.984	14.705998	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	4.910	34.981	0.000	14.705998	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.03	8.305	34.981	10.978	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV directo
 Clave : Rayo SV 1

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	87.287	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	3.91	6.502	87.287	21.024	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 2

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	30.370	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.67	2.868	30.370	9.272	4.687886	-9.000000
Interface 1/2 :	0.47	2.868	61.126	0.000	4.687886	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	6.194	61.126	18.628	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 3

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	51.017	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	6.98	3.933	51.017	12.717	9.885260	-9.000000
Interface 1/2 :	0.44	3.933	51.017	0.000	9.885260	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.10	8.356	51.017	14.299	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV hwp 1/2 P
 Clave : Rayo SV 4

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	28.853	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.83	2.825	28.853	9.134	4.407647	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	2.825	89.943	0.000	4.407647	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.258	90.000	2.898	7.305686	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	3.258	56.701	0.000	7.305686	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.183	56.701	16.384	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : SV hwp 1/2 SV

Sismogramas sintéticos. Datos

Clave : Rayo SV 5

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	28.853	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.05	2.825	28.853	9.134	4.407647	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	2.825	89.943	0.000	4.407647	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	4.562	90.000	11.637	16.044152	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	4.562	28.853	0.000	16.044152	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	7.738	28.853	10.270	21.000000	-0.005000

Trayectoria : SV tra 1/2 P ref 2/3 P tra 1/2 P
Clave : Rayo SV 6

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	16.754	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.85	2.584	16.754	8.355	2.408371	-9.000000
Interface 1/2 :	0.10	2.584	36.682	0.000	2.408371	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.04	4.259	36.682	11.222	9.112281	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	4.259	36.682	0.000	9.112281	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	5.934	36.682	11.222	15.816192	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	5.934	29.953	0.000	15.816192	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	7.788	29.955	11.222	21.000000	-0.005000

Trayectoria : SV tra 1/2 P ref 2/3 P tra 1/2 SV
Clave : Rayo SV 7

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	18.274	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.97	2.606	18.274	8.425	2.641752	-9.000000
Interface 1/2 :	0.12	2.606	40.526	0.000	2.641752	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.05	4.373	40.526	11.840	10.335541	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	4.373	40.526	0.000	10.335541	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.140	40.526	11.840	18.029330	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	6.140	18.274	0.000	18.029330	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.070	18.276	11.840	21.000000	-0.005000

Trayectoria : SV tra 1/2 P ref 2/3 SV tra 1/2 P
Clave : Rayo SV 8

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	19.044	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.69	2.618	19.044	8.463	2.761460	-9.000000
Interface 1/2 :	0.13	2.618	42.545	0.000	2.761460	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.05	4.441	42.545	12.216	11.021335	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	4.441	22.978	0.000	11.021335	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.968	22.978	12.216	14.837597	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	6.968	34.413	0.000	14.837597	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.915	34.415	12.216	21.000000	-0.005000

Trayectoria : SV tra 1/2 P ref 2/3 SV tra 1/2 SV
Clave : Rayo SV 9

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	21.140	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.76	2.653	21.140	8.577	3.093346	-9.000000
Interface 1/2 :	0.17	2.653	48.362	0.000	3.093346	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	4.675	48.362	13.546	13.216796	-18.000000

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Interface 2/3 :	0.00	4.675	25.562	0.000	13.216796	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	7.254	25.562	13.546	17.521540	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	7.254	21.140	0.000	17.521540	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	10.237	21.142	13.546	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV tra 1/2 SV ref 2/3 P tra 1/2 P
 Clave : Rayo SV 10

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	19.044	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.69	2.618	19.044	8.463	2.761504	-9.000000
Interface 1/2 :	10.50	2.618	22.979	0.000	2.761504	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	4.52	5.145	22.979	9.776	6.577828	-18.000000
Interface 2/3 :	0.05	5.145	42.545	0.000	6.577828	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.03	6.968	42.545	9.776	14.837916	-9.000000
Interface 2/1 :	0.03	6.968	34.413	0.000	14.837916	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.02	8.915	34.413	9.776	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV tra 1/2 SV ref 2/3 P tra 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 11

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	21.140	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.76	2.653	21.140	8.577	3.093386	-9.000000
Interface 1/2 :	10.54	2.653	25.562	0.000	3.093386	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	4.58	5.232	25.562	9.977	7.398188	-18.000000
Interface 2/3 :	0.03	5.232	48.363	0.000	7.398188	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.02	7.254	48.363	9.977	17.521891	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	7.254	21.140	0.000	17.521891	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	10.237	21.140	9.977	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV tra 1/2 SV ref 2/3 SV tra 1/2 P
 Clave : Rayo SV 12

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	22.858	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.40	2.685	22.858	8.682	3.372402	-9.000000
Interface 1/2 :	10.16	2.685	27.694	0.000	3.372402	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	4.32	5.313	27.694	10.164	8.096293	-18.000000
Interface 2/3 :	0.03	5.313	27.694	0.000	8.096293	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.02	7.941	27.694	10.164	12.820185	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	7.941	42.284	0.000	12.820185	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	10.112	42.283	10.164	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV tra 1/2 SV ref 2/3 SV tra 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 13

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Trazo 0 - 1 :	10.17	2.796	27.734	9.038	4.206153	-9.000000
Interface 1/2 :	9.77	2.796	33.833	0.000	4.206153	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	4.16	5.596	33.833	10.835	10.238714	-18.000000
Interface 2/3 :	0.06	5.596	33.833	0.000	10.238714	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.04	8.397	33.833	10.835	16.271275	-9.000000
Interface 2/1 :	0.04	8.397	27.734	0.000	16.271275	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.03	11.541	27.731	10.835	21.000000	-0.005000

.....

Apéndice A
Sismogramas sintéticos. Datos

Trayectoria : SV tra 1/2 SV hwp 2/3 SV tra 1/2 SV
Clave : Rayo SV 21

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	23.525	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.56	2.699	23.525	8.725	3.482719	-9.000000
Interface 1/2 :	10.31	2.699	28.526	0.000	3.482719	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	4.45	5.347	28.526	10.244	8.374660	-18.000000
Interface 2/3 :	0.00	5.347	89.943	0.000	8.374660	-18.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	5.818	90.000	3.818	12.192177	-18.000000
Interface 3/2 :	0.00	5.818	28.526	0.000	12.192177	-18.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.466	28.526	10.244	17.084118	-9.000000
Interface 2/1 :	0.00	8.466	23.525	0.000	17.084118	-9.000000
Trazo 4 - 5 :	0.00	11.501	23.525	9.810	21.000000	-0.005000

::

Trayectoria : SV ref s SV
Clave : Rayo SV 23

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	87.260	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	3.94	6.470	87.260	20.919	20.895522	0.000000
Superficie :	3.57	6.470	87.260	0.000	20.895522	0.000000
Trazo 1 - 2 :	3.55	6.503	87.260	0.105	21.000000	-0.005000

::

Trayectoria : SV ref 1/2 P ref_s P
Clave : Rayo SV 24

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	30.361	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.67	2.868	30.361	9.272	4.686227	-9.000000
Interface 1/2 :	0.47	2.868	61.099	0.000	4.686227	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.15	6.193	61.099	18.622	20.988959	0.000000
Superficie :	0.00	6.193	61.099	0.000	20.988959	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.195	65.636	0.012	21.000000	-0.005000

::

Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s SV
Clave : Rayo SV 25

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	30.364	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.89	2.868	30.364	9.272	4.686734	-9.000000
Interface 1/2 :	0.48	2.868	61.107	0.000	4.686734	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.15	6.194	61.107	18.627	20.995086	0.000000
Superficie :	0.15	6.194	30.364	0.000	20.995086	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.13	6.196	44.501	0.007	21.000000	-0.005000

::

Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s SV
Clave : Rayo SV 27

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	51.001	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	6.99	3.932	51.001	12.712	9.879447	-9.000000
Interface 1/2 :	0.44	3.932	51.001	0.000	9.879447	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.18	8.355	51.001	14.301	20.993825	0.000000
Superficie :	0.18	8.355	51.001	0.000	20.993825	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.18	8.358	51.001	0.008	21.000000	-0.005000

::

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

 Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 28

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	25.725	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	88.91	0.343	25.725	1.110	0.481804	0.000000
Superficie :	85.33	0.343	48.747	0.000	0.481804	0.000000
Trazo 1 - 2 :	6.08	2.781	48.747	13.649	10.743082	-9.000000
Interface 1/2 :	0.11	2.781	48.747	0.000	10.743082	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.06	5.217	48.750	13.642	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 29

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	29.826	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	85.82	0.357	29.826	1.153	0.573312	0.000000
Superficie :	85.82	0.357	59.482	0.000	0.573312	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.96	3.521	59.482	17.723	15.841375	-9.000000
Interface 1/2 :	0.04	3.521	29.826	0.000	15.841375	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.03	6.729	29.834	10.369	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 30

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	29.829	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	85.57	0.357	29.829	1.153	0.573376	0.000000
Superficie :	0.00	0.357	29.829	0.000	0.573376	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.565	29.829	10.374	5.733762	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	3.565	59.490	0.000	5.733762	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.729	59.493	17.719	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 31

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	47.870	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	66.15	0.461	47.870	1.491	1.105554	0.000000
Superficie :	66.09	0.461	47.870	0.000	1.105554	0.000000
Trazo 1 - 2 :	5.83	4.611	47.870	13.416	11.055541	-9.000000
Interface 1/2 :	0.25	4.611	47.870	0.000	11.055541	-9.000000
Trazo 2 - 3 :	0.12	8.758	47.870	13.409	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo P 32

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	30.967	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.33	1.666	30.967	9.330	4.800686	-9.000000
Interface 1/2 :	0.06	1.666	30.967	0.000	4.800686	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.03	3.540	30.967	10.496	10.201457	0.000000
Superficie :	0.01	3.540	30.967	0.000	10.201457	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	5.415	30.967	10.496	15.602229	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.415	30.967	0.000	15.602229	-9.000000

Sismogramas sintéticos. Datos

Trazo 3 - 4 : 0.00 7.288 30.967 10.490 21.000000 -0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s P ref 1/2 SV
 Clave : Rayo P 33

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	34.524	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.99	1.734	34.524	9.710	5.503156	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	1.734	34.524	0.000	5.503156	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	3.685	34.524	10.924	11.694206	0.000000
Superficie :	0.01	3.685	34.524	0.000	11.694206	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	5.635	34.524	10.924	17.885256	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	5.635	19.100	0.000	17.885256	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.579	19.100	9.519	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s SV ref 1/2 P
 Clave : Rayo P 34

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	34.526	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.91	1.734	34.526	9.710	5.503620	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	1.734	34.526	0.000	5.503620	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	3.685	34.526	10.924	11.695192	0.000000
Superficie :	0.02	3.685	19.101	0.000	11.695192	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	6.631	19.101	9.524	14.811869	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	6.631	34.526	0.000	14.811869	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.580	34.526	10.918	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 P ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo P 35

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	39.323	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.36	1.847	39.323	10.341	6.553332	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	1.847	39.323	0.000	6.553332	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	3.924	39.323	11.634	13.925830	0.000000
Superficie :	0.02	3.924	21.461	0.000	13.925830	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	6.915	21.461	9.670	17.463900	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	6.915	21.461	0.000	17.463900	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.905	21.461	9.665	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo P 36

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	34.526	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.91	1.734	34.526	9.710	5.503620	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	1.734	19.101	0.000	5.503620	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	4.680	19.101	9.524	8.620297	0.000000
Superficie :	0.02	4.680	34.526	0.000	8.620297	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	6.631	34.526	10.924	14.811869	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	6.631	34.526	0.000	14.811869	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.580	34.526	10.918	21.000000	-0.005000

.....

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s P ref 1/2 SV
Clave : Rayo P 37

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	39.323	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.36	1.847	39.323	10.341	6.553332	-9.000000
Interface 1/2 :	0.04	1.847	21.461	0.000	6.553332	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	4.838	21.461	9.670	10.091401	0.000000
Superficie :	0.02	4.838	39.323	0.000	10.091401	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	6.915	39.323	11.634	17.463900	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	6.915	21.461	0.000	17.463900	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.905	21.461	9.665	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s SV ref 1/2 P
Clave : Rayo P 38

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	39.326	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	9.28	1.847	39.326	10.342	6.554074	-9.000000
Interface 1/2 :	0.04	1.847	21.462	0.000	6.554074	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	4.838	21.462	9.671	10.092420	0.000000
Superficie :	0.00	4.838	21.462	0.000	10.092420	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	7.829	21.462	9.671	13.630767	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	7.829	39.326	0.000	13.630767	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.905	39.326	11.628	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref 1/2 SV ref s SV ref 1/2 SV
Clave : Rayo P 39

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	46.720	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	8.26	2.084	46.720	11.669	8.495314	-9.000000
Interface 1/2 :	0.01	2.084	24.855	0.000	8.495314	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	5.152	24.855	9.919	12.664317	0.000000
Superficie :	0.00	5.152	24.855	0.000	12.664317	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	8.219	24.855	9.919	16.833320	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	8.219	24.855	0.000	16.833320	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	11.285	24.855	9.913	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref s P ref 1/2 P ref s P
Clave : Rayo P 40

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	47.855	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	66.71	0.266	47.855	1.490	1.104972	0.000000
Superficie :	3.23	0.266	47.855	0.000	1.104972	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.31	2.661	47.855	13.413	11.049724	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	2.661	47.855	0.000	11.049724	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	5.056	47.855	13.413	20.994475	0.000000
Superficie :	0.00	5.056	47.855	0.000	20.994475	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	5.058	47.855	0.007	21.000000	-0.005000

Trayectoria : P ref s P ref 1/2 P ref s SV
Clave : Rayo P 41

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	47.859	0.000	0.000000	-1.000000

Sismogramas sintéticos. Datos

Trazo 0 - 1 :	66.78	0.266	47.859	1.490	1.105138	0.000000
Superficie :	3.23	0.266	47.859	0.000	1.105138	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.31	2.661	47.859	13.414	11.051385	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	2.661	47.859	0.000	11.051385	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	5.057	47.859	13.414	20.997631	0.000000
Superficie :	0.00	5.057	25.347	0.000	20.997631	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	5.058	25.348	0.006	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : P ref s P ref 1/2 SV ref s P
Clave : Rayo P 42

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	57.906	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	52.74	0.336	57.906	1.882	1.594505	0.000000
Superficie :	0.05	0.336	57.906	0.000	1.594505	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.361	57.906	16.939	15.945054	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	3.361	29.283	0.000	15.945054	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	6.552	29.283	10.319	20.992031	0.000000
Superficie :	0.00	6.552	57.906	0.000	20.992031	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.554	57.896	0.009	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : P ref s P ref 1/2 SV ref s SV
Clave : Rayo P 43

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	57.913	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	52.81	0.336	57.913	1.883	1.594968	0.000000
Superficie :	0.05	0.336	57.913	0.000	1.594968	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.362	57.913	16.943	15.949679	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	3.362	29.285	0.000	15.949679	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	6.553	29.285	10.319	20.997199	0.000000
Superficie :	0.00	6.553	29.285	0.000	20.997199	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.555	29.259	0.006	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 P ref s P
Clave : Rayo P 44

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	57.906	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	52.74	0.336	57.906	1.882	1.594505	0.000000
Superficie :	52.69	0.336	29.283	0.000	1.594505	0.000000
Trazo 1 - 2 :	7.20	3.528	29.283	10.319	6.641482	-9.000000
Interface 1/2 :	0.15	3.528	57.906	0.000	6.641482	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	6.552	57.906	16.939	20.992031	0.000000
Superficie :	0.00	6.552	57.906	0.000	20.992031	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.554	57.896	0.009	21.000000	-0.005000

.....

Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 P ref s SV
Clave : Rayo P 45

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	57.913	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	52.81	0.336	57.913	1.883	1.594968	0.000000
Superficie :	52.76	0.336	29.285	0.000	1.594968	0.000000
Trazo 1 - 2 :	7.39	3.528	29.285	10.319	6.642488	-9.000000
Interface 1/2 :	0.15	3.528	57.913	0.000	6.642488	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.06	6.553	57.913	16.943	20.997199	0.000000

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Superficie : 0.06 6.553 29.285 0.000 20.997199 0.000000
 Trazo 3 - 4 : 0.06 6.555 29.259 0.006 21.000000 -0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 SV ref s P
 Clave : Rayo P 46

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	83.183	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	11.48	1.504	83.183	8.424	8.364546	0.000000
Superficie :	10.89	1.504	34.978	0.000	8.364546	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.16	4.902	34.978	10.984	14.661366	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	4.902	34.978	0.000	14.661366	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.03	8.299	34.978	10.984	20.958186	0.000000
Superficie :	0.03	8.299	83.183	0.000	20.958186	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.03	8.306	83.181	0.042	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : P ref s SV ref 1/2 SV ref s SV
 Clave : Rayo P 47

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	83.212	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	11.51	1.511	83.212	8.461	8.401704	0.000000
Superficie :	10.90	1.511	34.981	0.000	8.401704	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.28	4.908	34.981	10.984	14.699107	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	4.908	34.981	0.000	14.699107	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.03	8.306	34.981	10.984	20.996510	0.000000
Superficie :	0.00	8.306	34.981	0.000	20.996510	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.308	34.914	0.006	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 32

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	18.876	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.71	2.615	18.876	8.455	2.735319	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	2.615	34.081	0.000	2.735319	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	4.555	34.081	10.866	8.824421	0.000000
Superficie :	0.01	4.555	34.081	0.000	8.824421	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.496	34.081	10.866	14.913524	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	6.496	34.081	0.000	14.913524	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	8.435	34.084	10.861	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s P ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 33

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	21.161	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.76	2.653	21.161	8.578	3.096687	-9.000000
Interface 1/2 :	0.05	2.653	38.700	0.000	3.096687	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	4.713	38.700	11.532	10.307088	0.000000
Superficie :	0.00	4.713	38.700	0.000	10.307088	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	6.772	38.700	11.532	17.517490	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	6.772	21.161	0.000	17.517490	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.755	21.164	9.646	21.000000	-0.005000

.....

Sismogramas sintéticos. Datos

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s SV ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 34

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	21.162	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.54	2.653	21.162	8.579	3.096923	-9.000000
Interface 1/2 :	0.04	2.653	38.703	0.000	3.096923	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.02	4.713	38.703	11.533	10.308109	0.000000
Superficie :	0.01	4.713	21.162	0.000	10.308109	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.01	7.698	21.162	9.651	13.792148	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	7.698	38.703	0.000	13.792148	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.756	38.706	11.527	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 P ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 35

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	24.392	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.49	2.717	24.392	8.784	3.627584	-9.000000
Interface 1/2 :	0.02	2.717	45.667	0.000	3.627584	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.01	5.017	45.667	12.879	12.839667	0.000000
Superficie :	0.01	5.017	24.392	0.000	12.839667	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	8.073	24.392	9.882	16.920699	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	8.073	24.392	0.000	16.920699	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	11.128	24.395	9.877	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s P ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 36

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	21.162	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.54	2.653	21.162	8.579	3.096923	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	2.653	21.162	0.000	3.096923	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	5.638	21.162	9.651	6.580962	0.000000
Superficie :	0.00	5.638	38.703	0.000	6.580962	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	7.698	38.703	11.533	13.792148	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	7.698	38.703	0.000	13.792148	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	9.756	38.706	11.527	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s P ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 37

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	24.392	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	10.49	2.717	24.392	8.784	3.627584	-9.000000
Interface 1/2 :	0.01	2.717	24.392	0.000	3.627584	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	5.773	24.392	9.882	7.708616	0.000000
Superficie :	0.00	5.773	45.667	0.000	7.708616	0.000000
Trazo 2 - 3 :	0.00	8.073	45.667	12.879	16.920699	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	8.073	24.392	0.000	16.920699	-9.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	11.128	24.395	9.877	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s SV ref 1/2 P
 Clave : Rayo SV 38

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
--	---------	--------	--------	---------	------------	------------

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

Fuente	:	100.00	0.000	24.394	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1	:	10.27	2.717	24.394	8.784	3.627961	-9.000000
Interface 1/2	:	0.01	2.717	24.394	0.000	3.627961	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.00	5.773	24.394	9.882	7.709417	0.000000
Superficie	:	0.00	5.773	24.394	0.000	7.709417	0.000000
Trazo 2 - 3	:	0.00	8.830	24.394	9.882	11.790873	-9.000000
Interface 1/2	:	0.00	8.830	45.672	0.000	11.790873	-9.000000
Trazo 3 - 4	:	0.00	11.129	45.674	12.873	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref 1/2 SV ref s SV ref 1/2 SV
 Clave : Rayo SV 39

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y	
Fuente	:	100.00	0.000	30.967	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1	:	9.82	2.886	30.967	9.330	4.800686	-9.000000
Interface 1/2	:	0.15	2.886	30.967	0.000	4.800686	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.06	6.132	30.967	10.496	10.201457	0.000000
Superficie	:	0.00	6.132	30.967	0.000	10.201457	0.000000
Trazo 2 - 3	:	0.00	9.378	30.967	10.496	15.602229	-9.000000
Interface 1/2	:	0.00	9.378	30.967	0.000	15.602229	-9.000000
Trazo 3 - 4	:	0.00	12.623	30.967	10.490	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 P ref s P
 Clave : Rayo SV 40

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y	
Fuente	:	100.00	0.000	25.718	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1	:	88.92	0.343	25.718	1.110	0.481663	0.000000
Superficie	:	85.32	0.343	48.731	0.000	0.481663	0.000000
Trazo 1 - 2	:	6.08	2.780	48.731	13.645	10.737313	-9.000000
Interface 1/2	:	0.11	2.780	48.731	0.000	10.737313	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.06	5.216	48.731	13.645	20.992963	0.000000
Superficie	:	0.00	5.216	48.731	0.000	20.992963	0.000000
Trazo 3 - 4	:	0.00	5.218	54.605	0.009	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 P ref s SV
 Clave : Rayo SV 41

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y	
Fuente	:	100.00	0.000	25.720	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1	:	89.16	0.343	25.720	1.110	0.481704	0.000000
Superficie	:	85.55	0.343	48.735	0.000	0.481704	0.000000
Trazo 1 - 2	:	6.17	2.780	48.735	13.646	10.738978	-9.000000
Interface 1/2	:	0.11	2.780	48.735	0.000	10.738978	-9.000000
Trazo 1 - 2	:	0.06	5.217	48.735	13.646	20.996252	0.000000
Superficie	:	0.05	5.217	25.720	0.000	20.996252	0.000000
Trazo 3 - 4	:	0.05	5.219	36.856	0.006	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 SV ref s P
 Clave : Rayo SV 42

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y	
Fuente	:	100.00	0.000	29.821	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1	:	85.58	0.357	29.821	1.153	0.573183	0.000000
Superficie	:	85.58	0.357	59.466	0.000	0.573183	0.000000
Trazo 1 - 2	:	4.88	3.520	59.466	17.715	15.831198	-9.000000
Interface 1/2	:	0.04	3.520	29.821	0.000	15.831198	-9.000000

Sismogramas sintéticos. Datos

Trazo 1 - 2 : 0.02 6.728 29.821 10.374 20.989843 0.000000
 Superficie : 0.02 6.728 59.466 0.000 20.989843 0.000000
 Trazo 3 - 4 : 0.02 6.730 63.790 0.011 21.000000 -0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s P ref 1/2 SV ref s SV
 Clave : Rayo SV 43

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	29.823	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	85.82	0.357	29.823	1.153	0.573247	0.000000
Superficie :	85.82	0.357	59.474	0.000	0.573247	0.000000
Trazo 1 - 2 :	4.96	3.521	59.474	17.719	15.836232	-9.000000
Interface 1/2 :	0.04	3.521	29.823	0.000	15.836232	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.03	6.729	29.823	10.374	20.995453	0.000000
Superficie :	0.00	6.729	29.823	0.000	20.995453	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.731	42.282	0.007	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 P ref s P
 Clave : Rayo SV 44

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	29.821	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	85.58	0.357	29.821	1.153	0.573183	0.000000
Superficie :	0.00	0.357	29.821	0.000	0.573183	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.565	29.821	10.374	5.731828	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	3.565	59.466	0.000	5.731828	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	6.728	59.466	17.715	20.989843	0.000000
Superficie :	0.00	6.728	59.466	0.000	20.989843	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.730	63.790	0.011	21.000000	-0.005000

.....

 Trayectoria : SV ref s SV ref 1/2 P ref s SV
 Clave : Rayo SV 45

	Energía	Tiempo	Angulo	Espacio	Posición X	Posición Y
Fuente :	100.00	0.000	29.823	0.000	0.000000	-1.000000
Trazo 0 - 1 :	85.82	0.357	29.823	1.153	0.573247	0.000000
Superficie :	0.00	0.357	29.823	0.000	0.573247	0.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	3.565	29.823	10.374	5.732468	-9.000000
Interface 1/2 :	0.00	3.565	59.474	0.000	5.732468	-9.000000
Trazo 1 - 2 :	0.00	6.729	59.474	17.719	20.995453	0.000000
Superficie :	0.00	6.729	29.823	0.000	20.995453	0.000000
Trazo 3 - 4 :	0.00	6.731	42.282	0.007	21.000000	-0.005000

.....



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Apéndice B

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas sintéticos de ejemplo.

En este apéndice se muestra, a través de varias tablas, una relación de los parámetros de entrada del método DReWP que proporcionan los mejores resultados, para cada una de las señales sintéticas de ejemplo y para cada una de las estaciones analógicas de la red.

El formato empleado para los parámetros de entrada de estas tablas es el siguiente: el primer elemento hace referencia al tipo de filtrado que se ha realizado; los tres siguientes elementos son la función de entropía, la wavelet madre, y el nivel máximo de descomposición utilizado en la etapa de filtrado; y los tres últimos

elementos hacen referencia a lo mismo que lo anterior, pero referidos a la etapa de deconvolución. En cuanto a los parámetros de medida, éstos representan: el tanto por ciento de energía respecto a la señal inicial (A), la SNR (B), el coeficiente de autocorrelación entre las señales completas (C), y el coeficiente de autocorrelación entre los pulsos de llegada (D).

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;6)	80.3	>50.00	0.97	0.91
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;5)	80.3	>50.00	0.97	0.91
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;6)	80.3	>50.00	0.97	0.91
(ST;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	88.5	>50.00	0.99	0.87
(ST;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	88.5	>50.00	0.99	0.87
(ST;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	88.5	>50.00	0.99	0.87
(ST;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	88.5	>50.00	0.99	0.87
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;5)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;6)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db12;5)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db12;6)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;5)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;6)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;5)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;6)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;6;thr_0.2;db10;5)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;6;thr_0.2;db10;6)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;5;thr_0.2;db10;5)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;thr_0.2;db10;5;thr_0.2;db10;6)	96.5	>50.00	0.98	0.86
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;5)	98.8	>50.00	0.98	0.90
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;6)	98.8	>50.00	0.98	0.90
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;5)	98.8	>50.00	0.98	0.90
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;6)	98.8	>50.00	0.98	0.90
(HT;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;5)	101.0	>50.00	0.97	0.91
(HT;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;6)	101.0	>50.00	0.97	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;5)	101.0	>50.00	0.97	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;6)	101.0	>50.00	0.97	0.91
(HT;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;5)	100.2	>50.00	0.97	0.93
(HT;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;6)	100.2	>50.00	0.97	0.93
(HT;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;5)	100.2	>50.00	0.97	0.93
(HT;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;6)	100.2	>50.00	0.97	0.93

Tabla B.1 *DReWP de la señal $x_{1,1}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;6)	116.5	>50.00	0.98	0.87
(HT;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;5)	116.5	>50.00	0.98	0.87
(HT;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;6)	116.5	>50.00	0.98	0.87
(HT;thr_0.2;db10;6;thr_0.2;db10;5)	116.5	>50.00	0.98	0.87
(HT;thr_0.2;db10;6;thr_0.2;db10;6)	116.5	>50.00	0.98	0.87
(HT;thr_0.2;db10;5;thr_0.2;db10;5)	116.5	>50.00	0.98	0.87
(HT;thr_0.2;db10;5;thr_0.2;db10;6)	116.5	>50.00	0.98	0.87
(ST;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	103.3	>50.00	0.98	0.88
(ST;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	103.3	>50.00	0.98	0.88
(ST;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	103.3	>50.00	0.98	0.88
(ST;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	103.3	>50.00	0.98	0.88
(ST;shannon;db10;6;shannon;db10;5)	112.7	>50.00	0.98	0.89
(ST;shannon;db10;6;shannon;db10;6)	112.7	>50.00	0.98	0.89
(ST;shannon;db10;5;shannon;db10;5)	112.7	>50.00	0.98	0.89
(ST;shannon;db10;5;shannon;db10;6)	112.7	>50.00	0.98	0.89
(HT;shannon;db12;5;shannon;db10;5)	129.0	16.09	0.94	0.91
(HT;shannon;db12;5;shannon;db10;6)	129.0	16.09	0.94	0.91
(HT;shannon;db12;6;shannon;db10;5)	129.0	16.09	0.94	0.91
(HT;shannon;db12;6;shannon;db10;6)	129.0	16.09	0.94	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	127.3	>50.00	0.94	0.92
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	127.3	>50.00	0.94	0.92
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	127.3	>50.00	0.94	0.92
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	127.3	>50.00	0.94	0.92
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;5)	102.0	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;6)	102.0	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;dne_0.8;db12;5)	102.0	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;dne_0.8;db12;6)	102.0	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;5)	102.0	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;6)	102.0	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;5)	102.0	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;6)	102.0	>50.00	0.98	0.93

Tabla B.2 *DReWP de la señal $x_{1,2}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(ST;shannon;db10;6;shannon;db10;6)	107.8	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;thr_0.2;db10;5)	107.8	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;thr_0.2;db10;6)	107.8	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db10;5)	107.8	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db10;6)	107.8	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;thr_0.2;db10;5)	107.8	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;thr_0.2;db10;6)	107.8	>50.00	0.99	0.90
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;5)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;6)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;5)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;6)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;5)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;6)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;dne_0.8;db12;5)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;dne_0.8;db12;6)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db12;5)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db12;6)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;5)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;6)	99.7	>50.00	0.98	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	115.2	>50.00	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	115.2	>50.00	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	115.2	>50.00	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	115.2	>50.00	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;5)	117.8	>50.00	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;6)	117.8	>50.00	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;5)	117.8	>50.00	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;6)	117.8	>50.00	0.98	0.94
(ST;dne_0.8;db10;6;dne_0.8;db12;5)	96.2	>50.00	0.98	0.94
(ST;dne_0.8;db10;6;dne_0.8;db12;6)	96.2	>50.00	0.98	0.94
(ST;dne_0.8;db10;5;dne_0.8;db12;5)	96.2	>50.00	0.98	0.94
(ST;dne_0.8;db10;5;dne_0.8;db12;6)	96.2	>50.00	0.98	0.94

Tabla B.3 *DReWP de la señal $x_{1,3}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(ST;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;6)	92.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;5)	92.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;6)	92.2	>50.00	0.98	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	108.5	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	108.5	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;5)	108.5	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;6)	108.5	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	108.5	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	108.5	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;5)	108.5	17.22	0.99	0.93
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;6)	108.5	17.22	0.99	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;5)	93.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;6)	93.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;dne_0.8;db12;5)	93.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;dne_0.8;db12;6)	93.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db12;5)	93.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db12;6)	93.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;5)	93.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;6)	93.2	>50.00	0.98	0.93
(ST;shannon;db10;6;shannon;db10;5)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;shannon;db10;6)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;shannon;db12;5)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;shannon;db12;6)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;dne_0.8;db12;5)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;6;dne_0.8;db12;6)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db10;5)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db10;6)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db12;5)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;shannon;db12;6)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;dne_0.8;db12;5)	97.6	>50.00	0.99	0.90
(ST;shannon;db10;5;dne_0.8;db12;6)	97.6	>50.00	0.99	0.90

Tabla B.4 *DReWP de la señal $x_{1,4}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;5)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;6)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;5)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;6)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;5)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;6)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;5)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;6)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;5)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;6)	96.2	>50.00	0.98	0.91
(HT;shannon;db10;5;shannon;db10;6)	97.8	37.45	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;6;dne_0.8;db12;5)	97.8	37.46	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;6;dne_0.8;db12;6)	97.8	37.46	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;5;dne_0.8;db12;5)	97.8	37.46	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;5;dne_0.8;db12;6)	97.8	37.46	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;6;thr_0.2;db10;5)	97.8	37.51	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;6;thr_0.2;db10;6)	97.8	37.51	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;5;thr_0.2;db10;5)	97.8	37.51	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;5;thr_0.2;db10;6)	97.8	37.51	0.99	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;5)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;6)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;5;dne_0.8;db12;5)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;5;dne_0.8;db12;6)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;5)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;6)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;6;dne_0.8;db12;5)	97.3	29.67	0.99	0.92
(HT;dne_0.8;db12;6;dne_0.8;db12;6)	97.3	29.67	0.99	0.92

Tabla B.5 *DReWP de la señal $x_{2,1}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(ST;thr_0.2;db12;6;thr_0.2;db10;6)	99.1	>50.00	0.98	0.91
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;5)	99.1	>50.00	0.98	0.91
(ST;thr_0.2;db12;6;dne_0.8;db12;6)	99.1	>50.00	0.98	0.91
(ST;thr_0.2;db10;6;shannon;db12;5)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;6;shannon;db12;6)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;5)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;6)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;5)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;6)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;5)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;6)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;6;thr_0.2;db10;5)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;6;thr_0.2;db10;6)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;5;thr_0.2;db10;5)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;thr_0.2;db10;5;thr_0.2;db10;6)	100.2	>50.00	0.98	0.92
(ST;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	105.0	>50.00	0.97	0.94
(ST;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	105.0	>50.00	0.97	0.94
(ST;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	105.0	>50.00	0.97	0.94
(ST;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	105.0	>50.00	0.97	0.94
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;5)	98.9	>50.00	0.97	0.95
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db10;6)	98.9	>50.00	0.97	0.95
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;5)	98.9	>50.00	0.97	0.95
(ST;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;6)	98.9	>50.00	0.97	0.95
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;5)	98.9	>50.00	0.97	0.95
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db10;6)	98.9	>50.00	0.97	0.95
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db12;5)	98.9	>50.00	0.97	0.95
(ST;thr_0.2;db12;6;shannon;db12;6)	98.9	>50.00	0.97	0.95
(ST;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;5)	100.1	>50.00	0.97	0.96
(ST;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;6)	100.1	>50.00	0.97	0.96
(ST;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;5)	100.1	>50.00	0.97	0.96
(ST;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;6)	100.1	>50.00	0.97	0.96

Tabla B.6 *DReWP de la señal $x_{2,2}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas sintéticos de ejemplo

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(HT;shannon;db12;6;dne_0.8;db12;6)	81.9	24.46	0.99	0.91
(HT;shannon;db12;5;dne_0.8;db12;5)	81.9	24.46	0.99	0.91
(HT;shannon;db12;5;dne_0.8;db12;6)	81.9	24.46	0.99	0.91
(HT;shannon;db10;5;shannon;db12;5)	83.5	43.86	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;5;shannon;db12;6)	83.5	43.86	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;5;thr_0.2;db10;5)	83.5	43.98	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;5;thr_0.2;db10;6)	83.5	43.98	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;5;shannon;db10;5)	83.5	43.87	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;5;shannon;db10;6)	83.5	43.87	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;6;shannon;db12;5)	83.5	45.46	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;6;shannon;db12;6)	83.5	45.46	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;6;thr_0.2;db10;5)	83.5	45.60	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;6;thr_0.2;db10;6)	83.5	45.60	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;6;shannon;db10;5)	83.5	45.47	0.98	0.89
(HT;shannon;db10;6;shannon;db10;6)	83.5	45.47	0.98	0.89
(HT;shannon;db12;6;shannon;db10;5)	83.5	27.13	0.98	0.91
(HT;shannon;db12;6;shannon;db10;6)	83.5	27.13	0.98	0.91
(HT;shannon;db12;5;shannon;db10;5)	83.5	27.13	0.98	0.91
(HT;shannon;db12;5;shannon;db10;6)	83.5	27.13	0.98	0.91
(HT;shannon;db12;6;shannon;db12;5)	83.5	26.90	0.98	0.91
(HT;shannon;db12;6;shannon;db12;6)	83.5	26.90	0.98	0.91
(HT;shannon;db12;5;shannon;db12;5)	83.5	26.90	0.98	0.91
(HT;shannon;db12;5;shannon;db12;6)	83.5	26.90	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;5)	84.1	19.74	0.97	0.94
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;6)	84.1	19.74	0.97	0.94
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;5)	84.1	19.74	0.97	0.94
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;6)	84.1	19.74	0.97	0.94
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;5)	82.6	19.34	0.98	0.95
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;6)	82.6	19.34	0.98	0.95
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;5)	82.6	19.34	0.98	0.95
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;6)	82.6	19.34	0.98	0.95

Tabla B.7 *DReWP de la señal $x_{2,3}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*

Parámetros de entrada	A.	B.	C.	D.
(HT;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;5)	102.4	>50.00	0.98	0.90
(HT;thr_0.2;db12;5;shannon;db12;6)	102.4	>50.00	0.98	0.90
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;5)	102.0	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db10;6)	102.0	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;5)	102.0	>50.00	0.98	0.91
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db10;6)	102.0	>50.00	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;5)	102.2	48.25	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db10;6)	102.2	48.25	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;5)	102.2	48.25	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db12;5;shannon;db12;6)	102.2	48.25	0.98	0.91
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;5)	101.8	35.78	0.98	0.92
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db10;6)	101.8	35.78	0.98	0.92
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;5)	101.8	35.81	0.98	0.92
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db10;6)	101.8	35.81	0.98	0.92
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db12;5)	104.9	29.28	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;6;shannon;db12;6)	104.9	29.28	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;6;dne_0.8;db12;6)	104.9	29.27	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db12;5)	104.9	29.36	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;5;shannon;db12;6)	104.9	29.36	0.98	0.94
(HT;dne_0.8;db10;5;dne_0.8;db12;6)	104.9	29.36	0.98	0.94
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;5)	104.4	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;5;shannon;db12;6)	104.4	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db12;5)	104.4	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;6;shannon;db12;6)	104.4	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;5;dne_0.8;db12;6)	104.4	>50.00	0.98	0.95
(HT;thr_0.2;db10;6;dne_0.8;db12;6)	104.4	>50.00	0.98	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;dne_0.8;db12;6)	104.4	21.05	0.99	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;5)	104.5	21.07	0.99	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db10;6)	104.5	21.07	0.99	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;5)	104.5	21.07	0.99	0.95
(HT;dne_0.8;db12;6;shannon;db12;6)	104.5	21.07	0.99	0.95

Tabla B.8 *DReWP de la señal $x_{2,4}(n)$. Resultados obtenidos para varias combinaciones de parámetros de entrada.*



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Apéndice C

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas de periodo corto registrados por la URSPA durante el año 2000.

En este apéndice se muestran los resultados obtenidos al aplicar el método DReWP sobre varios de los eventos registrados durante el año 2000.

En la tabla C.1 se encuentra una lista con los eventos seleccionados y en las gráficas posteriores se comparan los sismogramas registrados por cada una de las estaciones analógicas (parte izquierda) con los sismogramas resultantes del proceso de deconvolución (parte derecha).

Localización	Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad	M_L
Crevillente	20000203	38°17"	+0°56"	0.5	2.7
Costa de Alicante	20000402	38°18"	-0°10"	9.2	3.3
Costa de Alicante	20000402	38°19"	-0°10"	15.0	2.9
S. Miguel de Salinas	20000422	38°00"	+0°50"	6.0	3.4
Abanilla	20000625	38°12"	+1°02"	1.0	2.4
S. de Yecla	20000714	38°35"	+1°08"	1.1	2.4
Ibi	20000809	38°36"	+0°31"	0.7	2.0
SE. de Crevillente	20000822	38°13"	+0°50"	3.1	1.5
Dolores	20000822	38°07"	+0°44"	6.3	2.4
Sinarques (Valencia)	20000917	39°55"	+1°13"	2.5	3.1
Abanilla (Murcia)	20001030	38°11"	+1°16"	1.0	1.5
O. de Benijofar	20001101	38°04"	+0°47"	10.0	2.4
E. de Santa Pola	20001221	38°11"	+0°07"	9.0	1.9

Tabla C.1 *Relación de eventos detectados por la red local durante el año 2000.*

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas registrados por la URSPA durante el año 2000

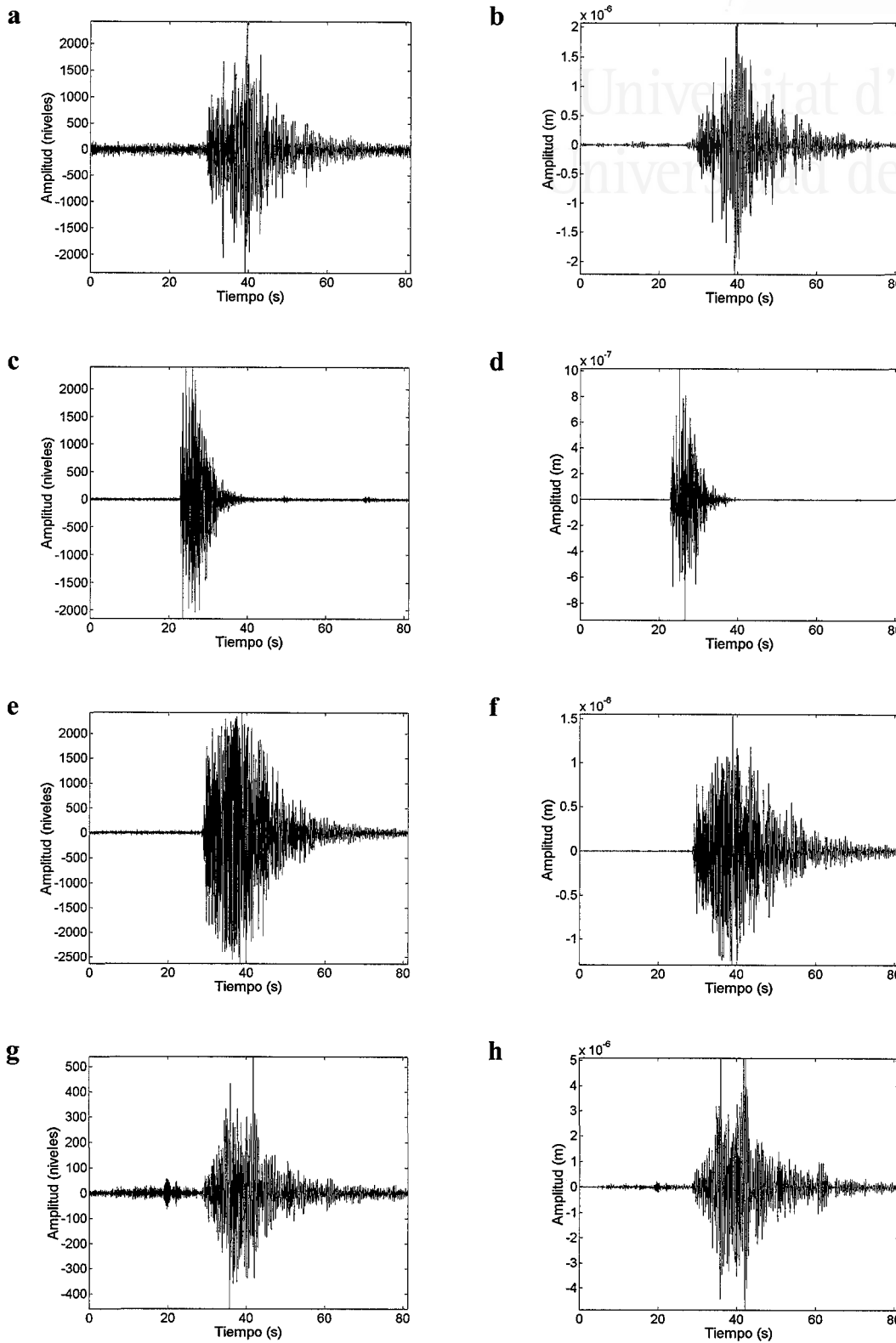


Figura C.1 Evento '00020302' ($38.28^{\circ}N$, $0.93^{\circ}O$).

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

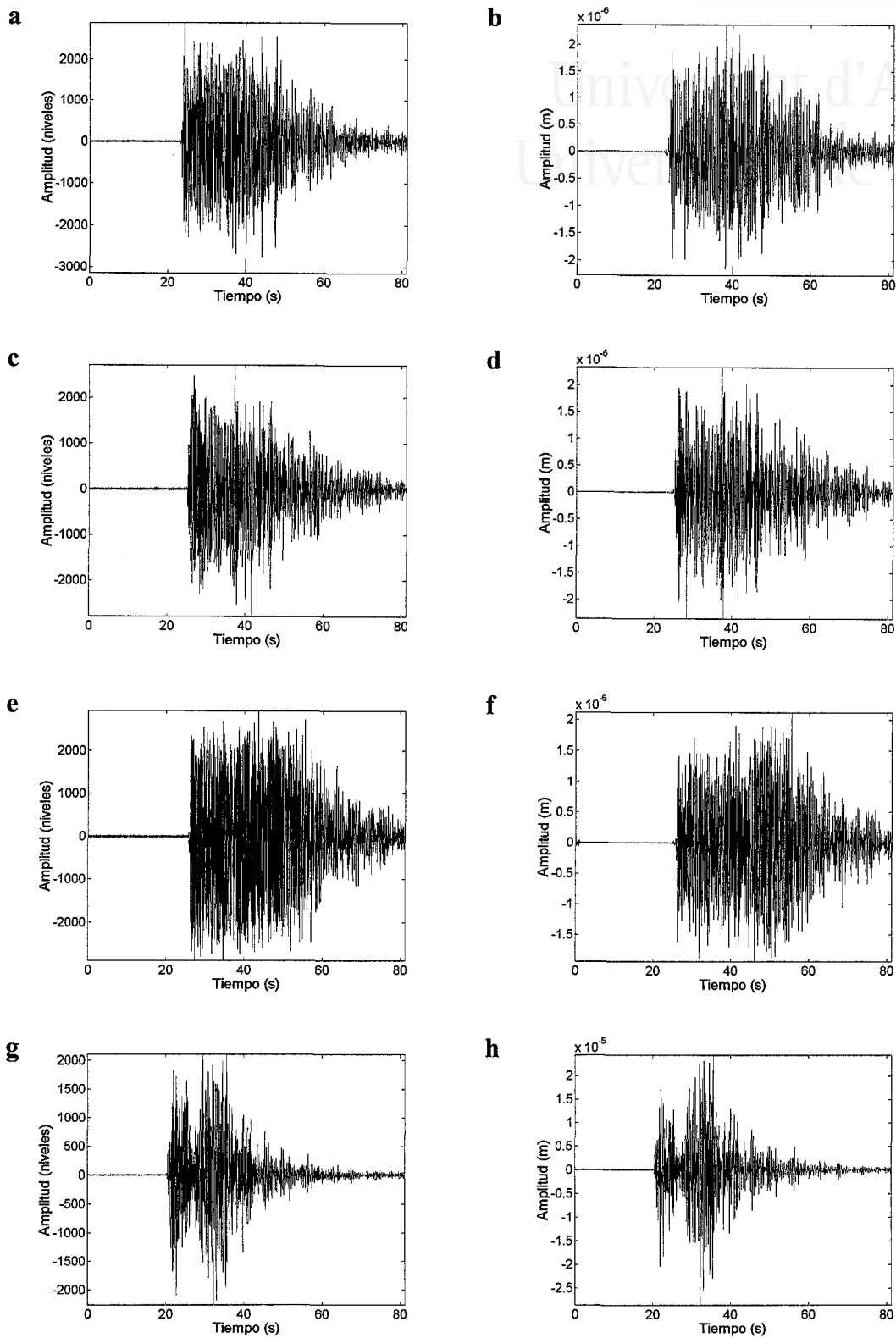


Figura C.2 *Evento '00040200' (38.30° N, 0.17° E).*

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas registrados por la URSPA durante el año 2000

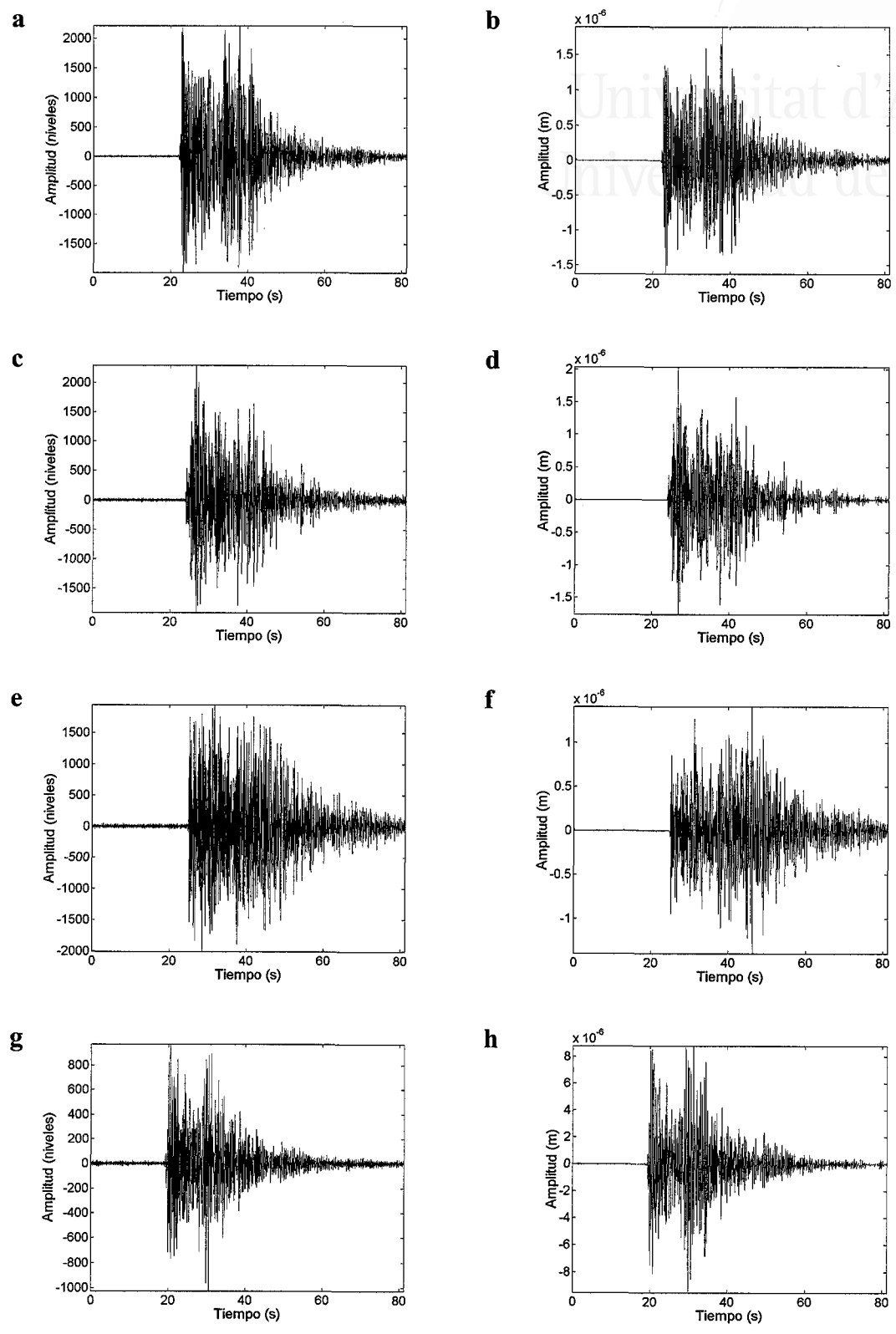


Figura C.3 *Evento '00040201' (38.32° N, 0.17° E).*

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

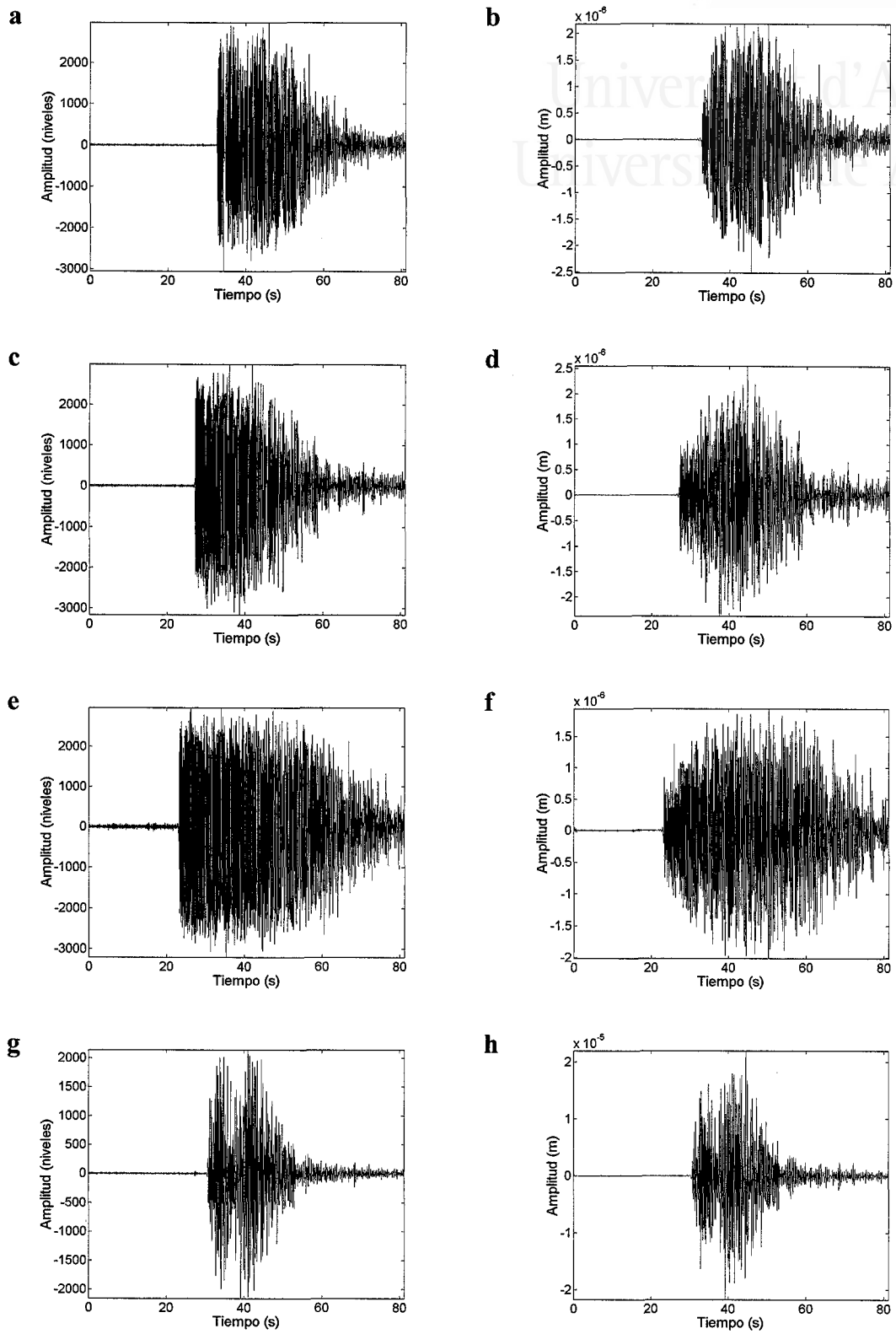


Figura C.4 Evento '00042204' ($38.00^{\circ}N$, $0.83^{\circ}O$).

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas registrados por la URSPA durante el año 2000

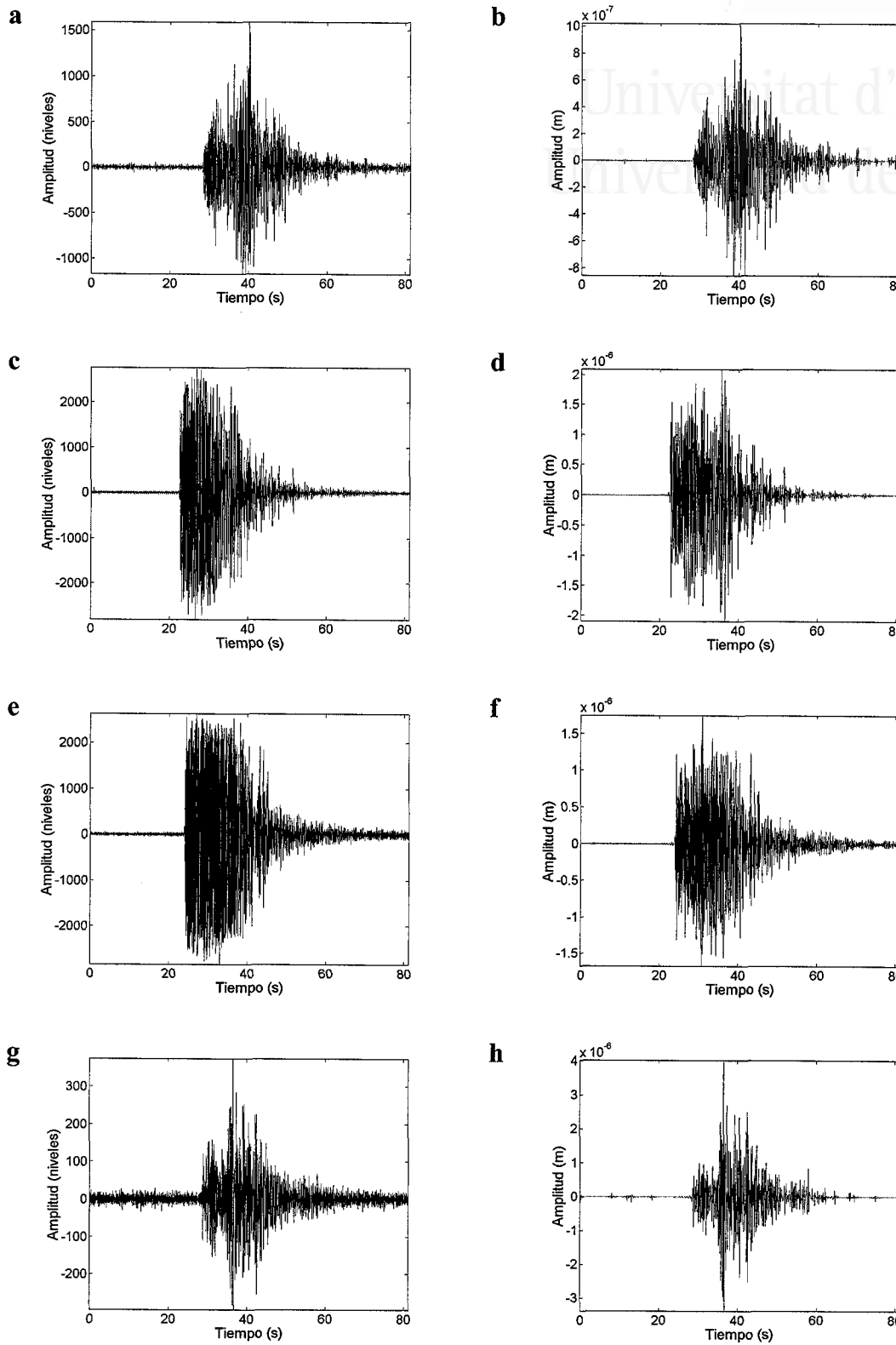


Figura C.5 *Evento '00062506' (38.20° N, 1.03° O).*

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

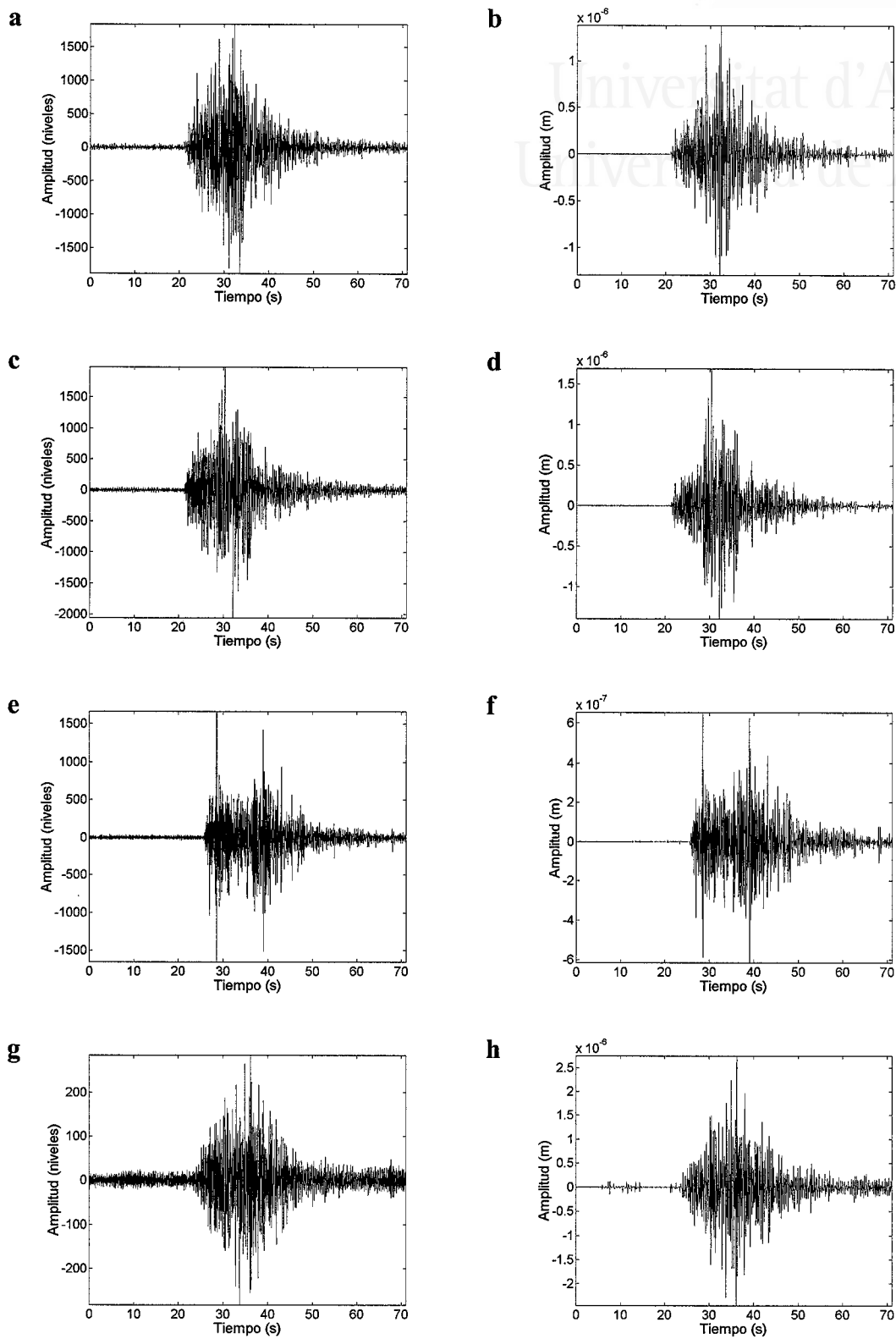


Figura C.6 *Evento '00071400' (38.58° N, 1.13° O).*

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas registrados por la URSPA durante el año 2000

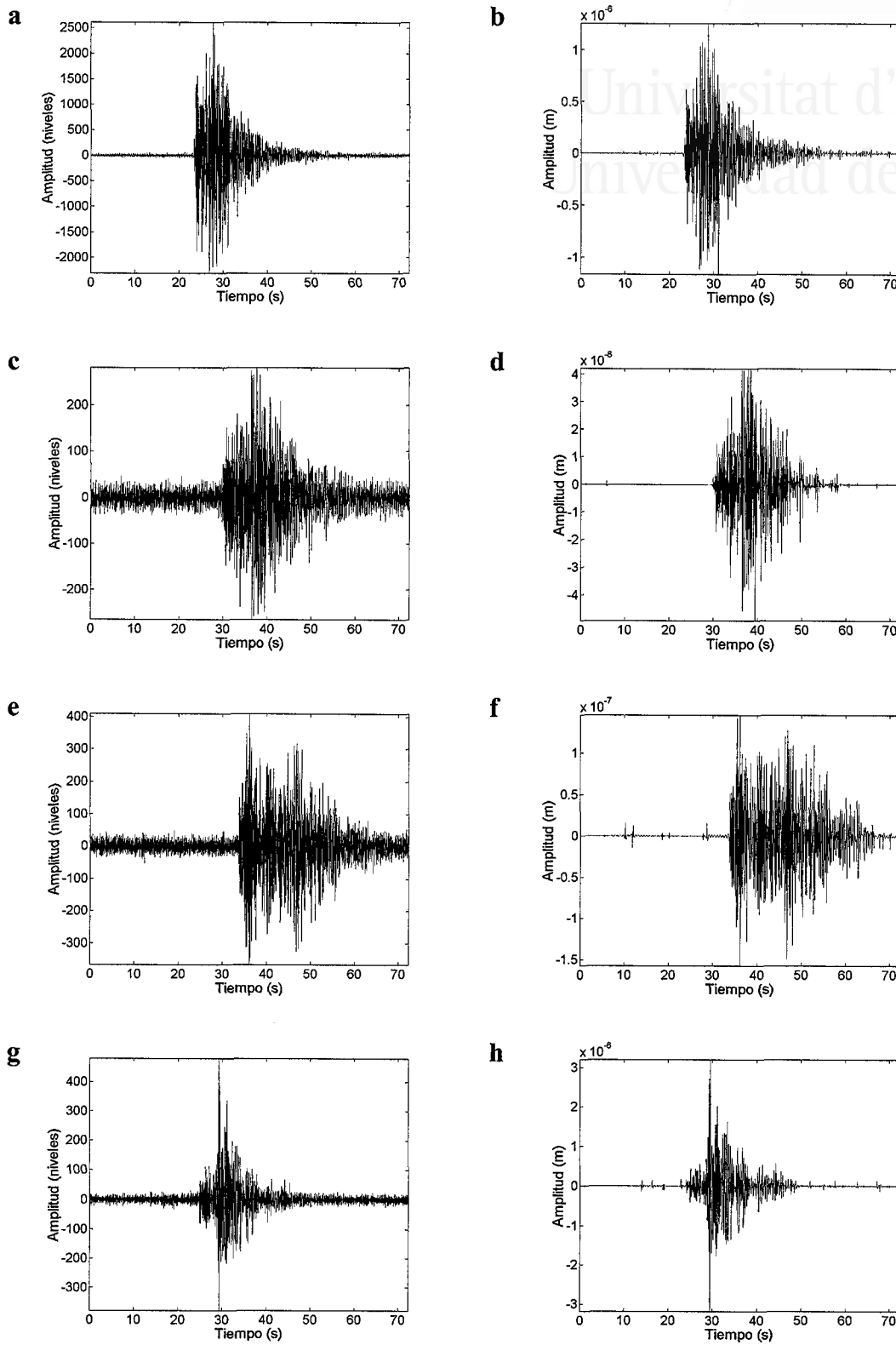


Figura C.7 Evento '00080900' ($38.60^{\circ}N$, $0.52^{\circ}O$).

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

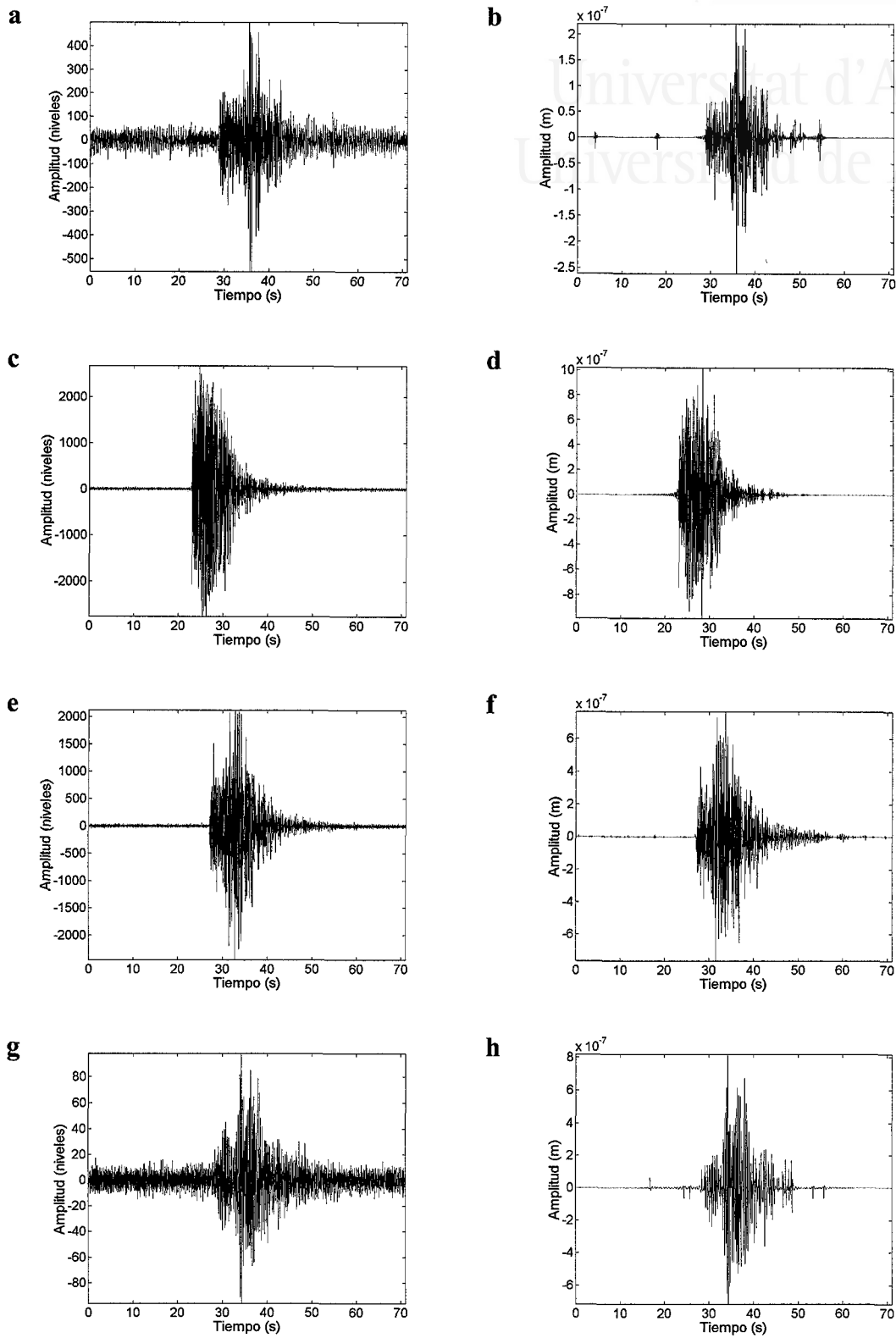


Figura C.8 Evento '00082200' ($38.22^{\circ}N$, $0.83^{\circ}O$).

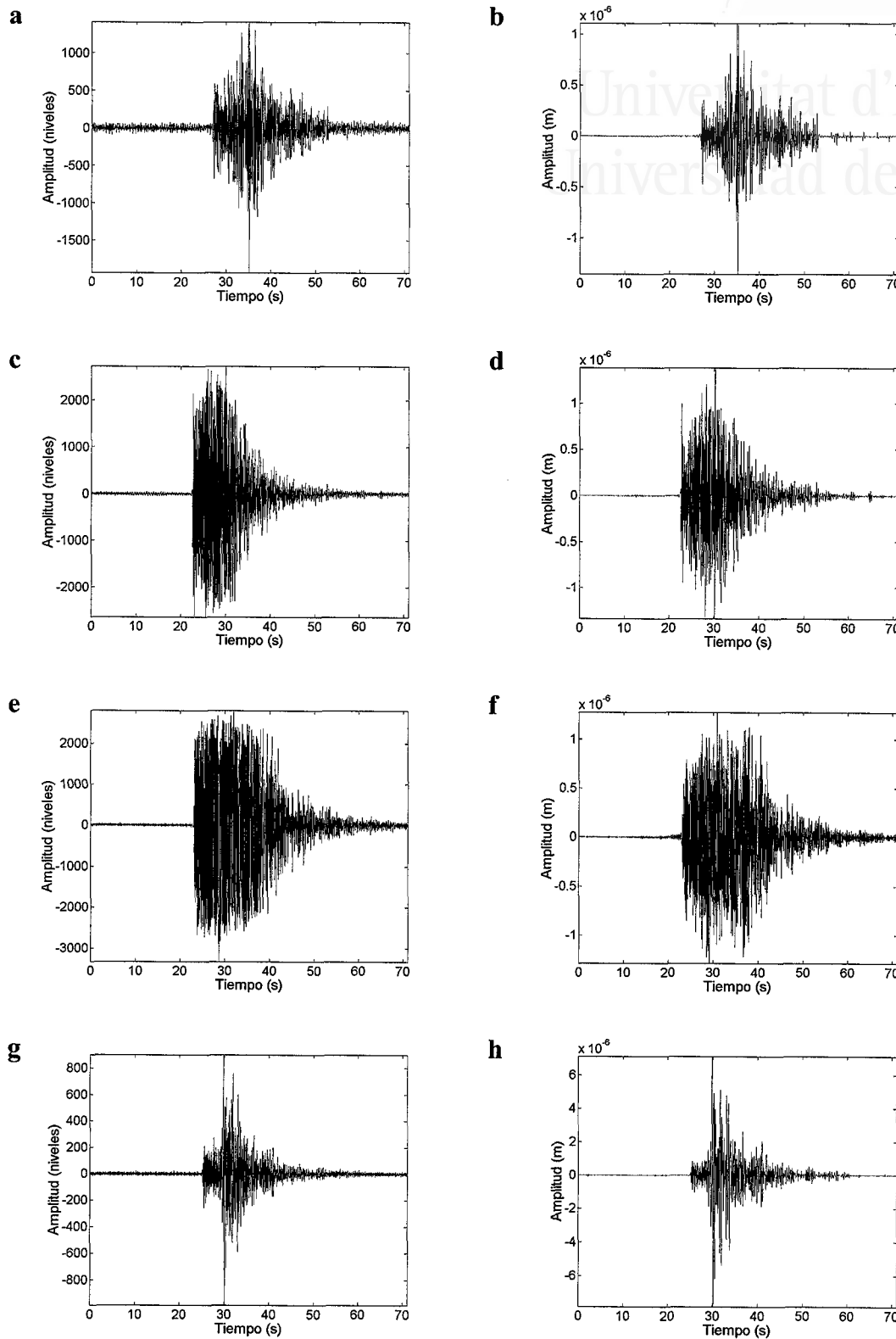


Figura C.9 *Evento '00082203' (38.12° N, 0.73° O).*

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

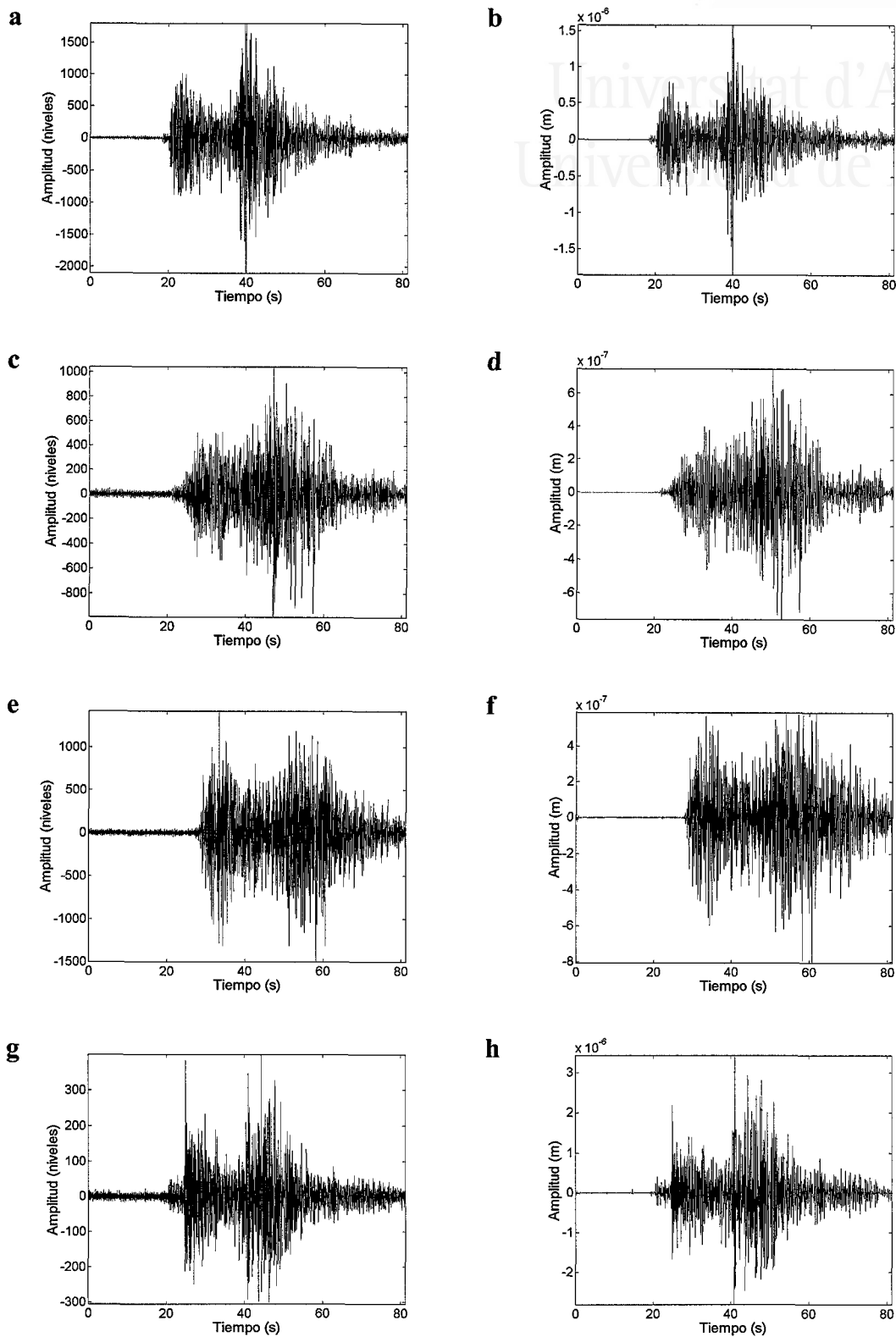


Figura C.10 Evento '00091700' (39.92° N, 1.22° O).

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas registrados por la URSPA durante el año 2000

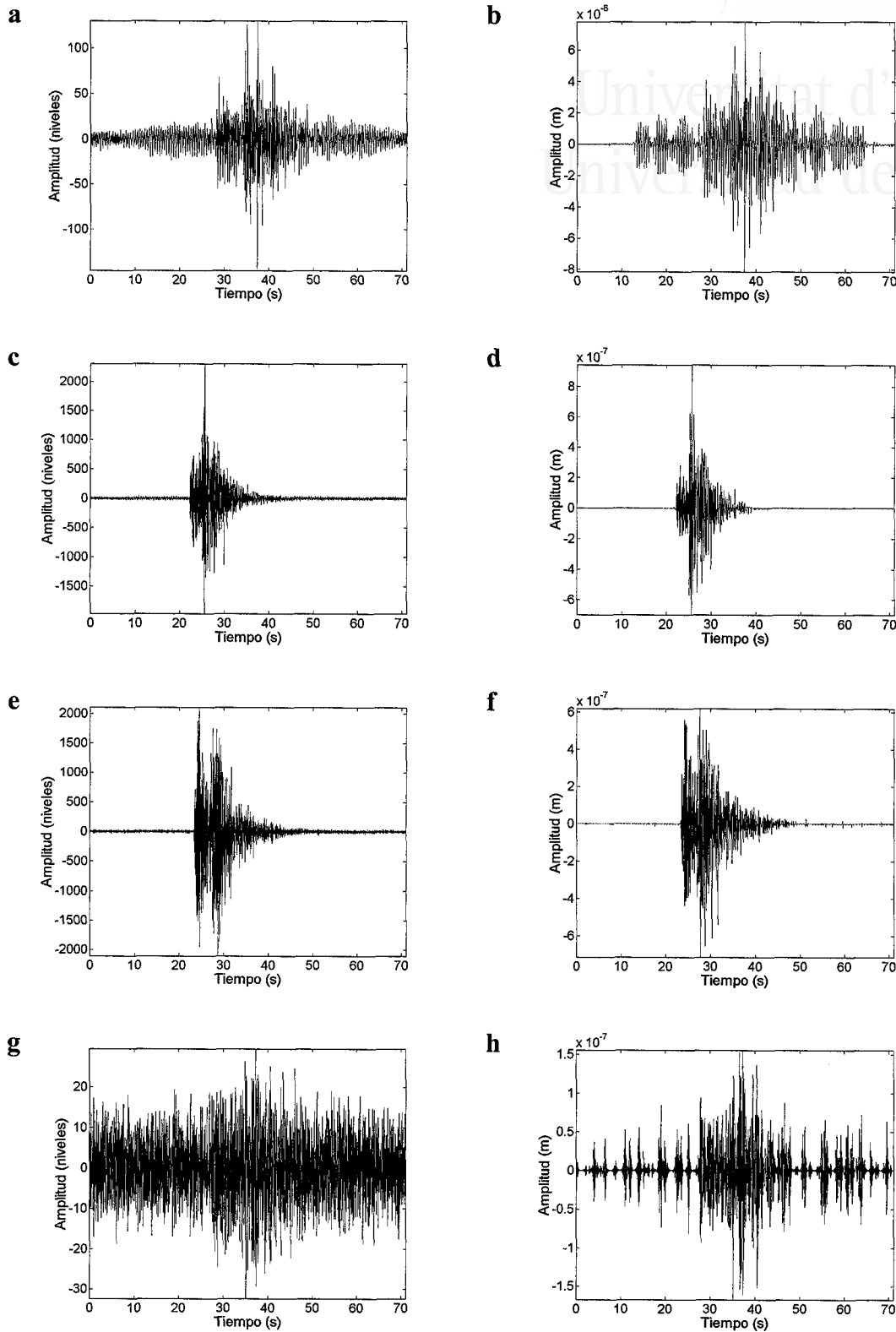


Figura C.11 Evento '00103000' (38.18° N, 1.27° O).

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

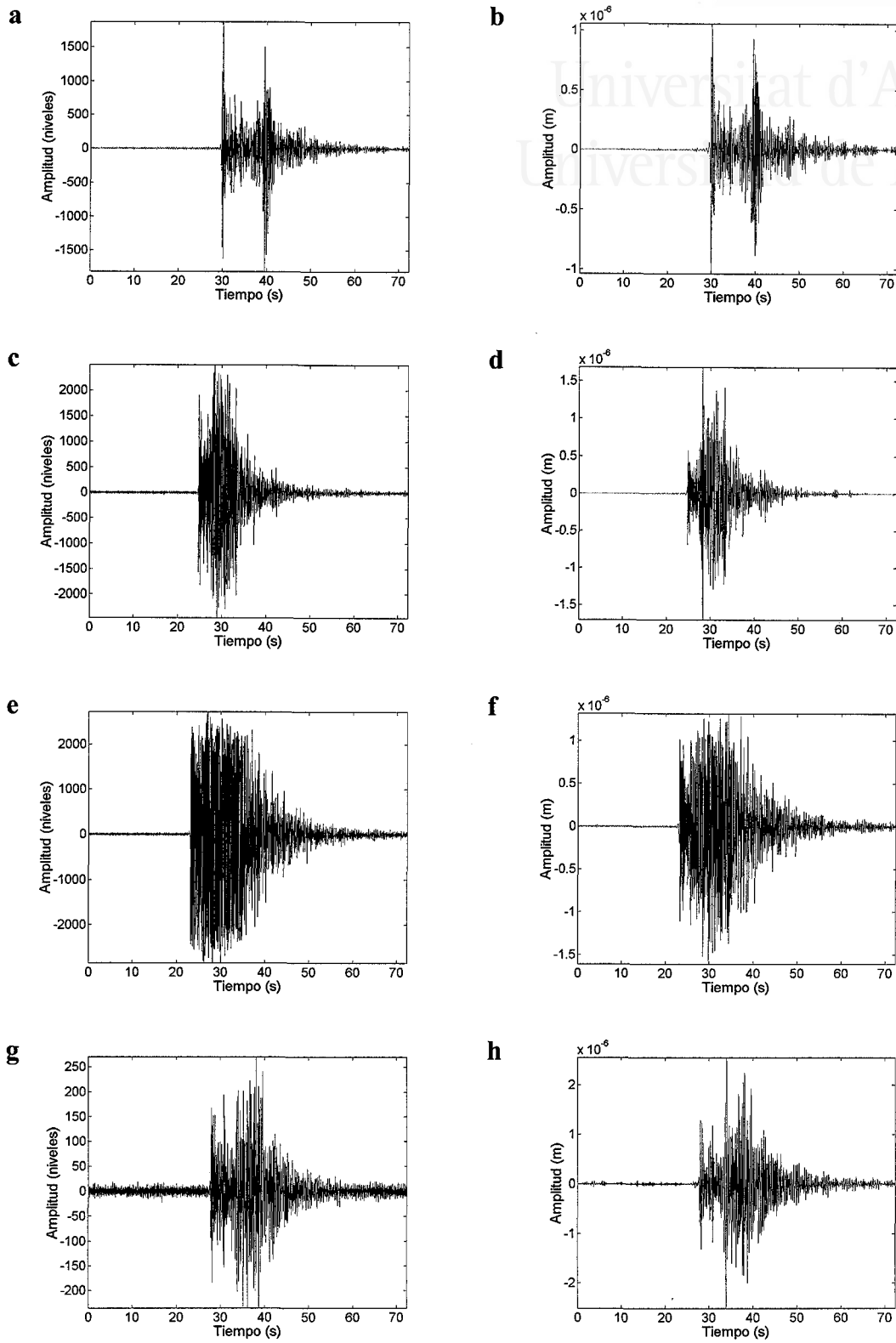


Figura C.12 Evento '00110104' ($38.07^\circ N$, $0.78^\circ O$).

Aplicación del método DReWP sobre los sismogramas registrados por la URSPA durante el año 2000

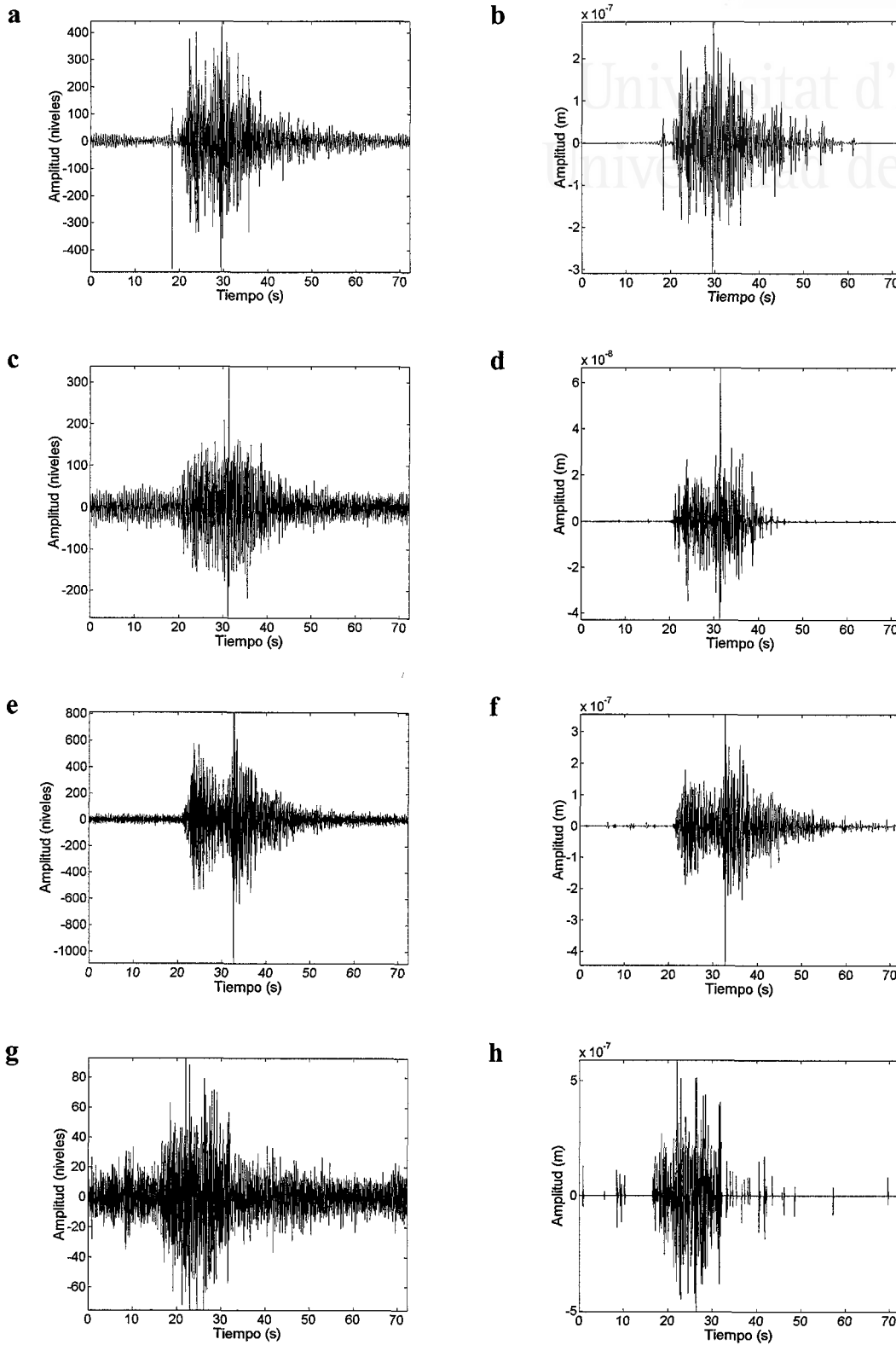


Figura C.13 Evento '00122105' (38.18°N, 0.12°O).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Apéndice D

Sismogramas sintéticos: Software.

Para realizar la simulación de los sismogramas sintéticos se han programado bastantes funciones (o scripts) en entorno Matlab. Todos estos programas se pueden clasificar en tres grandes grupos: programas de interface, de comprobación y de simulación.

En el siguiente apéndice se muestra el listado de aquellos programas relacionados con la fase de simulación que pueden resultar de mayor interés. En cuanto a los programas relacionados exclusivamente con el trazado de rayos, se ilustran sólo, a modo de ejemplo, alguno de ellos.

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% script 'mod3c8.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Realiza la simulación a partir de los datos introducidos por la
% interface y almacenados en memoria

% Lectura de datos

% Inicializa algunas variables

ni3=95;
ni=1;
vtiempo=[];
mpulso_x=zeros(1,length(pulsoo));
mpulso_z=zeros(1,length(pulsoo));
hx11 = waitbar(0, 'Simulando...');

% Trayectorias producidas por ondas P fuente
ni=0;
format long;
for ni2=1:1:31
    % Inicializa variables
    ni=ni+1;
    iniset;
    % Evalua la trayectoria del actual rayo
    rayo=['ray_P_',int2str(ni2)];
    eval(rayo);
    % Marca la llegada de la onda P directa
    % Corresponde a Ray_P_1
    if ni2==1
        marca_pd=ti;
    end

    % Guarda los tiempos de llegada y los correspondientes pulsos ( en coordenadas
    % cartesianas) para cada uno de los rayos;
    vtiempo=[vtiempo ti];
    mpulso_x(ni,:)=riu_x;
    mpulso_z(ni,:)=riu_z;
    % Almacena otros datos referentes a la trayectoria actual
    almacén;
    waitbar(ni/ni3,hx11);
end

% Trayectorias producidas por ondas SV fuente
for ni2=1:1:31
    % Inicializa variables;
    ni=ni+1;
    iniset;
    % Evalua la trayectoria del actual rayo
    rayo=['ray_SV_',int2str(ni2)];
    eval(rayo);
    % Marca la llegada de la onda S directa
    % Corresponde a Ray_S_1
    if ni2==1
        marca_sd=ti;
    end
    % Guarda los tiempos de llegada y los correspondientes pulsos ( en coordenadas
    % cartesianas) para cada uno de los rayos;
    vtiempo=[vtiempo ti];
    mpulso_x(ni,:)=riu_x;
    mpulso_z(ni,:)=riu_z;
    % Almacena otros datos referentes a la trayectoria actual
    almacén;
    waitbar(ni/ni3,hx11);
end

```

```

% Trayectorias P fuente adicionales
for ni2=32:1:47
    % Inicializa variables;
    ni=ni+1;
    iniset;
    % Evalua la trayectoria del actual rayo
    rayo=['ray_P_',int2str(ni2)];
    eval(rayo);
    % Guarda los tiempos de llegada y los correspondientes pulsos ( en coordenadas
    % cartesianas) para cada uno de los rayos;
    vtiempo=[vtiempo ti];
    mpulso_x(ni,:)=riu_x;
    mpulso_z(ni,:)=fact*riu_z;
    % Almacena otros datos referentes a la trayectoria actual
    almacén;
    waitbar(ni/ni3,hx11);
end

% Trayectorias SV fuente adicionales
for ni2=32:1:47
    % Inicializa variables;
    ni=ni+1;
    iniset;
    % Evalua la trayectoria del actual rayo
    rayo=['ray_SV_',int2str(ni2)];
    eval(rayo);
    % Guarda los tiempos de llegada y los correspondientes pulsos ( en coordenadas
    % cartesianas) para cada uno de los rayos;
    vtiempo=[vtiempo ti];
    mpulso_x(ni,:)=riu_x;
    mpulso_z(ni,:)=fact*riu_z;
    % Almacena otros datos referentes a la trayectoria actual
    almacén;
    waitbar(ni/ni3,hx11);
end

% Forma de onda obtenida en el sensor vertical
[aa,tti,aal,quita,ceroante]=sint8(mpulso_z,vtiempo,offset,fre_mu);

% Onda Rayleigh ( Componente vertical )
% Evalua la onda Rayleigh
rayo_rgl;
waitbar(ni+1/ni3,hx11);

% Marca la llegada de la onda Rayleigh
% Corresponde a Rayo_Rgl
marca_rg=tti;

% Forma de onda global ( P + SV + Rg )
solops=aa;
[aa,tti,aa2]=sint68(fi_z,ti,fre_mu,aa,tti,quita,offset,ceroante);
mon=size(aal);
mon1=mon(1);
mon2=mon(2);
if length(aa2)>mon2
    jode=length(aa2)-mon2;
    aal=[aal zeros(mon1,jode)];
end
aal(size(aal,1)+1,:)=aa2;
close(hx11)

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% function 'sint8.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Agrupa todas las llegadas P y SV en una sólo señal

function [a,ti,col,un,ceroantes]=sint8(fb,tt,off,fr);

% Calcula muestras previas al pulso efectivo
puncocima=find(abs(fb(1,:))==max(abs(fb(1,:))));
ceroantes=max(find(abs(fb(1,1:puncocima))<(max(fb(1,:))/1000)));

% Calcula la duración de un pulso
lu=length(fb(1,:));
du=ceil(lu/fr);

% Encuentra los pulsos con tiempos de llegada igual a cero
% Estos son trayectorias no validas
ind_un1=find(tt~=0);

% Excluye estos pulsos del resultado final
for yt=1:length(ind_un1);
    fb1(yt,:)=fb(ind_un1(yt),:);
    tt1(yt)=tt(ind_un1(yt));
end

% Intervalo en el cual estan comprendidos los tiempos de llegada
% Dando un margen igual a la duración de un pulso mas un segundo
un=min(tt1)-du-1;
if un<=0
    un=0;
end
do=max(tt1)+du+1;
dif=do-un;

% Calcula el vector tiempo
ti=un:1/fr:do;

% Calcula el numero de muestras necesarias para representar la señal
nmu=length(ti);

% Calcula el numero de pulsos
bu=length(tt1);

% Redefine el tiempo de comienzo y final de cada uno de los
% pulsos teniendo en cuenta el valor del offset
% En el mismo bucle convierte estos tiempos en muestras.
% Por ultimo determina la longitud final en muestras de cada uno
% de los pulsos

% Convierte el tiempo de offset en muestras
moff=ceil(off*fr);
for t=1:1:bu

    % Convierte los tiempos de llegada en muestras
    tt2(t)=round((tt1(t)-un)*fr)+1;
    % Muestra de inicio
    mm3(t)=tt2(t)-moff;
    % Comprueba que el tiempo de inicio no sea negativo
    if mm3(t)<1
        jaja=-mm3(t);
        poff=fb1(t,jaja:lu);
        fb2(t,:)=[poff zeros(1,jaja-1)];
        mm3(t)=1;
    else
        fb2(t,:)=fb1(t,:);
    end
end

```

```

end
% Superpone los diferentes pulsos del vector fb teniendo en cuenta
% la muestra de inicio a la cual comienzan.

ve=zeros(1,nmu);
vel=ve;
for t=1:1:bu
    co=fb2(t,:);
    ve(mm3(t)+1:mm3(t)+lu)=ve(mm3(t)+1:mm3(t)+lu)+co;
    vel=zeros(1,nmu);
    vel(mm3(t)+1:mm3(t)+lu)=co;
    col(t,:)=vel(1:length(vel)-4*moff);
end
a=ve(1:length(ve)-4*moff);
ti=ti(1:length(ve)-4*moff);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% function `sint68.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Agrupa la señal devuelta por sint8.m y la onda Rayleigh en una sola.

function [a,tu1,ve]=sint68(fi,tt,fr,aa,tu,un,off,ceroantes);

% Calcula la duracion de la onda Rayleigh
lu=length(fi);

% Obtiene el numero de muestras del vector tiempo
nmu=length(tu);

% Convierte los tiempos de llegada en muestras de llegada
tt2=round((tt-tu(1)-un-off)*fr)+1;
tt2=tt2+ceroantes;

% Inicializa un vector de ceros
ve=zeros(1,nmu);

% Posiciona el pulso en el instante adecuado
ve(tt2+1:tt2+lu)=fi;

% Recalcula el vector de tiempo
tu1=tu(1):1/fr:(tu(1)+((length(ve)-1)/fr));

% Obtiene la composicion global de todas las ondas
% Tantos las ondas de volumen como las superficiales
% Pero antes se asegura de que el tamaño de los vectores sea el mismo
al=zeros(size(ve));
a1(1:length(aa))=aa;
a=a1+ve;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% script `ray_SV18.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%


% Ray_SV_18:
% SV_tra_1/2_SV_hwp_2/3_P_tra_1/2_P

% Inicializacion de los datos
titulo='Rayo SV 18';
titulo1='SV tra 1/2 SV hwp 2/3 P tra 1/2 P ';

% Trazo 0 - 1

```


Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales



```

v01=Vs1;
q01=Q_S1;

% Interface 1/2
capital2='SvdsVd';
v121=Vp1;
v122=Vp2;
v123=Vs1;
v124=Vs2;
d121=dens_1;
d122=dens_2;

% Trazo 1 - 2
v12=Vs2;
q12=Q_S2;

% Interface 2/3
capita23='Svdpd';
v231=Vp2;
v232=Vp3;
v233=Vs2;
v234=Vs3;
d231=dens_2;
d232=dens_3;

% Trazo 2 - 3
v23=Vp3;
q23=Q_P3;

% Interface 3/2
capita32='PuPu';
v321=Vp2;
v322=Vp3;
v323=Vs2;
v324=Vs3;
d321=dens_2;
d322=dens_3;

% Trazo 3 - 4
v34=Vp2;
q34=Q_P2;

% Interface 2/1
capita21='PuPu';
v211=Vp1;
v212=Vp2;
v213=Vs1;
v214=Vs2;
d211=dens_1;
d212=dens_2;

% Trazo 4 - 5
v45=Vp1;
q45=Q_P1;

% Tipo de onda de salida
onda_out='P';
sentido='up';

% Calcula la onda resultante
rayos_14_21;
final;

% Limpia variables
clear v01 q01 capital2 v121 v122 v123 v124 d121 d122 v12 q12
clear capita23 v231 v232 v233 v234 d231 d232 v23 q23
clear capita32 v321 v322 v323 v324 d321 d322 v45 q45
clear alf_1 alf_2 alf_3 an_01 an_12 ang_23 dd fa_a fa_c fa_x fa_y

```

```

clear x1 x2 x3 z1 z2 z3

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% script 'rayos_14_21.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Rayos_14_21:

% o_tra_1/2_o_hwp_2/3_o_tra_1/2_o

% Nomenclatura de los puntos de importancia
% 0 -> Fuente
% 1 -> Punto de incidencia en la primera capa
% 2 -> Punto de incidencia en la segunda capa
% 3 -> Punto de reflexion en la segunda capa
% 4 -> Punto de refraccion en la segunda capa
% 5 -> Sensor

% Calculo del angulo critico de la onda incidente con la interface 1/2
an_cri=asin(v01/v12);

% Calculo del angulo critico de la onda con la interface 1/2
% Rayo refractado en la vuelta
an_cri_b=asin(v34/v45);

% Calculo del angulo critico de la onda con la interface 2/3
an_12=asin(v12/v23);

% Calculo del angulo de incidencia
an_01=asin((v01/v12)*sin(an_12));

% Angulo de salida de la onda de la interface 2/3
an_34=asin(v34/v23);

% Angulo de salida en el sensor
an_45=asin((v45/v34)*sin(an_34));

% Coordenadas del punto 1
x1=x_fuente+((z_1_capa-z_fuente)*tan(an_01));
z1=z_1_capa;

% Coordenadas del punto 2
x2=x1+((z_2_capa-z_1_capa)*tan(an_12));
z2=z_2_capa;

% Coordenadas del punto 4
x4=x_sensor-((z_1_capa-z_sensor)*tan(an_45));
z4=z_1_capa;

% Coordenadas del punto 3
x3=x4-((z_2_capa-z_1_capa)*tan(an_34));
z3=z_2_capa;

% Comprueba que todos los datos sean correctos
mal=0;
if real(an_01)~=an_01 | real(an_12)~=an_12 | an_01>=an_cri
    mal=1;
end
if real(an_34)~=an_34 | real(an_45)~=an_45 | an_34>=an_cri_b
    mal=1;
end
if x2>=x_sensor | x3<=x2
    mal=1;
end
if mal==0
    if onda_out=='P'

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

    fi=oho;
else
    fi=ohos;
end
ti=0;
% Energia inicial normalizada
enpri=100/(dens_1*v01*cos(an_01)*sum(abs(fi))^2);
come1(ni,:)= 'Fuente      :';
vtip=[ti];
vamp=[enpri*dens_1*v01*cos(an_01)*sum(abs(fi))^2];
vanp=[an_01*180/pi];
vesp=[0];
vtip1=[ti];
vamp1=[max(abs(fi))];

% Trazo 0 - 1
[fi,ti,an,ess]=onda(fi,ti,x_fuente,z_fuente,x1,z1,omega,q01,v01);
come2(ni,:)= 'Trazo 0 - 1  :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,ess];
vamp=[vamp,enpri*dens_1*v01*cos(an)*sum(abs(fi))^2/sum(vesp)];

% Llegada a la Interface 1/2
[fi,an,ce]=capa1(an,fi,v121,v122,v123,v124,d121,d122,capita12);
come3(ni,:)= 'Interface 1/2  :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,0];
vamp=[vamp,enpri*dens_2*v12*cos(an)*sum(abs(fi))^2/sum(vesp)];
vtip1=[vtip1,ti];
vamp1=[vamp1,max(abs(fi))];

% Trazo 1 - 2
[fi,ti,an,ess]=onda(fi,ti,x1,z1,x2,z2,omega,q12,v12);
come4(ni,:)= 'Trazo 1 - 2  :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,ess];
vamp=[vamp,enpri*dens_2*v12*cos(an)*sum(abs(fi))^2/sum(vesp)];

% Llegada a la Interface 2/3
an=asin((v12/v23)*sin(pi/2-0.001));
[fi,an,ce1]=capa1(an,fi,v231,v232,v233,v234,d231,d232,capita23);

come5(ni,:)= 'Interface 2/3  :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,0];
vamp=[vamp,enpri*dens_3*v23*cos(an)*sum(abs(fi))^2/sum(vesp)];
vtip1=[vtip1,ti];
vamp1=[vamp1,max(abs(fi))];

% Trazo 2 - 3
[fi,ti,an,ess]=onda(fi,ti,x2,z2,x3,z3,omega,q23,v23);
come6(ni,:)= 'Trazo 2 - 3  :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,ess];
athw=((x3)^(1/2))*((x3-x2)^(3/2));
vamp=[vamp,ce1*ce*vamp(1)/athw];

% Salida de la Interface 2/3
an=an-0.001;
[fi,an,ce2]=capa1(an,fi,v321,v322,v323,v324,d321,d322,capita32);
come7(ni,:)= 'Interface 3/2  :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,0];

```

```

vamp=[vamp,ce*ce1*ce2*vamp(1)/athw];
vtip1=[vtip1,ti];
vamp1=[vamp1,max(abs(fi))];

% Trazo 3 - 4
[fi,ti,an,ess]=onda(fi,ti,x3,z3,x4,z4,omega,q34,v34);
come8(ni,:)= 'Trazo 3 - 4 :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,ess];
athw=(((x4)^(1/2))*((x4-x2)^(3/2)));
vamp=[vamp,ce*ce1*ce2*vamp(1)/athw];

% Salida de la Interface 1/2
[fi,an,ce3]=capa1(an,fi,v211,v212,v213,v214,d211,d212,capita21);
come9(ni,:)= 'Interface 2/1 :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,0];
vamp=[vamp,ce*ce1*ce2*ce3*vamp(1)/athw];
vtip1=[vtip1,ti];
vamp1=[vamp1,max(abs(fi))];

% Trazo 4 - 5
[fi,ti,an,ess]=onda(fi,ti,x4,z4,x_sensor,z_sensor,omega,q45,v45);
come10(ni,:)= 'Trazo 4 - 5 :';
vtip=[vtip,ti];
vanp=[vanp,an*180/pi];
vesp=[vesp,ess];
athw=(((x_sensor)^(1/2))*((x_sensor-x2)^(3/2)));
vamp=[vamp,ce*ce1*ce2*ce3*vamp(1)/athw];
vtip1=[vtip1,ti];
vamp1=[vamp1,max(abs(fi))];

% Otros resultados
pos_x=[x_fuente,x1,x1,x2,x2,x3,x3,x4,x4,x_sensor];
pos_z=[-z_fuente,-z1,-z1,-z2,-z2,-z3,-z3,-z4,-z4,-z_sensor];
else
    an=0;
    fi=oho*0;
    ti=0;

end

% Otros resultados
tipo=5;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% funcion `onda.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Devuelve el ángulo, el tiempo de llegada, el espacio recorrido, y la
% forma y amplitud del pulso, teniendo en cuenta los fenómenos de atenuación.

function [fi,ti,ang,esp]=onda(fi,ti,x0,z0,x1,z1,omega,q,v);

% Angulo del rayo
ang=(pi/2)-abs(atan((z1-z0)/(x1-x0)));

% Espacio recorrido
esp=sqrt((x1-x0)^2+(z1-z0)^2);

% Tiempo de viaje
ti=ti+esp/v;

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

% Onda incidente
%fi=fi.*exp(i*abs(omega)*(sin(ang)/v)*(x1-x0)+(cos(ang)/v)*(z1-z0));

% Atenuacion
% Perdidas por absorcion
nuevace=v*(1+(1/(pi*q))*(log(abs(omega)/(2*pi))));
atenua=exp(-(abs(omega)*esp)/(2*nuevace*q));
fi=fi.*atenua;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% funcion 'capal.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [fi,an,ce]=capal(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2,capi);

switch capi
case {'PdPd'},
    [coe,coa,van]=pagPd(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(2);
    an=van(2);
    ce=coe(2);
case {'PdSVd'},
    [coe,coa,van]=pagPd(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(4);
    an=van(4);
    ce=coe(4);
case {'PdPu'},
    [coe,coa,van]=pagPd(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(1);
    an=van(1);
    ce=coe(1);
case {'PdSVu'},
    [coe,coa,van]=pagPd(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(3);
    an=van(3);
    ce=coe(3);
case {'PuPd'},
    [coe,coa,van]=pagPu(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(1);
    an=van(1);
    ce=coe(1);
case {'PuSVd'},
    [coe,coa,van]=pagPu(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(3);
    an=van(3);
    ce=coe(3);
case {'PuPu'},
    [coe,coa,van]=pagPu(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(2);
    an=van(2);
    ce=coe(2);
case {'PuSVu'},
    [coe,coa,van]=pagPu(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(4);
    an=van(4);
    ce=coe(4);
case {'SVdPd'},
    [coe,coa,van]=pagSVd(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(2);
    an=van(2);
    ce=coe(2);
case {'SVdSVd'},
    [coe,coa,van]=pagSVd(an,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
    fi=fi*coa(4);
    an=van(4);
    ce=coe(4);

```



```

case { 'SVdPu' },
    [coe, coa, van]=pagSVd(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(1);
    an=van(1);
    ce=coe(1);
case { 'SVdSVu' },
    [coe, coa, van]=pagSVd(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(3);
    an=van(3);
    ce=coe(3);
case { 'SVuPd' },
    [coe, coa, van]=pagSVu(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(1);
    an=van(1);
    ce=coe(1);
case { 'SVuSVD' },
    [coe, coa, van]=pagSVu(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(3);
    an=van(3);
    ce=coe(3);
case { 'SVuPu' },
    [coe, coa, van]=pagSVu(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(2);
    an=van(2);
    ce=coe(2);
case { 'SVuSVu' },
    [coe, coa, van]=pagSVu(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(4);
    an=van(4);
    ce=coe(4);
case { 'aPuPd' }
    [coe, coa, van]=pagaPu(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(1);
    an=van(1);
    ce=coe(1);
case { 'aPuSVD' }
    [coe, coa, van]=pagaPu(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(2);
    an=van(2);
    ce=coe(2);
case { 'aSVuPd' }
    [coe, coa, van]=pagaSVu(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(1);
    an=van(1);
    ce=coe(1);
case { 'aSVuSVD' }
    [coe, coa, van]=pagaSVu(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2);
    fi=fi*coa(2);
    an=van(2);
    ce=coe(2);
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% funcion 'pagSVd.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

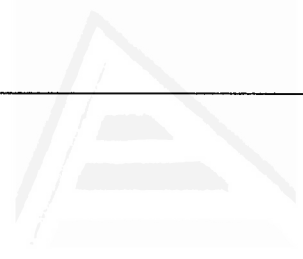
function [coe,coa,van]=pagSVd(an, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2)

% Calculo de los coeficientes
[repr3,an31]=capa(an,1, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2, 'SVdPu');
[repr3,an32]=capa(an,1, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2, 'SVdPd');
[repr3,an33]=capa(an,1, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2, 'SVdSVu');
[repr3,an34]=capa(an,1, vp1, vp2, vs1, vs2, de1, de2, 'SVdSVD');

% Correcciones a las amplitudes y angulos

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales



if isreal(an31)==0
 epr3=0;
 an31=pi/2;
 end
 if isreal(an32)==0
 ept3=0;
 an32=pi/2;
 end
 if isreal(an33)==0
 esr3=0;
 an33=pi/2;
 end
 if isreal(an34)==0
 est3=0;
 an34=pi/2;
 end

 % Calculo de las energias (relativas)
 enei=vs1*de1*cos(real(an));
 enepr=vp1*de1*cos(real(an31))*(epr3^2);
 enept=vp2*de2*cos(real(an32))*(ept3^2);
 enesr=vs1*de1*cos(real(an33))*(esr3^2);
 enest=vs2*de2*cos(real(an34))*(est3^2);

 % Calculo de los coeficientes de energia
 Erp=abs(enepr/enei);
 Efp=abs(enept/enei);
 Ers=abs(enesr/enei);
 Efs=abs(enest/enei);

 % Calculo de los factores de amplitud (solo la parte real)
 epr3=real(epr3);
 ept3=real(ept3);
 esr3=real(esr3);
 est3=real(est3);

 % Agrupación de los datos en vectores
 coe=[Erp Efp Ers Efs];
 coa=[epr3 ept3 esr3 est3];
 van=[an31 an32 an33 an34];

 %%%
 %
 % funcion 'capa.m'
 %
 %%%

 function [fi,an]=capa(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2,capi);

 switch capi
 case {'PdPd'},
 [fi,an]=IssPdPd(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
 case {'PdSVd'},
 [fi,an]=IssPdSVd(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
 case {'PdPu'},
 [fi,an]=IssPdPu(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
 case {'PdSVu'},
 [fi,an]=IssPdSVu(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
 case {'PuPd'},
 [fi,an]=IssPuPd(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
 case {'PuSVd'},
 [fi,an]=IssPuSVd(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
 case {'PuPu'},
 [fi,an]=IssPuPu(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
 case {'PuSVu'},
 [fi,an]=IssPuSVu(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
 case {'SVdPd'},

```

    [fi,an]=IssSVdPd(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
case {'SVdSVd'},
    [fi,an]=IssSVdSVd(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
case {'SVdPu'},
    [fi,an]=IssSVdPu(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
case {'SVdSVu'},
    [fi,an]=IssSVdSVu(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
case {'SVuPd'},
    [fi,an]=IssSVuPd(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
case {'SVuSVd'},
    [fi,an]=IssSVuSVd(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
case {'SVuPu'},
    [fi,an]=IssSVuPu(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
case {'SVuSVu'},
    [fi,an]=IssSVuSVu(an,fi,vp1,vp2,vs1,vs2,de1,de2);
case {'aPuPd'}
    [fi,an]=IsaPuPd(an,fi,vp1,vs1);
case {'aPuSVd'}
    [fi,an]=IsaPuSVd(an,fi,vp1,vs1);
case {'aSVuPd'}
    [fi,an]=IsaSVuPd(an,fi,vp1,vs1);
case {'aSVuSVd'}
    [fi,an]=IsaSVuSVd(an,fi,vp1,vs1);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% funcion 'IssSVdSVd.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Interface solido (1) - solido (2)
% Onda Incidente: SV (1)
% Onda Refractada: SV (2)

function [amplitud,angulo]=IssSVdSVd(ang_i,amp_i,Vp1,Vp2,Vs1,Vs2,dens_1,dens_2)

% Camino optico
p=sin(ang_i)/Vs1;

% Angulo i1
ang_i1=asin(Vp1*p);

% Angulo i2
ang_i2=asin(Vp2*p);

% Angulo j1
ang_j1=ang_i;

% Angulo j2
ang_j2=asin(Vs2*p);

% Aplicacion de las ecuaciones de Zoeppritz
% Calculo de valores intermedios

% Vertical Slowness
mu_P_1=cos(ang_i1)/Vp1;
mu_P_2=cos(ang_i2)/Vp2;
mu_S_1=cos(ang_j1)/Vs1;
mu_S_2=cos(ang_j2)/Vs2;

% Parametros a , b , c ,d
a=dens_2*(1-2*(Vs2^2)*(p^2))-dens_1*(1-2*(Vs1^2)*(p^2));
b=dens_2*(1-2*(Vs2^2)*(p^2))+(2*dens_1*(Vs1^2)*(p^2));
c=dens_1*(1-2*(Vs1^2)*(p^2))+(2*dens_2*(Vs2^2)*(p^2));
d=2*(dens_2*(Vs2^2)-dens_1*(Vs1^2));

```


Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales



```

% Parametros E , F , G , H
E=b*mu_P_1+c*mu_P_2;
F=b*mu_S_1+c*mu_S_2;
G=a-d*mu_P_1*mu_S_2;
H=a-d*mu_P_2*mu_S_1;

% Parametros D
D=E*F+G*H*(p^2);

% Coeficiente de reflexion / refraccion
Crr=(2*dens_1*mu_S_1*E*(Vs1/Vs2))/D;

% Resultados
angulo=ang_j2;
amplitud=amp_i*Crr;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% script 'rayo_rgl.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Onda Rayleigh

% Nomenclatura de los puntos de interes.
% 0 -> Fuente
% 1 -> Punto de reflexion en la superficie
% 2 -> Sensor

% Calculo del camino optico
p=1/Vr;

% Angulo critico que produce una onda evanescente P
an_cri=asin(Vs1/Vp1);

% Cordenadas del punto 1
x1=x_fuente+z_fuente*tan(an_cri);
z1=0;

% Trazo 0 - 1
fi=oho;
ti=0;

% Energia inicial normalizada
enpri=100/(dens_1*Vs1*cos(an_cri)*sum(abs(fi))^2);

[fi,ti,an]=onda(fi,ti,x_fuente,z_fuente,x1,z1,omega,Q_S1,Vs1);
vamp=[enpri*dens_1*Vs1*cos(an)*sum(abs(fi))^2];

% Llegada a la superficie
an=an-0.000000001;
[fi,an]=IsaSVuPd(an,fi,Vp1,Vs1);
vamp=[enpri*dens_1*Vs1*cos(an)*sum(abs(fi))^2];

% Transforma fi al dominio del tiempo
riu2=real(ifft(fftshift(fi)));

num_cic=durs*2*fre_R;
nue_amp=(vamp/enpri)/(2*num_cic);

% Trazo 1 - 2
[fi_x,fi_z,ti]=onda_rg(riu2,ti,x1,z1,x_sensor,z_sensor,fre_R,fre_mu,disp_R,Q_R,Vr,Vg,nue_amp);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% funcion 'onda_rg.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [fi_h,fi_v,ti]=onda_rg(fi,ti,x0,z0,x1,z1,fre,fre_mu,disp,q,vr,vg,nue_amp);

% Amplitud maxima de la onda
A=nue_amp;

% Camino optico
p=1/vr;

% Numero de onda
k=(2*pi*fre)/vr;

% Espacio recorrido en horizontal
esp_h=x1-x0;

% Espacio recorrido en vertical ( Profundidad del sensor )
esp_v=z1;

% Tiempo de viaje total
ti_rgl=ti;
ti=ti+esp_h/vr

% Tiempo de viaje de la onda Rayleigh
ti_rg=esp_h/vr;

% Amortiguamiento horizontal de la onda Rayleigh debida a la profundidad
amor_h=(exp(-0.85*k*esp_v)-0.58*exp(-0.39*k*esp_v));

% Amortiguamiento vertical de la onda Rayleigh debida a la profundidad
amor_v=(0.85*exp(-0.85*k*esp_v)-1.47*exp(-0.39*k*esp_v));

% Dispersion geometrica de las ondas Rayleigh
% Ondas cilindricas
dis_geo=1/sqrt(esp_h);

% Perdidas por absorcion
at=exp(-(2*pi*fre*esp_h)/(2*q*vg));

% Amplitud horizontal de la onda Rayleigh
u1=-A*k;

% Amplitud vertical de la onda Rayleigh
u3=-A*k;

% Amplitud global de las componentes horizontal y
% vertical de las ondas Rayleigh
amplitud_h=u1*amor_h*dis_geo*at;
amplitud_v=u3*amor_v*dis_geo*at;

% Vector de tiempo
tul=ti_rg:1/fre_mu:3*ti_rg;

% Movimiento horizontal de la onda Rayleigh
rt_h=amplitud_h*sin(k*esp_h-k*vr*tul);

% Movimiento vertical de la onda Rayleigh
rt_v=amplitud_v*cos(k*esp_h-k*vr*tul);

% Dispersion de las ondas
y=(2*pi*disp/2)*(tul-(esp_h/vg));
j=(2*pi*disp)*(sin(y)./y);

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

% Movimiento global de la onda Rayleigh horizontal
fi_h=j.*rt_h;

% Movimiento global de la onda Rayleigh vertical
fi_v=j.*rt_v;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% script 'control2.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Convolucionada la señal sintética con la respuesta instrumental
% Después añade ruido a la señal obtenida

muymal=0;
bo1=vesta(1);
bo2=vesta(2);
bo3=vesta(3);
bo4=vesta(4);
bo5=vesta1(1);
bo6=vesta1(2);
%bo7=sscanf(get(b7,'string'),'%f');
bo8=vesta2(1);
bo9=vesta2(2);

if bo1==1
    estacion=1;
elseif bo2==1
    estacion=2;
elseif bo3==1
    estacion=3;
elseif bo4==1
    estacion=5;
else
    muymal=1;
end

if bo5==1
    claseruido=1;
elseif bo6==1
    claseruido=2;
else
    muymal=1;
end

if isempty(bo7)==1
    muymal=1;
end

if bo8==1
    convolu=1;
elseif bo9==1
    convolu=2;
else
    muymal=1;
end
if muymal==0
    queesesto=1;
    [ve,ac,wa,fr]=ftransf1(length(aa),estacion,'99111005',1,1);
    de=sqrt(-1)*2*pi*fr.*ve;

    tfaa=fftshift(fft(aa));
    if convolu==2
        tfcon=tfaa.*wa';
    else
        tfcon=tfaa.*de';
    end
end

```

```

end
aacon=real(iffshift(iffshift(tfcon)));
aacon=sumaruido(estacion,claseruido,aacon,bo7);
[grt1,im5]=grafi_fi2;
pin_tot1;
bixc=-fre_mu/2:fre_mu/(1*length(aacon)):fre_mu/2;
bixc=bixc(1:length(aacon));
figure;loglog(bixc,abs(fftshift(fft(aacon))));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% funcion 'sumaruido.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Suma ruido a una señal de entrada

% al --> Identificación de la estación
% cl --> Tipo de ruido ( Ruido característico o ruido aleatorio )
% se --> Señal de entrada
% sn --> Relación señal ruido
% sel --> Señal de salida

function sel=sumaruido(al,cl,se,sn)

malis=0;
if cl==2
    switch al
        case {1}
            load maig;
            ru=maig';
        case {2}
            load crev;
            ru=crev';
        case {3}
            load puja;
            ru=puja';
        case {5}
            load unip;
            ru=unip';
        otherwise
            malis=1;
    end
else
    ru=rand(1,length(se));
end

if malis==0
    uno=length(se);
    % Se supone que las simulaciones van a ser inferiores a los 100 segundos
    % que duran los registros de ruido.
    ru=ru(1:length(se));
    uno=rmsvalor(se);
    dos=rmsvalor(ru);
    tre1=uno/dos;
    cte_A=tre1/sn;
    ru=cte_A*ru;
    sel=se+ru;
else
    sel=se;
end
end

```



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Apéndice E

Filtrado y deconvolución: Software.

En este apéndice se listan los programas (funciones o scripts) que se han realizado en entorno Matlab para llevar a cabo el proceso de filtrado y deconvolución en el dominio de las wavelet packets. No se encuentran exactamente todos los scripts, sino sólo aquellos que se han considerado más relevantes.

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Script 'caso905.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Realiza la deconvolución de la señal mediante el método DreWP (Parte I).

% Inicializacion

clear;
warning off;
close all;
format long g;
global guarda wav_ent ;
conti=0;

% Parametros

% Fichero de comparación (para el caso de sintéticos)
comparacion=['load ev1545b;'];

% Factor de escalado
load fa1545;

% Fichero:
fichero='ev1545u.wvm';
ruta='C:\Tesis\Toolbox\Sismogramas_Sintéticos\Modelo_de_Tres_Capas\Sismos1\';

% Nombre del fichero entradas y resultados
guarda='ev1523us';

% Numero de canal registrado
% 1 -> Maig
% 2 -> Crev
% 3 -> Puja
% 5 -> Unip

tlgre=5;

% Comparación del pulso inicial
mupuin=450;
mupufi=650;

% Canal a estudiar ( Sintetico = 1 )
canal=1;

% Respuesta instrumental
cana2='d';

% Segundos previos de ruido
cana3=4;

% Abrir el fichero de datos
abrir5;

% Elegir un canal
hu=canal;

% Elegir respuesta instrumental
bu=cana2;

% Determina la señal y la respuesta instrumental
if bu=='v'
    drt='fve';
elseif bu=='a'
    drt='fac';
else
    drt='fde';

```

```

end

hola=['x=se',int2str(hu),''];
eval(hola);

hola=['h=',drt,int2str(hu),''];
eval(hola);

% Directorio para guardar
cd c:\carpeta;

% Numero de segundos aproximado de ruido
% Indices correspondientes a ese tiempo
icet=find(ti<=cana3);
icet=max(icet);

% Carga la señal ideal
eval(comparacion);

% Bucle de ejecución
input('Comenzar el bucle de ejecucion: ');
t0=clock;

% Primer bucle: Selección de método de filtrado (3)

% Segundo bucle: Tipo de wavelet para el filtrado (3)

% Tercer bucle: Tipo de entropia para el filtrado (5)

% Cuarto bucle: Tipo de wavelet para la deconvolucion (4)

% Quinto bucle: Tipo de entropia para la deconvolucion (5)

% Sexto bucle: Niveles de filtrado de ruido (4)

% Séptimo bucle: Niveles de deconvolucion (3)

% Total de combinaciones := (10800)

% Selección del método de filtrado
% Tipo de filtrado de ruido
% 0 -> Soft thresholding
% 1 -> Hard thresholding
% 2 -> Non-Negative Garrote Shrinkage


for metodo=[1,2,3];
    if metodo==0
        cadel='ST;';
    elseif metodo==1
        cadel='HT;';
    else
        cadel='GS;';
    end
end

% Tipo de entropia para el filtrado de ruido

for fentro=[1,2,3,4,5];
    % Forma las cadenas para la formación de las entropias.
    switch fentro
        case 1
            cade2='shannon;';
            fentro1=['','shannon'];
        case 2
            cade2='thr_0.2;';
            fentro1=['','user','jentrop4'];
        case 3
            cade2='dne_0.8;';
            fentro1=['','user','jentrop2'];
    end
end

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales



```

case 4
    cade2='nor_1.1;';
    fentro1=['','norm',1.1);'];
case 5
    cade2='nor_1.9;';
    fentro1=['','norm',1.9);'];
end

% Tipo de wavelet para el filtrado de ruido

for fwave=[1,2,3,4];
% Forma las cadenas para la formacion de las wavelets.
switch fwave
case 1
    cade3='db4;';
    fwave1=[''db4'''];
case 2
    cade3='db10;';
    fwave1=[''db10'''];
case 3
    cade3='db12;';
    fwave1=[''db12'''];
case 4
    cade3='db45;';
    fwave1=[''db45'''];
end
wav_t2=[fwave1,fentro1];

% Tipo de entropia para la deconvolucion

for dentro=[1,2,3,4,5];
% Forma las cadenas para la formacion de las entropias.
switch dentro
case 1
    cade4='shannon;';
    dentro1=['','shannon')'];
case 2
    cade4='thr_0.2;';
    dentro1=['','user','jentrop4')'];
case 3
    cade4='dne_0.8;';
    dentro1=['','user','jentrop2')'];
case 4
    cade4='nor_1.1;';
    dentro1=['','norm',1.1);'];
case 5
    cade4='nor_1.9;';
    dentro1=['','norm',1.9);'];
end

% Tipo de wavelet para la deconvolucion

for dwave=[1,2,3,4];
% Forma las cadenas para la formacion de las wavelets.
switch dwave
case 1
    cade5='db4;';
    dwave1=[''db4'''];
case 2
    cade5='db10;';
    dwave1=[''db10'''];
case 3
    cade5='db12;';
    dwave1=[''db12'''];
case 4
    cade5='db45;';
    dwave1=[''db45'''];
end
wav_t1=[dwave1,dentro1];

```



```

% Numero niveles de ruido para deconvolucion

    for cana4b=[4,5,6]
        cade6=int2str(cana4b);

% Numero niveles de ruido para filtrado

    for cana4=[4,5,6]
        cade7=int2str(cana4);
        % Contador
        conti=conti+1;
        % Nombre del fichero entradas y resultados
        guarda=['cas_',int2str(conti)];
        % Deconvoluciona la señal de entrada
        caso906;
        % Crea cadena de texto para resultados
        if datres(20)>=100
            datres(20)=100;
        end
        if porene>=900
            porene=900;
        end
        if datres(15)>=100
            datres(15)=100;
        end
        if porenel>=900
            porenel=900;
        end
        bonho=['(',cade1,cade2,cade3,cade7,',',cade4,cade5, ...,
            cade6,')'];
        bonha=[sprintf('%0.3g',datres(24)),',',sprintf(' ,...
            '%0.2f',datres(20)),',',sprintf('%0.2f',datres(21)),',', ...,
            ,sprintf('%0.2f',datres(22))];
        bonhal=[sprintf('%0.3g',datres(23)),',',sprintf(' ,...
            '%0.2f',datres(15)),',',sprintf('%0.2f',datres(16)),',', ...,
            ,sprintf('%0.2f',datres(17))];
        bonhi(conti,:)=[''];
        bonhil(conti,:)=[''];
        bonhu=[bonho,bonha];
        bonhu1=[bonho,bonhal];
        bonhi(conti,1:length(bonhu))=bonhu;
        bonhil(conti,1:length(bonhu1))=bonhu1;

        % Guarda cadena de ordenación:
        %Autocorrelación del primer pulso
        datord(conti)=datres(22);
        datord1(conti)=datres(17);
        % Guarda los resultados
        save(guarda,'bonhi','datord','bonhil','datord1');

        % Muestra el contador
        disp(conti);
    end
end
end
end
end
end
end
end

etime(clock,t0)

warning off

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Script 'caso906.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Realiza el filtrado y la deconvolución de la señal mediante el método DreWP (Parte
% II).
% Filtrado previo de la señal mediante wavelet packets

wav_ent=wav_t2;
[fc,est1]=sesio905(x,x(1:icet),cana4,metodo);

% Deconvolucion de la señal en el dominio tiempo-frecuencia

% Factor de atenuacion del ruido
forc=1;

wav_ent=wav_t1;
[s,est2,notos,varian1,varian2]=sesio906(fc,fc(1:icet),h,fre,cana4b,forc);

% Filtrado final de la señal mediante wavelet packets

wav_ent=wav_t2;
[y,est3]=sesio905(s,s(1:icet),cana4,metodo);
y=y*factor(tlgre);
s=s*factor(tlgre);

% Comparacion de datos

% Vector de resultados
datres=[];
estres=[];
varres=[];

% Energia de la señal sin ruido xaa
enexaa=sum((abs(xaa).^2));

% Valor RMS de la señal sin ruido
vrmsxaa=enexaa/length(xaa);

% Relacion señal ruido de la señal inicial x
r11=std(x(1:estoes));
r12=std(x(1:icet));
r13=r11/r12;

% Relacion señal ruido de la señal filtrada
r14=std(fc(1:estoes));
r15=std(fc(1:icet));
r16=r14/r15;

% Relacion señal ruido de la señal deconvolucionada
r17=std(s(1:estoes));
r18=std(s(1:icet));
r19=r17/r18;

% Relacion señal ruido de la señal final
r20=std(y(1:estoes));
r21=std(y(1:icet));
r22=r20/r21;

% Energia de la señal inicial
enex=sum((abs(x(1:estoes)).^2));

% Valor RMS de la señal inicial
vrmsx=enex/length(x(1:estoes));

% Energia de la señal filtrada

```

```

enefc=sum((abs(fc(1:estoes)).^2));

% Valor RMS de la señal filtrada
vrmsfc=enefc/length(fc(1:estoes));

% Energia de la señal deconvolucionada
enes=sum((abs(s(1:estoes)).^2));

% Valor RMS de la señal deconvolucionada
vrms=enes/length(s(1:estoes));

% Energia de la señal final
eney=sum((abs(y(1:estoes)).^2));

% Valor RMS de la señal final
vrmsy=eney/length(y(1:estoes));

% Coeficiente de autocorrelacion entre la señal sin ruido y la señal inicial
corrxaax=corrcoef(xaa,x(1:length(xaa)));
corrxaax=abs(corrxaax(1,2));

% Coeficiente de autocorrelacion entre la señal sin ruido y la señal filtrada
corrxaafc=corrcoef(xaa,fc(1:length(xaa)));
corrxaafc=abs(corrxaafc(1,2));

% Coeficiente de autocorrelacion entre la señal sin ruido y la señal deconvolucionada
corrxaas=corrcoef(xaa,s(1:length(xaa)));
corrxaas=abs(corrxaas(1,2));

% Coeficiente de autocorrelacion entre la señal sin ruido y la señal final
corrxaay=corrcoef(xaa,y(1:length(xaa)));
corrxaay=abs(corrxaay(1,2));

% Coeficiente de autocorrelacion entre la señal sin ruido y la señal inicial (llegada)
corrxaax2=corrcoef(xaa(mupuin:mupufi),x(mupuin:mupufi));
corrxaax2=abs(corrxaax2(1,2));

% Coeficiente de autocorrelacion entre la señal sin ruido y la señal filtrada
(llegada)
corrxaafc2=corrcoef(xaa(mupuin:mupufi),fc(mupuin:mupufi));
corrxaafc2=abs(corrxaafc2(1,2));

% Coeficiente de autocorrelacion entre la señal sin ruido y la señal deconvolucionada
(llegada)
corrxaas2=corrcoef(xaa(mupuin:mupufi),s(mupuin:mupufi));
corrxaas2=abs(corrxaas2(1,2));

% Coeficiente de autocorrelacion entre la señal sin ruido y la señal final (llegada)
corrxaay2=corrcoef(xaa(mupuin:mupufi),y(mupuin:mupufi));
corrxaay2=abs(corrxaay2(1,2));

% Porcentaje de energia perdida o ganada despues de la deconvolucion
porenel=(100*enes)/enexaa;

% Porcentaje de energia perdida o ganada al final
porene=(100*eney)/enexaa;

% Error cuadrático medio cometido entre la señal deconvolucionada y la señal ideal
errxaas=sqrt((1/length(s))*sum((xaa-s').^2));

% Error cuadrático medio cometido entre la señal final y la señal ideal
errxaay=sqrt((1/length(y))*sum((xaa-y).^2));

% Guarda resultados
datres=[datres enexaa vrmsxaa enex vrmsx r13 corrxaax corrxaax2];
datres=[datres enefc vrmsfc r16 corrxaafc corrxaafc2];
datres=[datres enes vrms r19 corrxaas corrxaas2];
datres=[datres eney vrmsy r22 corrxaay corrxaay2];
datres=[datres errxaas errxaay];

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

datres=datres';

% Señales de salida
%senres=[ti(1:estoes);fc(1:estoes);s(1:estoes)'];y(1:estoes)];

% Estructuras de salida
estres=[est1,est2,est3];

% Varianzas de la señal y ruido en la deconvolución
varres=[notos';varian1,varian2];
varres=varres';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Función 'sesio905.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Realiza el filtrado en el dominio de las wavelet packets

% Parámetros de entrada
% se -> señal de entrada
% qq -> señal muestra de ruido
% nume -> máximo nivel de descomposición
% metodo -> tipo de umbralización de los coeficientes

% Parámetros de salida
% bien -> señal filtrada
% t1 -> estructura del mejor árbol.

function [bien,t1]=sesio905(se,qq,nume,metodo);

% Mejor arbol de la señal ruidosa
global wav_ent;

% Coeficientes del arbol para la señal ruidosa.
wav_ent2=['[t,d]=wpdec(se,nume,',wav_ent)];
eval(wav_ent2);

% Calcula el mejor numero de niveles
[t0,d0]=bestlevt(t,d);
nume=treedpth(t0);
[t1,d1,e]=besttree(t0,d0);

% Copia la estructura de datos
d3=d1;

% Arbol de la muestra de ruido

% Coeficientes del arbol para el ruido
wav_ent2=['[t2,d2]=wpdec(qq,nume,',wav_ent)];
eval(wav_ent2);

% Nodos terminales del arbol
% Dibuja arbol
plottree(t1);

% Nodos terminales
n=tnodes(t1);

% Numero de nodos terminales
nu=length(n);

% Inicializacion de variables
vario1=0;
vario2=0;

```

```

% Bucle de filtrado de la señal
for i=1:nu

    % Coeficientes correspondientes a la señal ruidosa
    coefa=wpcoef(t1,d1,n(i));

    % Coeficientes correspondientes al ruido
    coefr=wpcoef(t2,d2,n(i));

    % Calculo de varianza de la señal ruidosa para esta escala.
    vario1=std(coefa);
    vario1=vario1*vario1;

    % Calculo de varianza del ruido para esta escala.
    vario2=std(coefr);
    vario2=vario2*vario2;

    % Calculo del umbral
    thet=sqrt(vario2*2*log(length(coefr)));

    % Crea una copia de los coeficientes obtenidos
    coefb=coefa;

    % Filtrado de la señal
    if metodo==0
        % Soft thresholding
        lok=length(coefb);
        for ty=1:lok
            if abs(coefb(ty))<=thet
                coefb(ty)=0;
            else
                coefb(ty)=coefb(ty)-thet*sign(coefb(ty));
            end
        end
    elseif metodo==1
        % Hard thresholding
        lok=length(coefb);
        for ty=1:lok
            if abs(coefb(ty))<=thet
                coefb(ty)=0;
            else
                coefb(ty)=coefb(ty);
            end
        end
    elseif metodo==2
        % Non-negative garrote shrinkage
        lok=length(coefb);
        for ty=1:lok
            if abs(coefb(ty))<=thet
                coefb(ty)=0;
            else
                coefb(ty)=coefb(ty)-(thet/coefb(ty))^2;
            end
        end
    end

    % Modifica la estructura de datos substituyendo los
    % coeficientes originales por los nuevos coeficientes
    % deconvolucionados.

    [trg,ino,iui]=intersect(d3,coefa);
    trg=min(ino);
    iui=trg+length(coefb)-1;
    d1(trg:iui)=coefb;

% Fin del bucle
end

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

% Reconstruccion de la señal filtrada
bien=wpdec(t1,d1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Función 'sesio906.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Realiza la deconvolución en el dominio de las wavelet packets.

% Parámetros de entrada
% se -> señal de entrada
% qq -> señal muestra de ruido
% hh -> respuesta en frecuencia de los equipos
% fcu ->vector de frecuencias
% nume -> máximo nivel de descomposición
% fuerza -> factor de atenuación del ruido (=1)

% Parámetros de salida
% bien -> señal filtrada
% t1 -> estructura del mejor árbol.
% n -> índices de los nodos del mejor árbol
% varian1 -> varianza asociada a los nodos de la señal
% varian2 -> varianza asociada a los nodos del ruido

function [bien,t1,n,varian1,varian2]=sesio906(se,qq,hh,fcu,nume,fuerza);

% Mejor arbol de la señal ruidosa
global wav_ent;
% Coeficientes del arbol para la señal ruidosa.
wav_ent2=[' [t,d]=wpdec(se,nume,' ,wav_ent)'];
eval(wav_ent2);

% Calcula el mejor numero de niveles
[t0,d0]=bestlevt(t,d);
nume=treedpth(t0);
[t1,d1,e]=besttree(t0,d0);

% Copia la estructura de datos
d3=d1;

% Arbol de la muestra de ruido
% Coeficientes del arbol para el ruido
wav_ent2=[' [t2,d2]=wpdec(qq,nume,' ,wav_ent)'];
eval(wav_ent2);

% Nodos terminales del arbol
% Dibuja arbol
plottree(t1);

% Nodos terminales
n=tnodes(t1);

% Posicion de los nodos terminales ( Nivel + Nodo )
unm=tnodes(t1,'deppos');

% Numero de nodos terminales
nu=length(n);

% Inicializacion de variables
vario1=0;
vario2=0;

% Calcula los indices limites a partir de los cuales

```

```

% los coeficientes pueden ser considerados como ruido

% Frecuencia inferior igual a 1 Hz
in1lim=find(fcu<=1);
in1lim=max(in1lim);

% Frecuencia superior igual a 25 Hz
in2lim=find(fcu>=25);
in2lim=min(in2lim);

% Bucle de deconvolucion de la señal

% Calcula el espectro de la señal de entrada
espse=fftshift(fft(se));
asco=find(abs(hh)==0);
hh1=hh;
for uy=1:length(asco)
    lb=angle(hh(asco(uy)));
    hh1(asco(uy))=1e-15*(cos(lb)+i*sin(lb));
end
l1on1=length(hh1);
l1on2=l1on1/2;
mdhh=hh1(l1on2+1:l1on1);
maxihh=fuerza*max(abs(hh));
mund5=hh1;

% Comienza el bucle
for i=1:nu
    % Calcula los indices de la escala actual relativos al
    % vector respuesta instrumental
    tonto=2^(unm(i,1));
    parte=length(mdhh)/tonto;
    ind1=floor(parte*unm(i,2)+1);
    ind2=ceil(parte*(unm(i,2)+1));
    indir1=l1on2-ind1+1;
    indir2=l1on2-ind2+1;
    ind1=l1on2+ind1;
    ind2=l1on2+ind2;
    mundo=[hh1(indir2:indir1);hh1(ind1:ind2)];
    mund2=[espse(indir2:indir1);espse(ind1:ind2)];
    clear mund3;
    for ohh=1:length(mundo)
        lb=angle(mundo(ohh));
        mund3(ohh)=maxihh*(cos(lb)+sqrt(-1)*sin(lb));
    end

    % Coeficientes correspondientes a la señal ruidosa
    % en el dominio del tiempo
    coefa=wprcoef(t1,d1,n(i));

    % Coeficientes correspondientes al ruido
    % en el dominio del tiempo
    coefr=wprcoef(t2,d2,n(i));

    % Calculo de varianza de la señal ruidosa para esta escala
    % en el dominio del tiempo.
    vario1=std(coefa);
    vario1=vario1*vario1;
    varian1(i)=vario1;

    % Calculo de varianza del ruido para esta escala
    % en el dominio del tiempo.
    vario2=std(coefr);
    vario2=vario2*vario2;
    varian2(i)=vario2;

    % Realiza la deconvolucion atendiendo a ciertas restricciones
    % sobre los coeficientes del nodo actual
    % Atendiendo a la relacion entre las varianzas de la

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales



```

% señal ruidosa y el ruido.
if vario1<vario2
    mund4=mund2./mund3;
else
    mund4=mund2./mundo;
end

% Atendiendo a la zona de frecuencias donde se encuentran
% los coeficientes del nodo actual
if indil<=inl1im
    mund4=mund2./mund3;
end
if indi2>=in21im
    mund4=mund2./mund3;
end

% Modifica la estructura de datos substituyendo los
% coeficientes originales por los nuevos coeficientes
% deconvolucionados.
olps=length(mundo)/2;
mund5(indir2:indir1)=mund4(1:olps);
mund5(indi1:indi2)=mund4(olps+1:2*olps);

% Fin del bucle
end

% Reconstruccion de la señal deconvolucionada
bien=real(ifft(ifftshift(mund5)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% script `abrir5.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Lee el archivo de datos y la respuesta en frecuencia asociada al equipo instrumental

% Inicialización de variables
seguir=0;
infil=1;
pant=1;
declasi;

% Directorio de los ficheros *.wvm
eval(dira);
while seguir==0
    if fichero~=0
        % Abre una pantalla grafica
        if pant==1
           (gcf4=figure('units','pixels','pos',[5 68 530 372]));
            pant=0;
        end

        % Limpia la variable que guarda los datos .
        clear datosr

        % Abre el fichero de datos .
        ruta=change_8(ruta(1:length(ruta)-1));
        opl=['cd ',ruta];
        eval(opl);
        FILE=fopen(fichero);
        frewind(FILE);

        % Variables todavia por determinar
        magic=fread(FILE,1,'int16');
        % Tamaño del paquete de lectura

```



```

    clth=fread(FILE,1,'uint16');
    % Numero de canales
    scan=fread(FILE,1,'int16');
    % Frecuencia de muestreo
    srates=fread(FILE,1,'float32');

    clist=fread(FILE,16,'int16');
    % Ganancia
    gain=fread(FILE,16,'int16');

    % Lectura de datos
    fseek(FILE,1024,-1);
    n=0;
    while ans==0
        n=n+1;
        asd=fread(FILE,[clth,scan],'int16');
        if length(asd)~=0
            datosr(clth*(n-1)+1:clth*n,:)=asd;
        end
        feof(FILE);
    end

    % Resta el offset binario
    datosr=datosr-2048;
    fclose(FILE);
    clear FILE;

    nuid1=size(datosr,1);
    nuid2=ceil(log(nuid1)/log(2));
    nuid3=(2^nuid2)-nuid1;
    nuid4=zeros(nuid3,size(datosr,2));

    estoer=size(datosr,1);
    datosr=[datosr;nuid4];

    clear nuid1 nuid2 nuid3 nuid4;

    trate=1/srates;
    % Graba el vector del eje de ordenadas.
    freq=(0:trate:trate*(size(datosr,1)-1));

    lon=size(datosr,2);

    for t=1:lon
        subplot(lon,1,t);
        plot(freq,datosr(:,t));
        grid on;
    end

    lin=size(datosr,1);
    seguir=1;
else
    seguir=1;
end

end

eval(diro);

% Si se ha seleccionado un fichero correctamente entonces se procede
% a la lectura del fichero de datos .

if fichero~=0
    bhj='se';
    ajh='ti';
    fhj='fre';
    chj='fde';
    dhj='fve';

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales



```

ehj='fac';
hola=[ajh,'=freq;'];
eval(hola);
lono=size(datosr,2);
disp(' ');
disp(['Señal: ',fichero]);
if size(datosr,2)==1
    disp(['Formada por ',int2str(size(datosr,2)),' señal de' ,...
        ,int2str(size(datosr,1)),' datos.']);
else
    disp(['Formada por ',int2str(size(datosr,2)),' señales de ' ,...
        ,int2str(size(datosr,1)),' datos.']);
end

for tl=1:lono
    pzn=[bhj,int2str(tl),'=datosr(:,',int2str(tl),')'];
    eval(pzn);
    if fichero(1)~='9' & fichero(1)~='0'
        [ve,ac,wa,fr]=ftransf(size(datosr,1),tlgre,'99111005',gain,infil);
    else
        [ve,ac,wa,fr]=ftransf(size(datosr,1),tl,fichero(1:8),gain,infil);
    end

    de=sqrt(-1)*2*pi*fr.*ve;
    hola=[chj,int2str(tl),'=de;'];
    eval(hola);
    hola=[dhj,int2str(tl),'=ve;'];
    eval(hola);
    hola=[ehj,int2str(tl),'=ac;'];
    eval(hola);
end

hola=[fhj,'=fr;'];
eval(hola);

end

% Limpia todas variables que no vaya a utilizar .
clear chj dhj ehj fhj ve de ac wa fr seguir infil wd ju
% Limpia todas variables que no vaya a utilizar .
clear ruta hola ajh bhj freq datosr pzn tl ;
% Limpia todas variables que no vaya a utilizar .
clear n ruta hola clth scan srate freq trate magic lon asd lin opl

```



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Apéndice F

Estimación del ángulo azimut: Software.

A continuación se muestran los listados de los programas diseñados en entorno Matlab para realizar el proceso de detección y estimación del ángulo azimut.

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Script 'miauto4.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Realiza una estimación del ángulo azimut

clear

% Obtención de los datos
sbo=obten('00120801.ida');

% Muestras previas de ruido
moo=750;
rui_ti=4;

% Copia de la señal
sb=sbo;

% Filtrado en el dominio de las wavelet packets
sb=detrend(sb,'constant');
sb=fwp(sb,moo,4,'db10','shannon');

% Detección del 'pick'
pto=detecta6(sb,3,0.005)

% Estimación del ángulo de azimut
m=1;
for g=[pto-16,pto]
    si(:,m)=funciona(sbo(g-25:g+25,:));
    kl(m)=g;
    pt(m)=std(compro(sbo(g-25:g+25,:),si(1,m),si(2,m)));

    si(:,m+1)=funciona(sb(g-25:g+25,:));
    kl(m+1)=g;
    pt(m+1)=std(compro(sb(g-25:g+25,:),si(1,m),si(2,m)));

    m=m+2;
end

disp(si);
disp(pt);
disp(kl);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Function 'fwp.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Esta función filtra la señal de entrada mediante la DWPT.

% Parámetros
% sb -> señal de entrada
% mru -> muestras iniciales de la señal que se pueden considerar como ruido.
% niv -> niveles de descomposicion
% wave -> el tipo de wavelet
% entro -> tipo de entropia
% entro2 -> si la entropia necesita un segundo parametro como es el caso de
%         'norm' y 'threshold'
% se_out -> Señal filtrada

% Ejemplos
% sez=fwp(sb,750,4,'db10','norm',1.9);
% sez=fwp(sb,750,4,'db10','shannon');

```

```

function [sb_out]=fwf(sb,mru,niv,wave,entro,entro2)

if nargin==5
    entro2=[];
end

se1=interna(sb(:,1),mru,niv,wave,entro,entro2);
se2=interna(sb(:,2),mru,niv,wave,entro,entro2);
se3=interna(sb(:,3),mru,niv,wave,entro,entro2);

sb_out=[se1;se2;se3]';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function se_out=interna(se_in,mru,niv,wave,entro,entro2)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Coeficientes del arbol para la señal ruidosa.

[t,d]=wpdec(se_in,niv,wave,entro,entro2);

% Calcula el mejor numero de niveles
[t0,d0]=bestlevt(t,d);
niv=treedpth(t0);

% Calcula el mejor árbol
[t1,d1,e]=besttree(t0,d0);

% Copia la estructura de datos
d1b=d1;

% Selecciona una muestra de ruido
qq1=se_in(1:mru);

% Coeficientes del arbol para el ruido
[t1r,d1r]=wpdec(qq1,niv,wave,entro,entro2);

% Calculo de los nodos terminales
n=tnodes(t1);

% Posicion de los nodos terminales (Nivel + Nodo)
unm=tnodes(t1,'depos');

% Numero de nodos terminales
nu=length(n);

% Bucle de filtrado y asignación de matrices
for i=1:nu
    % Filtrado
    %Coeficientes correspondientes a la señal ruidosa
    coefx=wpcoef(t1,d1,n(i));
    % Coeficientes correspondientes al ruido
    coefxr=wpcoef(t1r,d1r,n(i));

    % Calculo de varianza de la señal ruidosa para esta escala.
    vario1=std(coefx);
    vario1=vario1*vario1;

    % Calculo de varianza del ruido para esta escala.
    vario2=std(coefxr);
    vario2=vario2*vario2;

    % Calculo del umbral
    thet=sqrt(vario2*2*log(length(coefxr)));

```

Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales

```

% Crea una copia de los coeficientes obtenidos
coefxc=coefx;

% Shoft Denoising
lok=length(coefxc);
for ty=1:lok
    if abs(coefxc(ty))<thet
        coefxc(ty)=0;
    else
        coefxc(ty)=coefxc(ty)-thet*sign(coefxc(ty));
    end
end

% Modifica la estructura de datos substituyendo los
% coeficientes originales por los nuevos coeficientes
% filtrados.

[trg,ino,iui]=intersect(d1b,coefxc);
trg=min(ino);
iui=trg+length(coefxc)-1;
d1(trg:iui)=coefxc;

% Fin del bucle

end

% Reconstruccion de la señal filtrada
se_out=wprec(t1,d1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Function 'detecta6.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Realiza el proceso de detección en el dominio de las wavelets

% Parámetros
% sb -> señal de tres componentes
% ni1, ni2 -> parámetros de selección
% pto -> muestra donde comienza el primer pulso

function pto=detecta6(sb,ni1,ni2)

warning off;
for th=0:7
    ui=zeros(th,3);
    sbl=[ui;sb];
    [matriz1,matrizx,matrizy,matrizz]=dewav('nombre',sbl,7,'haar');
    x=matrizz(4,:);
    coma=max(x);
    x=x/coma;
    uno1=abs(x(1));
    for t=1:8:length(x)
        uno2=uno1;
        uno1=abs(x(t));
        dig=100*uno1/uno2-100;
        if dig>ni1 & uno2>ni2
            pto(th+1)=t;
            break;
        end
    end
end
end

pto=sum(pto)/8;
warning on;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Function 'funciona.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula el ángulo de azimut a partir del pulso de entrada 'sb'

function ang=funciona(sb)

subt=[1:length(sb)];
matrix=[sb(subt,2) sb(subt,3) sb(subt,1)];

covmat=cov(matrix);
[vec sva]=eig(covmat,'nobalance');
[sva ind]=sort(diag(sva));
vec(:,1:3)=vec(:,ind');
vp(:,1)=vec(:,3);
ang(:,1)=angust(vp(:,1))';
rect=1-(sva(2)/sva(3));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Function 'angust.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula el azimut y el angulo de incidencia a partir del vector propio
% asociado al mayor valor propio.

function angu=angust(vpr)

% Calculo del angulo de incidencia.
angu(2)=(180/pi)*acos(vpr(3));
% Calculo del angulo azimut
angu(1)=(180/pi)*acos(abs(vpr(1))/sqrt(vpr(1)^2+vpr(2)^2));

% Correcciones
if vpr(1)<0 & vpr(2)>0
    angu(1)=180-angu(1);
end
if vpr(1)<0 & vpr(2)<0
    angu(1)=180+angu(1);
end
if vpr(1)>0 & vpr(2)<0
    angu(1)=360-angu(1);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Function 'compro.m'
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Realiza la proyección de las tres componentes sobre la dirección de
% propagación

function co5=compro(sb,the,fii);

z=sb(:,1);
n=sb(:,2);
e=sb(:,3);

col=n/cos(the*pi/180);
    
```

co2=e/sin(the*pi/180);
co3=(co1+co2)/sin(fii*pi/180);
co4=z/cos(fii*pi/180);
co5=co3+co4;

UNIVERSIDAD DE ALICANTE
Comisión de Doctorado

Reunido el Tribunal que suscribe en el día de la fecha
acordó otorgar, por unanimidad la Tesis Doctoral de Don/Dña.
Juan José Galiana Merino la calificación de
Sobresaliente Cum Laude

Alicante 4 de Julio de 2001

El Secretario,

El Presidente,

UNIVERSIDAD DE ALICANTE
Comisión de Doctorado

La presente Tesis de D. JUAN JOSÉ GALIANA
MERINO ha sido registrada al Folio
con el n.º 778-027P del registro de entrada correspondiente.

Alicante 5 de Julio de 2001

El Encargado del Registro,