

# VIII JORNADAS CHILENAS DE SISMOLOGÍA E INGENIERÍA ANTISÍSMICA, VALPARAÍSO, ABRIL, 2002.

## DETECCIÓN DE PROPIEDADES TIEMPO-FRECUENCIA EN REGISTROS SÍSMICOS CHILENOS

Autores: Rubén Boroschek K<sup>1</sup>, Leszek Szczecinski<sup>2</sup>, Daniel Correa<sup>1</sup>,  
Alexis Morales<sup>1</sup>, Rodrigo Rivas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Depto. Ing. Civil, Universidad de Chile, Blanco Encalada 2120, Stgo. , Chile,*  
[rborosch@ing.uchile.cl](mailto:rborosch@ing.uchile.cl)

<sup>2</sup>*INRS-Telecommunications, Canadá*

<sup>3</sup>*Depto. Ing. Eléctrica, Universidad de Chile.*

### RESUMEN

En el presente trabajo se caracterizan los patrones de evolución de frecuencias, amplitudes y singularidades de señales sísmicas chilenas utilizando la Transformada de Fourier por ventanas o espectrograma y la Transformada Wavelet. El estudio se aplica a registros de los terremotos de la Zona Central de 1985, Sur del Perú 2001. Algunas de las conclusiones alcanzadas son las siguientes: frecuencia media del registro para el sismo principal es cercana a 6 Hz, 90% de la energía de la señal se ubica en la banda entre 1.0 y 10 Hz, y la evolución de energía por escalas o bandas de frecuencia presenta poca variación con respecto al registro completo.

### SUMMARY

In the present work time frequency analysis is performed on Chilean seismic signals using the window Fourier and wavelet transform. The study is applied to the Central Zone 1985 and South of Peru 2001 earthquakes. Some conclusions are as follows: the median frequency of the main shock is close to 6 Hz, 90% of signal energy is located between 1.0 and 10 Hz and the energy input by scale or frequency bands present similar variation as that of the main record.

### INTRODUCCION

La caracterización de señales sísmica es un paso previo en el proceso de simulación, adaptación o modificación de registros en situaciones en los que no se cuenta con información apropiada. Los parámetros importantes de la señal a evaluar desde el punto de vista de la ingeniería estructural son la amplitud máxima de aceleración, velocidad y desplazamiento, el valor medio cuadrático y su evolución, la frecuencia predominante, el ancho de banda y su evolución, la duración de registro y de fase fuerte y la evolución de frecuencia entre otras.

En este trabajo se derivarán las propiedades de registros sísmicos utilizando dos técnicas de análisis de evolución tiempo-frecuencia de señales, la Transformada de Fourier por ventanas o espectrograma y la Transformada de Wavelet.

## ANALISIS TIEMPO-FRECUENCIA

El espectrograma es la transformada de Fourier de una señal,  $s_i(\tau)$ , seleccionada a través de múltiples ventanas,  $h(t)$ , centrada en el tiempo  $t$ , de la señal completa  $s(t)$  (Ecuación 1):

$$s_i(\tau) = s(t) * h(\tau - t) \quad (1)$$

La Figura 1 presenta el registro del sismo del Sur del Perú 2001, obtenido en la ciudad de Arica, (Ref 1), su espectrograma y la evolución de la frecuencia al ser analizado con una ventana de análisis de 2 segundos. En la figura del acelerograma se indican la duración de la fase fuerte, líneas verticales, y el valor medio cuadrático del registro, líneas horizontales. El espectrograma presenta en la escala horizontal el tiempo y en la vertical la frecuencia, la escala de colores indica la amplitud del espectro, entre más roja mayor amplitud. Del espectrograma de la señal se aprecia que no existen variaciones bruscas de distribución de frecuencias en el tiempo, es decir no existen pulsos importantes en la señal. La banda de frecuencias más importantes esta localizada bajo los 20 Hz y concentradas principalmente entre los 55 y 80 segundos desde el inicio del registro. Sin embargo se aprecian frecuencias hasta los 30 Hz especialmente en el momento de mayor aceleración. Las curvas de frecuencia presentan la frecuencia media obtenida directamente del espectrograma y calculando el número de cruces por cero del registro. Además se calcula el rango en que se encuentra el 95% de la energía en términos de frecuencia y para cada ventana. De estas curvas se observa que el valor medio de la frecuencia por ventana disminuye en términos relativos durante la fase fuerte hasta unos 5 Hz. Sin embargo la variación no es muy importante por que esta influenciada por la baja amplitud de las señales fuera de la fase fuerte. El valor medio para el registro obtenido del espectro de Fourier es 5.14 Hz y la central derivado de espectro de potencia 5.9 Hz y por medio de los cruces por cero 8.5 Hz. La banda del 90% de energía derivada del espectro de amplitud de Fourier para el registro es de 1.5 a 15.2 Hz.

La identificación de las propiedades del registro depende en gran medida del tamaño de la ventana de análisis, ya que frecuencias menores y mayores y detalles temporales son analizados con una única ventana. Precisamente esta es la limitación principal del método al utilizar una ventana fija, se analiza con igual precisión los detalles de variación relativa rápida y los lentos y por tanto es difícil precisar en un solo análisis la ocurrencia de singularidades puntuales y generales, Cohen (Ref. 3), Correa (Ref. 4), Boroschek et al (Ref. 2). Sin embargo la información entregada es útil y permite una primera aproximación a la caracterización.

La deficiencia mencionada es corregida por la Transformada de Wavelet, la cual analiza la señal con funciones (wavelets), que se ajustan, mediante un algoritmo predeterminado de acuerdo a su escala o dimensión. Existe un gran número de wavelet con distintas características, en la Figura 2 se presenta la wavelet Daubechies de orden 4.

La Transformada de Wavelet (TW) es una proyección de una señal  $s(t)$ , en la base ortonormal de funciones  $\psi_{j,k}(t)$  y  $\varphi_k(t)$ .

$$d_j(k) = \langle s(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (2)$$

$$c(k) = \langle s(t), \varphi_k(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \varphi_k(t) dt$$

Donde las wavelets,  $\psi_{j,k}(t)$ , están relacionadas con la llamada wavelet madre  $\psi(t)$  a través de la ecuación 3, Mallat (Ref. 5) :

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \quad (3)$$

La TW es una herramienta de análisis de señales eficiente ya que existe un procedimiento computacional rápido para el cálculo de los coeficiente wavelet  $d_j(k)$  (llamados detalles, ya que contienen los resultados de una banda de análisis o escala) y  $c(k)$  (que contiene el residuo de la señal) mediante algoritmos recursivos.

Todas las wavelets  $\psi_{j,k}(t)$  son señales pasa banda y debido a que se escalan utilizando el factor  $2^j$  (Ec.(3)) su transformada de Fourier es consistente con las variaciones del parámetro de escala  $j$ .

Dado lo anterior los coeficientes  $d_j(k)$  pueden ser considerados como factores de peso correspondiendo a las distintas bandas de frecuencia definidas por  $j$ , a pesar de que estas, no están totalmente separadas. Debido a que las funciones wavelets son ortogonales para el parámetro de escala  $j$  y para la traslación  $k$ , el Teorema de Parseval es aplicable:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \sum_{j=0}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2 + \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_J(k)|^2 \quad (4)$$

Así se puede establecer que la variación del coeficiente de escala  $j$ , afecta al contenido de la banda definida por esta escala y solo en el instante definido por el coeficiente  $k$ .

Estas características permiten visualizar los detalles  $d_j(k)$ , que corresponden a los niveles  $j$ , de cada señal en el espacio del tiempo y en bandas aproximadamente definidas.

La Figura 3 presentan la señal y su descomposición mediante la Transformada de Wavelet en 7 nivel de detalles y su residuo. Cada detalle se puede asociar con una banda de frecuencia, como se muestra en la figura en el costado derecho. La energía de cada banda se puede obtener mediante la ecuación (4) y se indica en el lado izquierdo de la figura. Cada coeficiente representa la similitud de la señal con la wavelet seleccionada. De esta manera la selección de la wavelet de análisis influye en la interpretación y en las opciones de análisis. Es posible definir wavelet optimizadas para establecer continuidad de la señal, presencia de patrones preestablecidos, entre otros. Además es posible modificar la señal modificando cualquier coeficiente en cualquier escala, sin alterar el registro completo (Ref 1).

La evolución de la amplitud o de energía en cada nivel a su vez puede ser caracterizada

mediante envolventes simple o complejas a partir de los coeficientes de detalle. Como ejemplo, en este trabajo se ha utilizado una aproximación basada una función chi-cuadrado que depende de tres parámetros, Saragoni (Ref 8):

$$E \{ |a(t)|^2 \} = e^{-\alpha t} \beta t^\gamma \quad (5)$$

El estudio de la evolución de la energía en cada nivel permite establecer parámetros descriptivos como su valor medio y desviación estándar en la escala de tiempo y por banda de frecuencia. La función de parametrización de la energía dada por la ecuación (5) ha sido ajustada a la señal completa y para cada detalle de descomposición de la TW y se presenta en la Figura 4. En esta figura se presenta el registro de aceleración, su energía acumulada normalizada, la distribución de energía por escalas, la energía acumulada por detalle y los parámetros de ajuste de la ecuación (5). Del estudio de las curvas se aprecia que el 90% de la energía se encuentra entre los detalles 4 y 7 que corresponden a la banda de frecuencia entre 0.78 y 12.5 Hz. Que los detalles con mayor energía son el 5 y el 6 correspondiente a la banda entre 1.56 y 6.25 Hz. La energía acumulada por detalles indica un comportamiento similar para las escalas sin saltos abruptos. Adicionalmente se observa que la ecuación (5) representa bastante bien la evolución de la energía por escalas.

Una de las ventajas de la Transformada Wavelet es que existe su inversa, la cual está definida por:

$$s(t) = \sum_{j=0}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_j(k) \psi_{j,k}(t) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_J(k) \phi_{J,k}(t) \quad (6)$$

La existencia de la inversa y la facilidad de generar los niveles de detalles permite modificar o generar patrones arbitrarios para distintos niveles y luego reconstruir una señal consistente. Este proceso de reconstrucción no es posible al utilizar el espectrograma ya que no es una representación ortogonal, Cohen (Ref. 2). Sin embargo la representación del espectrograma es más intuitiva ya que representa valores físicos, por el contrario la función wavelet es en general arbitrario y su elección debe ser cuidadosa.

## ANÁLISIS DE REGISTROS SISMICOS

Se ha realizado un análisis estadístico en 53 registros horizontales obtenidos del terremoto de 13 Marzo de 1985 y 23 de Junio de 2001 (Ref 7). Como etapa preliminar, en este trabajo, solo se presentan los resultados de registros en Suelos I y II y no se han incluido la variable de distancia. En Correa (Ref. 4) y Morales (Ref. 6) se puede encontrar un análisis más detallado de los mismos.

En la Tabla 1 se presentan los valores medios que caracterizan el conjunto de registros. De ellos se destaca la similitud entre los registros del año 1985 y 2001. Sin embargo los registros del 2001 poseen una duración de la fase fuerte considerablemente menor y frecuencia central también menor. La frecuencia central observada en los registros es cercana a los 6 Hz. La banda de frecuencias que posee el 90% de energía de los registros es mayor en el caso del terremoto 1985 y de valores extremos más altos. En la Figura 5 se presenta la media de la distribución porcentual de energías por escala para los sismos. La energía de cada banda se ha ubicado con un único valor correspondiente a

la ordenada del centro de la escala. Además se han indicado los valores extremos de cada escala. Ambos sismos presentan la misma distribución de energía y valores extremos diferentes. Es interesante notar que existen registros en los cuales la energía en una sola escala representa el 80% de la energía total del registro. Esta dispersión en los valores medios se debe fundamentalmente a que se han incluido registros provenientes de distancias muy distintas. Cuando estas variables son consideradas la dispersión disminuye considerablemente, (Morales, Ref. 6).

Un aspecto importante es evaluar si la evolución temporal de la energía de cada escala es distinta que la del registro. Esto se puede estudiar preliminarmente estimando la media y desviación estándar temporal de la energía instantánea de la señal en cada escala y comparándola con la del registro completo. La Figura 6 presenta la razón entre la media temporal de cada escala y la del registro asignada a la frecuencia media de la escala. Para valores superiores a 1 Hz se observa que esta razón es muy cercana a uno es decir la media escalar es similar a la media temporal del registro. En la misma figura se presenta los valores máximos y mínimos observados para cada escala vemos que la diferencia máxima sobre 1.5 Hz no es mayor a 1.45.

En la Figura 7 se presenta la razón entre la desviación estándar temporal de la energía de cada escala y la del registro total. Las variaciones en este caso son mayores, en especial para el sismo del 2001. Sin embargo se debe considerar que el número de registro del 2001 es considerablemente menor al del 1985.

**Tabla 1. Características de Registros. Suelos I y II**

<b>PARAMETRO</b>	<b>Sismo Marzo 1985</b>	<b>Sismo Junio 2001</b>	<b>Sismos 1985 y 2001</b>
<b>Número de Registros</b>	39	14	53
<b>Frecuencia Central (Hz)</b>	6.4	5.3	6.1
<b>Frecuencia Cruces Cero (Hz)</b>	6.3	6.4	6.3
<b>Frec. 5% Energía (Hz)</b>	1.2	0.9	1.2
<b>Frec. 95% Energía (Hz)</b>	11.2	9.5	10.7
<b>Ancho Banda 90% Energía (Hz)</b>	9.9	8.6	9.6
<b>Duración Movi. Fuerte (seg)</b>	33	22	30

## **CONCLUSIONES**

El uso de herramienta de análisis de evolución de tiempo frecuencia de registros sísmicos a demostrado ser posible y ventajosa. Los parámetros identificados de eventos chilenos importantes son la amplitud máxima de aceleración, velocidad y desplazamiento, el valor medio cuadrático y su evolución, la frecuencia predominante, el ancho de banda y su evolución, la duración de registro y de fase fuerte y la evolución de frecuencia entre otras.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece el apoyo de la Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y del Proyecto FONDECYT 1000912 para el desarrollo de esta investigación. El apoyo del Ingeniero Pedro Soto es ampliamente reconocida y agradecida.

## REFERENCIAS

1. R. Boroschek, D. Comte, A. Morales, "Características sismológicas e ingenieriles del terremoto de Ocoña del 23 de Junio de 2001". VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Chile, 2002.
2. R. Boroschek, L. Szczecinski, Correa, D., Rivas, R. "Detección de propiedades tiempo-frecuencia en registros sísmicos reales". 2° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, España, 2001.
3. L. Cohen (1995), "Time-Frequency Analysis ", Prentice Hall, First edition.
4. D. Correa (2001), "Identificación de Patrones de Acelerogramas Utilizando Razones de Energía, Espectrogramas y Transformada de Wavelet", Memoria de Título, Universidad de Chile.
5. S. Mallat (1999), "A Wavelet Tour of Signal Processing". Academic Press, Second edition.
6. A. Morales (2002). "Simulación de acelerogramas utilizando la Transformada Wavelet". Memoria de Título Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 2002 (en preparación).
7. Red Nacional de Acelerógrafos, Departamento de Ingeniería Civil Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1985, 2001.
8. G. R. Saragoni (1972), "Nonstationary Characterization and Simulation of Earthquake Ground Motions", Ph. D. Dissertation, U.C.L.A., Los Angeles, California.

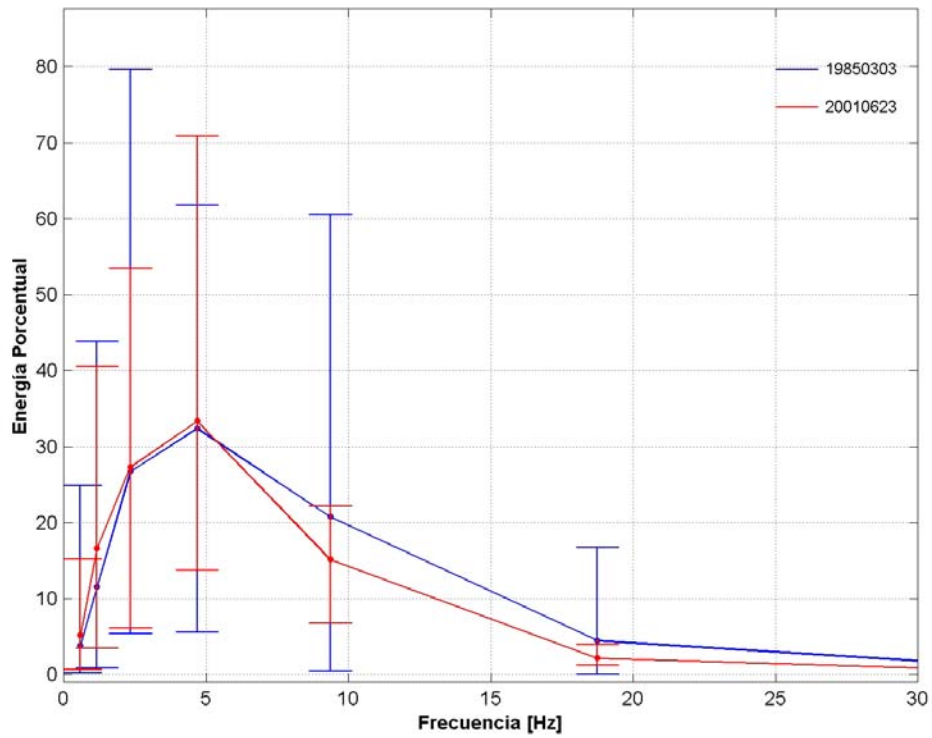


Figura 5. Distribución porcentual de energía por escalas de descomposición de Transformada Wavelet. Se asocia valor al centro de la escala. Registros suelos I y II sismos de Marzo 1985 y Junio 2001.

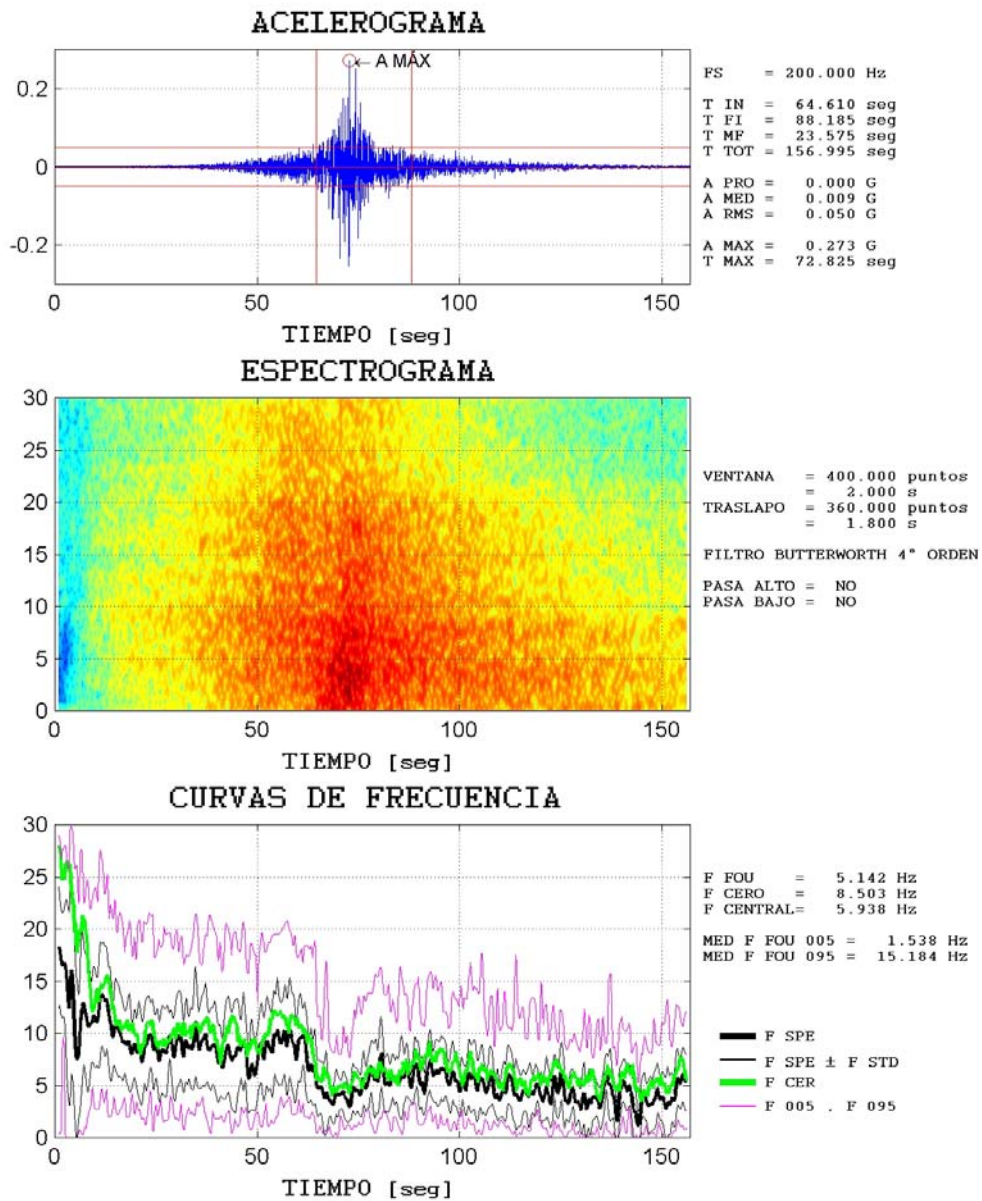


Figura 1. Arriba: registro de aceleración estación Arica Hospital, terremoto Sur del Perú 23/06/01. Centro: Espectrograma. Abajo: curvas de frecuencia media, desviación estándar y 5 y 95% de energía.



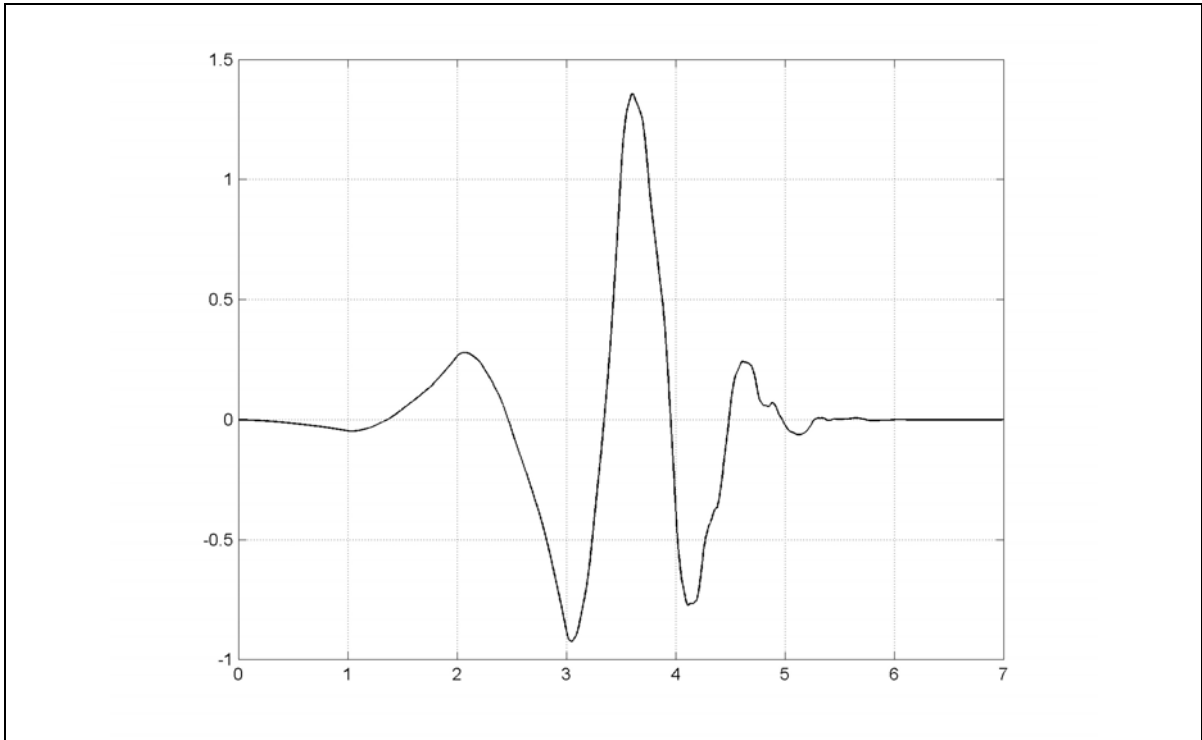


Figura 2. Wavelet Daubechies de orden 4.

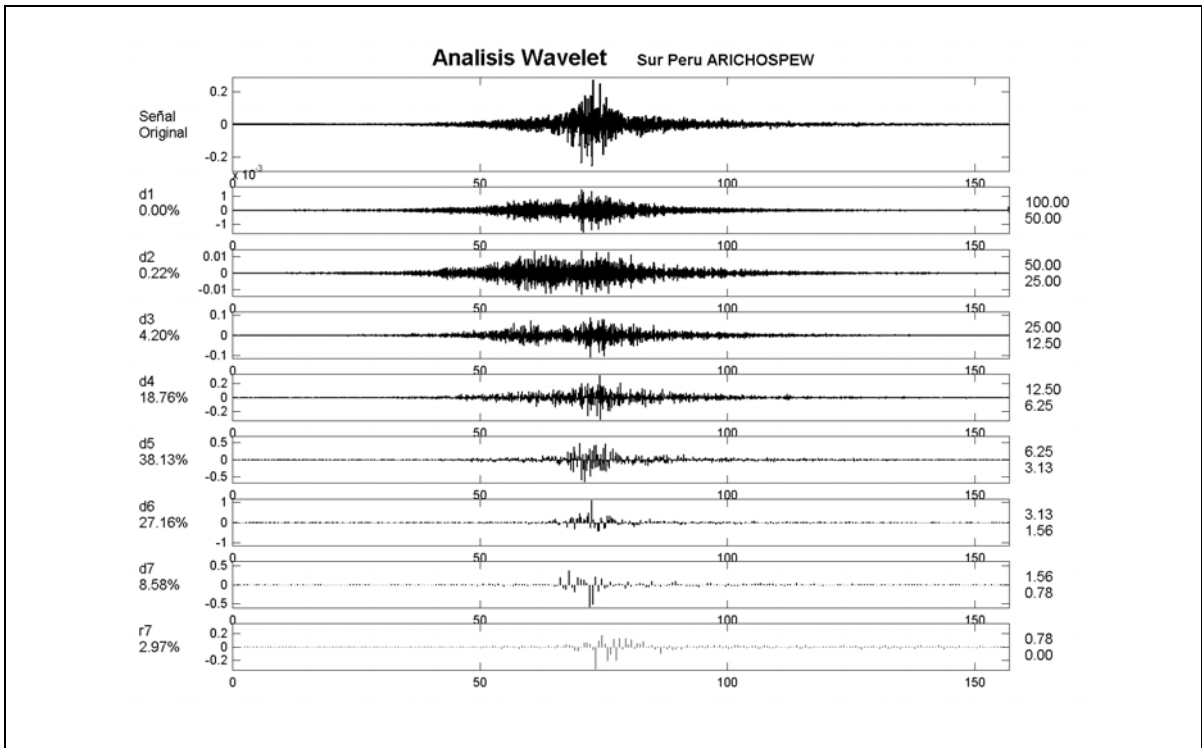
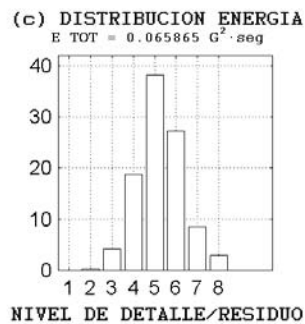
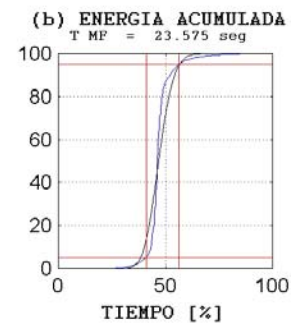
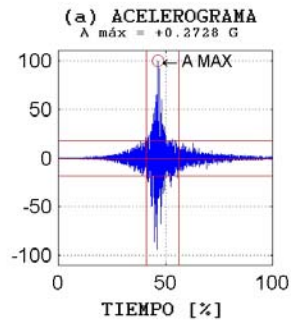


Figura 3. Descomposición Wavelet en 7 niveles de detalles y residuo. Wavelet utilizada Daubechies orden 10. Energía de cada escala en lado derecho. Banda aproximada de frecuencias en lado izquierdo.



(e) TABLA RESUMEN ENERGÍA

NIV	FMIN (Hz)	FMAX (Hz)	ENERGÍA (G <sup>2</sup> ·seg)	ENERGÍA (%)
1	50.00	100.00	1.51E-006	0.002
2	25.00	50.00	1.42E-004	0.216
3	12.50	25.00	2.77E-003	4.199
4	6.25	12.50	1.24E-002	18.756
5	3.13	6.25	2.51E-002	38.128
6	1.56	3.13	1.79E-002	27.157
7	0.78	1.56	5.65E-003	8.576
r	0.00	0.78	1.95E-003	2.965

NIV	ALFA (Hz)	BETA (G <sup>2</sup> ·seg)	GAMA
4	0.631882	+4.72E-070	46.164182
5	1.043747	+1.79E-112	76.163012
6	1.768059	+2.33E-188	129.194020
7	1.457055	+2.06E-153	104.856120

Figura 4. Parametrización de detalles de la Transformada Wavelet. (a) Señal original, (b) Energía acumulada de la señal, (c) Energía acumulada de los detalles, (e) Tabla resumen energía y parámetros de ajuste de función chi-cuadrado.

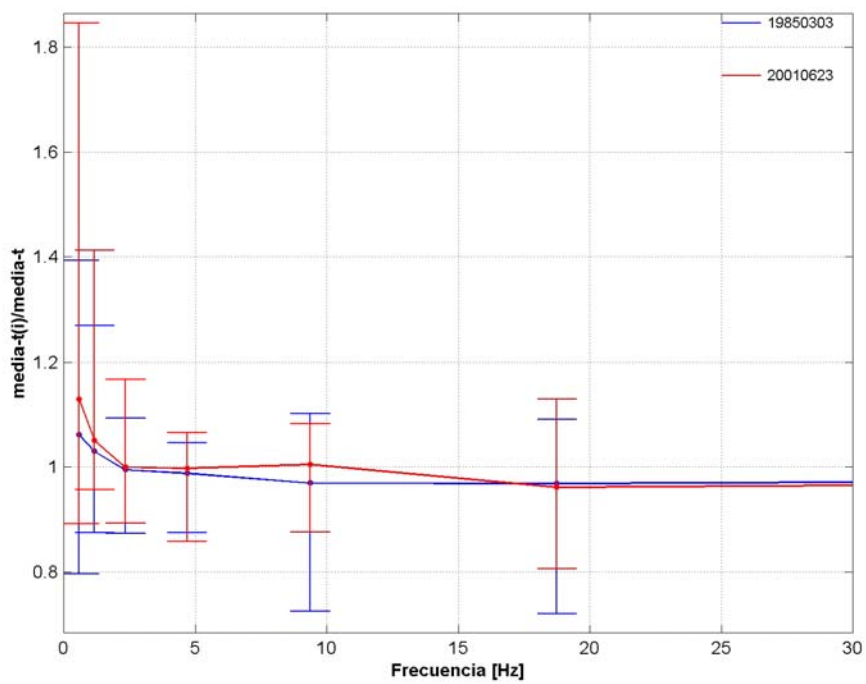


Figura 6. Valor medio y extremos de la razón entre la media temporal de la escala y la señal completa para los registros de suelo I y II de los sismos de Marzo 1985 y Junio 2001.

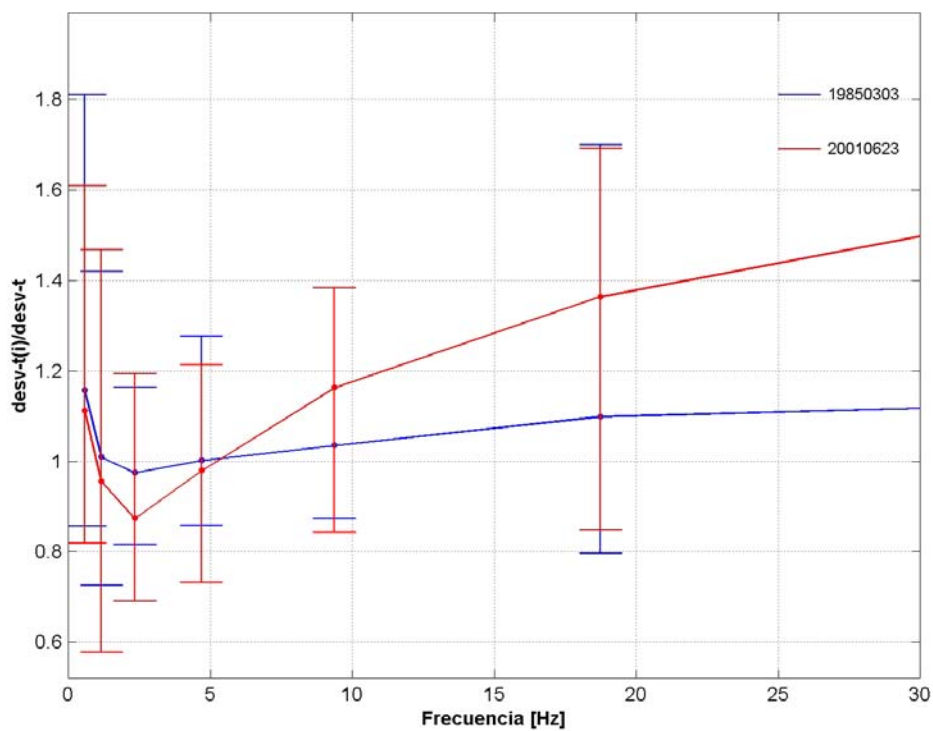


Figura 7. Valor medio y extremos de la razón entre la media temporal de la escala y la señal completa para los registros de suelo I y II de los sismos de Marzo 1985 y Junio 2001.