

CARACTERÍSTICAS TIEMPO FRECUENCIA DE LOS REGISTROS DEL TERREMOTO DE MW=8.4 DEL 23 DE JUNIO DEL 2001 EN EL SUR DEL PERÚ

Rubén L. Boroschek
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile
Blanco Encalada 2120, Piso 4
Tel: (562) 6784372 (562) 6892833
rborosch@ing.uchile.cl

RESUMEN

El terremoto Mw= 8.4, del 23 de Junio del 2001 afectó al Sur del Perú y Norte de Chile en forma severa. Se registraron 75 muertes, 90 000 damnificados y daños en infraestructura: destrucción de puente, carreteras, sistemas de agua y alcantarillados y un número importante de centros de salud.

Este terremoto es el más fuerte ocurrido en la región y uno de los más severos ocurridos en una zona de subducción en el planeta en los últimos años. El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile posee en el norte de Chile una red de 20 instrumentos de registro de terremotos de los cuales ocho registraron movimientos importantes en este evento.

Estos registros y sus características son descritos en este trabajo utilizando técnicas en el espacio del tiempo y la frecuencia en especial la Transformada Wavelet. Entre las características importantes observadas en este evento destaca las amplitudes relativamente mayores de aceleración, 0.31 y 0.33 g en Arica, ubicada a una distancia a 200 km de la zona de ruptura y más de 300 km del epicentro. Entre las características identificadas se encuentra: amplitud y parámetros de envolvente de amplitudes en el tiempo y en función de banda de frecuencia preestablecida, frecuencia características y su evolución, energía y duración.

La identificación de estas características es fundamental para la comprensión del daño observado y para la simulación de eventos de este tipo.

CARACTERÍSTICAS TIEMPO FRECUENCIA DE LOS REGISTROS DEL TERREMOTO DE MW=8.4 DEL 23 DE JUNIO DEL 2001 EN EL SUR DEL PERÚ

INTRODUCCION

El terremoto Mw= 8.4, del 23 de Junio del 2001 afectó al Sur del Perú y Norte de Chile en forma severa. Se registraron 75 muertes, 90 000 damnificados y daños severos en infraestructura: destrucción de puente, carreteras, sistemas de agua y alcantarillados, un número importante de centros de salud.

Este terremoto es el más fuerte ocurrido en la región y uno de los más severos ocurridos en una zona de subducción en el planeta en los últimos años. El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile posee en el norte de Chile una red de 20 instrumentos de registro de terremotos de los cuales ocho registraron movimientos importantes en este evento.

La caracterización de señales ha sido un tema de discusión y análisis extenso en ingeniería sismorresistente, si bien las variables más comunes a considerar son las amplitudes máximas de aceleración, velocidad y desplazamiento, es posible con el uso de registros digitales y de computadores, la obtención de otros parámetros como son: el valor medio cuadrático, la frecuencia predominante, el ancho de banda de frecuencias predominantes, la duración de registro y de fase fuerte, la energía (su magnitud, su evolución en tiempo y frecuencia) y las asociadas a la demanda en osciladores de un grado de libertad como el espectro de respuesta lineal y no lineal y la aceleración y velocidad efectivas.

En este trabajo se derivarán las propiedades de registros sísmicos obtenidos utilizando la Transformada de Wavelet que permite observar la evolución tiempo-frecuencia de señales. Si bien existen otras técnicas para el análisis tiempo frecuencia. Se utilizan esta por su potencial en el proceso de simulación de registros sísmicos.

ANALISIS TIEMPO - FRECUENCIA

La Transformada de Wavelet (TW) es una de las herramientas disponibles para el análisis tiempo – frecuencia. Una excelente presentación de estas técnicas se puede encontrar en Cohen (1995) y Iyama, Kuwamura (1999). En términos generales la TW descompone la señal en bandas (llamadas escalas o detalles) las cuales a su vez son subdivididas temporalmente. Esta descomposición se realiza a través de funciones predefinidas llamadas ondeletas o wavelets, las que se ajustan, mediante un algoritmo predeterminado de acuerdo a su escala o dimensión.

La Transformada de Wavelet es una proyección de una señal $s(t)$, en la base ortonormal de funciones $\mathbf{y}_{j,k}(t)$ y $\mathbf{j}_k(t)$:

$$\begin{aligned}d_j(k) &= \langle s(t), \mathbf{y}_{j,k}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \mathbf{y}_{j,k}(t) dt \\c(k) &= \langle s(t), \mathbf{j}_k(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \mathbf{j}_k(t) dt\end{aligned}\tag{1}$$

donde las wavelets, $\mathbf{y}_{j,k}(t)$, están relacionadas con la llamada wavelet madre $\mathbf{y}(t)$ a través de la ecuación, Mallat (1999) :

$$\mathbf{y}_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \mathbf{y}\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right) \quad (2)$$

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, Mallat (1999).

Todas las wavelets $\mathbf{y}_{j,k}(t)$ son señales pasa banda y debido a que se escalan utilizando el factor 2^j (Ec.(2)) su transformada de Fourier es consistente con las variaciones del parámetro de escala j . Para ilustrar este punto en la Figura 1 se presenta la Transformada de Fourier de las funciones $\mathbf{y}_{j,k}(t)$ para $j=0, \dots, 5$ y k arbitrarios utilizando la wavelet Daubechies de orden 10, Mallat (1999).

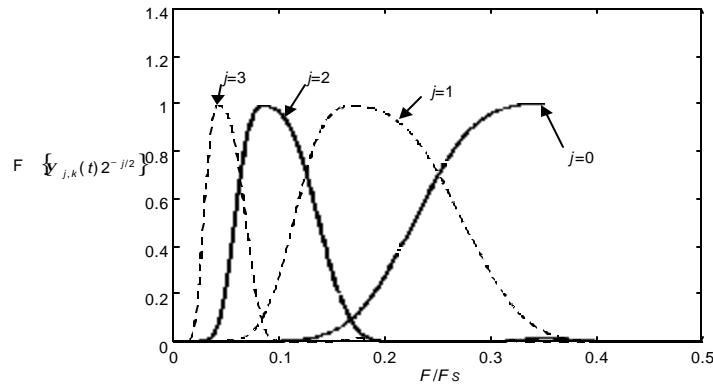


Figura 1: Transformada de Fourier de wavelet Daubechies de orden 10; la frecuencia ha sido normalizada a la frecuencia de muestreo F_S .

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, como muestra la Figura 1, 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:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \sum_{j=0}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2 + \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_j(k)|^2 \quad (3)$$

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 2 y la Figura 3 presentan los resultados de la Transformada Wavelet de una función seno de amplitud constante con frecuencia linealmente variable entre 2 y 12 Hz. En la Figura 2 se presenta la señal y su descomposición en 8 nivel de detalles. Cada detalle se puede asociar con una banda de frecuencia, como se muestra en la parte superior de la figura. La energía de cada banda se puede obtener mediante la ecuación (3) y se indica a en lado inferior

en la figura. Adicionalmente se puede calcular la energía acumulada en función del tiempo, Figura 3d.

Los niveles de energía a su vez pueden ser caracterizados mediante envolventes simples o complejas. Como ejemplo, en este trabajo se ha utilizado una aproximación basada una función chi-cuadrado que depende de tres parámetros, Saragoni (1972):

$$E\{|a(t)|^2\} = e^{-at} \mathbf{b}^g \quad (4)$$

Otras formas de parametrizar la energía se presentan en Rivas (2001). Esta función de parametrización de la energía ha sido ajustada a la señal completa y para cada detalle de descomposición de la TW y se presenta en la Figura 3b y d respectivamente.

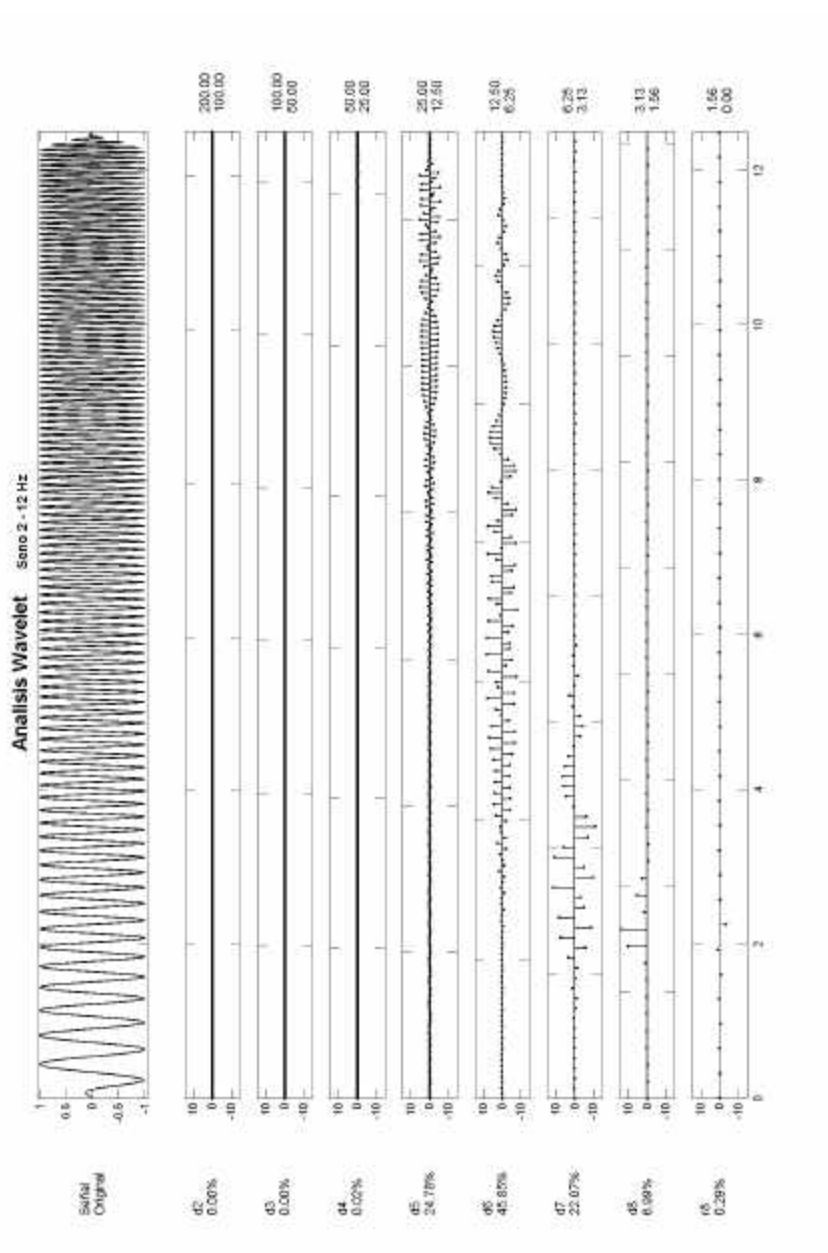


Figura 2: Transformada Wavelet en 7 Niveles de Detalle utilizando funciones Daubechies de orden 10.

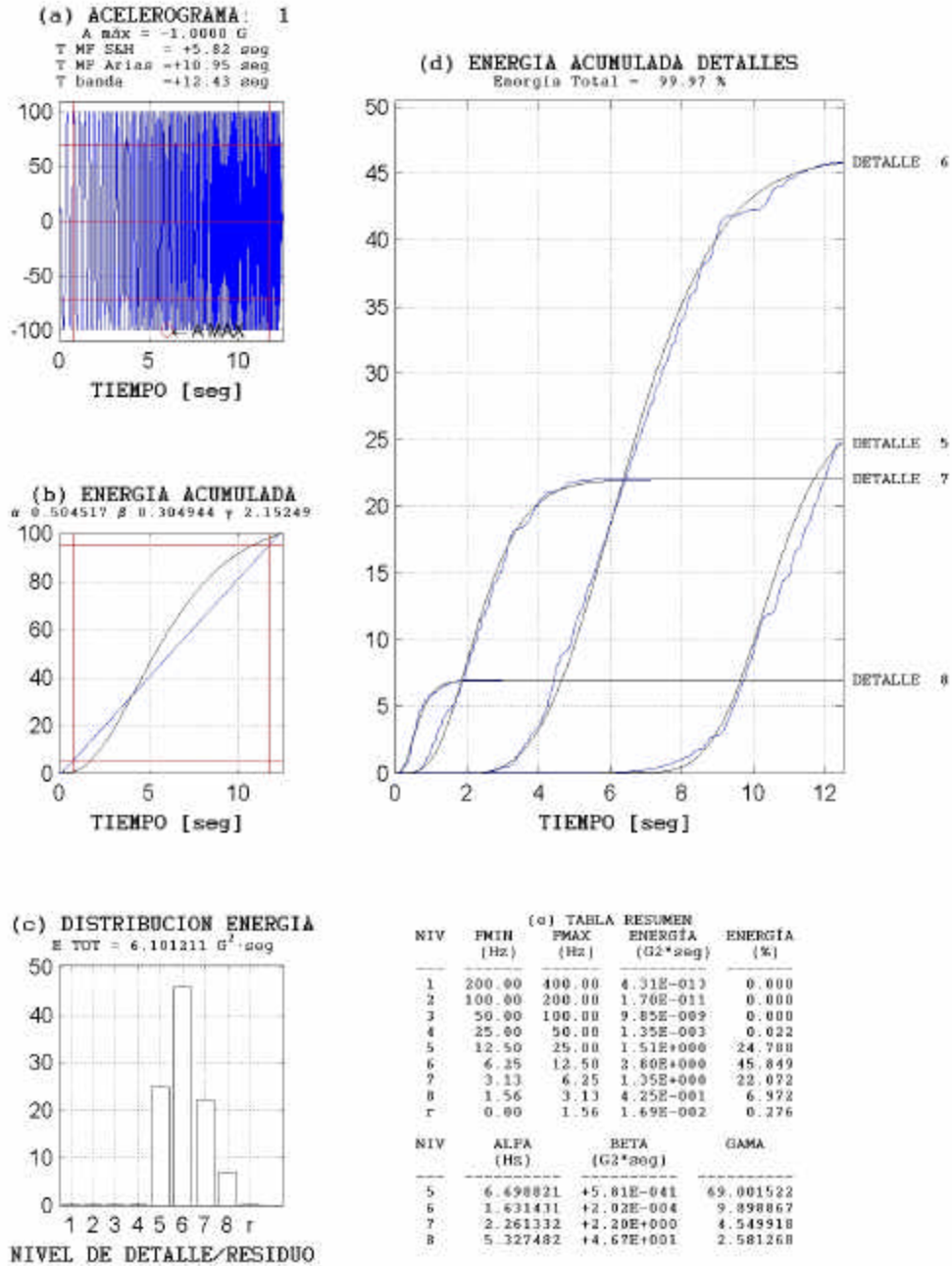


Figura 3: Parametrización de detalles de la Transformada Wavelet. (a) Señal original, (b) Energía acumulada de la señal y aproximación utilizando ecuación (4), (c) Energía acumulada de los detalles con mayor energía en la descomposición wavelet y aproximación utilizando ecuación (4), (d) Distribución de energía por detalles, (e) Tabla de resumen energía y parámetros de ajuste de función chi-cuadrado.

Una de las ventajas de la Transformada Wavelet es que existe su inversa, la cual está definida por la ecuación (5).

$$s(t) = \sum_{j=0}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_j(k) \mathbf{y}_{j,k}(t) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_J(k) \mathbf{j}_{J,k}(t) \quad (5)$$

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. Por este motivo ha sido utilizada para simular eventos sísmicos Iyama, Kuwamura (1999), Rivas (2001).

ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS TIEMPO – AMPLITUD

El evento principal del terremoto en estudio fue registrado por la Red Nacional de Acelerógrafos de la Universidad de Chile, (RENADIC, 2001) en las localidades de Arica, Poconchile, Putre, Cuya, Pisagua, CISMID en Moquegua, Perú y un instrumento digital en la ciudad de Arica de un proyecto conjunto ORSTOM - Universidad de Chile . La Figura 1 presenta los registros horizontales obtenidos, por acelerógrafos analógicos Kinematics SMA-1, por RENADIC. Las aceleraciones y velocidades máximas horizontales y verticales observadas, el valor de raíz media cuadrática de la duración de fase fuerte, la duración de fase fuerte asociada a 90% de la energía de la Integral de Arias, la energía total y frecuencia central del registro filtrado entre 0.15 y 25 Hz, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. AMPLITUD Y ENERGIA

ESTACION	A max	A rms	Tiempo MF Arias	Tiempo MF > 0.05g	Energía	V max	Frecuencia Central
	(g)	(g)	(seg)	(seg)	(g*g * seg)	(cm/s eg)	(Hz)
Arica Cost.060	-0,33	0,06	20,40	25,76	0,09	23,96	2,93
Arica Cost.330	-0,28	0,06	22,95	31,17	0,08	19,29	3,15
Arica Casa.140	-0,27	0,06	22,94	30,23	0,09	21,05	3,73
Arica Casa.050	0,31	0,06	23,29	38,78	0,11	22,96	4,34
Cuya.210	0,14	0,03	35,27	24,55	0,04	7,91	4,77
Cuya.120	-0,16	0,04	30,33	27,12	0,05	9,22	4,76
Poconchile.170	0,25	0,05	18,06	23,24	0,05	29,14	4,33
Poconchile.080	0,26	0,06	17,09	23,11	0,07	29,15	3,54
Putre.080	0,20	0,05	14,29	16,42	0,04	10,74	4,16
Putre.150	-0,19	0,05	15,42	16,67	0,04	10,73	3,44
Arica Cost.ver	-0,08	0,02	33,10	18,65	0,01	6,79	6,95
Arica Casa.ver	0,18	0,03	29,69	21,92	0,04	12,77	8,14
Cuya.ver	-0,06	0,02	42,76	13,16	0,01	3,85	7,55
Poconchile.ver	-0,14	0,03	24,45	24,73	0,02	14,98	5,72
Putre.ver	0,09	0,02	15,74	8,60	0,01	5,19	4,49

Si se considera que la distancia epicentral promedio entre las estaciones de registros es cercana a los 450 kilómetros, los valores de aceleraciones y velocidades máximas obtenidas son considerablemente mayores a los observados en otros eventos sísmicos nacionales. Por ejemplo las aceleraciones máximas registradas en las tres estaciones de Arica, 0.33 y 0.31 g, son mayores a las que se estiman con las curvas de atenuación usualmente utilizadas, aunque

dichas curvas normalmente no consideran distancias superiores a los 300 km. Los valores de duración de movimiento fuerte, cercanos a los 30 segundos, conjuntamente con las amplitudes máximas muestran la severidad de este evento. Un aspecto observado en otros eventos del sector es la relativa alta frecuencia predominante en los registros horizontales, 3 a 5 Hz, y verticales, 6 a 9 Hz. Estas frecuencias son menores a las derivadas de contar los cruces por cero del registro que para el movimiento horizontal resulta entre 4 y 8 Hz y el vertical entre 8 y 10 Hz. Estas características explican en parte las bajas velocidades para las altas aceleraciones observadas y las características de los daños que se presentan en la región.

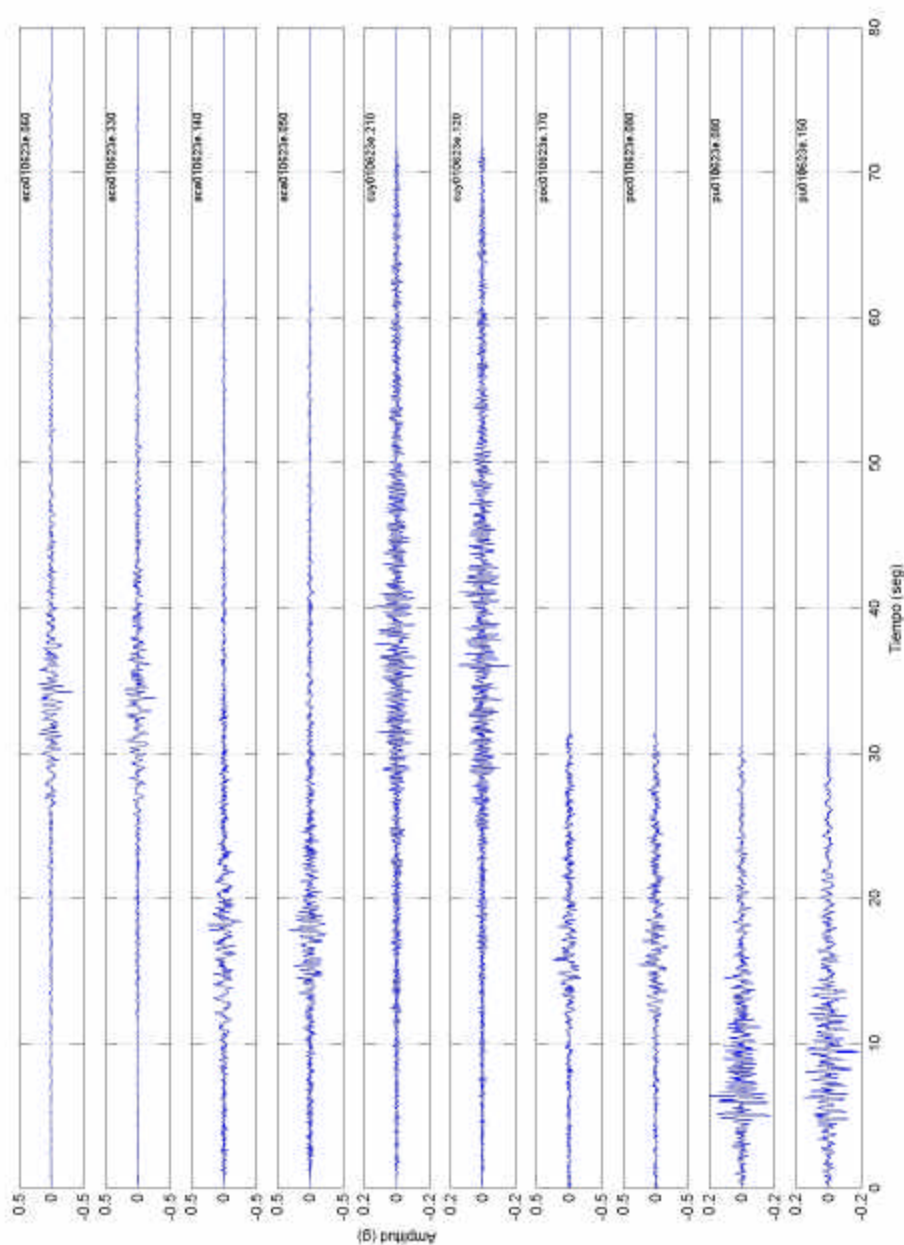


Figura 4. Registros horizontales 24 de Junio 2001, RENADIC. El origen de tiempo no es común. Debido a que los instrumentos de registro son analógicos no cuentan con una duración o inicio común.

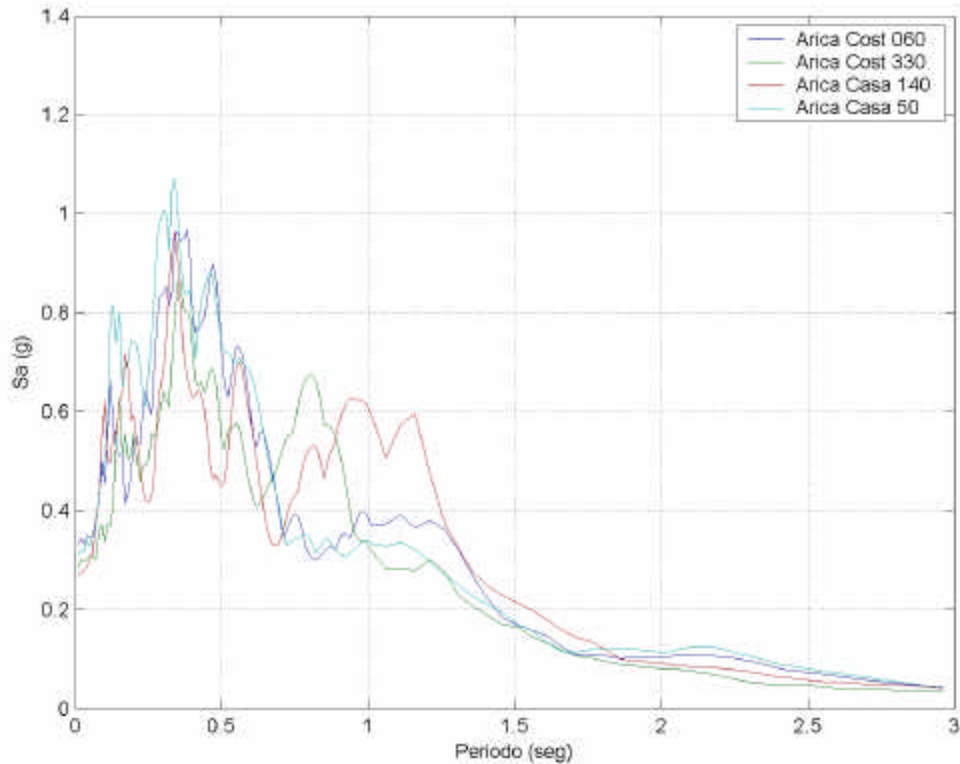


Figura 5. Espectro de Respuesta 5% amortiguamiento crítico.

Los espectros de respuesta asociados a un 5% de razón de amortiguamiento crítico para los dos registros más severos se presentan en las Figura 2. El tipo de suelo de cada estación es relativamente compacto con velocidades de onda corte promedio en los 30 metros superficiales, entre 400 y 600 m/seg. Se puede apreciar que la demanda es importante en el rango de períodos de 0.2 hasta 1.3 segundos, con especiales amplificaciones en 0.3 y 1 segundos. Esta característica permite explicar el daño observado en la ciudad de Arica en estructuras débiles de adobe y albañilería y algunas estructuras altas. Otros antecedentes sobre estos registros se pueden obtener en Boroschek, (2002) y Comte et al., (2002).

ANÁLISIS TIEMPO – FRECUENCIA

Se ha utilizado la Transformada de Wavelet para estudiar la evolución temporal de la energía en los distintos registros analógicos. Como se mencionó anteriormente esta no es la única técnica para estudiar esta evolución, pero presenta la ventaja de permitir la síntesis de este tipo de eventos. En este trabajo se presentan los reconstruidos detalles (no los coeficientes de descomposición si no su inversa en el tiempo), otros estudios se pueden encontrar en Morales (2001). Dado que los registros presentan comportamientos generales similares solo se presenta la descomposición wavelet y algunos de los parámetros derivados para el registro obtenido en Arica sector Casa (aca010623) en una dirección horizontal y la vertical, ambos filtrados entre 0.1 y 25 Hz, Figuras 6 y 7. De estas figuras y los registros se puede apreciar lo siguiente:

1. La energía total del registro horizontal, Figura 6b, tiene una evolución temporal relativamente rápida con un crecimiento de un 40%, de la energía total del registro, en

menos de 5 segundos. En el registro vertical, Fig. 7b, este crecimiento es mucho más lento, aproximadamente 25 segundos.

2. En el registro horizontal más del 90% de la energía se acumula en una banda de frecuencia de 0.78 a 12 Hz, lo que corresponde a las escalas 4 a 7. Siendo la banda con mayor energía la 1.56 a 3.13 Hz, (e). En el registro vertical las frecuencias son mayores, con un 90% de la energía entre 0.78 y 25 Hz (y por tanto están afectada por el filtro pasa bajos). No se aprecia una escala con predominio de la energía.
3. La evolución de energía por escala en el registro horizontal, Figura 6d, indica que las escalas mayores, frecuencias menores, tienen crecimientos bruscos de la energía en una duración menor a los 3 segundos. Por el contrario las frecuencias altas tienen una evolución mucho más lenta a lo largo de todo el registro. En el registro vertical se aprecia una situación aun más marcada de diferencia entre bandas de frecuencia. Esta característica, observada en todos los registros se puede asociar a que este sismo se caracterizó por unos pocos pulsos de gran energía acompañado de un ambiente de vibraciones de relativa alta frecuencia que recorrió toda el área.

En la Figura 8 se compara, para el registro vertical, la evolución temporal por bandas de frecuencia derivadas del registro, y para la aproximación, utilizando la envolvente paramétrica normalizada a un energía unitaria. Al normalizarse estas curvas es clara la diferencia en las evolución real y las dificultades que tiene la aproximación paramétrica en detectar estos cambios brusco de energía. Si esta restricción no es importante la función paramétrica del registro completo es una buena aproximación para simular las distintas niveles de detalle.

CONCLUSIONES

Se ha registrado uno de los eventos más importante de las ultimas décadas en una zona de subducción. Si bien los registros analizados están a distancias relativamente mayores, sus características destructivas son importante.

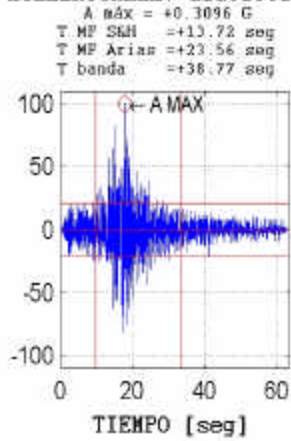
Del estudio se corrobora la relativa alta frecuencia de los registros sísmicos de la zona de subducción peruana y chilena, con frecuencias entre lo 4 y 6 Hz horizontales y 5 y 10 verticales y sus altas aceleraciones y relativas bajas velocidades.

La evolución de las frecuencias de los registros indica que las frecuencias mayores tienen evoluciones relativamente suaves. Por el contrario las frecuencias baja presentan concentraciones de energía. La evolución de energía del registro completo se correlaciona bien con la evolución de energía en las bandas de frecuencia estudiadas, sin embargo si se desea realizar una simulación de estos eventos es convenientes establecer distintos patrones de evolución para las distintas bandas de frecuencias.

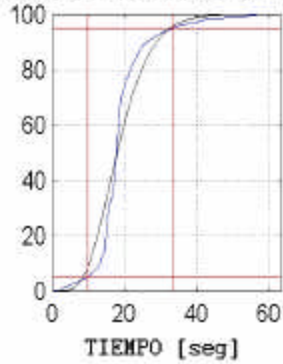
AGRADECIMIENTOS

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.

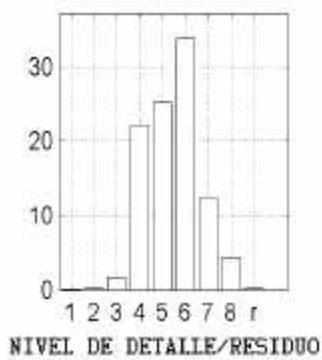
(a) ACELEROGRAMA: aca010623e.050



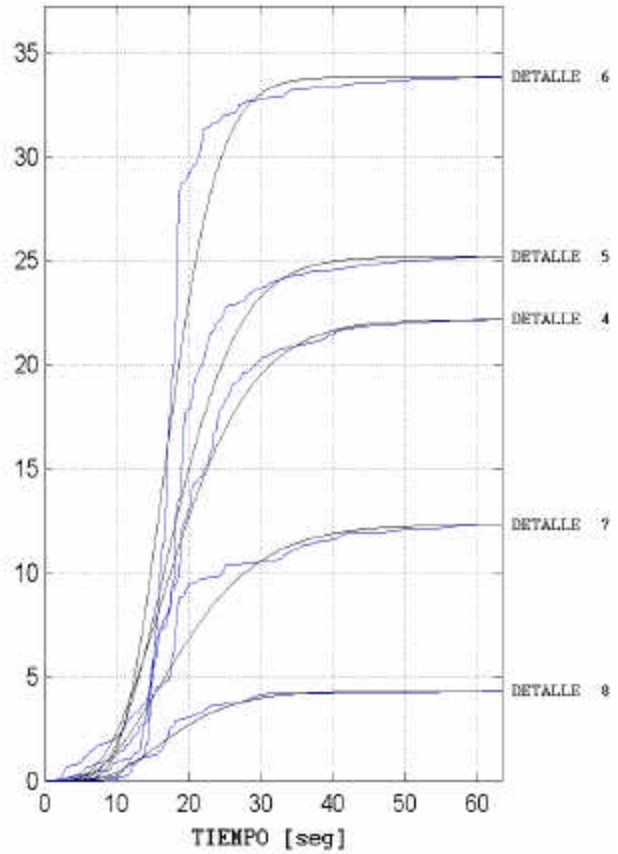
(b) ENERGIA ACUMULADA
 α 0.340838 β 3.72121e-007 γ 5.46618



(c) DISTRIBUCION ENERGIA
 $E_{TOT} = 0.106331 G^2 \cdot seg$



(d) ENERGIA ACUMULADA DETALLES
 Energia Total = 100.00 %



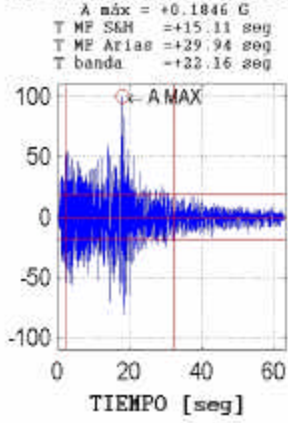
(e) TABLA RESUMEN

NIV	FMIN (Hz)	FMAX (Hz)	ENERGIA (G ² *seg)	ENERGIA (%)
1	50.00	100.00	1.35E-005	0.013
2	25.00	50.00	2.44E-004	0.230
3	12.50	25.00	1.77E-003	1.663
4	6.25	12.50	3.36E-002	22.187
5	3.13	6.25	2.68E-002	25.207
6	1.56	3.13	3.60E-002	33.848
7	0.78	1.56	1.31E-002	12.309
8	0.39	0.78	4.57E-003	4.301
r	0.00	0.39	3.59E-004	0.243

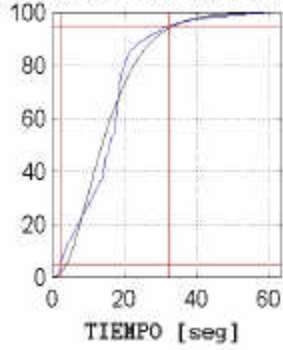
NIV	ALFA (Hz)	BETA (G ² *seg)	GAMA
4	0.266342	+6.64E-007	4.239614
5	0.381992	+1.83E-005	6.307734
6	0.630716	+2.87E-011	10.273973
7	0.232442	+9.59E-007	3.674576
8	0.344599	+3.13E-008	5.389953

Figura 6. Descomposición y reconstrucción wavelet de registro Arica Casa horizontal.

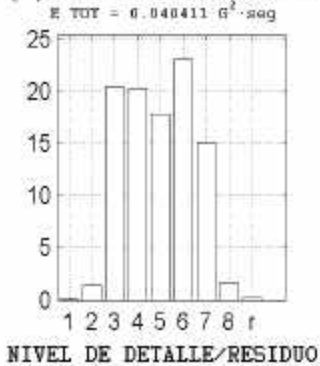
(a) ACELEROGRAMA: aca010623e.ver



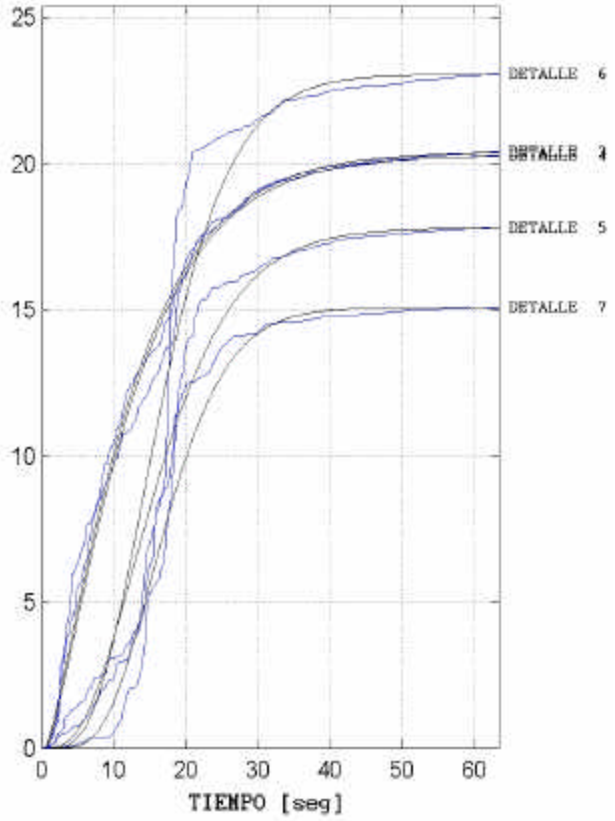
(b) ENERGIA ACUMULADA
 $\alpha = 0.174233$ $\beta = 0.00021436$ y 1.73351



(c) DISTRIBUCION ENERGIA



(d) ENERGIA ACUMULADA DETALLES
 Energia Total = 100.00 %

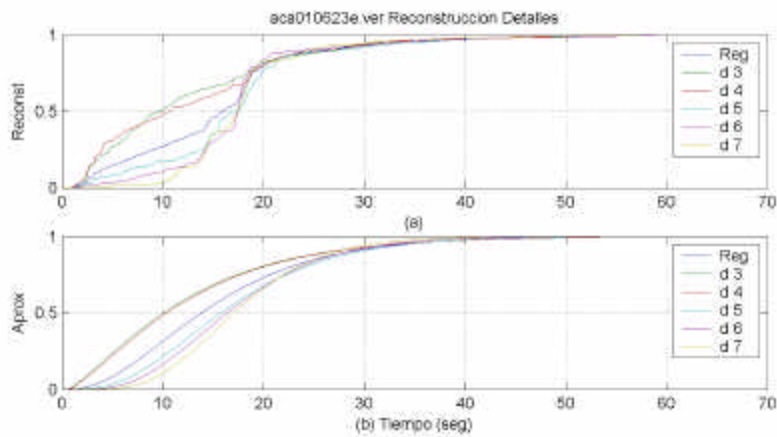


(e) TABLA RESUMEN

NIV	FMIN [Hz]	FMAX [Hz]	ENERGIA (G ² ·seg)	ENERGIA (%)
1	50.00	100.00	1.09E-05	0.027
2	25.00	50.00	5.68E-04	1.406
3	12.50	25.00	8.25E-03	20.405
4	6.25	12.50	8.20E-03	20.285
5	3.13	6.25	7.20E-03	17.821
6	1.56	3.13	9.33E-03	23.081
7	0.78	1.56	6.10E-03	15.086
8	0.39	0.78	6.74E-04	1.668
r	0.00	0.39	8.88E-05	0.220

NIV	ALFA (Hz)	BETA (G ² ·seg)	GAMA
3	0.117886	+3.03E-04	0.491270
4	0.121164	+3.43E-04	0.559208
5	0.216355	+5.29E-05	2.745207
6	0.278609	+8.67E-07	3.897124
7	0.372530	+2.03E-08	5.689248

Figura 7. Descomposición y reconstrucción wavelet de registro Arica Casa vertical.



[c] SUMMARY TABLE						
LEVEL	PRIN	PRAX	ENERGY	ENERGY	μ	σ
(Hz)	(Hz)	(10^3 g ² /s)	(%)	(10^5)	(%)	(%)
1	59.89	100.00	1.49E-003	0.023	0.000	0.000
2	29.89	50.00	5.48E-004	1.408	0.000	0.000
3	12.58	25.00	8.35E-003	20.405	0.006	1.092
4	6.25	12.50	0.20E-003	20.205	0.010	1.085
5	3.13	6.25	7.20E-003	17.831	1.193	0.948
6	1.56	3.13	9.32E-003	23.031	1.120	0.837
7	0.78	1.56	6.10E-003	15.866	1.145	0.732
8	0.39	0.78	6.74E-004	1.566	0.000	0.000
9	0.00	0.39	8.88E-005	0.220	0.000	0.000

Figura 8. Comparación de evolución de energía por escalas. (a) Registro. (b) aproximación con ecuación paramétrica chi-cuadrado (c) Tabla resumen.

REFERENCIAS

R. Boroschek, D. Comte, A. Morales, “Características del Terremoto de Ocoña del 23 de Junio de 2001”. VII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Chile 2002.

L. Cohen (1995), “Time-Frequency Analysis”, Prentice Hall, First edition.

Comte, D., Boroschek, R., Tavera, H, Dorbath, L., Portugal, D., Frogneux, M., Haessler, H., Montes, H., Bernal, I., Antayhua, Y., Salas, H., Inza, A., Rodríguez, S., Glass, B., Correa, E., Meneses, C., Balmaceda, I., Cruz, A., "Análisis del terremoto del sur del Perú, 23 de Junio 2001, Mw=8.4 utilizando datos locales". VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Chile, 2002.

D. Correa (2001), “Identificación de Patrones de Acelerogramas Utilizando Razones de Energía, Espectrogramas y Transformada de Wavelet”, Memoria de Titulo, Universidad de Chile.

J. Iyama, H. Kuwamura, “Applications of Wavelets to Analysis and Simulation of Earthquake Motions”, Earthquake Engng. Struct. Dyn. 28, pp. 255-272, 1999.

S. Mallat (1999), “A Wavelet Tour of Signal Processing”. Academic Press, Second edition.

A. Morales (2002), “Simulación de acelerogramas utilizando la Transformada Wavelet”, Memoria de Título, Universidad de Chile.

R. Rivas (2001), “Procesamiento de Señales Sísmicas utilizando Transformación de Wavelets”, Memoria de Titulo, Universidad de Chile.

G. R. Saragoni (1972), “Nonstationary Characterization and Simulation of Earthquake Ground Motions”, Ph. D. Dissertation, U.C.L.A., Los Angeles, California.