

# **ANÁLISIS DE LOS ACELEROGRAMAS REGISTRADOS EN LAS CIUDADES DE AREQUIPA, MOQUEGUA Y TACNA CORRESPONDIENTES AL SISMO DE TARAPACA DEL 13 DE JUNIO DE 2005 ( $M_w = 7.9$ )**

Rafael Salinas Basualdo, Fernando Lázares La Rosa

Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID),  
Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería

## **RESUMEN**

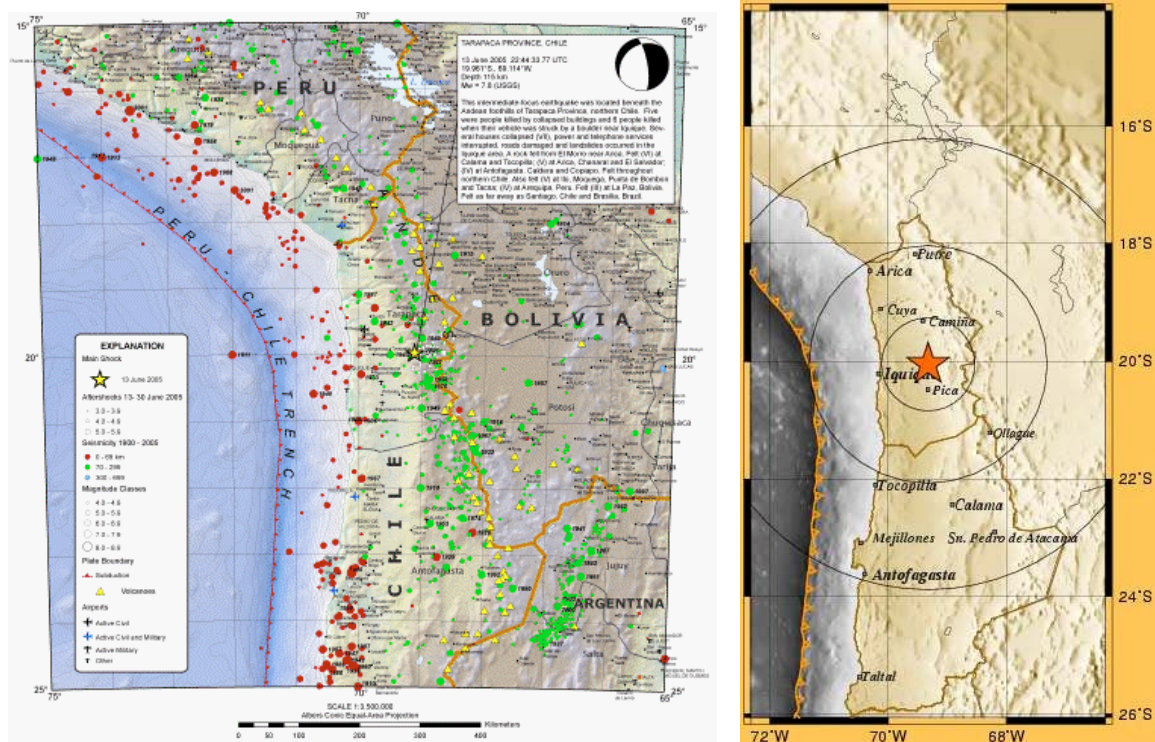
Utilizando 21 acelerogramas obtenidos en las siete estaciones acelerográficas del CISMID ubicadas en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna, se analizan los espectros de Fourier y espectros de respuesta de aceleración absoluta. Como consecuencia del análisis, se observan no solamente efectos locales sino también un efecto del tipo regional entre Arequipa, Moquegua y Tacna.

Los registros de aceleración presentan claramente los tiempos de arribo de las ondas P y S, permitiendo establecer las distancias epicentrales a cada estación. Entre las estaciones de Arequipa y Moquegua no es muy clara la atenuación del movimiento que se podría esperar para sismos con tal distancia epicentral, lo que se puede deber a algún efecto de tipo regional, traducido en la posible presencia de algunos depósitos geológicos que no logran atenuar el movimiento en ciertos intervalos de frecuencia.

## **CARACTERÍSTICAS SISMOLÓGICAS DEL SISMO DEL 13 DE JUNIO DE 2005**

A las 18:44 (hora local), la región de Tarapacá fue sacudida por un sismo fuerte, que llegó a ser sentido en el sur del Perú y la zona occidental de Bolivia. De acuerdo a reportes del Servicio Sismológico de la Universidad de Chile (SS-UC), el foco del sismo está ubicado en la Latitud Sur  $19.89^\circ$  y la Longitud Oeste  $69.125^\circ$ , tuvo una profundidad de 117 km y se le asignó una magnitud  $M_b = 7.0$  (USGS-NEIC) y  $M_w = 7.9$  (USGS-NEIC). El epicentro está localizado a 125 km de Iquique y 210 km de Arica (en Chile) y a 240 km de Tacna, 360 km de Moquegua y 460 km de Arequipa (en el Perú). En la Figura 1.a se presenta la ubicación del epicentro y el entorno geográfico regional. Este sismo está asociado al proceso de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana (USGS).

Los primeros reportes del evento han revelado la intensidad del movimiento del terreno en las zonas cercanas al evento sísmico, habiéndose registrado aceleraciones máximas de 0,79 g en dirección vertical y 0,72 g en dirección horizontal, a 67 km del epicentro, en la estación de Pica, en Chile (Boroschek et al, 2005; CERESIS, 2005). Se ha llegado a establecer inicialmente una distribución regional preliminar de isosistas, mostrada en la Figura 1.b (SS-UC). En Chile se observaron intensidades de VII en Iquique, VI en Calama y V en Arica. En el Perú, se reportaron intensidades de V en Tacna, IV en Moquegua, Ilo y Arequipa; es importante anotar que la mayor intensidad local reportada se presentó en Candarave, en la sierra de Tacna (CERESIS, 2005).



(a) Ubicación del epicentro (USGS). (b) Mapa de Isosistas (SS-UC)

### LA RED DE ACELERÓGRAFOS DEL CISMID EN EL SUR DEL PERÚ

El Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, tiene a su cargo una red de siete acelerógrafos distribuidos en el Sur del Perú, emplazados en Tacna, Arequipa y Moquegua. La Tabla 1 muestra las ubicaciones de las estaciones. La Figura 2 muestra las ubicaciones de las estaciones y el epicentro del sismo del 13 de junio.

Tabla 1. Ubicación de las estaciones acelerográficas de la Red CISMID en el Sur del Perú.

REGIÓN	Estación	Coordenadas Geográficas		Tipo de Acelerógrafo	Elevación (m.s.n.m.)
		Latitud S	Longitud W		
TACNA	U.N. Jorge Basadre (TAC-1)	18.02	70.25	ETNA KINEMATRICS	585
	Alberto Giesecke – U.P. Tacna (TAC-2)	18.01	70.23	ETNA KINEMATRICS	672
MOQUEGUA	Est. Vizcarra (MOQ-1)	17.19	70.93	ETNA KINEMATRICS	1461
	Chen-Chen (MOQ-2)	17.19	70.92	ETNA KINEMATRICS	1562
	Gobierno Regional (MOQ-3)	17.19	70.92	SM – 10B RION	--
AREQUIPA	U.N. San Agustín (AQP-1)	16.40	71.52	ETNA KINEMATRICS	2413
	Estación Geofísico Characato (AQP-2)	16.47	71.49	ETNA KINEMATRICS	2499



Figura 2. Ubicación de las estaciones y epicentro del sismo

Como se observa en la Tabla 1, en esta región la red del CISMID cuenta con seis acelerógrafos digitales y uno analógico. El acelerógrafo digital es de la marca Kinematics, modelo ETNA, que tiene la capacidad de registrar 200 muestras de aceleración por segundo, para empezar a grabar registros el valor mínimo es programable, actualmente este equipo tiene como umbral  $2 \text{ cm/s}^2$ . El analógico es de la marca RION, modelo SM-10B, de manufactura japonesa; este equipo tiene la capacidad de registrar 100 muestras de aceleración por segundo y graba registros cuando el movimiento del suelo excede un valor de  $5 \text{ cm/s}^2$  de aceleración vertical. Durante el terremoto del 13 de junio fue posible obtener acelerogramas en las siete estaciones de la región.

En la Tabla 2 se resumen los valores máximos de aceleración registrados en las siete estaciones del CISMID. A estos valores se han añadido aquellos obtenidos en dos estaciones de la red acelerográfica de la Universidad de Chile, para comparar las aceleraciones máximas en función a la distancia epicentral; la estación CHL-1 está ubicada en Iquique y la CHL-2 en Pica (figura 2). Como una muestra de la variabilidad de los registros obtenidos, se presenta en las Figuras 3 al 5 los acelerogramas de las componentes EW del movimiento del terreno en las estaciones de la red.

Tabla 2. Valores máximos de aceleración.

	Estación	Latitud S (grados)*	Longitud W (grados)*	Distancia epicentral (km)	Aceleración máxima (gal)		
					EO	NS	UD
1	TAC-1 (*)	18.02	70.25	240	93	90	76
2	TAC-2 (*)	18.00	70.22	240	121	116	75
3	MOQ-1 (*)	17.19	70.93	357	58	66	35
4	MOQ-2 (*)	17.18	70.92	358	80	53	39
5	MOQ-3 (*)	17.19	70.92	357	49	62	28
6	AQP-1 (*)	16.40	71.52	466	80	65	45
7	AQP-2 (*)	16.47	71.49	457	138	128	47
8	CHL-1 (**)	20.27	70.21	126	255	245	245
9	CHL-2 (**)	20.47	69.32	67	706	559	775

Fuentes : (\*) CISMID-UNI, (\*\*) SS-UC.

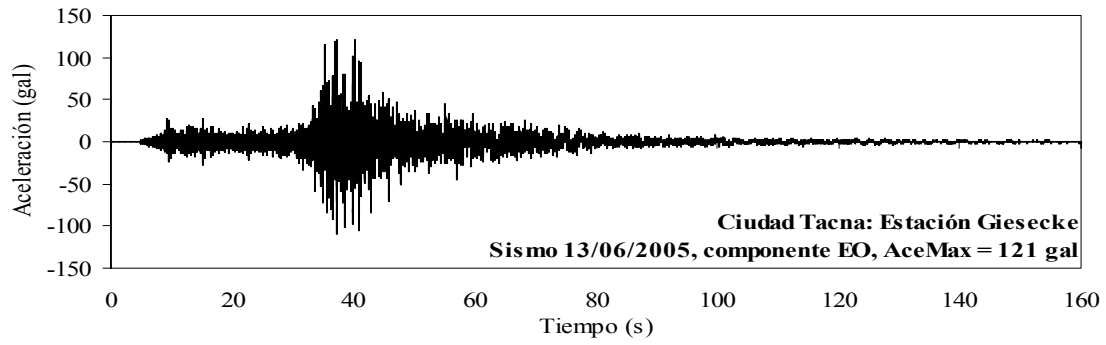
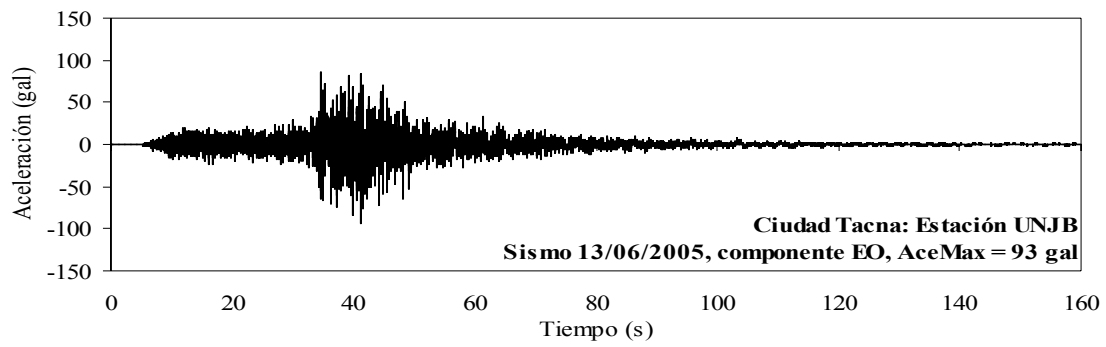


Figura 3. Acelerogramas registrados en las estaciones de Tacna.

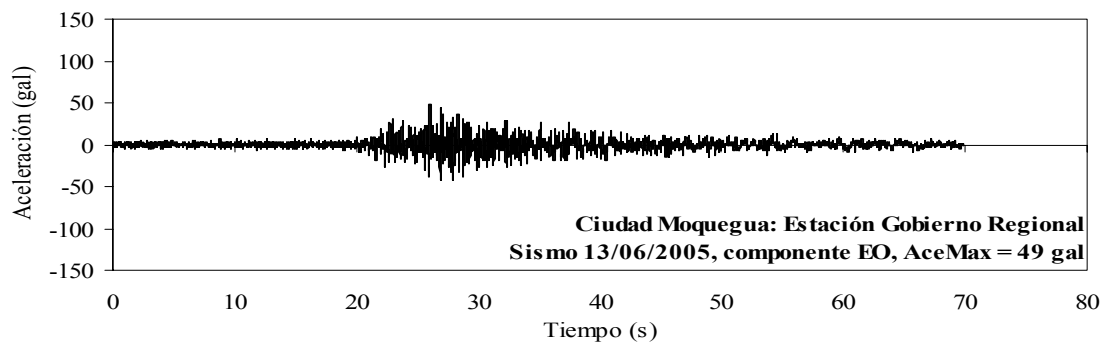
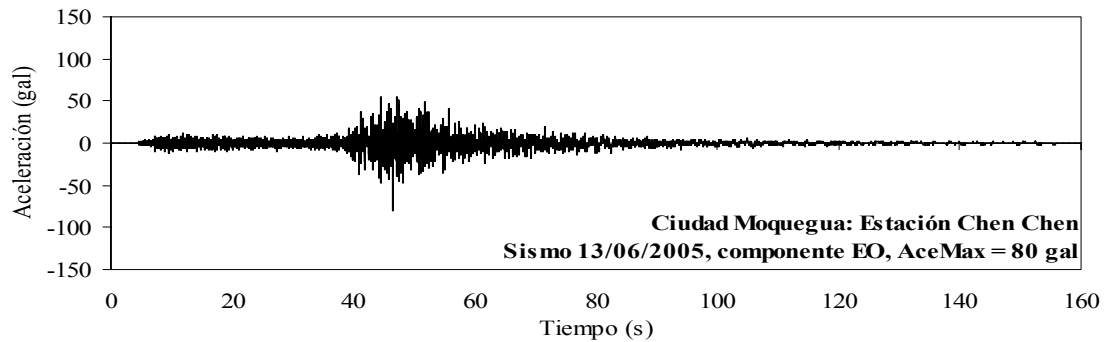
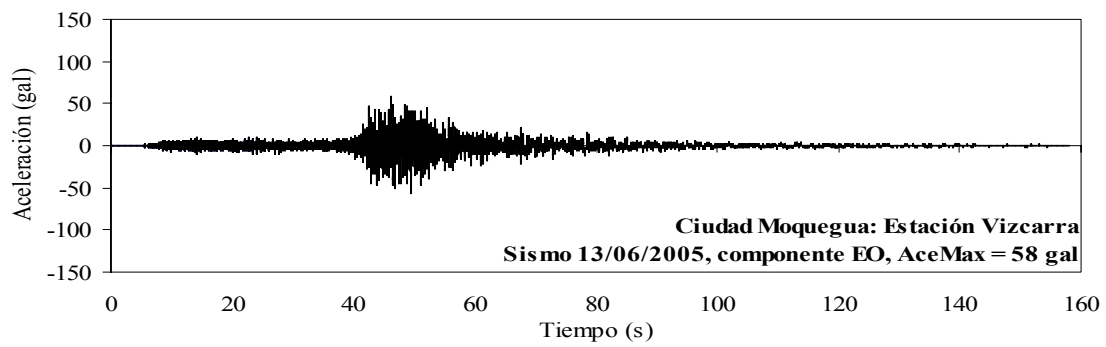


Figura 4. Acelerogramas registrados en las estaciones de Moquegua.

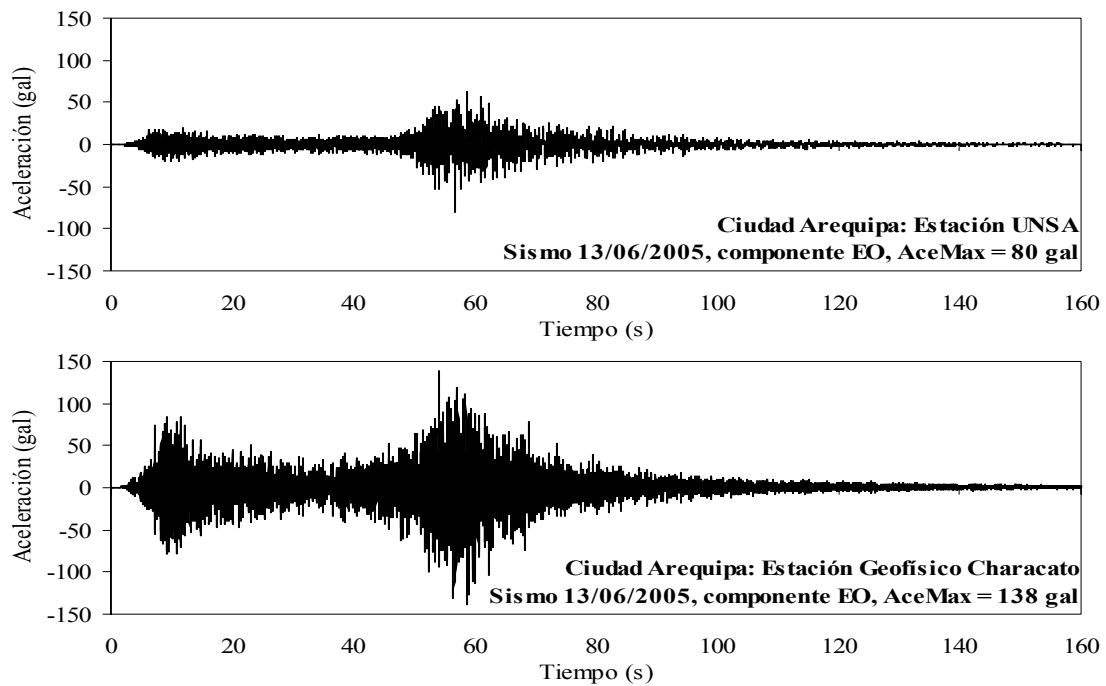


Figura 5. Acelerogramas registrados en las estaciones de Arequipa.

La información sobre sismos pasados da cuenta de la baja atenuación de las aceleraciones máximas con la distancia epicentral que caracteriza a los sismos en la región de la costa central (Alva y Chang, 1978). La Figura 6 presenta un diagrama de atenuación a base de las aceleraciones máximas obtenidas, que muestra una baja atenuación, aunque tiene una pendiente más pronunciada en la componente vertical (UD), con valores que van de  $775 \text{ cm/s}^2$  (0.80 g) a 67 km del epicentro hasta  $47 \text{ cm/s}^2$  (0.05 g) a 457 km. Se han registrado valores relativamente altos, con respecto a los demás registrados, en la estación de Arequipa AQP-2, a 457 km del epicentro, donde el terreno corresponde a un basamento rocoso.

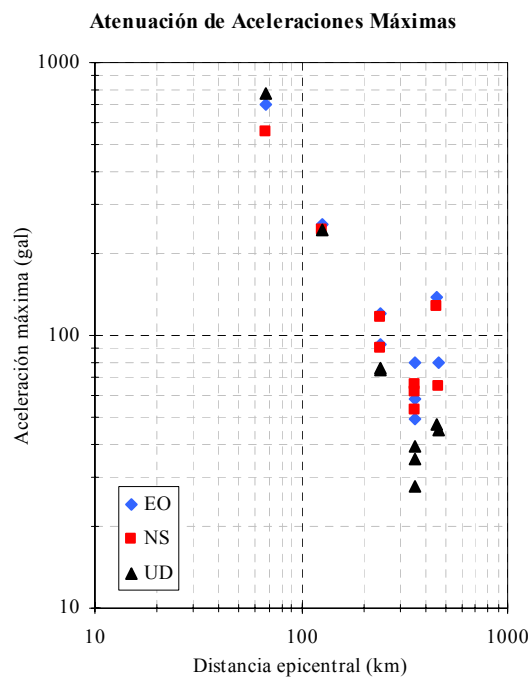


Figura 6. Diagrama de atenuación de aceleraciones máximas con la distancia epicentral.

Esta atenuación de la aceleración máxima se debe reflejar también al revisar los respectivos EAF de los acelerogramas de estas estaciones. En la Figura 7 se muestra la superposición de los EAF de los acelerogramas registrados en las estaciones GIESECKE (Tacna), CHEN CHEN (Moquegua) y UNSA (Arequipa), los EAF de Tacna y Moquegua se eligieron debido a que presentan los mayores valores de amplitud. En la parte superior de la Figura 7 se observa en ambas componentes que las amplitudes de estos espectros disminuyen con la distancia epicentral, pero sólo para el intervalo de frecuencia entre 0.01 y 0.57 Hz. Para frecuencias mayores a 0.6 Hz las amplitudes de estos espectros no tienen un patrón definido, inclusive llegan a ser iguales en ciertos intervalos. En la parte inferior de la Figura 7 se utiliza para Arequipa la estación IG-CHARACATO, la superposición de espectros muestra nuevamente que las amplitudes disminuyen con la distancia epicentral pero sólo para el intervalo de frecuencia entre 0.01 y 0.6 Hz, mostrando que para valores mayores a 10 Hz el EAF de Arequipa presenta mayores amplitudes.

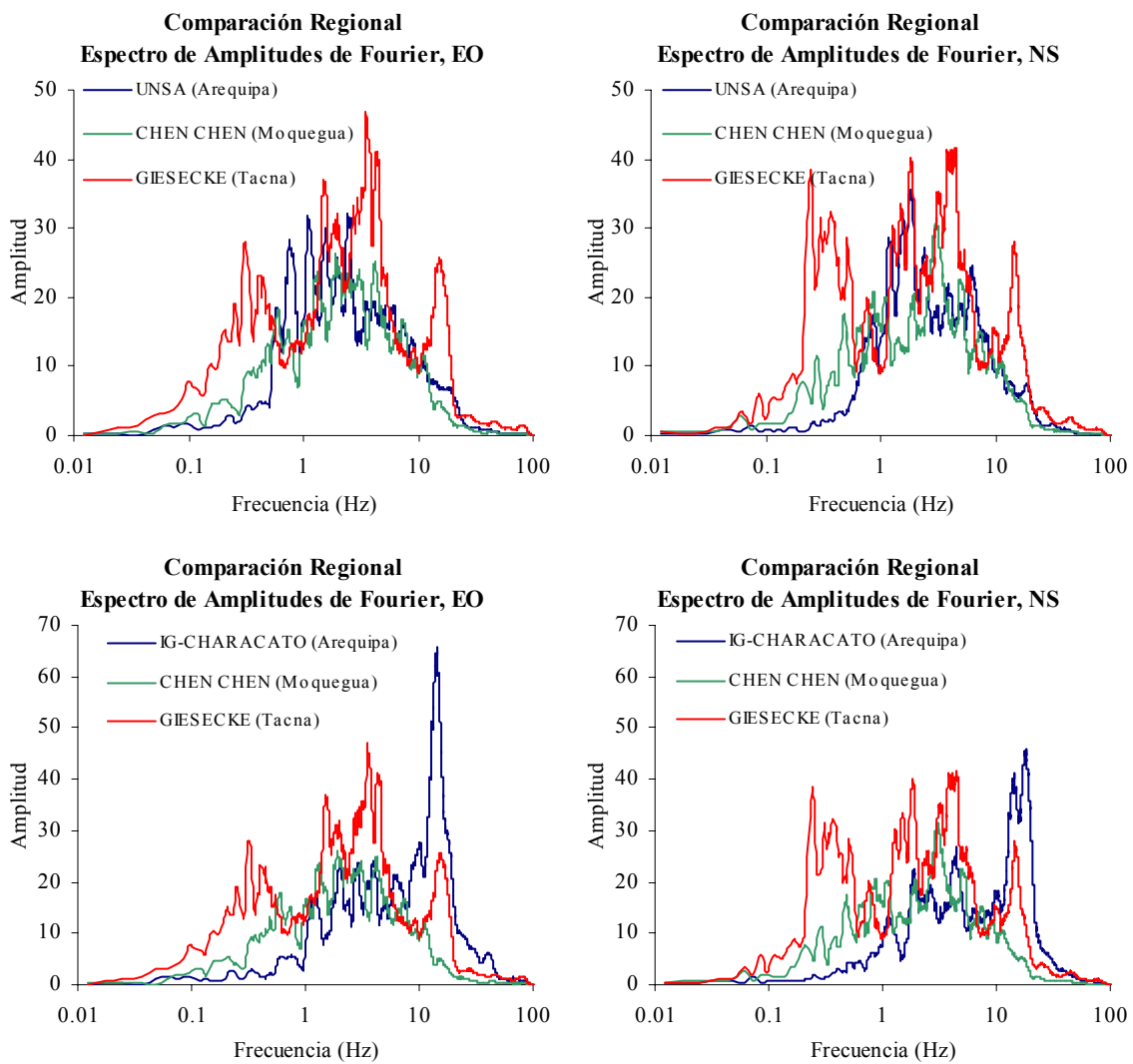


Figura 7. Comparación Regional de EAF.

Se presentan en la Figura 8 los espectros de respuesta de aceleraciones absolutas, agrupados para una comparación regional, para apreciar de forma más clara la influencia de la atenuación del movimiento del terreno sobre las demandas sísmicas en las estructuras. En la comparación se observa que, en general, hay una tendencia consistente en tener aceleraciones espectrales menores a mayor distancia epicentral. Sin embargo, las demandas de aceleración no siempre disminuyen con la distancia epicentral en determinados rangos de periodos. Por ejemplo, en la componente EO para un

rango de 0.7 a 1.5 s se observa que las mayores aceleraciones espectrales corresponden a la estación UNSA (Arequipa), aunque estas demandas son cercanas o menores que la aceleración máxima del terreno. Asimismo, en la componente NS, la estación UNSA (Arequipa) presenta aceleraciones espectrales mayores que la estación CHEN CHEN (Moquegua) en un rango de periodos de 0.5 a 0.9 s. Es importante notar que los valores máximos espectrales obtenidos en Moquegua y Arequipa son cercanos, si se exceptúan los máximos obtenidos en IG-CHARACATO, que por cierto se presentan en un periodo de 0.07 s, lo cual puede indicar una alta demanda para estructuras muy rígidas de un piso, como podría ser una construcción de adobe.

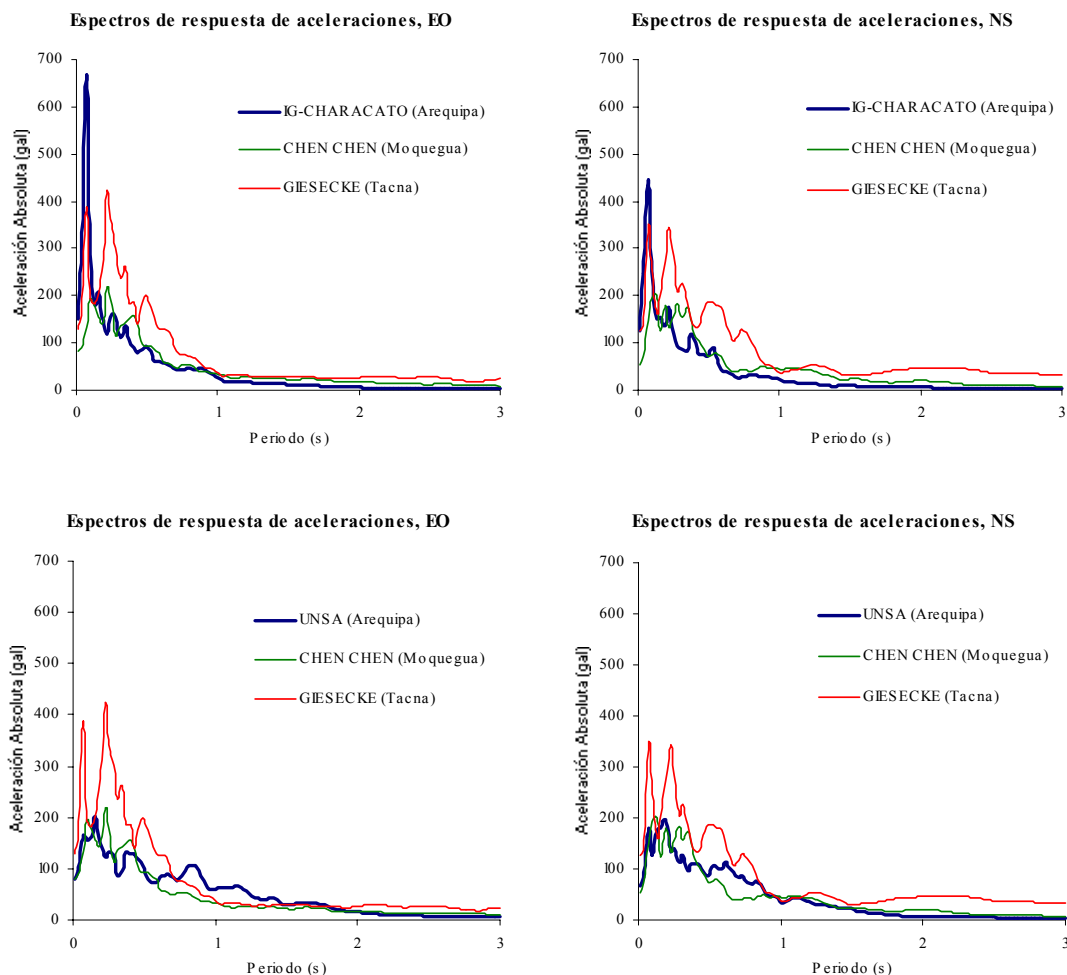


Figura 8. Comparación regional de espectros de respuesta de aceleraciones.

Las figuras 9 y 10 presentan la superposición de espectros de Fourier y de respuesta de aceleraciones absolutas para cada ciudad. Esta superposición muestra la variabilidad de la respuesta del terreno entre estas estaciones, en la medida que las formas espectrales son diferentes entre sí, para ciertos rangos de frecuencia y de periodo. En particular, es notoria la diferencia entre las formas de los espectros en las estaciones de Arequipa. Esta variación implica la necesidad de realizar un estudio detallado de los efectos de las condiciones locales en la respuesta de estos suelos. Una cantidad mayor de registros en estas estaciones, con sismos de diferente acimut, podrá proporcionar información valiosa para definir estos efectos locales.

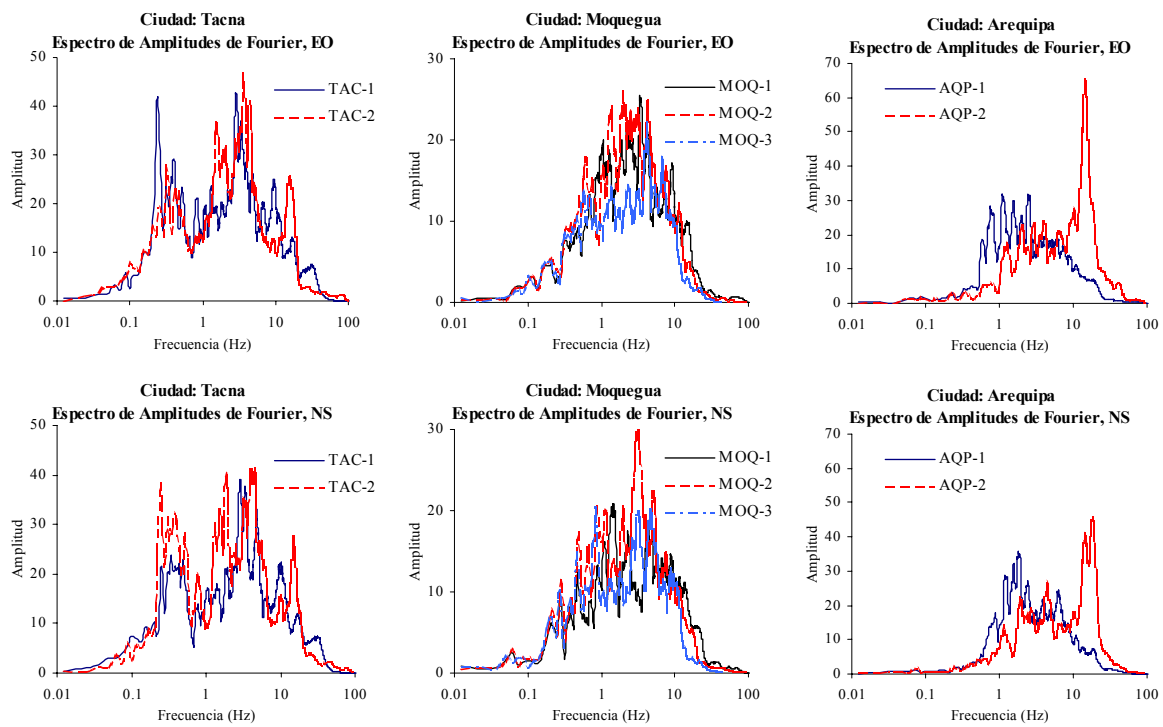


Figura 9. Espectros de Fourier de los acelerogramas obtenidos el Sur del Perú.

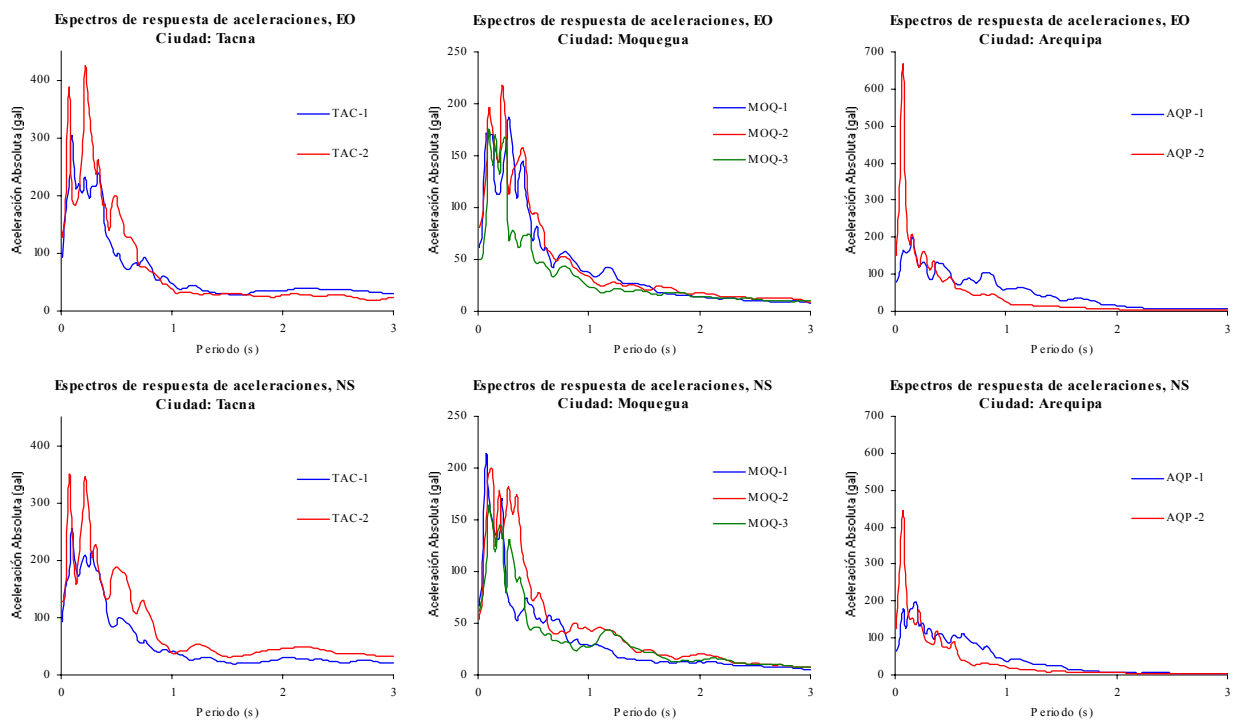


Figura 10. Espectros de respuesta de aceleraciones absolutas.

## CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis de los acelerogramas obtenidos en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna, durante el sismo del 13 de Junio de 2005 ( $M_W = 7.9$ ). Los resultados indican una atenuación relativamente baja de las aceleraciones máximas, aunque en la componente vertical del movimiento

la atenuación resulta mayor. A nivel de espectros de Fourier y de respuesta esta atenuación en general se cumple, salvo algunos intervalos de frecuencia y de periodo. Entre las estaciones de Arequipa y Moquegua no es muy clara la atenuación del movimiento que se podría esperar para sismos con tal distancia epicentral, lo que se puede deber a algún efecto de tipo regional, traducido en la posible presencia de algunos depósitos geológicos que no logran atenuar el movimiento en ciertos intervalos de frecuencia.

## REFERENCIAS

Alva Hurtado, J.E., Chang, C.S. (1978), “Características los terremotos peruanos de Lima y alrededores”, *Memorias del III Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, Perú.*

Boroschek, R., Comte, D., Soto, P. y León, R. (2005), “Registro estación Pica – Terremoto norte de Chile 13 de junio de 2005 M=7.9”, informe preliminar, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

CERESIS (2005), “Terremoto de Tarapacá, Chile”, Informe preliminar.

Ordaz M. y Montoya D. (2002), programa DEGTRA, versión 3.2.4. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Salinas, R. y Lázares, F. (2004), “Análisis de acelerogramas registrados en la ciudad de Lima obtenidos con la red acelerográfica del CISMID”, *Memorias del Primer Congreso Latinoamericano de Sismología. Armenia, Colombia.*

USGS (2005), Informaciones sismológicas sobre el sismo del 13 de junio de 2005.