

## **EFFECTOS DE SISMOS DISTANTES SOBRE EDIFICIOS ALTOS: RIESGO SÍSMICO EN BUENOS AIRES**

Bertero, Raul; Vaquero, Sebastián; Mussat, Juan  
Facultad de Ingeniería – UBA - INTECIN  
r.bertero@gmail.com

### **RESUMEN**

El terremoto de Chile del 16 de Septiembre del 2015 produjo pánico en los habitantes de edificios altos de Buenos Aires ubicados a 1,300 km del epicentro. El evento principal y sus réplicas fueron registradas por un nuevo sismómetro instalado en el centro de Buenos Aires por la Universidad de Buenos Aires. Utilizando los datos obtenidos se calcularon los espectros de respuesta, contenidos de frecuencias y duración significativa del movimiento del terreno así como las distorsiones de entrepiso y las aceleraciones de los edificios altos de Buenos Aires. El amortiguamiento y la frecuencia natural de los edificios altos de la ciudad había sido determinada mediante vibración ambiente en un estudio previo. Los resultados muestran que espectros similares son obtenidos tanto para el evento principal como para las réplicas indicando que el período del suelo es uno de los parámetros principales que permite explicar la gran amplificación que se observa en la pseudo-aceleración calculada los edificios altos. Un cálculo aproximado de la frecuencia fundamental del suelo de Buenos Aires muestra un valor similar a los obtenidos para los edificios altos de la ciudad. Por otra parte, el contenido de frecuencia del movimiento en la roca – situada 300 m por debajo de la superficie – fue estimado por deconvolución del movimiento registrado en la superficie. Finalmente, teniendo en cuenta la sismicidad de la falla de subducción en la costa chilena y la ley de atenuación obtenida para sismos distantes a partir de los movimientos registrados en Buenos Aires, se obtuvo el período de recurrencia de los estados límites de confort y de daño no estructural para los edificios altos de Buenos Aires.

### **ABSTRACT**

*The Chilean 8.3 Magnitude Earthquake of September 16 2015 produced panic of inhabitants of tall buildings in Buenos Aires, 1,300 km away. The main event and his aftershocks were registered by a new seismometer of Universidad de Buenos Aires. Using these data it was computed the response spectra, the frequency contents and significant duration of the ground motions and the inter story drift index and RMS acceleration on Buenos Aires tall buildings. Damping and period of these tall buildings had been measured during a previous study. The results shows that similar spectra are obtained for the main shock and the aftershocks showing that soil period is one of the main parameter to explain the large amplification of pseudo acceleration computed for the tall buildings. This soil period in Buenos Aires was computed showing similar values that the measured tall buildings natural period. The frequency content of ground motion on rock, 300 m below the surface, is obtained from deconvolution of the acceleration measured on surface. Finally from the Chilean seismicity and the new attenuation law obtained for distant earthquakes, the return period of human discomfort and non-structural damage is obtained for current practice in Buenos Aires tall buildings.*

## INTRODUCCIÓN

Buenos Aires, capital de Argentina y segunda ciudad más grande de América del Sur con 14.5 millones de habitantes, se encuentra en el centro-este del país, en la orilla occidental del Río de la Plata. La ciudad se encuentra en el centro de la llanura Pampeana, a más de 1,200 kilómetros de la zona de alta sismicidad definida por la interfaz entre la placa Sudamericana y la placa de Nazca. La historia sísmica reciente de esta zona de América del Sur, en particular Argentina y Chile, se puede ver en la Fig. 1.

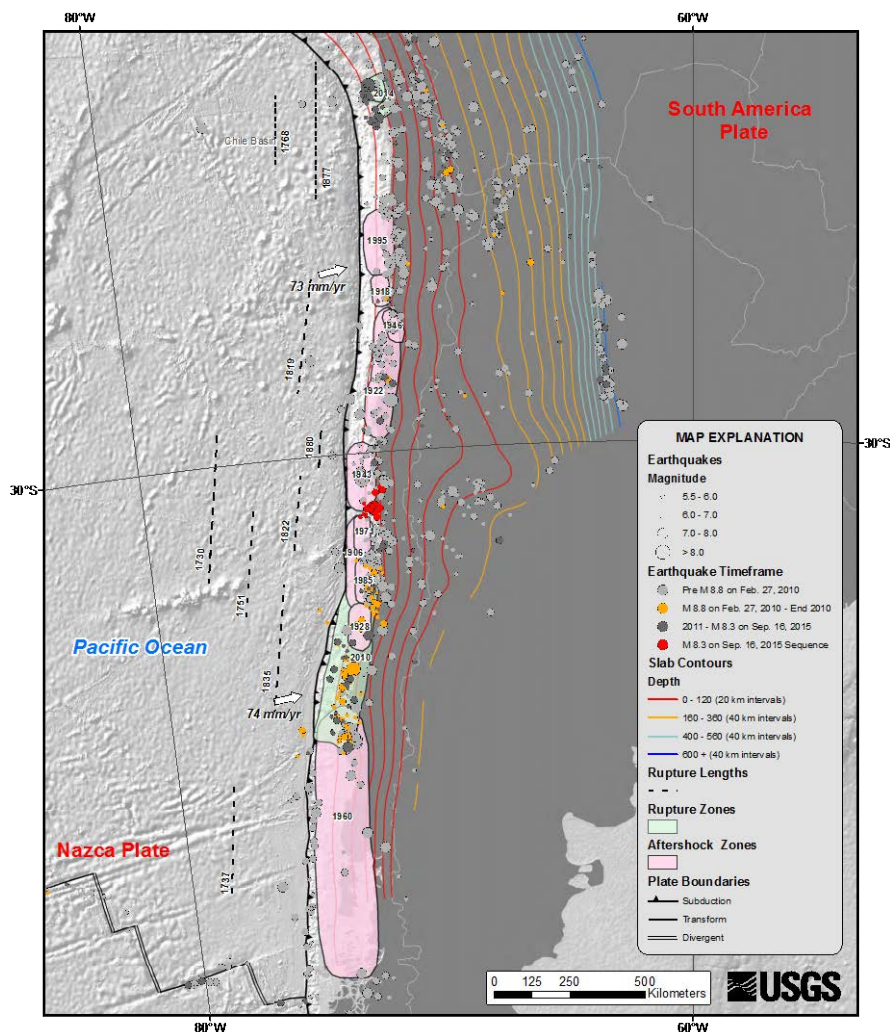


Fig. 1 Historia sísmica reciente del área definida por la interfaz entre la placa Sudamericana y la placa de Nazca [1].

El 16 de septiembre de 2015 a las 19:54:32 (UTC-03:00) se registró un terremoto de magnitud  $M_w$  8.3. El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) informó que las coordenadas del epicentro fueron  $31.573^\circ\text{S}$ ,  $71.674^\circ\text{W}$ , a unos 230 km al nor-noroeste de Santiago de Chile, Chile y 1,280 kilómetros de Buenos Aires. Durante el siglo previo a este terremoto, la región alrededor de 700 km de este evento contabilizó con 15

terremotos de magnitud  $M_w$  7 o más, y el terremoto más grande de la historia, 1960  $M_w$  9.5 en el sur de Chile.

El evento 2015  $M_w$  8.3 se sintió fuertemente, como en oportunidades anteriores, en varias provincias argentinas. En Buenos Aires, los edificios más altos fueron auto-evacuados debido al movimiento objetos colgantes como lámparas, cortinas, plantas y estanterías. El director de los servicios médicos de emergencia (SAME) informó que el terremoto se sintió desde la 8ª planta de los edificios y que no hubo daños estructurales. La única baja reportada fue un hombre que tenía una ligera discapacidad física y murió al caer por las escaleras durante la evacuación de un edificio después del terremoto. Mientras que en las ciudades de zonas sísmicas los habitantes están acostumbrados a este fenómeno, en Buenos Aires, causó alarma y pánico a los residentes de edificios.

Los códigos argentinos para el diseño de estructuras en Buenos Aires no tienen en cuenta las cargas sísmicas, salvo para las edificaciones tales que su falla podría tener efectos catastróficos sobre grandes segmentos de la población. Sin embargo, como puede verse en términos de la repercusión de los recientes terremotos, las estructuras de periodo largo fundadas sobre una profundidad considerable de suelo respondieron a los terremotos lejanos con un movimiento perceptible. En otras partes del mundo se han producido varios casos que reflejan esto [2], y el más significativo es el terremoto de México de 19 de Septiembre de 1985. Daños importantes ocurrieron en la Ciudad de México debido a los grandes efectos de amplificación del suelo a 350 kilómetros de distancia del epicentro [3].

## **GEOLOGÍA Y SUELOS DE BUENOS AIRES**

En la Ciudad de Buenos Aires, el basamento cristalino con presencia de gneiss (una roca metamórfica foliada) se encuentra a una profundidad entre 280 a 400 m. Como consecuencia de esta falla diferencial, el basamento metamórfico se puede observar en la superficie de Uruguay, a más de 20 m sobre el nivel del mar, en la isla Martín García en el Río de la Plata. Los aproximadamente 300 m de suelo por encima de la roca están compuestos principalmente por 5 formaciones diferentes (Fig. 1): "Post-Pampeano" (<10 m de espesor), "Pampeano" (25 a 45 m de espesor), "Puelche" (12 a 20 m de espesor), "Paraná" (30 a 45 m de espesor) y "Olivos" (200 m de espesor) [4]. A continuación se da una breve descripción de cada capa [5], donde  $V_s$  es la velocidad de onda de corte promedio del estrato:

- "Pampeano o Tosca" ( $V_s \approx 220$  m/s): En la mayor parte de la zona urbana, el nivel superior de Buenos Aires presenta depósitos rígidos de suelos limosos y arcillosos, fuertemente pre-consolidados por desecación con capas de lentes de suelos cementados por impregnación calcárea. El espesor total de estos depósitos sedimentarios es de 25 a 45 m.

- "Post-Pampeano" ( $V_s \approx 115$  m/s): Por encima de la "Pampeano", en una estrecha franja (1000 a 2000 m) a lo largo de la costa del Río de la Plata y el Riachuelo (Fig. 1),

el nivel superior de la Pampeano se sustituye por un estrato de profundidad variable (menos de 10 m) de depósitos fluviales muy blandos de arcillas y suelos arcillosos limosos plásticos.

- "Puelche" ( $V_s \approx 347$  m/s): arenas finas y densas subyacen a la formación Pampeano. Este depósito es principalmente de origen fluvial, y alcanza un espesor de 12 a 20 m. Su porosidad es de alrededor de 20% - 30%, carece casi totalmente la cementación, y sus vacíos están llenos de agua. Se trata del mayor acuífero no sólo en el área de Buenos Aires, sino de la región Pampeana en su conjunto.

- "Paraná" ( $V_s \approx 351$  m/s): Por debajo de estas arenas densas hay una capa de limo arcilloso plástico o arcilla limosa, de aproximadamente 30 a 45 m de espesor. Esta arcilla de color verdoso o azulado es de origen marino, son muy rígidas y están normalmente consolidadas bajo las cargas impuestas por el perfil Pampeano.

- "Olivos" ( $V_s \approx 570$  m/s): Por debajo de la formación Paraná y por encima del basamento fracturado existe una capa de aproximadamente 200 m de origen continental. Los 100 m superiores están compuestos principalmente por arcillas mientras que en los 100 m inferiores predominan los suelos arenosos.

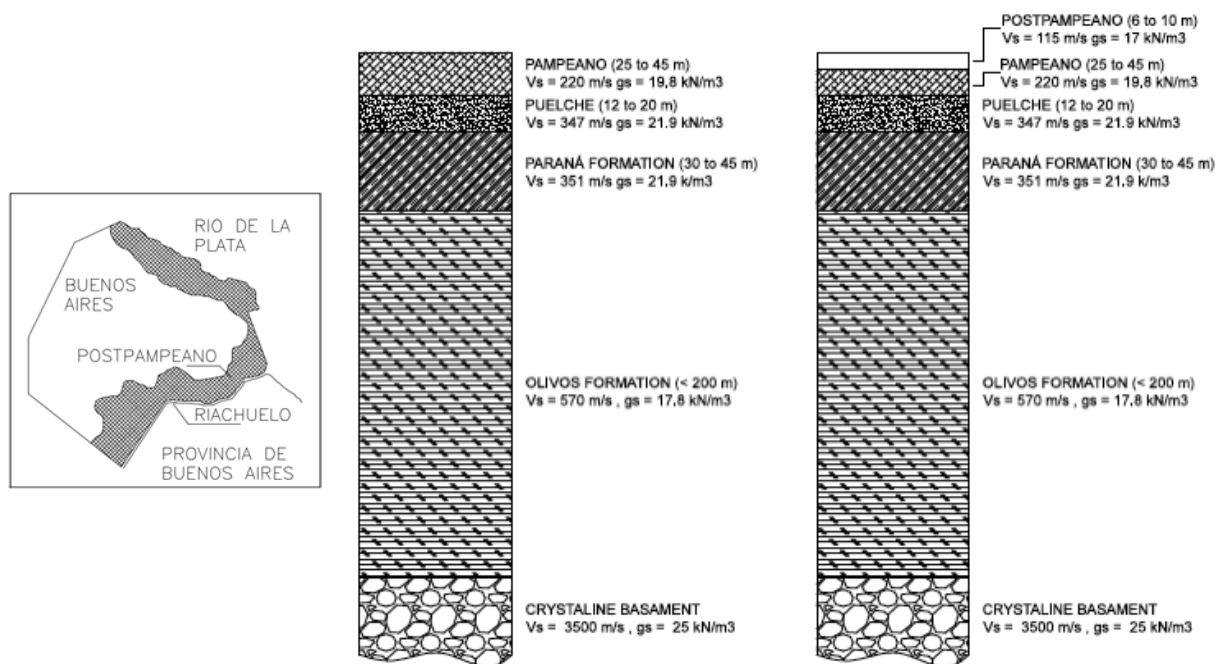


Fig. 2 Suelos de la Ciudad de Buenos Aires. El perfil de la izquierda se corresponde al centro de la ciudad, donde la Universidad de Buenos Aires tiene su sismógrafo. El perfil de la derecha se corresponde a la zona sombreada de la figura de la izquierda, cerca de las márgenes del Río de la Plata y el Riachuelo.

## MOVIMIENTOS DE SUELO REGISTRADOS EN BUENOS AIRES DEBIDO A TERREMOTOS DE CHILE

La *Tabla 1* muestra el terremoto de Chile del 16 de Septiembre de 2015 de magnitud

8.3, y 13 réplicas de magnitud igual o mayor que 6.0, grabados con el sismómetro de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, ubicado cerca del centro geométrico de la ciudad. La tabla muestra la magnitud ( $M_w$ ), la profundidad, la distancia del epicentro al centro de Buenos Aires ( $R$ ), la velocidad máxima del suelo ( $PGV$ ) y el pico de aceleración del suelo ( $PGA$ ) registrados en Buenos Aires. También se muestran la duración significativa ( $T_d$ ), definida como el intervalo de tiempo entre 5 y 95% de la integral del cuadrado de la aceleración del suelo [6] y el periodo cuadrado medio del registro ( $T_g$ ) definido como [7]

$$T_g = 2\pi \left( \sum_{0.25\text{Hz}}^{20\text{Hz}} \mathcal{F}_{\ddot{u}i}^2 \frac{1}{\omega_i} \right) / \left( \sum_{0.25\text{Hz}}^{20\text{Hz}} \mathcal{F}_{\ddot{u}i}^2 \right) \quad (1)$$

donde  $\mathcal{F}_{\ddot{u}i}$  es la transformada rápida discreta de Fourier del acelerograma en la frecuencia  $\omega_i$ . Algunos valores de  $T_d$  no pudieron ser calculados porque el sismómetro truncó los registros.

*Tabla 1 - Registros de movimientos de suelos en Buenos Aires*

Día	Hora	Terremoto	$M_w$	Prof.	R	PGV	PGA	$T_d$	RMS	$T_g$
				km	km	cm/s	cm/s <sup>2</sup>	s	cm/s <sup>2</sup>	s
2015-09-16	22:54:32	48km W de Illapel, Chile	8.3	23.3	1282	0.48690	1.10100	261.6	0.2453000	2.25
2015-11-07	07:31:43	39km SW de Ovalle, Chile	6.8	47.8	1289	0.05209	0.15340	301.8	0.0308360	1.95
2015-09-17	04:10:27	61km WNW de Illapel, Chile	6.7	40.7	1295	0.05657	0.12830	226.4	0.0287670	1.99
2015-09-26	02:51:18	26km SSW de Ovalle, Chile	6.3	40.2	1280	0.04062	0.12460	229.5	0.0337330	2.20
2015-09-21	17:40:00	22km WSW de Illapel, Chile	6.6	13.0	1250	0.03748	0.09565	316.8	0.0221920	2.30
2015-11-11	01:54:38	81km NW de Coquimbo, Chile	6.9	32.9	1401	0.03472	0.08107		0.0308360	2.38
2016-02-10	00:33:05	37km W de Ovalle, Chile	6.3	36.5	1314	0.02761	0.08085		0.0222920	1.99
2015-09-17	03:55:15	54km WNW de Illapel, Chile	6.5	45.0	1288	0.02258	0.06309	271.0	0.0122690	2.12
2015-09-21	05:39:34	55km W de Illapel, Chile	6.1	40.7	1288	0.01815	0.05786	263.2	0.0104630	2.08
2015-09-17	01:41:05	70km SW de Ovalle, Chile	6.4	45.0	1297	0.02299	0.05582		0.0116540	2.29
2015-09-18	09:10:44	93km NW de Valparaíso, Chile	6.2	33.0	1306	0.01605	0.03661	334.2	0.0064692	2.43
2016-02-22	06:37:03	105km WSW de Coquimbo, Chile	6.0	12.0	1383	0.01097	0.03464	200.2	0.0073619	2.26
2015-09-19	12:52:20	79km W de La Ligua, Chile	6.2	26.9	1292	0.01370	0.02798	256.8	0.0071569	2.21
2015-11-27	21:00:22	64km N de Taltal, Chile	6.2	34.0	1601	0.00384	0.00901		0.0016572	2.10

### Duración significativa y período cuadrado medio

La Fig. 3 a) muestra la duración significativa de los movimientos del suelo registrados en función de la magnitud. Se puede notar que al contrario de lo que sucede en terremotos cercanos, sus duraciones significativas no dependen de la magnitud y son mucho más grandes (200 a 300s). Esto tiene dos consecuencias importantes: a) edificios en resonancia con el período principal del movimiento del suelo amplifican

notablemente la aceleración en la base y b) los habitantes de esos edificios se ven afectados por altas aceleraciones durante varios minutos, incrementando así la incomodidad y el pánico.

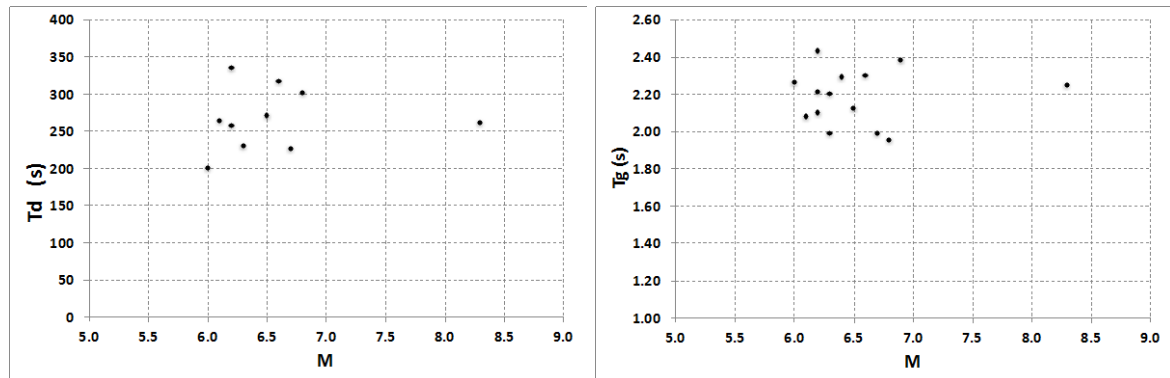


Fig. 3 a) Duración significativa (izquierda) y b) período cuadrado medio (derecha) de los movimientos de suelo registrados

La Fig. 3 b) muestra el período de los movimientos del suelo registrados en función de la magnitud. Se obtiene un valor medio de 2.2s, independiente de la magnitud. Este resultado indica que para terremotos lejanos el efecto de la magnitud en el contenido de frecuencia tiende a ser ocultado por la influencia del período de suelo por encima de la roca como se mostrará en la siguiente sección.

### Espectro de respuesta

Los espectros de respuesta de pseudo-aceleración de los 14 movimientos del suelo registrados, normalizados por el *PGA*, se muestran en la Fig. 4 para un coeficiente de amortiguación del 1% (valor obtenido para edificios altos de Buenos Aires bajo vibración ambiente). Se observa claramente la similitud entre los espectros de respuesta de todos los movimientos del terreno con dos períodos de resonancia alrededor de 2.5s y 1s. Como se verá, estos son el primer y segundo período natural de los 300m de suelo por encima del basamento de roca. Hay que destacar además la gran amplificación de la *PGA* (alrededor de 10 veces para el primer período de resonancia), típico de movimientos de suelo armónicos. La Fig. 4 b) muestra la media y la media más una desviación estándar de los espectros de respuesta presentados en Fig. 4 a).

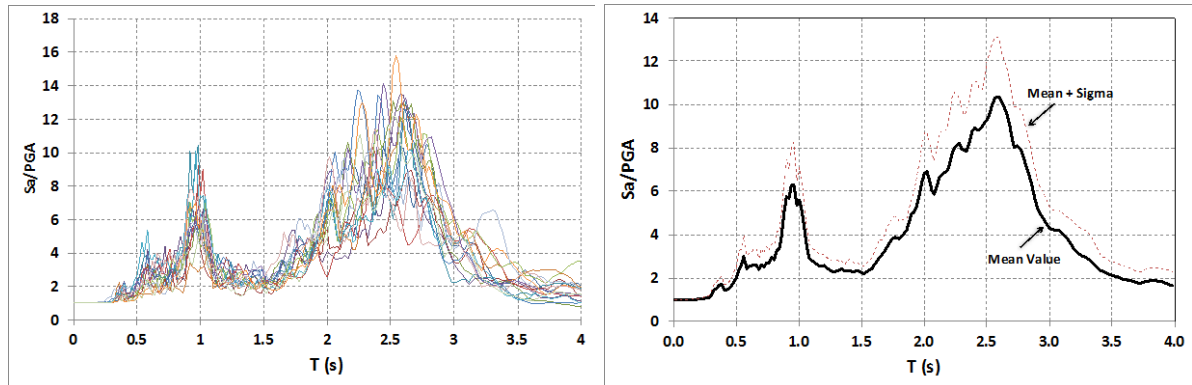


Fig. 4 a) Espectros de respuesta de pseudo-aceleración de 14 movimientos de suelo registrados en Buenos Aires, normalizados por el PGA (izquierda); b) Media y media + desvío estándar de los espectros (derecha)

### Relación Aceleración de suelo máxima (PGA) - Magnitud

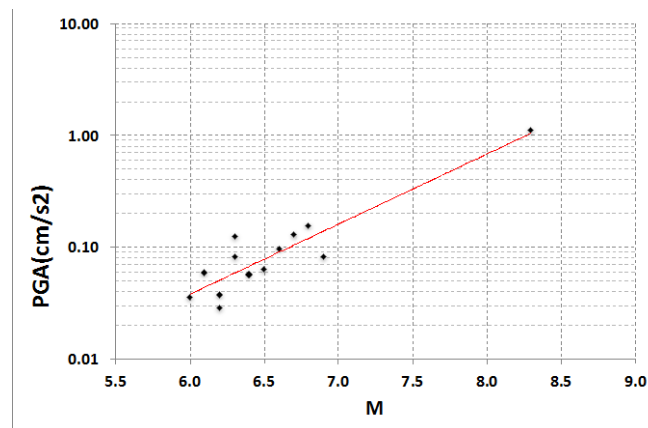


Fig. 5 PGA – Magnitud para los movimientos de suelos registrados en Buenos Aires

La Fig. 5 muestra que el modelo exponencial representa muy bien la relación entre PGA y Magnitud para el movimiento de suelo registrado en Buenos Aires. Por lo tanto, haciendo un análisis de regresión se obtuvo la siguiente ecuación con  $\sigma_{ln} = 0.34$  (se debe tener en cuenta que esta expresión es válida para un rango de distancia acotado entre  $R=1250$  a  $1400$  km y para el suelo Buenos Aires).

$$\ln\left(\frac{PGA}{cm/s^2}\right) = 24.537 + 1.408 M_w - 5.052 \ln\left(\frac{R}{km}\right) \quad (2)$$

### Espectro de Fourier en el suelo

La Fig. 6 muestra la historia de aceleración del movimiento del suelo del 16 de Septiembre de 2015 debido al terremoto, registrado sobre suelo en el centro de Buenos Aires. Se destacan el PGA de  $1cm/s^2$  y la larga duración del movimiento significativo (260s) registrada. La Fig. 7 muestra la transformada rápida de Fourier discreta de este

registro. El contenido de frecuencia está predominantemente alrededor de  $T=2.5$  s ( $f=0.4$  Hz) y  $T=1$  s, como también se muestra en la Fig. 4.

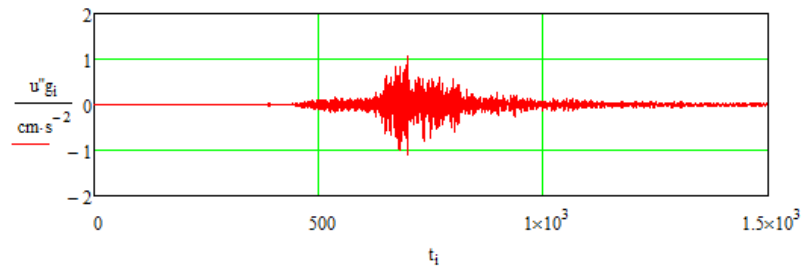


Fig. 6 Historia de aceleraciones del terremoto del 16 de Septiembre de 2015, registrado en Buenos Aires sobre suelo

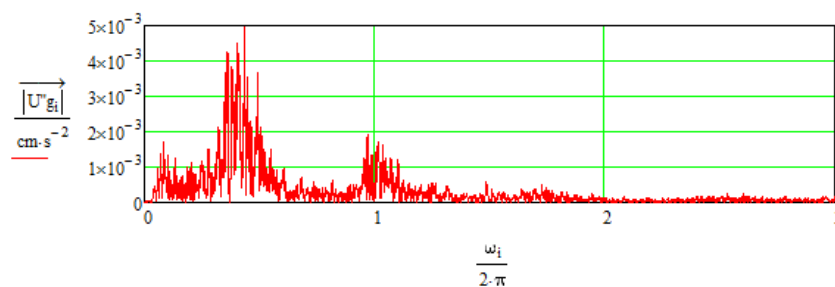


Fig. 7 Transformada discreta de Fourier del terremoto del 16 de Septiembre de 2015, registrado en Buenos Aires sobre suelo

### Espectro de Fourier en roca por deconvolución

Considerando el perfil de suelo de la Fig. 2 sobre roca bajo un comportamiento elástico y un factor de amortiguamiento  $\xi = 0,03$  para los estratos de suelo y roca, la función de transferencia entre la roca y la superficie del suelo en Buenos Aires se muestra en la Fig. 8. Las frecuencias naturales del suelo son  $f_1=0.4$  Hz ( $T_1=2.5$  s) y  $f_2=1$  Hz ( $T_2=1$  s) para el primer y segundo período respectivamente. Usando la función de transferencia de la Fig. 8, la transformada de Fourier del movimiento en la roca se calcula mediante deconvolución [8] (Fig. 9).

Se observa que en el basamento rocoso, a 1300 kilómetros del epicentro, el contenido de frecuencia es mayor en el rango de 0 a 0.6 Hz. Por lo tanto, solo suelos con su primer modo en este rango (es decir, con cientos de metros del suelo por encima de la roca o suelos muy blandos) podrían amplificar el movimiento en la roca a un nivel suficientemente alto como para alarmar a los residentes. Esta es la situación en Buenos Aires, donde además existe un inventario importante de edificios altos con período natural en este rango.

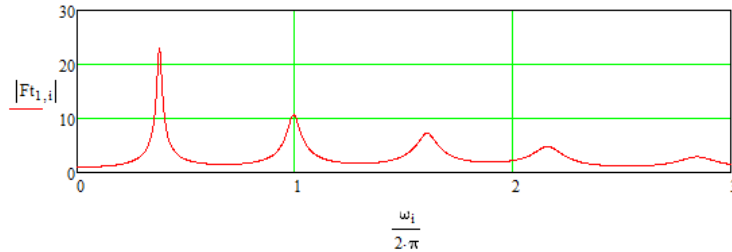


Fig. 8 Función de transferencia entre la roca y la superficie para los estratos de suelo del centro de Buenos Aires

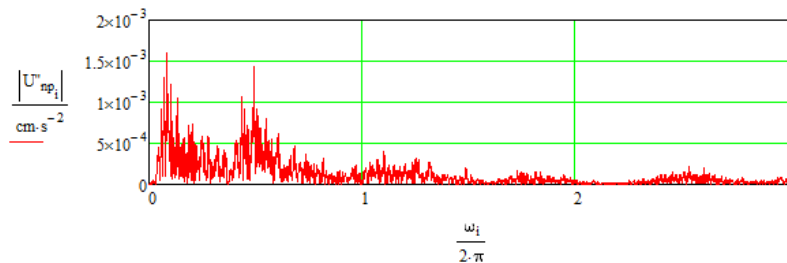


Fig. 9 Transformada de Fourier del terremoto del 16 de Septiembre de 2015 en Buenos Aires sobre el basamento rocoso obtenida por deconvolución

## EFFECTOS DE LA SISMICIDAD CHILENA EN EL PERÍODO DE RETORNO DE LOS MOVIMIENTOS DE SUELO EN BUENOS AIRES

Como resultado de la subducción oblicua de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana a una tasa de convergencia elevada de aproximadamente 7cm/año, los principales terremotos en Chile que producen movimiento en Buenos Aires están asociados con los grandes terremotos de subducción, a lo largo de la zona acoplada de la interfaz entre la placa de Nazca de subducción y la placa Sudamericana. Usando la categoría geográfica definida por Susa [9], las zonas 5, 6 y 7 (Fig. 10) son las más importantes debido a su distancia epicentral a Buenos Aires (alrededor de 1300 km para las tres zonas). A partir de la evaluación de la recurrencia sísmica para cada zona obtenida por Núñez et al [10] resulta el número de terremotos por año con magnitud  $M_w \geq m$  (Fig. 10).

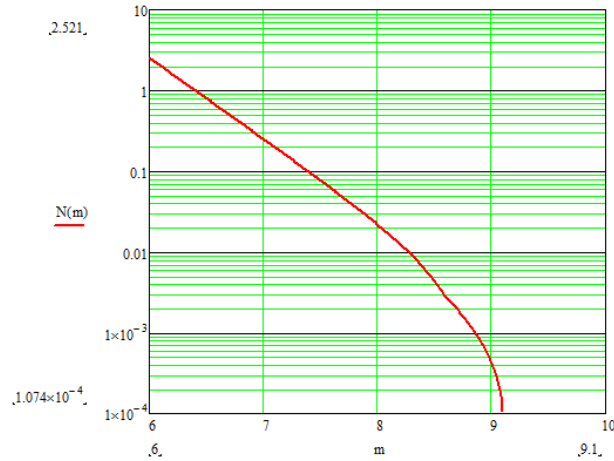
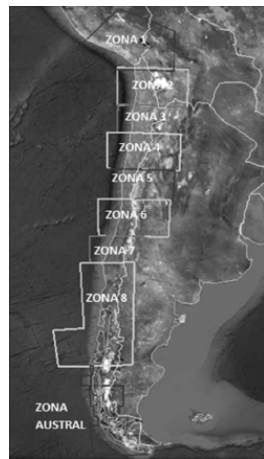


Fig. 10 Zonas chilenas de sismicidad definidas por Susa [9] (izquierda) y número de terremotos por año con magnitud  $M_w \geq m$  para las zonas 5, 6 y 7 (derecha)

Usando la ley de atenuación de la ec. (2) y los resultados de la Fig. 10 se obtiene la tasa anual de terremotos en Chile que producen movimientos de suelo con  $PGA \geq pga$  (cm/s<sup>2</sup>) en Buenos Aires (Fig. 11). De acuerdo a estos resultados, un  $PGA \geq 1$  cm/s<sup>2</sup> (como se registró el 16 de septiembre de 2015 en Buenos Aires) tiene un período de retorno de 100 años (sólo para los terremotos de Chile).

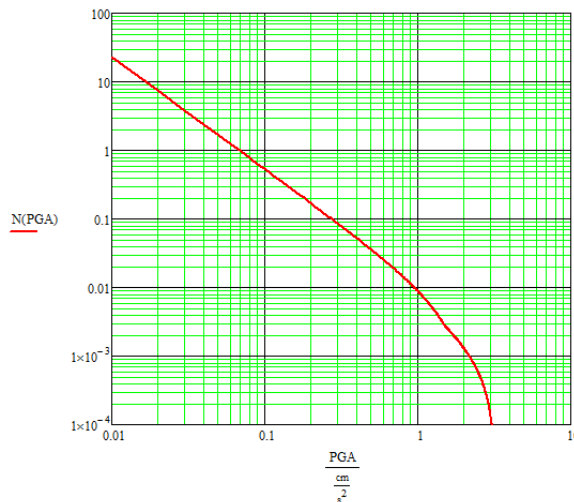


Fig. 11 Número de terremotos por año en Chile que producen movimientos de suelo con  $PGA \geq pga$  en Buenos Aires

## PERÍODO Y AMORTIGUAMIENTO DE EDIFICIOS ALTOS EN BUENOS AIRES

A partir de un estudio sistemático utilizando vibraciones ambientales para estimar el período natural y el amortiguamiento de edificios altos en Buenos Aires [11], se obtuvo la relación  $T = 0.0187 H/m - 0.0544$  (Fig. 12). Por ejemplo, para una altura de 150 m (edificio de 50 pisos) el período natural encontrado fue alrededor de 2.7 s. En el mismo

estudio se obtuvo una amortiguación de aproximadamente 1%, en particular para los edificios más altos (Fig. 12). A pesar de que este valor podría aumentar un poco para un  $PGA$  de  $1\text{cm/s}^2$  ( $PGA$  de 100 años de período de retorno), 1% de amortiguamiento debe utilizarse para estimar la respuesta de edificios altos en Buenos Aires hasta que haya más datos disponibles.

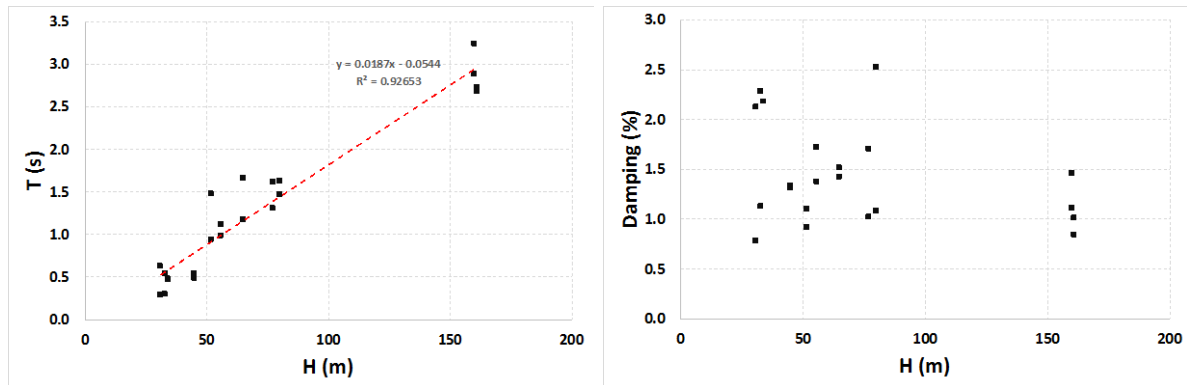


Fig. 12 Período y amortiguamiento de edificios altos en Buenos Aires [11]

## PERÍODO DE RETORNO DE LAS ACELERACIONES EN EDIFICIOS ALTOS DE BUENOS AIRES

Usando valores de  $PGA$  con períodos de retorno de 1, 5, 20 y 50 años obtenidos a partir de la Fig. 11, se calculó la aceleración (media + sigma) en el último piso de edificios con comportamiento según viga de corte (Fig. 13). En la figura se muestra también la curva de evaluación para movimientos horizontales aceptables para residencias especificada por la norma ISO 10137 en el Anexo D "Guidance for human response to wind-induced motions in buildings". La norma especifica aceleraciones pico en las primeras frecuencias naturales asociadas a las direcciones principales estructurales de los edificios (en la dirección del viento, transversal al viento y torsión). Esto se deriva de análisis de datos de varios edificios de uso general.

Como se muestra en la figura, para los edificios con primer período modo de aproximadamente 1 s y 2.4 s a 2.7 s se supera el límite aceptable para viento con un período de retorno de alrededor de 20 años. Entonces, la peor situación en términos de confort de los habitantes es para edificios de 100 a 160 m de altura (33 a 53 pisos). También se ve en la figura que para estos edificios el umbral de percepción de la vibración promedio [12] tiene un período de retorno de 5 años.

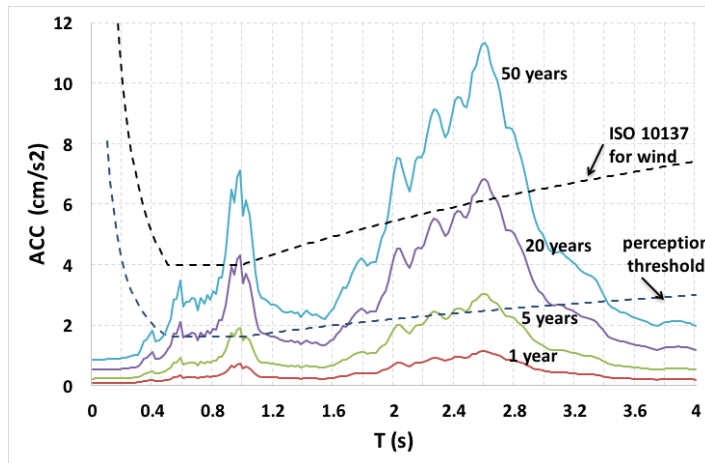


Fig. 13 Aceleración en el piso superior de edificios con comportamiento de viga de corte en Buenos Aires

## PERÍODO DE RETORNO DEL DAÑO DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES EN EDIFICIOS ALTOS DE BUENOS AIRES

El daño de mamposterías depende particularmente de la distorsión de entre piso ( $IDI$ ), como se muestra en la Fig. 14. Cierta nivel de daño se alcanza, por  $IDI$ s tan bajos como 0.0006 para ciertos tipo de mamposterías [13].

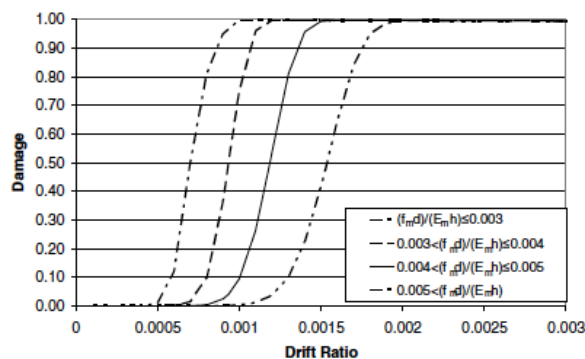


Fig. 14 Funciones de daño para mamposterías [13]

De la Fig. 11, un  $PGA = 1.65 \text{ cm/s}^2$  se obtiene en Buenos Aires para 475 años de período de retorno. Usando este  $PGA$ , los espectros de respuesta de la Fig. 4 y la relación entre  $T$  y  $H$  de la Fig. 12, se obtiene el  $IDI$  para el primer piso de edificios con comportamiento de viga de corte. Como se muestra en la Fig. 15, un cierto nivel de daño no estructural es posible para edificios de aproximadamente 130 a 150 m de altura (40 a 50 pisos,  $T = 2,4$  a  $2,8$  s), particularmente para mamposterías débiles si existe alguna distorsión previa, como es usual en edificios altos debido a efectos de creep diferencial en columnas.

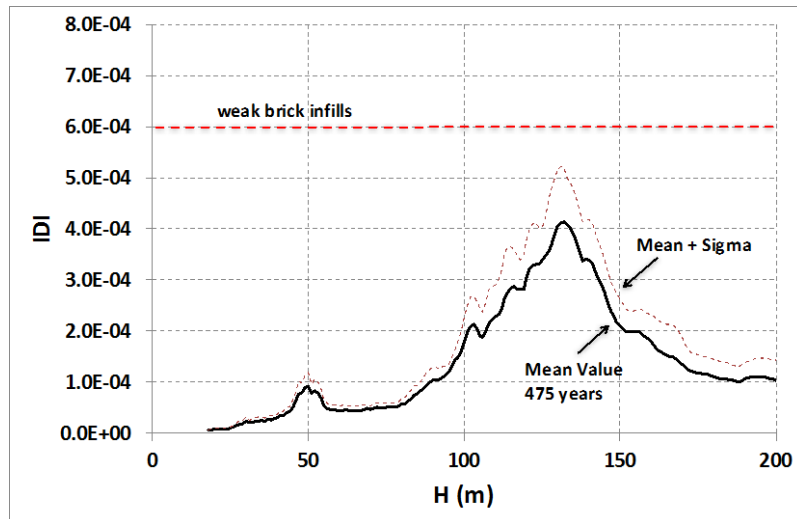


Fig. 15 IDI en el primer piso de edificios con comportamiento de viga de corte para un período de retorno de 475 años

## CONCLUSIONES

A partir del análisis de los temas tratados en este trabajo se obtienen las siguientes conclusiones con respecto a los efectos de los terremotos de larga distancia en los edificios altos (1,300 km del epicentro de Buenos Aires, en este caso):

- La duración significativa de los movimientos de suelo, en contraste con la de los terremotos de corta distancia, no depende de la magnitud y es mucho más grande (200 a 300 s). Esto tiene dos consecuencias importantes: a) edificios en resonancia con el período principal del movimiento del suelo amplifican notablemente la aceleración en la base y b) los habitantes de esos edificios se ven afectados por altas aceleraciones durante varios minutos incrementando así la incomodidad y el pánico.
- Para terremotos de larga distancia, el efecto de la magnitud en el contenido de frecuencia tiende a ser ocultado por la influencia del período de suelo por encima de la roca
- La forma de los espectros de respuesta obtenidos para el terremoto principal y para todas las réplicas (de magnitud 8.3 a 6.0) son similares con dos períodos de resonancia alrededor de 2.5 s y 1 s. Estos períodos son aproximadamente el primer y segundo período natural de los 300 m del suelo por encima del basamento de roca en Buenos Aires. El espectro de respuesta de pseudo-aceleración muestra también una gran amplificación del *PGA* (alrededor de 10 veces para el primer período de resonancia), típicos de movimiento del suelo del tipo armónico.
- El contenido de frecuencia obtenido por deconvolución en el basamento rocoso a 1,300 km del epicentro es mucho mayor en el rango de 0 a 0.6 Hz. Por lo tanto, solo suelos con su primer modo en este rango (es decir, con cientos de metros del suelo por encima de la roca o suelos muy blandos) podrían amplificar el movimiento en la roca a un nivel suficientemente alto como para alarmar a los residentes. Esta es la situación

en Buenos Aires, donde además existe un inventario importante de edificios altos con período natural en este rango

- Para los edificios con primer período modo de aproximadamente 1 s y 2.4 s a 2.7 s se supera el límite aceptable para viento con un período de retorno de alrededor de 20 años. La peor situación en términos de confort de los habitantes es para edificios de 100 a 160 m de altura (33 a 53 pisos). Para estos, el umbral de percepción de la vibración promedio tiene un periodo de retorno de 5 años.

- Un cierto nivel de daño no estructural es posible para los edificios alrededor de 130 a 150 m de altura (alrededor de 40 a 50 pisos,  $T = 2,4$  a  $2,8$  s), en particular para rellenos de mamposterías débiles, con un periodo de retorno de 475 años.

## REFERENCIAS

- [1] USGS, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a#general>
- [2] Pan TC (1995): When The Doorbell Rings - A Case of Building Response To A Long Distance Earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 24, 1343-1353
- [3] Celebi M, Prince J, Dietel C, Onate M and Chavez G (1987) The Culprit in Mexico City—Amplification of Motions. *Earthquake Spectra*: May 1987, Vol. 3, No. 2, pp. 315-328.
- [4] Núñez E (1986): Geotechnical conditions in Buenos Aires City. *V Intern. Congress IAEG*, IV, 2623-2630.
- [5] Codevilla M and Sfriso A (2011): Actualización de la información geotécnica de los suelos de la Ciudad de Buenos Aires. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*.
- [6] Trifunac MD and Brady AG (1975): A study on duration of strong earthquake ground motion. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 65, 581–626.
- [7] Rathje ER, Abrahamson NA and Bray JD (1998): Simplified Frequency Content Estimates Of Earthquake Ground Motions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 124, No. 2, pp. 150-159, 1998.
- [8] Kramer S (1996): *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 1<sup>st</sup> edition.
- [9] Susa D. (2004): Evaluación del peligro sísmico asociado a sismos de tipo interplaca en Chile y sur del Perú utilizando una distribución bi-paramétrica de Weibull. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- [10] Núñez I, Boroschek R, Comte D and Contreras V (2015): Nuevo Peligro Sísmico para Chile. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015*, Santiago, Chile.
- [11] Mustar J (2015): Determinación del Período Natural y Factor de Amortiguamiento a Partir de la vibración ambiente. Tesis para completar las exigencias del grado de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.
- [12] Kwok K, Hitchcock P and Burton M (2009): Perception of vibration and occupant comfort in wind-excited tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 97 (2009) 368–380
- [13] Erduran E and Yakut A (2004): Drift based Damage Functions for Components of RC Structures. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004