

CARACTERIZACIÓN DE SISMOS DE CAMPO CERCANO¹

Jorge A. Rodríguez Ordoñez ²

RESUMEN: Los sismos de campo cercano son los que tienen su epicentro a menos de 20 km con respecto al sitio de interés. Estos sismos tienen condiciones particulares que representan una alta amenaza sísmica y no están contemplados en los parámetros de amenaza sísmica regionales que se establecen a partir de estudios de amenaza generales. Algunos códigos de diseño requieren una evaluación específica de esta situación para el diseño de estructuras, pero no presentan detalles ni referencias para esta evaluación. El artículo presenta una descripción de las condiciones características que describen el movimiento sísmico de campo cercano con base en el análisis de registros reales. Se muestra cómo los sismos de campo cercano tienen un patrón coherente de movimientos de periodo largo y de gran intensidad que se originan en el desplazamiento por la ruptura en la fuente. Debido a que son de periodo largo se manifiestan significativamente en los desplazamientos cosísmicos que pueden llegar a ser bastante grandes. Este efecto se atenúa en distancias mayores a 20 km. Esta información es de utilidad en la caracterización de la amenaza sísmica para casos en que se tengan fuentes sísmicas superficiales cercanas al sitio de interés.

Palabras clave: amenaza sísmica, desplazamientos sísmicos, sismos de campo cercano

NEAR FIELD EARTHQUAKES CHARACTERIZATION

ABSTRACT: Near field earthquakes are those that have their epicenter at less than 20 km with respect to the site of interest. These earthquakes have particular conditions that pose a high seismic threat and are not covered by the regional seismic hazard parameters established from regional studies. Some design codes require a specific assessment of this situation for structure design, but do not specify methods or references for this evaluation. This article presents a description of the characteristic conditions of near field seismic movement based on the analysis of real records. It shows how near field earthquakes have a coherent pattern of long-period, high-intensity movements that originate from the rupture displacement in the source. Because of the long-period movements they significantly affect the coseismic displacements which can become quite large. This effect is attenuated at distances larger than 20 km. This information is useful in characterizing the seismic threat in cases where there are shallow seismic sources near the site of interest.

Keywords: seismic hazard, seismic displacements, near field earthquakes

INTRODUCCIÓN

Los sismos de campo cercano son los que tienen su epicentro a menos de 20 km con respecto al sitio de interés. El movimiento de estos sismos está controlado por los desplazamientos que ocurren en la ruptura de la fuente. Estos son proporcionales al área de ruptura que a su vez es proporcional a la energía o el momento sísmico de la ruptura que depende del desplazamiento y la caída de esfuerzos que se libera en el momento de la ruptura. El logaritmo del momento sísmico es proporcional a la magnitud del sismo. Los desplazamientos que se producen por lo tanto ocurren sobre un área grande con lo que la longitud de onda del movimiento resultante también es grande. Esto implica que se manifiesta a periodos largos por sus componentes de Fourier.

¹ Artículo recibido el 16 de noviembre de 2020 y aceptado para publicación el 16 de diciembre de 2020.

² Gerente, Jeoprobe SAS, Calle 86 No. 24 -54, Bogotá, Colombia. E-mail: jorge.rodriguez@jeoprobe.com

La intensidad del movimiento es alta, en términos de aceleraciones y desplazamientos por lo que representan una alta amenaza. Estos efectos locales no están contemplados en los parámetros de amenaza sísmica regionales que se establecen a partir de estudios probabilísticos de amenaza que se basan en la identificación de fuentes sísmicas y su caracterización utilizando ecuaciones de atenuación desarrolladas a partir de datos de sismos lejanos.

Algunos códigos de diseño como las especificaciones AASHTO para diseño de puentes (AASHTO 2012, 2017), que sirve de base para el Código Colombiano de Diseño de Puentes, requieren una evaluación específica de esta situación para el diseño, pero no presentan detalles ni referencias para esta evaluación. Este tema ha sido estudiado por autores como Abramson (2001), Baker (2007), Champion & Liel (2012), Grimaz & Malisan (2014), Sadigh et al (1997), Shabestari K.T. & Yamazaki F. (2003), y Somerville (2005) entre otros. Estos trabajos permiten entender los efectos de sismos cercanos asociados a los desplazamientos cosísmicos del terreno por el movimiento de ruptura en la falla.

El presente artículo presenta una descripción de las condiciones características que describen el movimiento sísmico de campo cercano con base en el análisis de registros reales de 36 sismos de la base de datos del “Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)” y tres (3) sismos de la Red Sísmica de Colombia de una misma zona sismogénica registrados en varias estaciones a diferentes distancias. Estos registros permiten estudiar los movimientos registrados en términos de aceleraciones y desplazamientos, así como su relación con la distancia, magnitud del sismo y condiciones geológicas. El análisis muestra cómo los sismos de campo cercano tienen un patrón coherente de pulsos de movimientos de periodo largo y de gran intensidad que se originan en el desplazamiento por la ruptura en la fuente. Debido a que son de periodo largo afectan significativamente los desplazamientos que pueden llegar a ser bastante grandes. Este efecto se atenúa en distancias mayores a 20 km. Esta información es de utilidad en la caracterización de la amenaza sísmica para casos en que se tengan fuentes sísmicas superficiales cercanas al sitio de interés.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MOVIMIENTOS DE CAMPO CERCANO

De acuerdo con Somerville (2002, 2005), el movimiento del terreno cerca del origen de rupturas en fallas superficiales contiene pulsos dinámicos coherentes muy fuertes de movimiento a largos periodos y desplazamientos permanentes en el terreno, los cuales se asocian a la ruptura misma en la falla ya que se propagan aproximadamente a la velocidad de las ondas de corte y su rango de periodos predominantes está controlado por el tamaño de la ruptura. Estos movimientos ocurren en los tres componentes, perpendicular al plano de la falla causado por efectos de direccionalidad en la ruptura. Los registros muestran que estos pulsos tienen componentes en un rango limitado de frecuencia que disminuye con la magnitud del sismo. Estos pulsos tienen una fuerte directividad, Somerville (2005) presenta un modelo que considera la directividad de la ruptura en un rango limitado de frecuencias teniendo en cuenta la relación entre el periodo del pulso y la magnitud.

Adicionalmente, cuando la falla tiene expresión en superficie, en el campo cercano ocurre desplazamiento relativo del terreno de un lado con respecto al otro de la falla que se rompe, lo cual puede generar desplazamientos relativos que afecten las estructuras expuestas. La expresión de la ruptura en superficie permite identificar la longitud de desplazamiento relativo en la ruptura (Wells y Coppersmith, 1994). Los estudios de Neotectónica también permiten evaluar la magnitud de los desplazamientos máximos que pueden ocurrir en las fallas por eventos sísmicos. A manera de ejemplo, en el estudio de Paleosismología de la Falla de Ibagué (INGEOMINAS, 2008) se pudo establecer que en los últimos 10.400 años en el sitio donde se realizó una trinchera para la evaluación, han ocurrido entre 3 y 6 eventos sísmicos con separación de tiempo entre eventos entre 1275 y 2945 años. De estos eventos, tres son principales con magnitud característica entre 6.9 y 7.1 con desplazamiento máximo en la falla del orden de 1.0m y 40 km de longitud de ruptura. La tasa de actividad promedio de esta falla ha sido entre 0.77 y 3.8 mm/año y la longitud total de la falla es del orden de 84 km. Estos valores son consistentes con otros reportados (Wells y Coppersmith, 1994). Los valores de desplazamiento en la falla son el límite superior de los desplazamientos que pueden producirse en el terreno en el campo cercano; Estos valores se atenúan con la distancia.

A continuación se examinan los espectros de respuesta y la magnitud de los desplazamientos que ocurren en eventos de sismos de campo cercano.

ESPECTROS DE RESPUESTA DE SISMOS CERCANOS

Con el propósito de tener un estimativo de cuáles pueden ser los niveles de aceleración a períodos largos por efecto de sismos cercanos, en la Figura 1 se presenta una recopilación de 36 espectros de respuesta de sismos reales cercanos ($R < 15\text{km}$ y magnitud de momento $M_o < 5.5 - 7.5$) obtenidos de la base de datos del PEER <https://ngawest2.berkeley.edu/site>). Se puede apreciar que todos los sismos cercanos tienen valores altos de aceleración

espectral a periodos largos, la mayoría de ellos con picos diferenciables a periodos mayores de 0.5s. En esta figura se presentan líneas a trazos que corresponden al promedio y el promedio +/- una desviación estándar de los datos que se muestran. Se puede apreciar que la tasa de descenso de los valores espectrales al aumentar el periodo es en general mucho menor que la que se obtiene normalmente en sismos en roca de campo lejano. En la Tabla 1 se presenta la información relevante de cada evento utilizado en la presente caracterización.

El análisis de los datos de los sismos cercanos registrados obtenidos permite establecer la relación entre la forma del espectro a periodos largos con la magnitud y la distancia. Esto permite obtener una evaluación empírica de la forma del espectro teniendo en cuenta el efecto de campo cercano a nivel de roca para distancias y magnitudes dadas. En la Figura 2 se muestra una selección representativa de los espectros considerados con el fin de ilustrar la forma del espectro de sismos de campo cercano registrados en suelo duro o roca; por limitación de espacio no se presentan las curvas de todos los sismos. Adicionalmente, en estas figuras se presenta el espectro obtenido para cada uno de los eventos con base en la ecuación de atenuación, ecuación (1), propuesta por el GK15 (Graizer & Kalkan, 2016) la cual es aplicable para sismos de campo lejano. Esta ecuación considera una forma espectral parametrizada, PSA_{norm} (ecuación (3)), que se escala en función de la aceleración máxima del terreno (PGA) que se determina a su vez mediante la ecuación (2 en función de 5 funciones que tienen en cuenta la magnitud (G_1), la atenuación con la distancia (G_2), la atenuación inelástica (G_3), los efectos de respuesta de local de sitio (G_4) y efectos de cuenca (G_5). Se aprecia que en todos los casos se presentan picos de respuesta significativos por encima de los valores de la relación GK-15 para periodos largos. Este es el efecto del movimiento asociado con el desplazamiento de la falla diferente y en adición a las vibraciones inducidas por el sismo que se reflejan al utilizar la ecuación de atenuación para campo lejano propuesta por el GK-15.

$$PSA = PGA * PSA_{norm} \tag{1}$$

$$PGA = G_1 * G_2 * G_3 * G_4 * G_5 \tag{2}$$

$$PSA_{norm}(T) = I * \exp \exp \left(-0.5 * \left(\frac{\ln(T) + \mu}{S} \right)^2 \right) + \left(\left(1 - \left(\frac{T}{T_{sp,0}} \right)^\zeta \right)^2 + 4 * (D_{sp})^2 * \left(\frac{T}{T_{sp,0}} \right)^\zeta \right)^{-0.5} \tag{3}$$

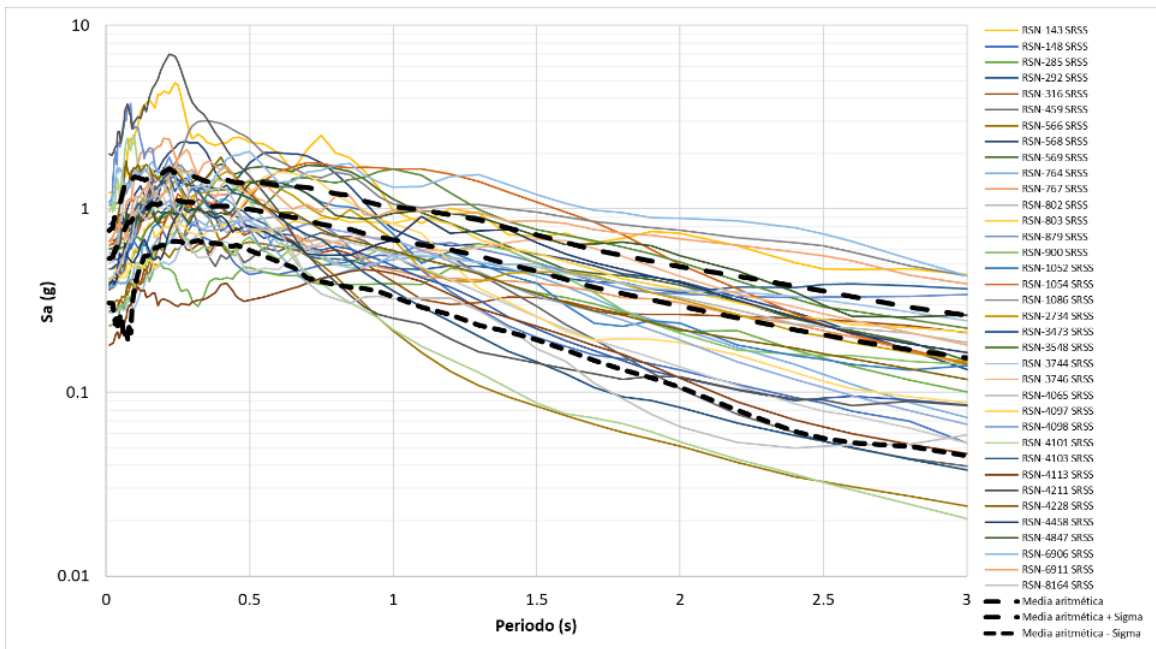


Figura 1: Espectros de respuesta de sismos cercanos reales.

Se considera que debe existir una relación entre los valores de pseudo aceleración (S_a) con la distancia y la magnitud. A partir de los datos de la Figura 1 se discriminaron los resultados partir de dos parámetros para representar el descenso del valor de S_a a periodos largos (>1 seg): el valor de S_a para periodo de 1.0 segundo (S_{a1s}) y la tasa de descenso, m , del espectro de respuesta a periodos largos (>1.0 seg), m , de la forma $S_a=S_{a1s}T^{-m}$. En la Figura 2 se muestran las curvas que definen estos parámetros que describen el comportamiento del espectro de sismos de campo cercano. En línea continua se presenta el espectro de respuesta del sismo, en línea a trazos el espectro siguiendo metodología GK-15 con los datos correspondientes de cada sismo y en línea continua gruesa el espectro para periodos largos con base en la parametrización de campo cercano. Se puede apreciar, que aunque las ecuaciones del GK15 se desarrollaron teniendo en cuenta sismos a partir de 0.2km, los sismos que se ilustran se apartan de la predicción del GK15 por mostrar picos a periodos largos que son característicos de los movimientos cosísmicos por el desplazamiento en la falla que se atenúa rápidamente y que le dan un carácter diferente a estos eventos.

Tabla 1. Información sismos campo cercano utilizados.

No.	RSN	Nombre	Año	Mecanismo	Magnitud de		Distancia, R (km)	Vs 30 (m/s)
					momento	Pulso (s)		
1	143	"Tabas_Iran"	1978	Inversa	7.35	6.2	1.8	767
2	148	"Coyote Lake"	1979	Transcurrente	5.74	1.2	6.8	350
3	285	"Irpinia_Italy-01"	1980	Normal	6.90	1.7	8.1	650
4	292	"Irpinia_Italy-01"	1980	Normal	6.90	3.3	6.8	382
5	316	"Westmorland"	1981	Transcurrente	5.90	4.4	16.5	349
6	459	"Morgan Hill"	1984	Transcurrente	6.19	1.2	9.9	663
7	566	"Kalamata_Greece-02"	1986	Normal	5.40	0.8	4.0	382
8	568	"San Salvador"	1986	Transcurrente	5.80	0.8	2.1	489
9	569	"San Salvador"	1986	Transcurrente	5.80	1.1	3.7	456
10	764	"Loma Prieta"	1989	Inversa oblicua	6.93	1.6	10.3	309
11	767	"Loma Prieta"	1989	Inversa oblicua	6.93	2.6	12.2	350
12	802	"Loma Prieta"	1989	Inversa oblicua	6.93	4.6	7.6	381
13	803	"Loma Prieta"	1989	Inversa oblicua	6.93	5.6	8.5	348
14	879	"Landers"	1992	Transcurrente	7.28	5.1	2.2	1369
15	900	"Landers"	1992	Transcurrente	7.28	7.5	23.6	354
16	1052	"Northridge-01"	1994	Inversa	6.69	0.7	5.3	508
17	1054	"Northridge-01"	1994	Inversa	6.69	1.2	5.5	326
18	1086	"Northridge-01"	1994	Inversa	6.69	2.4	1.7	441
19	2734	"Chi-Chi_Taiwan-04"	1999	Transcurrente	6.20	2.4	6.0	553
20	3473	"Chi-Chi_Taiwan-06"	1999	Inversa	6.30	4.2	5.7	443
21	3548	"Loma Prieta"	1989	Inversa oblicua	6.93	1.6	3.2	1070
22	3744	"Cape Mendocino"	1992	Inversa	7.01	5.4	8.5	566
23	3746	"Cape Mendocino"	1992	Inversa	7.01	2.0	16.4	459
24	4065	"Parkfield-02_CA"	2004	Transcurrente	6.00	1.2	1.4	384
25	4097	"Parkfield-02_CA"	2004	Transcurrente	6.00	0.9	1.6	648
26	4098	"Parkfield-02_CA"	2004	Transcurrente	6.00	1.3	1.7	327
27	4101	"Parkfield-02_CA"	2004	Transcurrente	6.00	0.5	5.0	397
28	4103	"Parkfield-02_CA"	2004	Transcurrente	6.00	0.7	3.3	410
29	4113	"Parkfield-02_CA"	2004	Transcurrente	6.00	1.1	1.2	372
30	4211	"Niigata_Japan"	2004	Inversa	6.63	0.3	10.2	419

31	4228	"Niigata_Japan"	2004	Inversa	6.63	1.8	6.3	375
32	4458	"Montenegro_Yugoslavia"	1979	Inversa	7.10	2.0	4.0	319
33	4847	"Chuetsu-oki_Japan"	2007	Inversa	6.80	1.4	9.4	383
34	6906	"Darfield_New Zealand"	2010	Transcurrente	7.00	6.2	1.2	344
35	6911	"Darfield_New Zealand"	2010	Transcurrente	7.00	9.9	7.3	326
36	8164	"Duzce_Turkey"	1999	Transcurrente	7.14	10.1	2.7	690

En la Figura 3 se presenta la variación de la tasa de caída, m , en función de la distancia y la magnitud. Se aprecia que la tasa de caída es menor para eventos con magnitud mayor, es decir dichos eventos tienen un mayor contenido de energía en un rango más amplio y de periodos más largos. Esto corresponde a la realidad física de un sismo de mayor magnitud que implica una ruptura de mayor tamaño en la falla con lo cual hay asociadas componentes de movimiento con longitud de onda proporcionales a dicha ruptura. También se aprecia una dependencia de la tasa de caída con la distancia, en la cual a menor distancia con respecto al sitio de la ruptura la curva tiene valores mayores.

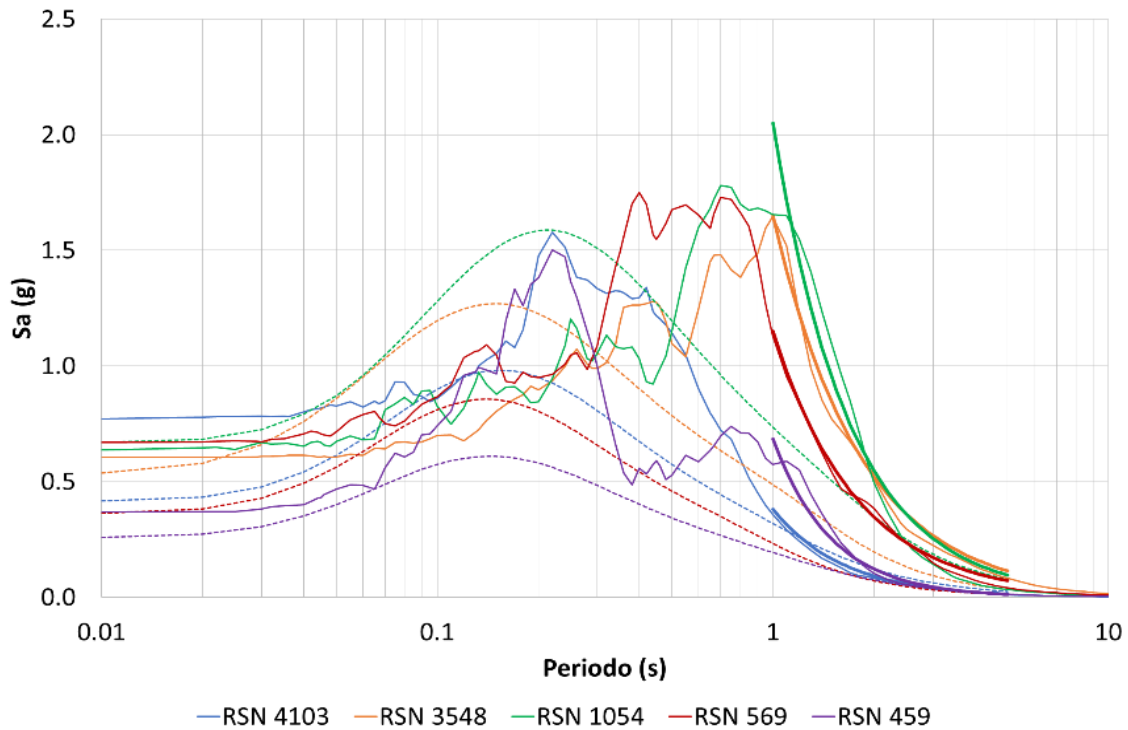


Figura 2: Espectros de campo cercano comparados con ecuaciones de atenuación y aproximación a periodos largos.

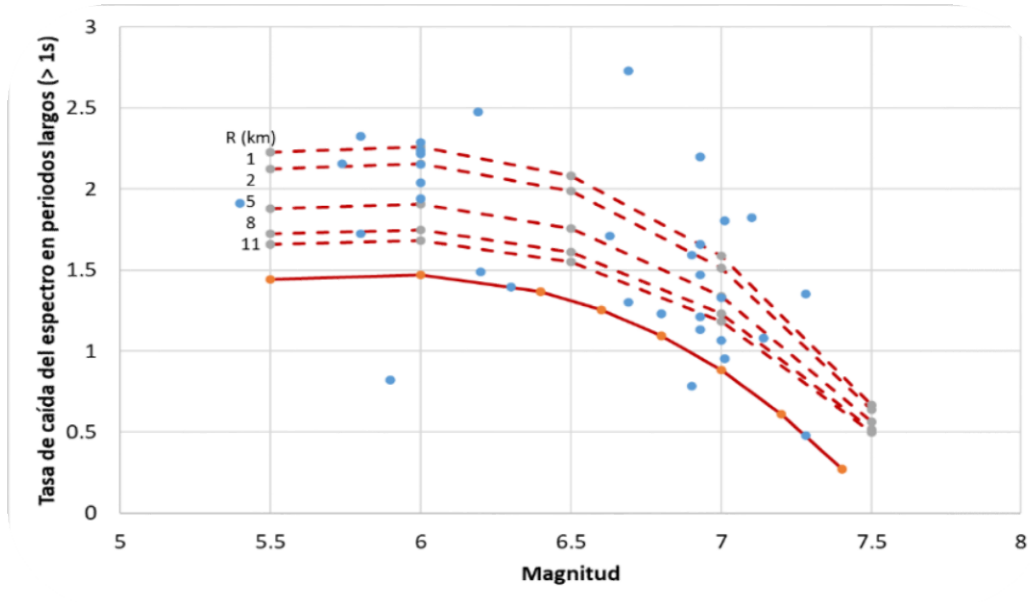


Figura 3: Variación de la tasa de caída, m , en $S_a = S_{a1s} T^{-m}$ del espectro de respuesta en periodos largos ($T > 1\text{seg}$) de sismos cercanos reales en función de la distancia y la magnitud.

En la Figura 4 se aprecian los datos del valor de S_a a 1.0 segundo en función de la magnitud. Se aprecia una tendencia general de aumento de dicho valor con la magnitud, aunque se registra una variación bastante amplia. En esta figura se indica el resultado en línea roja, el cual corresponde al promedio +2 veces la desviación estándar de los datos, esto a su vez corresponde a una cobertura del orden del 90% de los datos registrados.

En la Figura 5 se presentan los datos del valor de S_a a 1.0 segundo en función de la distancia. Se aprecia que este valor aumenta para menores distancias con respecto a la falla. A distancias mayores a 15 km los datos presentan una tendencia a nivelarse. Esto corresponde a la transición a la condición de campo lejano.

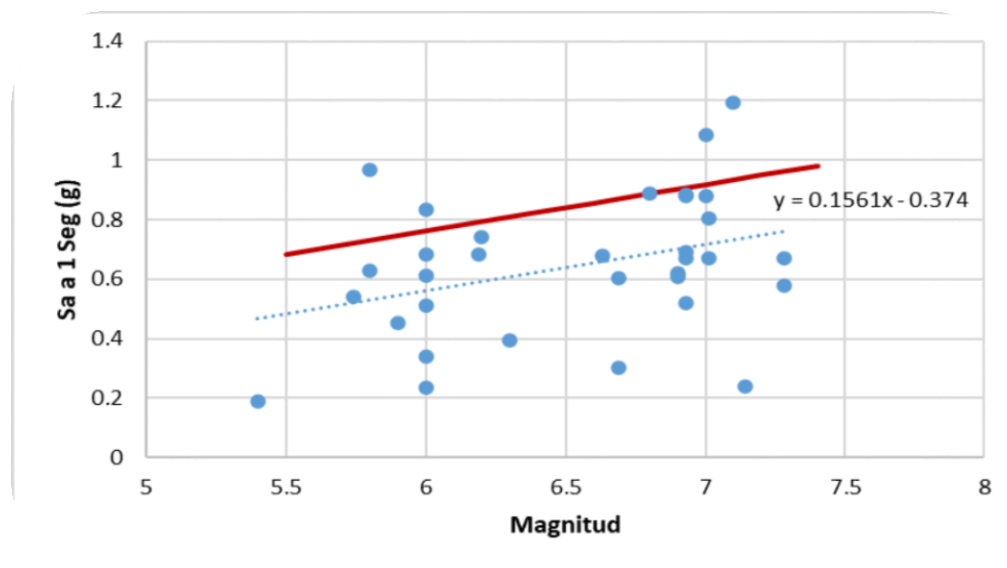


Figura 4: Variación del valor de S_a para periodo $T=1\text{seg}$ de sismos cercanos reales en función de la magnitud.

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS DEL TERRENO EN SISMOS CERCANOS

Como la evaluación de los espectros de respuesta para sismos de campo cercano indican que los efectos de estos sismos se manifiestan en desplazamientos significativos a periodos largos como consecuencia del desplazamiento en la falla, los efectos del movimiento a periodos largos son más evidentes en los desplazamientos que en las aceleraciones. Con el propósito de entender mejor las características del movimiento originado por sismos cercanos, se evaluaron los desplazamientos en cada una de las direcciones de los registros de 36 sismos obtenidos de la base de datos del PEER ID dos sismos de magnitud 5.7 a 6.1 registrados en la cordillera oriental de Colombia en varias estaciones a diferentes distancias. Esta información se analiza para identificar la importancia relativa de los factores que determinan el comportamiento del movimiento.

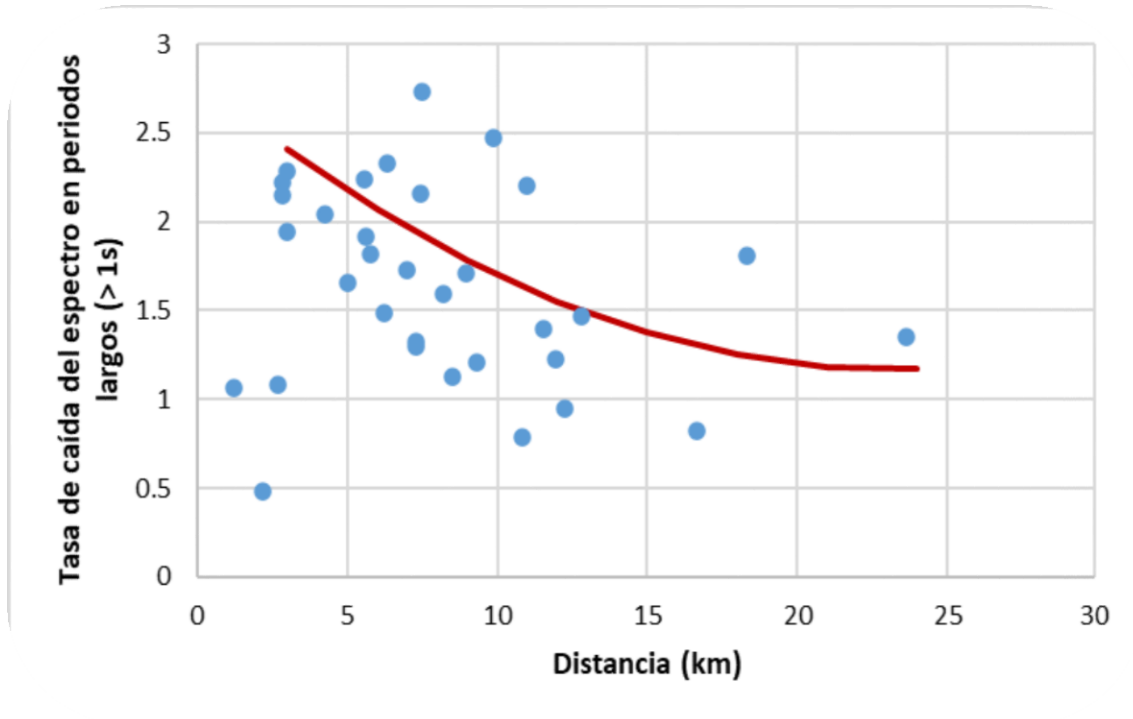


Figura 5: Variación de la tasa de caída, m , en $S_a = T_1^m T^{-m}$ del espectro de respuesta en periodos largos ($T > 1\text{seg}$) de sismos cercanos reales en función de la distancia.

En la Figura 6 se presenta la variación con la distancia de los desplazamientos máximos del movimiento del terreno, como la magnitud de la resultante del vector de movimiento cuyas componentes se obtienen de la doble integración de las historias de aceleración. En esta figura también se muestran el rango medio y máximo de los desplazamientos máximos de ruptura registrados en las fallas reportados por Wells & Coppersmith (1994). Estos valores corresponden al límite superior del movimiento y corresponden bien con los datos de los registros. En la figura se indican los sismos registrados en Colombia como Upied y los sismos de referencia como Uref.

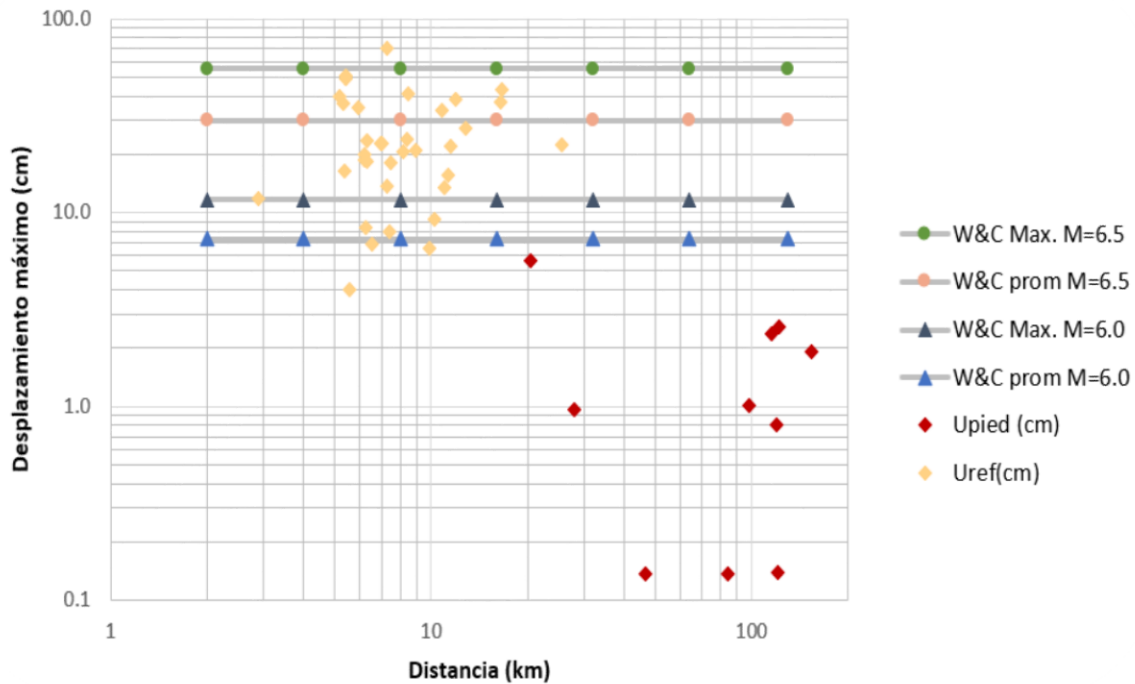


Figura 6: Desplazamiento total máximo de los registros considerados en función de la distancia.

De acuerdo con Brune (1970), el espectro de Fourier de amplitud del movimiento a bajas frecuencias es directamente proporcional al momento sísmico, el cual está relacionado con la magnitud con proporcionalidad exponencial. También es inversamente proporcional a la distancia con respecto a la fuente y es proporcional al inverso del cubo de la velocidad de propagación de las ondas de corte en el medio. Dado que se trata de periodos largos las longitudes de onda correspondientes son del orden de varios kilómetros con lo que la velocidad de propagación de ondas de corte relevante es la del macizo rocoso a esas profundidades. Diferentes formaciones geológicas y los efectos tectónicos determinan variaciones significativas de esta velocidad. Por lo tanto, la amplitud del movimiento depende mucho de las condiciones geológicas de la parte superior de la corteza en la zona donde se registren. Para el análisis de los desplazamientos registrados se normalizaron los datos con base en estos parámetros con el fin de poder identificar el efecto de la condición de campo cercano de las señales.

El desplazamiento máximo normalizado se presenta en función del inverso de la distancia a la fuente en la Figura 7 y en la Figura 8 se presenta en función de la distancia a la fuente. En ambas figuras se aprecia como para distancias menores a 20 km aumenta significativamente el desplazamiento, pero a partir de esa distancia los valores máximos se nivelan. Existe incertidumbre con respecto a la velocidad de ondas de corte del medio para los sismos considerados, en especial para los de referencia internacionales, lo cual contribuye a la dispersión de los datos. A pesar de esto la tendencia del comportamiento es clara y consistente con lo que se puede esperar a partir de la física del problema. Estas observaciones son útiles para la caracterización del movimiento sísmico de fuentes cercanas. La ecuación de la línea de tendencia del desplazamiento máximo, D (m), con la distancia R (km), en la Figura 8 está dada por:

$$D = 1.364 \cdot 10^{(-1.8674 \log \log R^3 + 9.527 \log \log R^2 - 16.302 \log \log R + 6.7964)} ; R < 100 \text{ km} \quad (4)$$

CONCLUSIONES

En el artículo se analizan los registros de un número representativo de sismos de campo cercano y de tres eventos registrados en la cordillera oriental de Colombia, con el fin de caracterizar los espectros de respuesta y los desplazamientos máximos asociados con este tipo de eventos. Los sismos de campo cercano son los que tienen su epicentro a menos de 20 km con respecto al sitio de interés. El movimiento de estos sismos está determinado por los desplazamientos que ocurren en la ruptura de la fuente. Estos son proporcionales al área de ruptura que a su vez es proporcional a la energía o el momento sísmico. La energía depende del desplazamiento y la caída de esfuerzos que se libera en el momento de la ruptura. El logaritmo del momento sísmico es proporcional a la magnitud del sismo por lo que el desplazamiento crece exponencialmente con la magnitud. Los desplazamientos que se producen ocurren sobre un área grande con lo que la longitud de onda del movimiento resultante también es grande, involucrando los primeros kilómetros de la corteza. Esto implica que el efecto se manifiesta a periodos largos.

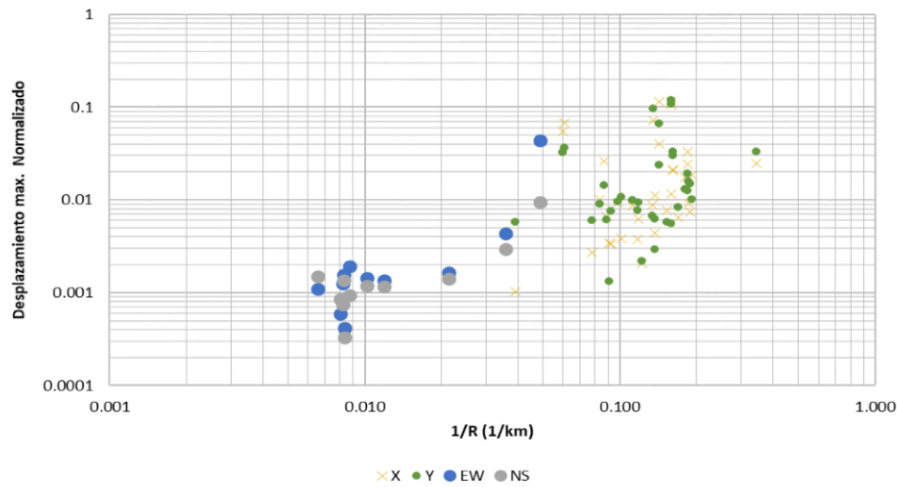


Figura 7: Variación del desplazamiento máximo normalizado en función del inverso de la distancia.

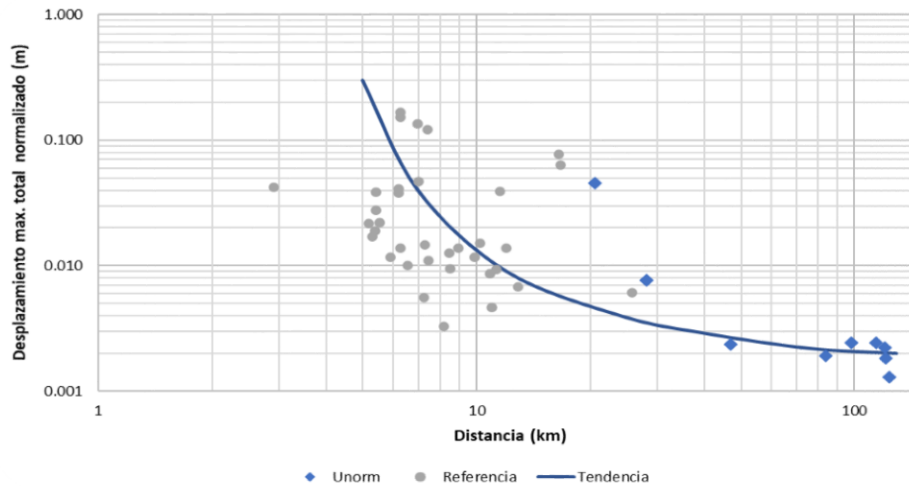


Figura 8: Variación del desplazamiento máximo normalizado en función del inverso de la distancia.

El análisis muestra cómo los sismos de campo cercano tienen un patrón coherente de pulsos de movimiento de periodo largo y de gran intensidad que se originan en el desplazamiento por la ruptura en la fuente. La intensidad del movimiento es alta, en términos de aceleraciones y desplazamientos por lo que representan una alta amenaza. Del análisis se obtuvieron relaciones empíricas que permiten estimar la forma de los espectros de respuesta de aceleraciones teniendo en cuenta la distancia a la fuente y la magnitud del sismo. También se presentan relaciones de los desplazamientos máximos normalizados con el momento sísmico y la distancia, teniendo en cuenta las variaciones de la velocidad de onda de corte promedio de la parte superior de la corteza que tiene una alta injerencia en la magnitud de los desplazamientos. Con esta normalización los sismos considerados muestran una tendencia clara de los desplazamientos normalizados que aumentan significativamente a distancias menores a 20 km de la fuente, pero mantienen un nivel constante a mayores distancias. Esto es consistente con lo que se espera a partir de la teoría sismológica de la atenuación de los desplazamientos producidos por fuentes sísmicas.

Los efectos locales no están contemplados en los parámetros de amenaza sísmica regionales que se establecen a partir de estudios probabilísticos de amenaza que se basan en la identificación de fuentes sísmicas y su caracterización utilizando ecuaciones de atenuación desarrolladas a partir de datos de sismos lejanos. Por lo tanto, tal como lo requieren algunas guías de diseño sísmico, se debe tener en cuenta que a distancias menores a 20 km de fallas activas superficiales la amenaza sísmica se ve incrementada por estos efectos. La información que se presenta es de utilidad en la caracterización de la amenaza sísmica para casos en que se tengan fuentes sísmicas superficiales cercanas al sitio de interés.

Algunos códigos de diseño como las especificaciones AASHTO para diseño de puentes (AASHTO 2012, 2017), que sirve de base para el Código Colombiano de Diseño de Puentes, requieren una evaluación específica de esta situación para el diseño, pero no presentan detalles ni referencias para esta evaluación. Las observaciones reportadas en el presente artículo pueden utilizarse como criterio para la consideración de la amenaza en el campo cercano.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2017). “Bridge Design Guide Specifications”, 8^{va} Edición.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2012). “Bridge Design Guide Specifications”, 6^{ta} Edición.
- Abrahamson N.A. (2001). “Incorporating effects of near fault tectonic deformation into design ground motions”, *Presentation sponsored by the Earthquake Engineering Research Institute Visiting Professional Program, hosted by the State University of New York at Buffalo, 26/oct/2001*. Disponible en: <http://mceer.buffalo.edu/outreach/pr/abrahamson.asp>.
- Baker J.W. (2007). “Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis”, *Bulletin Seismological Society Am.*, 97, pp. 1486-1501.
- Brune, J. N. (1970). “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, pp. 4997–5009.
- Champion C. and Liel A. (2012). “The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 41, pp. 1391-1409.
- Graizer V., & Kalkan. (2016). “Summary of the GK15 Ground-Motion Prediction Equation for Horizontal PGA and 5% Damped PSA from Shallow Crustal Continental Earthquakes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 2, pp. 687–707.
- Grimaz S, Malisan P (2014). “Near field domain effects and their consideration in the international and Italian seismic codes”, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 55(4):717–738
- Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS (2008). “Paleo sismología de la Falla de Ibagué”, *Publicaciones Geológicas Especiales*, Número 29.

- Sadigh, K., C. Y. Chang, J. A. Egan, F. Makdisi, and R. R. Youngs (1997). "Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data", *Seismological Research Letter*, Vol. 68, no. 1, 180-189.
- Shabestari K.T. and Yamazaki F. (2003). "Near-fault spatial variation in strong ground motion due to rupture directivity and hanging wall effects from the Chi-Chi, Taiwan earthquake", *Earthquake Engineering. Structural Dynamics*, Vol. 32, 2197- 2219.
- Somerville P.G. (2005). "Engineering characterization of near-fault ground motions In", *Proceedings of 2005 NZSEE Conference*, Wairakei, NZ, 2005.
- Somerville, P. G. (2002). "Characterizing near fault ground motion for the design and evaluation of bridges", *Third National Conf. and Workshop on Bridges and Highways* Portland, OR.
- Wells D.L. & Coppersmith, K. (1994). "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002.