

IDENTIFICACIÓN DE REGISTROS IMPULSIVOS PARA ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURAS

Carlos D. Frau, D. Sebastián Panella y Miguel E. Tornello
Doctores en Ingeniería
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina
cdfrau@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

Los movimientos sísmicos cercanos a fallas se caracterizan frecuentemente por intensos pulsos de velocidad y desplazamiento de períodos relativamente largos que los distinguen claramente de los movimientos de suelo típicos de campo lejano. Los movimientos con grandes pulsos de velocidad pueden afectar negativamente el desempeño sísmico de las estructuras por lo que resulta necesario poder identificar este tipo de registros para realizar análisis sísmicos confiables cuando las obras se emplazan en zonas de elevada sismicidad. El presente artículo revisa brevemente estos estudios y presenta un nuevo procedimiento simple y eficiente para identificar acelerogramas tipo pulso; el procedimiento se basa en un nuevo parámetro llamado "longitud desarrollada de la historia de tiempo de velocidad". El procedimiento se aplica a una serie representativa de registros, los resultados muestran una buena eficiencia para identificar registros sísmicos impulsivos, de fácil reproducción y con muy bajo costo computacional; permite también una clasificación de registros sísmicos impulsivos según diferentes rangos. Este trabajo es una síntesis en español del artículo: "A simple and intuitive procedure to identify pulse-like ground motions". Elsevier, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2017. (94), 234-243.

Palabras Claves.

Registros sísmicos impulsivos – Pulsos de velocidad - Ingeniería Sísmica.

ABSTRACT

Near-fault seismic ground motions are frequently characterized by intense velocity and displacement pulses of relatively long periods that clearly distinguish them from typical far-field ground motions. Intense velocity pulses motions can affect adversely the seismic performance of structures. In response to the realization of the importance of near-fault motions on structural performance, a number of studies have been directed to developing procedures for the identification of ground motions containing velocity pulses. The present paper reviews these studies briefly and presents a simple and efficient procedure to identify pulse-like ground motions based on a new parameter called "development length of velocity time history". The procedure is applied to a representative series of records, and the results show positive efficiency to identify pulse-like ground motions at low computational cost. This work is a synthesis of the article: "A simple and intuitive

procedure to identify pulse-like ground motions". Elsevier, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2017. (94), 234-243.

Keywords

Pulse-like record- Velocity pulses - Earthquake Engineering.

1. INTRODUCCION

Cuando la ruptura de una falla sísmica avanza en dirección a un sitio cercano, la velocidad de ruptura que es ligeramente más lenta que la velocidad de las ondas de corte produce que la energía del terremoto llegue al sitio concentrada un lapso de tiempo menor al tiempo de ruptura; este fenómeno es conocido como "directividad de la ruptura" (Somerville et al., 1997; Somerville, 2003; Spudich y Chiou, 2008).

El efecto deviene en la concentración que entrega el terremoto en unos pocos pulsos de gran amplitud y largos períodos que se manifiestan especialmente en la historia de velocidad de suelo. Así, los registros sísmicos de falla cercana se caracterizan frecuentemente por grandes pulsos de velocidad y desplazamiento de períodos relativamente largos que los distinguen claramente de los registros típicos de campo lejano.

Los movimientos con grandes pulsos de velocidad pueden afectar negativamente el desempeño sísmico de las estructuras (Bertero et al., 1978; Anderson y Bertero, 1987; Hall et al., 1995; Naeim, 1995; Iwan 1997; Alavi y Krawinkler, 2001; Chopra y Chintanapakdee, 2001), lo que hace necesario su consideración.

Baker (2007) desarrollo un método cuantitativo para identificar registros sísmicos que contienen pulsos de velocidad, como los causados por directividad de la ruptura; Khanse y Lui (2008) cuentan también con una metodología para identificar pulsos en acelerogramas. Hayden et al., (2012) desarrollaron un esquema cuantitativo para clasificar los registros como pulso o no pulso. Estos criterios evaluaron su eficiencia y se calibraron mediante una clasificación manualmente, es decir a través del análisis visual de la historia de tiempo de velocidad. Esto se apoya en Mukhopadhyay y Gupta (2012) quienes afirman que el movimiento tipo pulso puede ser visualmente identificado debido a la presencia de un pulso de gran amplitud, periodo largo y contenido significativo de energía en la historia de velocidades del suelo.

En general, los distintos criterios de clasificación de registros tipo pulso han recurrido a un control visual de los resultados a través de la observación directa sobre el trazo del registro (Baker, 2007; Zamora y Riddell 2011). Así, la observación del trazo del registro de velocidad es una manera efectiva de clasificación, por lo que la forma que adopta el trazo de la historia de velocidades es quien revela su carácter impulsivo y guardar cierto grado de subjetividad.

Por otro lado, se observa en los procedimientos desarrollados para identificar registros tipo pulso, cierta complejidad operativa que dificulta su aplicación por parte de usuarios no especializados. Así, para la identificación de futuros registros puede ser necesario recurrir a los autores de dichos procedimientos para que realicen la clasificación correctamente.

El presente estudio describe un nuevo procedimiento para clasificar registros tipo pulso diseñado a partir de la serie de tiempo de velocidad del suelo. El procedimiento es sencillo, fácilmente reproducible y captura en forma cuantitativa el criterio de clasificación visual. Los parámetros involucrados en este nuevo criterio de clasificación permiten también evaluar la influencia de la orientación de las series de tiempo y determinar la dirección de mayor impulsividad (no incluido en este trabajo).

2. ÍNDICE DE IMPULSIVIDAD

2.1 Longitud desarrollada de una serie de tiempo de velocidad

Dada una curva en el plano x - y , expresada en forma paramétrica $x=x(t)$ y $y=y(t)$ con $a \leq t \leq b$, la longitud de dicha curva viene dada por

$$L = \int_a^b dl = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt \quad (1)$$

Si la curva está definida mediante n valores discretos y_i para abscisas igualmente espaciadas Δx ; la longitud de la curva será:

$$L = \sum_{i=1}^n (\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y_i)^2}) \quad (2)$$

A partir de la historia del tiempo de velocidad proveniente de un movimiento sísmico se propone la definición del parámetro "Longitud desarrollada de velocidad" (Ldv) como la longitud que alcanza el trazo del registro de velocidades si el mismo fuera "extendido" como un hilo reflejada en la Ec. 3 (Panella et al, 2013).

$$Ldv = \sum_{i=1}^n (\sqrt{(\Delta t)^2 + (\Delta v_i)^2}) \quad (3)$$

Donde Δt es el paso de tiempo del registro entre dos puntos sucesivos $t(i+1)-t(i)$, Δv_i son incrementos de velocidades entre $t(i)$ y $t(i+1)$ en cm/s y n es el número de muestras de la serie. De la ecuación 3 se desprende que Ldv es un parámetro que suma términos expresados en distintas unidades; por lo tanto, el tiempo y las velocidades deben ser expresados en unidades previamente establecidas, para este trabajo se adoptan las unidades de centímetros (cm) para las longitudes y segundos (s) para el tiempo.

2.2 Fundamentos del Índice de Impulsividad

Para describir los fundamentos en que se basa el índice de impulsividad (se define más adelante) se analiza una función seno del tipo $y=A \sin(\omega t)$, donde A es la amplitud, $\omega=2\pi/T$ la frecuencia angular, T es período de la onda y t la variable tiempo.

En la figura 1 (a), (b) y (c) se muestran ondas seno de igual duración y amplitud,

pero con distinta frecuencia. Para la misma amplitud y duración, la onda de menor frecuencia en la figura 1 (a) presenta un carácter impulsivo mucho mayor que la onda de mayor frecuencia en la figura 1 (c). Como consecuencia, para el mismo intervalo de tiempo (1.0 s), la longitud desarrollada del trazo de la onda (a) es menor que la del trazo de la onda (c). La figura 1 (b) se ubica en una situación intermedia entre (a) y (c).

Para investigar la influencia de la amplitud de la señal en la evaluación de la impulsividad, se estudian ondas seno de la misma duración y frecuencia, pero de distinta amplitud de onda, figura 1 (b) y 1 (e); la amplitud de la onda (e) es 1/3 de la amplitud de la onda (b). A iguales frecuencias resulta más impulsiva la onda con mayor amplitud; en otras palabras, ondas de poca amplitud resultan menos impulsivas. La misma conclusión puede obtenerse de los casos (a) y (d) y de los casos (c) y (f).

Basado en estos conceptos Panella et al. (2013), definieron un nuevo indicador del carácter impulsivo a partir de la longitud desarrollada de velocidad y el PGV . Así, "Índice de Impulsividad" IP resulta:

$$IP = \frac{Ld_v}{PGV} \quad (4)$$

La definición de Ld_v captura de forma sencilla y eficaz el aspecto impulsivo que se distingue visualmente en una serie de tiempo de velocidad. Un valor relativamente bajo de Ld_v representa carácter impulsivo, en tanto que un valor alto de Ld_v significa carácter no impulsivo o vibratorio. La amplitud del pulso juega también un papel importante; PGV elevados (de gran amplitud) revelan la presencia de al menos un pulso en tanto que PGV bajos "diluyen" los pulsos. De esta manera una combinación de valores bajos de Ld_v y elevados de PGV conducen a IP pequeños sugieren un carácter impulsivo; lo contrario pone de manifiesto un carácter No impulsivo. Un PGV bajo conduce a un aumento del IP , alejando al registro de la categoría de tipo pulso; lo contrario ocurre si el PGV es elevado pero el trazo de velocidades tiene una gran longitud Ld_v . En síntesis, cuanto más bajo sea IP más impulsivo será el registro y, por el contrario, cuanto más elevado sea IP menos impulsiva será.

A los fines de una primera evaluación del índice propuesto, se vuelve sobre la figura 1 donde se han representados seis casos de ondas seno que combinan dos niveles de amplitudes $A \equiv PGV$ (1 y 1/3 cm/s) y tres niveles de frecuencia ω (5, 10 y 15 rad/s). La observación directa de los trazos permite clasificar la impulsividad de los distintos casos. Sin duda, el trazo de figura 1 (a) se presenta como el más impulsivo; le siguen en orden decreciente los trazos b), c), d), e) y f), este último se presenta como el menos impulsivo de todos.

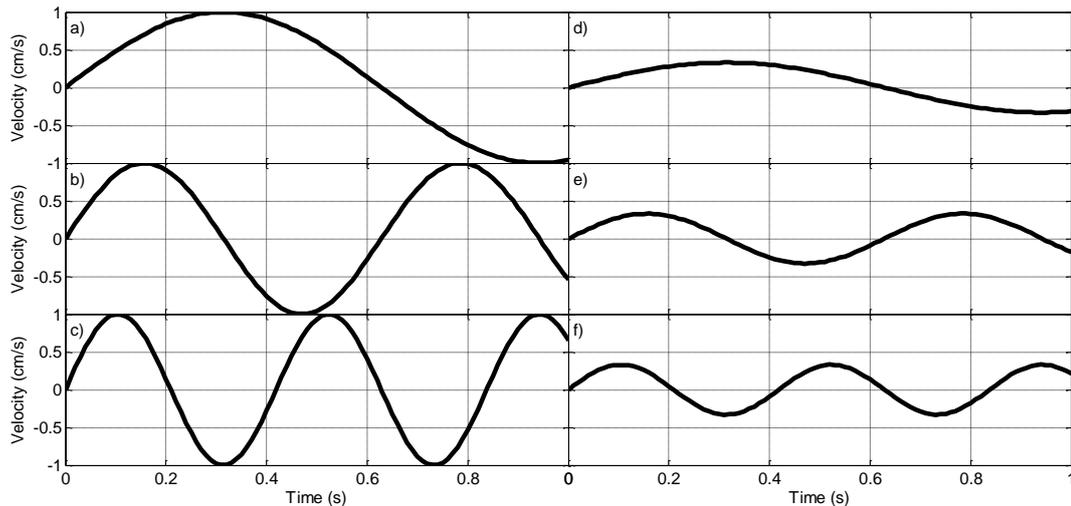


Figura 1. Ondas seno: (a) $A= 1.0$ y $\omega=5$; (b) $A= 1.0$ y $\omega=10$; (c) $A= 1.0$ y $\omega=15$; (d) $A= 1/3$ y $\omega=5$; (e) $A= 1/3$ y $\omega=10$ y (f) $A= 1/3$ y $\omega=15$.

Para los seis trazos mostrados en la figura 1 se calcularon la longitud desarrollada y el índice de impulsividad que responden a la ecuación $y=A \sin (\omega t)$ con $0 \leq t \leq 1$. La Tabla 1 resume los resultados obtenidos y muestran una buena correlación con la observación directa.

Caso	Amplitud	Frecuencia	Periodo	Longitud	Índice
Nº	A	ω	T	Ld_v	Impulsividad
					IP
a	1,0	5	1,26	2,36	2,4
b	1,0	10	0,63	3,07	3,1
c	1,0	15	0,42	3,41	3,4
d	0,33	5	1,26	1,79	5,4
e	0,33	10	0,63	2,19	6,6
f	0,33	15	0,42	2,39	7,2

Tabla 1 - Longitudes desarrolladas e Índice de impulsividad para ondas seno con distintas amplitudes de onda A y frecuencias ω para un intervalo de tiempo de 1.0 s.

La longitud desarrollada de velocidad Ld_v se debe calcular con la duración total del registro; en el desarrollo de la presente investigación se realizaron análisis de la variación de Ld_v cuando se consideraba la porción más intensa del registro como por ejemplo el tiempo comprendido entre el 10% y 90% de la Intensidad de Arias (1970). No se encontraron diferencias significativas en los resultados por lo que se mantuvo el criterio de considerar la duración total del registro para mayor

simplicidad en los cálculos. En cuanto al *PGV*, es conocido que distintos investigadores establecieron como condición excluyente para clasificar un registro como tipo pulso que el *PGV* alcance un mínimo de 30 *cm/s* (Baker, 2007; Zhai, 2013). Si bien este valor es generalmente aceptado, no cuenta con una adecuada justificación. Si bien el *IP* propuesto no requiere de un valor umbral o mínimo de *PGV* para clasificar a un registro como tipo pulso dado que el *PGV* participa con su verdadera magnitud para elevar la impulsividad cuando más alto es la adopción del umbral ayuda a simplificar la tarea de identificación de los registros. Además, al variar gradualmente, el *IP* permite una clasificación en distintos niveles de impulsividad. El *IP* puede también ser utilizado para evaluar registros sintéticos o pulsos simples artificiales como se hizo con las ondas senos anteriormente descritas. Como se verá más adelante, la clasificación de registros tipo pulso a través del *IP* no requiere establecer umbrales de magnitud sísmica, distancia a la fuente u orientación respecto a la traza de la falla sísmica. La Figura 2 muestra dos casos típicos con marcada diferencia en el valor de *Ldv*.

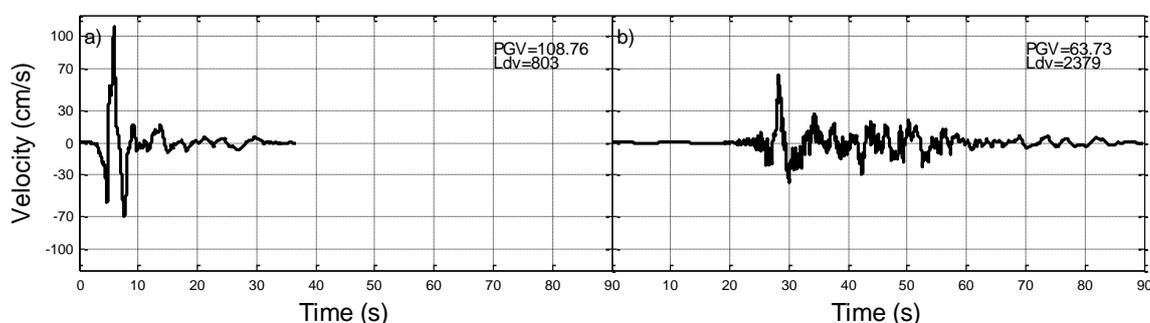


Figura 2. Series de tiempo de velocidades de los registros (a) Terremoto de Imperial Valley-06, estación El Centro Array #7; (b) Terremoto Chi-Chi 1999, Taiwan estación TCU076.

3. BASE DE DASTOS DE REGISTROS SIMICOS

Para el presente estudio, se seleccionó un conjunto de 1021 registros, y cada registro contiene dos componentes horizontales que completan 2042 historias de tiempo de aceleración expresadas en unidades de *cm / s²*. Los registros sísmicos utilizados corresponden a 112 terremotos en diferentes partes del mundo con magnitud de momento entre 5.5 y 7.9. Los datos se obtuvieron de la base de datos PEER NGA. Todo el conjunto de terremotos corresponde a las estaciones registradas en la base de datos NGA-West2 con una distancia de Joyner-Boore inferior a 30 *km* (*RJB dist <30 km*).

En correspondencia con los valores de Ldv y PGV , los índices de impulsividad IP se calcularon según la ecuación (4). La figura 3 muestra los IP cuyos valores varíen entre 6.5 y 281.7.

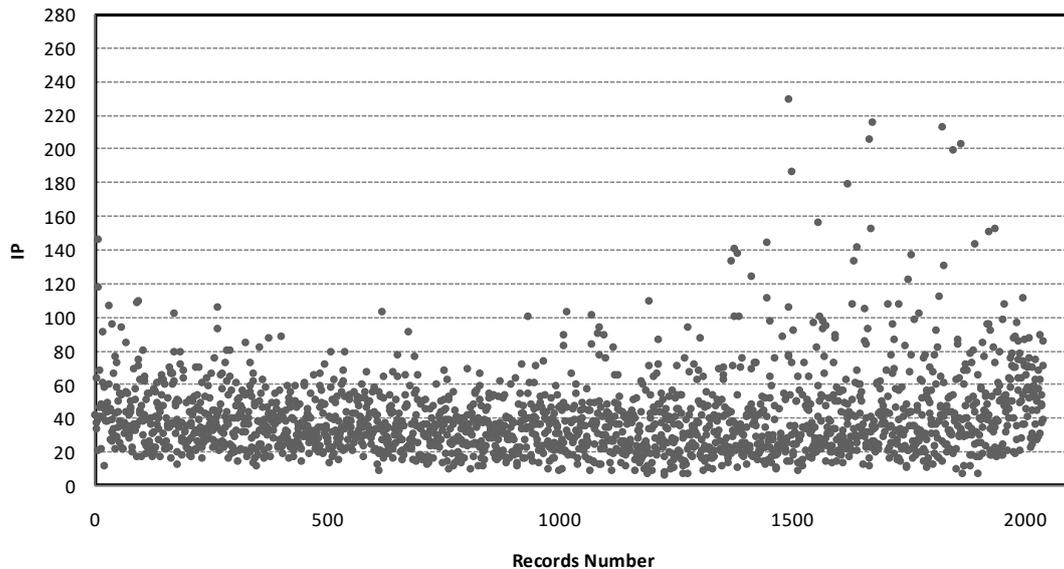


Figura 3. Valores de IP correspondientes a los registros 2042 seleccionados.

Es conocido que el efecto de la directividad de ruptura es una de las principales causas de los registros tipo pulso. Entre los principales modelos utilizados para cuantificar los efectos de la directividad se encuentran los de Somerville et al. (1997); Spudich y Chiou (2008) y Abrahamson (2000). Estos modelos establecen umbrales de magnitud sísmica mínima (6.0 y 5.6 respectivamente) a partir de los cuales pueden estar presentes los efectos de la directividad. Si la IP se representa versus la magnitud del momento del terremoto (Figura 4), se puede observar que las magnitudes moderadas o incluso bajas pueden generar registros de tipo pulso. La figura 4 muestra una distribución de registros más o menos uniforme con $IP < 20$ en el rango de magnitudes entre 5.5 y 7.9. Por lo tanto, no es necesario establecer un umbral de magnitud para seleccionar los registros de tipo pulso que se utilizarán en el análisis estructural.

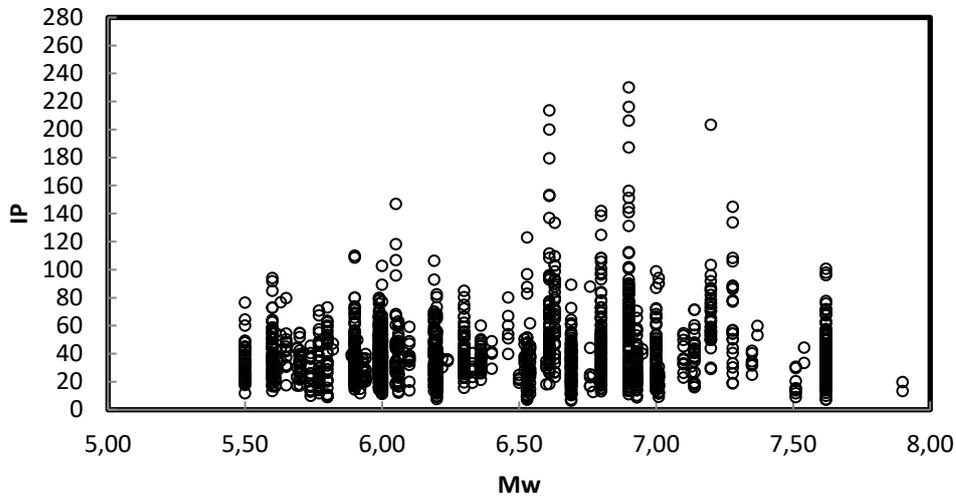


Figura 4. Representación de la magnitud del momento (M_w) versus el índice de impulsividad (IP).

4. CLASIFICACION DE REGISTROS TIPO PULSO

En el presente apartado se describe el procedimiento para clasificar registros tipo pulso. El procedimiento consiste en una primera clasificación a través de una regresión logística que permite identificar si el registro es tipo pulso o tipo no pulso. Luego a través de índice IP se establece el nivel de impulsividad.

4.1 Identificación mediante regresión logística

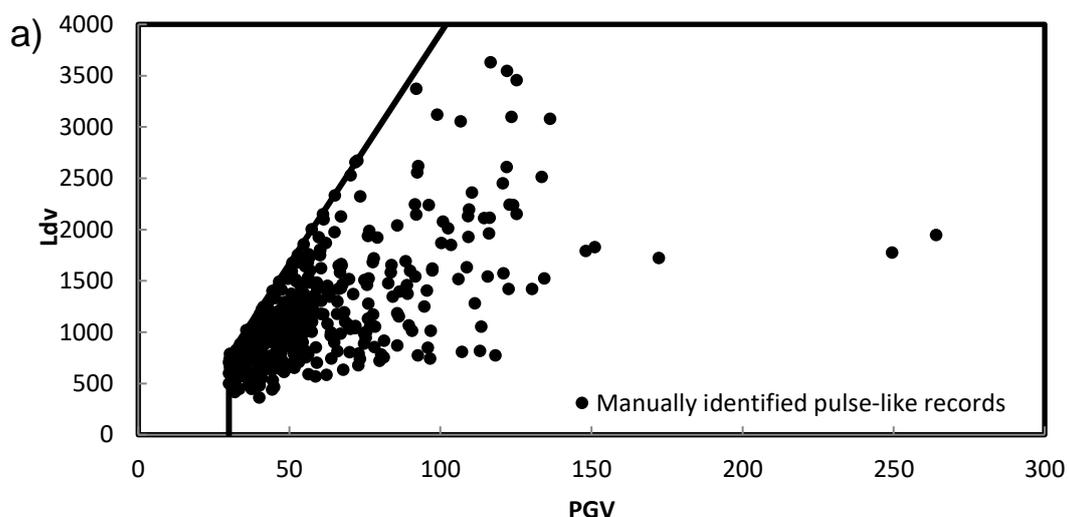
Dado el carácter binario de la clasificación que se busca (Tipo pulso y tipo no pulso) y que se cuenta con un número suficiente de datos, una regresión logística binaria fue usada para clasificar los registros. Para obtener la regresión se siguieron los procedimientos descritos en Agresti (2002) y se utilizaron los parámetros contenidos en el índice IP (Ldv y PGV). La regresión logística arroja la siguiente ecuación predictiva para el Índice de Impulsividad por Regresión " IP_R ". Finalmente, la ecuación 5 fue ajustada mediante un análisis visual de todas las series de tiempo y los índices IP .

$$IP_R = \frac{1}{1 + e^{(5 - 0.45PGV + 0.01Ldv)}} \quad (5)$$

El Índice de Impulsividad por Regresión IP_R toma valores entre 0 y 1. Un movimiento sísmico es clasificado como tipo pulso, si su IP_R es mayor a 0.7 y su PGV es mayor a 30 cm/s; por debajo de 0.7 el registro es tipo No pulso. El valor de $PGV < 30$ cm/s no está adecuadamente justificado por distintos criterios de identificación, pero el mismo

impone un mínimo a la potencia del pulso para que una serie de tiempo de velocidad alcance la categoría de tipo pulso. Por lo que si bien pueden ser registros tipo pulso se descartan por considerarse poca amplitud de los valores de velocidad. Para nuestro estudio se fijó un PGV mínimo de 30 cm/s para clasificar como Tipo Pulso. Varios investigadores han establecido como condición excluyente para clasificar un registro como tipo pulso que el PGV debe alcanzar un mínimo de 30 cm/s (Baker ,2007; Zhai et al., 2013).

Para el conjunto de registros seleccionados, se obtuvieron 463 casos con $IP_R > 0.7$ y $PGV > 30 \text{ cm/s}$ (22.7%) y 1579 casos con $IP_R < 0.7$ (77.3%). Después de que se calculó el IP_R , se realizó una clasificación visual de cada serie de tiempo para evaluar la efectividad del procedimiento propuesto. El análisis no arrojó ningún falso positivo, mientras que se encontraron 48 falsos negativos (2,35%). Los casos de falsos negativos se debieron básicamente a dos situaciones: a) series de tiempo que presentan más de 5 o 6 semi-ondas de velocidad de amplitud similar, generalmente hacia el final del registro, y b) series de tiempo con amplitud baja y onda de alta frecuencia montado sobre el pulso de velocidad que, en oposición, tiene alta amplitud y baja frecuencia. La figura 5 muestra la relación entre los dos parámetros clave (Ldv y PGV) a través de la regresión logística (ecuación (5)) para las líneas rectas correspondientes a $IP_R = 0.7$ y $PGV < 30 \text{ cm/s}$ que establece el límite entre la zona tipo pulso y tipo no pulso. La figura 5 (a) muestra los registros clasificados como tipo pulso donde existe una coincidencia total entre el resultado del procedimiento propuesto y la clasificación visual (no se encontraron falsos positivos). La figura 5 (b) muestra los registros clasificados como tipo no pulso de acuerdo con el procedimiento propuesto. El gráfico diferencia los casos en los que la clasificación visual los identifica como tipo pulso (falsos negativos). El Apéndice A contiene los datos correspondientes al set de registros analizados, en los cuales se puede apreciar los registros identificados como tipo pulso mediante el procedimiento propuesto.



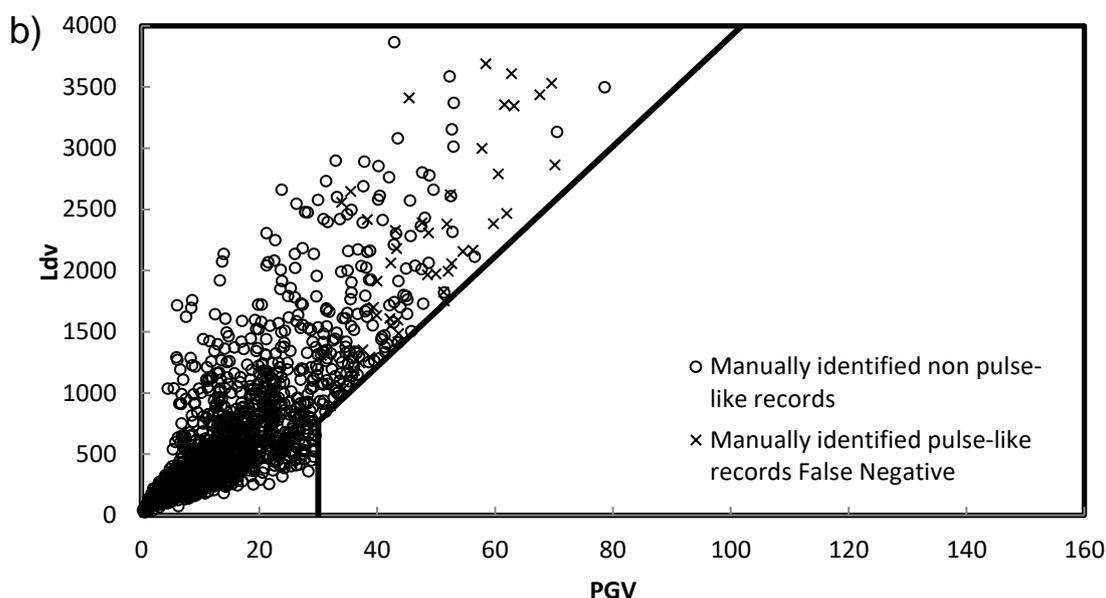


Figura 5. (a), (b) Relación entre los dos parámetros clave (Ldv y PGV) a través de la regresión logística (Ec. (5)), identificada como Pulso, No pulso y Falso negativo.

4.2 Nivel de Impulsividad

Una vez identificado un registro como tipo pulso a través del IP_R (Ec. 5), con el valor que toma IP (Ec. 4) se pueden establecer rangos para clasificar a los movimientos sísmicos según 3 niveles de impulsividad: elevada, media o moderada y baja (ver Tabla 2).

De las 2042 componentes analizadas se encontró que 463 registros fueron clasificados como tipo pulso. Una vez calculado el IP se encuentra que 41 (8.9%) tienen $IP \leq 12$, 188 (40.6%) tienen $12 < IP \leq 20$ y 234 (50.5%) con $20 < IP \leq 40$. Así, la clasificación propuesta permitirá a los usuarios elegir registros de distintos niveles de impulsividad para el análisis estructural en función de su interés. El Apéndice A contiene una lista de los 2042 registros considerados en este estudio, clasificados según sus IP_R e IP .

IP	Registros Tipo Pulso	Impulsividad
$IP \leq 12$	41	Elevada
$12 < IP \leq 20$	188	Media o Moderada
$20 < IP \leq 40$	234	Baja

Tabla 2 - Clasificación Impulsividad de registros tipo pulso.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO

Esta sección presenta una comparación simple entre los resultados de este estudio y el algoritmo de Baker (2007). El algoritmo de Baker utiliza el análisis wavelet para extraer el potencial de velocidad de pulso (PGV y velocidad cuadrática acumulada). Más tarde determina un indicador de pulso utilizado para mostrar la importancia del pulso extraído. El indicador de pulso toma valores entre 0 y 1; cuanto mayor sea el indicador de pulso, más probable es que el movimiento del suelo sea de tipo pulso. Los criterios para una clasificación discreta son los siguientes: si el indicador de pulso está por encima de 0,85, los registros se consideran como pulsos; si está por debajo de 0,15, se detecta un movimiento de tipo no pulso; si está entre 0,15 y 0,85, el algoritmo lo clasifica como ambiguo. Para avanzar en la comparación, la Figura 6 presenta una distribución de índices de pulso: los valores que corresponden al IP_R propuesto en este estudio se agrupan en el eje X, mientras que el Indicador de Pulso de Baker (IP_B) se muestra en el eje Y. Los límites establecidos en ambos criterios marcan seis zonas claramente diferenciadas: A, B, A1, A2, B1 y B2.

La zona A, donde ambos métodos coinciden en la clasificación de registros tipo de pulso, contiene 147 casos (46%). En la zona B, ambos métodos coinciden en la clasificación como tipo no pulso, con 60 casos (19,4%). Por lo tanto, ambos métodos tienen un 65,4% de concordancia.

También se realizó un análisis comparativo con el algoritmo de Shahi y Baker (2014). Los resultados de este análisis son los siguientes: sobre un total de 1021 estaciones registradoras analizadas en el presente estudio (con dos componentes horizontales cada una), en 161 casos ambos procedimientos coinciden en clasificar los registros como tipo pulsos; en 737 estaciones, coinciden en clasificar los registros como tipo no pulso. Solo 12 casos son clasificados como pulso por el algoritmo de Shahi y Baker en comparación con los resultados de nuestro procedimiento. Finalmente, se identificaron 111 estaciones con registros similares a pulsos que no aparecen en la lista de registros tipo pulsos identificados por Shahi y Baker.

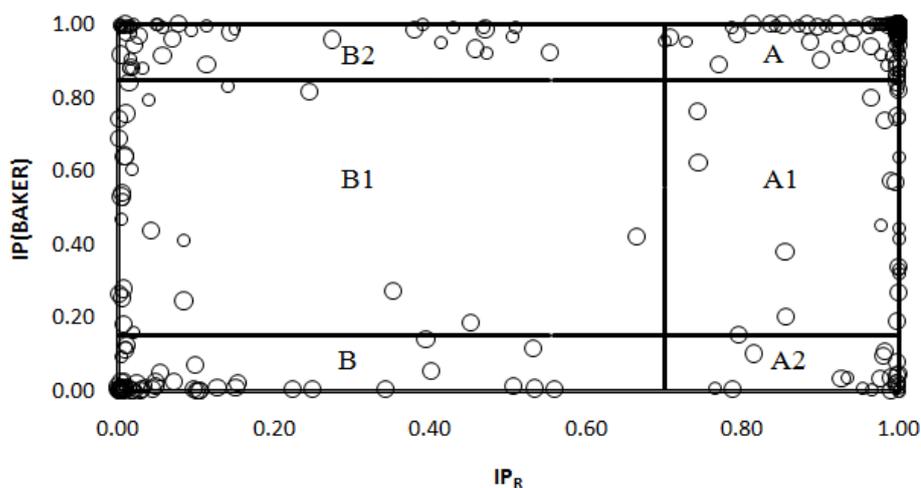


Figura 6. Distribución de los índices de pulso por regresión " IP_R " frente a los indicadores de pulso de Baker (2007).

6. CONCLUSIONES

- a) Se desarrolló un nuevo procedimiento para identificar registros sísmicos tipo pulso utilizando un Índice de Impulsividad por Regresión (IP_R), obtenido del historial de tiempo de velocidad del suelo.
- b) El procedimiento, basado en un nuevo parámetro llamado "longitud desarrollada de velocidad", es simple, eficiente y de bajo costo computacional. Es fácilmente reproducible y es capaz de capturar en forma cuantitativa el criterio de clasificación visual.
- c) El índice de IP permite una clasificación de registros sísmicos impulsivos en diferentes rangos, lo que ayuda a considerar diferentes niveles de impulsividad en el análisis estructural.
- d) La longitud desarrolla de la velocidad horizontal $Ldv_{(H)}$ se presenta como independiente de la orientación de las componentes. Por lo tanto, representa una propiedad inherente de la velocidad horizontal del suelo y puede considerarse como un parámetro que caracteriza el movimiento horizontal del suelo en términos de velocidad (no presentado en el artículo por razones de espacio).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa de Becas Doctorales para Docentes de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional y al Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC) por el apoyo dado a esta investigación.

Apéndice A. Información de apoyo

Los datos adicionales asociados con este artículo se pueden encontrar en la versión en línea en doi: 10.1016 / j.soildyn.2017.01.020.

REFERENCIAS

1. Abrahamson NA. Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis. In: Sixth international conference on seismic zonation. 2000.
2. Agresti A. Categorical data analysis. New York: Wiley; 2002. p. 710.
3. Alavi B, Krawinkler H. Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design. Proceedings. 12th World Conf. on Earthquake Engineering 2000, Auckland, New Zealand.
4. Anderson JC, Bertero VV. Uncertainties in establishing design earthquakes. J. Struct. Eng. 1987, ASCE 113(8), 1709-1724.
5. Arias A. A measure of the earthquake intensity in seismic design for nuclear power plants. MIT Press: Cambridge, MA, 1970; pp. 438-468.

6. Baker JW. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2007; 97:1486–501.
7. Bertero VV, MahinSA, Herrera RA. Aseismic design implications of San Fernando earthquake records. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 1978. 6(1), 31-42
8. Chopra AK, Chintanapakdee C. Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2001; 30:1769–89.
9. Hall JF, Heaton TH, Halling MW, Wald DJ. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthq. Spectra* 1995. 11, N° 4, 569–605.
10. Hayden C.P., Bray J.D., N.A. Abrahamson N.A., Acevedo-Cabrera A.L. Selection of Near-Fault Pulse Motions for Use in Design. In: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, Paper No. 3752; 2012 (on CD).
11. Iwan, WD. Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions. *J. Struct. Eng.* 1997. 123, no. 4, 397–404.
12. Khanse AC, Lui EM. Identification and analysis of pulse effects in near fault ground motions. In: *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, Paper No. 02-0015; 2008 (on CD).
13. Mukhopadhyay S, Gupta VK. Directivity pulses in near-fault ground motions-I: Identification, extraction and modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2013; 50: 1-15.
14. Naeim, F. On seismic design implications of the 1994 Northridge Earthquake records, *Earthquake Spectra* 1995. 11, 91–109.
15. NGA database flatfile. <http://peer.berkeley.edu/nga/flatfile.html>. [15 Dic; 2014].
16. Panella DS, Frau CD, Tornello ME. Identificación de registros sísmicos impulsivos para uso en ingeniería estructural. *Mecánica Computacional*. Vol. XXXII, págs. 851-863. Mendoza, 19-22 Noviembre 2013. ISSN 1666-6070
17. Somerville PG, Smith NF, Graves RW, Abrahamson NA. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters* 1997; 68:199–222.
18. Somerville, PG., Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, *Phys. Earth Planet* 2003. Interiors 137, no. 1, 12.
19. Spudich P, and Chiou, BSJ. Directivity in NGA earthquake ground motions: Analysis using isochrone theory. *Earthquake Spectra* 2008. 24:1, 279-298
20. Zamora M, Riddell R. Elastic and Inelastic Response Spectra Considering Near-Fault Effects. *Journal of Earthquake Engineering* 2011; 15:5, 775-808.
21. Zhai C., Chang Z., Li S., Chen Z., Xie L. Quantitative Identification of Near-Fault Pulse-Like Ground Motions Based on Energy. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2013; 103:5, 2591-2603.