

## **A SIMPLE AND INTUITIVE PROCEDURE TO IDENTIFY PULSE-LIKE GROUND MOTIONS**

**Sebastián D. Panella<sup>(1)</sup>, Carlos D. Frau<sup>(2)</sup> and Miguel E. Tornello<sup>(3)</sup>**

- (1) Ingeniero docente investigador de la Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza. Argentina. Investigador en el CEREDETEC (Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica). [spanella@frm.utn.edu.ar](mailto:spanella@frm.utn.edu.ar)
- (2) Doctor Ingeniero docente investigador de la Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza. Argentina. Investigador en el CEREDETEC (Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica). [cdfrau@frm.utn.edu.ar](mailto:cdfrau@frm.utn.edu.ar)
- (3) Doctor Ingeniero docente investigador de la Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza. Argentina. Investigador en el CEREDETEC (Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica). [mtornell@frm.utn.edu.ar](mailto:mtornell@frm.utn.edu.ar)

Received: April 2020. Accepted: December 2020. Published: December 2020

### **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 pulse 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.

### **UN PROCEDIMIENTO SIMPLE E INTUITIVO PARA IDENTIFICAR ACELEROGRAMAS TIPO PULSO**

Este trabajo es una versión en español publicada por *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (94), 234-243.

### **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. Para comprender la influencia de los movimientos cercanos a fallas en la respuesta estructural, se han desarrollado diversos estudios para identificar registros sísmicos impulsivos. 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.

**Palabras claves:** Pulsos de velocidad - Registro tipo pulso – Movimiento near fault-longitud desarrollada de la velocidad - Ingeniería Sísmica.

## 1 Introducción

Cuando la propagación de una ruptura en una falla sísmica avanza en dirección a un sitio cercano y la velocidad de ruptura 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", produciendo que la mayor parte de la energía sísmica llegue concentrados en pocos pulsos de gran amplitud. (Somerville et al., 1997; Somerville, 2003; Spudich y Chiou, 2008).

El efecto deviene 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 campo cercano 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 (Panella et al., 2013).

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). Los movimientos tipo pulso han sido identificados como críticos en el diseño de estructuras en zonas de campo cercano; los análisis de sistemas elásticos e inelásticos de múltiples grados de libertad indican que la amplitud y periodo del pulso en la historia de velocidades del suelo es el parámetro que controla la performance de la estructura (Bray y Rodríguez-Marek, 2004). Algunos autores como Krawinkler (1995), manifiestan que el espectro de respuesta no es capaz de capturar las características impulsivas de los registros y por lo tanto la cuantificación de la demanda sísmica mediante los espectros de respuesta en zona cercanas a falla, arrojan acciones de diseño en defecto respecto de la real.

En respuesta a la importancia de los movimientos cercanos a la falla en el desempeño estructural, varios estudios se han dirigido al desarrollo de relaciones predictivas para los parámetros que caracterizan este tipo especial de registros en zona cercana a falla (Alavi y Krawinkler, 2000; Somerville, 2000; Mavroeidis y Papageorgiou, 2003). Bray y Rodríguez-Marek (2004) identificaron parámetros clave en la caracterización de los movimientos tipo pulso con directividad, incluida la amplitud (PGV), el período del pulso de velocidad y el número de ciclos significativos. Sin embargo, Rupakhety y Sigbjörnsson (2011) descubrieron que pulsos equivalentes a menudo se utilizaron para caracterizar la respuesta estructural de los edificios altos para registros de campo cercano subestimando la deriva máxima de piso.

Siguiendo el mismo objetivo, otros investigadores reunieron un set de registros de campo cercano similar a un pulso, estos conjuntos se seleccionaron utilizando diferentes criterios. Somerville, (2003); Mavroeidis y Papageorgiou, (2003); Bray y Rodriguez-Marek, (2004), Cox y Scott, (2002) y Fu y Menon, (2004), prepararon listas de registros de fallas cercanas consideradas como acelerogramas de grandes pulsos. Dado que a menudo se supone que la orientación de pulso tiene una dirección normal al plano de falla, el enfoque de estos investigadores fue identificar pulsos en la componente normal a la falla; de esta manera, solo se identificaron unos pocos registros de pulsos paralelos a fallas (Huang et al. 2008; Howard et al., 2005).

Baker (2007) y Shahi y Baker (2014) desarrollaron un método para identificar cuantitativamente los registros sísmicos que contienen pulsos de velocidad, como los causados por directividad de la ruptura. El enfoque utiliza el análisis del registro mediante la transformada wavelet para extraer el pulso de mayor velocidad de un registro dado. El tamaño del pulso extraído en relación con el registro original se utiliza para desarrollar un criterio cuantitativo para clasificar un movimiento como "impulsivo". El criterio se calibró mediante el uso de un conjunto de datos de registros clasificados manualmente.

Khanse y Lui (2008) presentaron una metodología para identificar pulso en terremotos. Debido a que los efectos de directividad son más significativos para frecuencias inferiores a 1,67 Hz (es decir, un período superior a 0,6 s) (Somerville et al., 1997), este criterio se utilizó para identificar las características del pulso. La metodología clasifica un registro como tipo de pulso (similar a un pulso) si en el espectro de amplitud de Fourier de velocidad del suelo, muestra un pico alto con una frecuencia inferior a 1,6 Hz. En este caso, se debe identificar la frecuencia de corte ( $f_c$ ) y se debe filtrar la historial de tiempo de la velocidad del suelo para probar la existencia del pulso. Estos dos aspectos necesitan intervención humana con cierto grado de subjetividad. Por lo tanto, el procedimiento no se puede replicar fácilmente con resultados idénticos. Zamora and Riddell (2011), toma como base el índice de Baker y adicionalmente considera los parámetros de la intensidad del pulso de aceleración y velocidad del movimiento, y tiene en cuenta el rango de orientaciones sobre el registro. La clasificación es de una manera empírica, sin ningún intento de explicar su origen sobre la base de las propiedades sismológicas del proceso de ruptura.

Hayden et al., (2012) desarrolló un esquema cuantitativo para clasificar los registros como pulso o no pulso. Este esquema implica filtrar el registro, calcular los parámetros en todas las orientaciones, dando puntuación a los movimientos basados en dos parámetros clave del registro. Los investigadores revisaron manualmente los resultados y ajustaron la clasificación de un número limitado de registros, dándose cuenta de que ningún procedimiento de clasificación basado en números podría capturar todos los matices de un registro. Clasifica registros como "tipo pulso" en aquellos movimientos con uno o dos ciclos intensos en la historia de velocidad. Para ello, utiliza dos parámetros relacionados con la velocidad del suelo: la diferencia entre dos picos sucesivos para diferentes orientaciones y el cuadrado de la velocidad acumulada normalizada. De esta manera, define una regresión logística con el propósito de clasificar un determinado registro como pulso o no-pulso.

Mukhopadhyay y Gupta (2012) 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. Define una energía fraccional como la relación entre la energía de la señal de cada medio ciclo y la energía total de la señal. El máximo valor de la energía fraccional contribuye al movimiento tipo pulso. Zhai et al., (2013) propone un método cuantitativo basado en energía para evaluar movimientos tipo pulso. Considera que en un medio coherente el pulso hace una gran contribución a la energía total del movimiento del suelo. La energía de movimiento está representada por la integral del cuadrado de la velocidad del suelo en la historia del tiempo. La energía relativa del pulso es utilizada como variable de predicción para identificar un pulso. Los movimientos sísmicos cuyos pulsos de velocidad dominante tengan valores de energía relativa superiores a un valor 0.3 pueden ser clasificados como tipo pulso, de lo contrario se los clasifica como no pulso o ambiguo. Maniatakis et al., (2008) realizó una comparación entre los registros Griegos y los reconocidos registros internacionales de fuentes cercanas de terremotos pequeños, moderados y fuertes. Descubrieron que la relación máxima entre la velocidad espectral y la velocidad máxima del suelo (*PGV*) es un buen indicador de pulso de velocidad. Sin embargo, el estudio no presenta un criterio formal para clasificar los registros tipo pulso.

En general, los distintos criterios de clasificación de registros tipo pulso recurren 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.

En el presente estudio se describe un nuevo procedimiento para clasificar registros tipo pulso a partir de series de tiempo de velocidades. 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.

## 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  $\Delta x$ ; 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 (Ecuación 3). (Panella et al, 2013)

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

Donde  $\Delta t$  es el paso de tiempo del registro entre dos puntos sucesivos  $t(i+1)-t(i)$ ,  $\Delta v_i$  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 adimensional 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 definirá a continuación) 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) y 1 (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 figura 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.

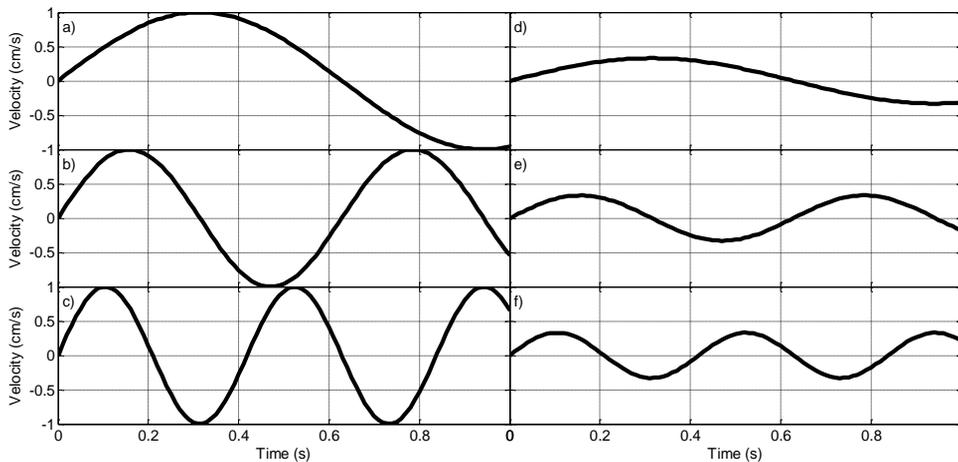
Basado es estos conceptos Panella et al. (2013), definieron un nuevo indicador del carácter impulsivo a partir de la longitud desarrollada de velocidad y el  $PGV$ . Así, "Índice de Impulsividad"  $IP$  resulta:

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

La definición de  $Ldv$  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  $Ldv$  representa carácter impulsivo, en tanto que un valor alto de  $Ldv$  significa carácter no impulsivo o vibratorio. La amplitud del pulso juega también un papel importante;  $PGV$  elevados 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  $A=PGV$  (1 y 1/3 cm/s) y tres niveles de frecuencia  $\omega$  (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.



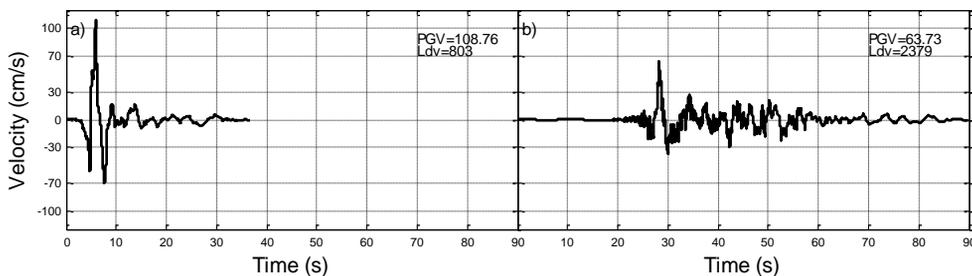
**Figura 1.** Ondas seno: (a)  $A= 1.0$  y  $\omega=5$ ; (b)  $A= 1.0$  y  $\omega=10$ ; (c)  $A= 1.0$  y  $\omega=15$ ; (d)  $A= 1/3$  y  $\omega=5$ ; (e)  $A= 1/3$  y  $\omega=10$  y (f)  $A= 1/3$  y  $\omega=15$ .

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.

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

Caso N°	Amplitud $A$	Frecuencia $\omega$	Periodo $T$	Longitud $Ldv$	Índice 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

La  $Ldv$  se debe calcular con la duración total del registro; en el desarrollo de la presente investigación se realizaron análisis de la variación de  $Ldv$  cuando se consideraba la porción más intensa del registro como por ejemplo el tiempo comprendido entre el 5% y 95% 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. El  $IP$  propuesto no requiere de un valor umbral o mínimo de  $PGV$  para clasificar a un registro como tipo pulso; el  $PGV$  participa con su verdadera magnitud para elevar la impulsividad cuando más alto es. 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 descrita. 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.

Se utilizan los registros bases de aceleración, y se realiza el procesamiento mediante técnicas de análisis de señales digitales, utilizando rutinas en software

Matlab, en la cual se procede a la determinación de las historias de tiempo de las velocidades de suelo mediante la aplicación de la integración numérica en el tiempo del registro de las aceleraciones.

### 3 Base de datos de registros sísmicos

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  $cm / s^2$ . Los registros sísmicos utilizados corresponden a 112 terremotos en diferentes partes del mundo con magnitud de momento entre 5.5 y 7.9 (Tabla 2). 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 ( $RJB \text{ dist} < 30 \text{ km}$ ).

Los registros utilizados son procesados con una adaptación de la metodología desarrollada por el PEER NGA (Ancheta et al., 2013), que se resume en un proceso iterativo en donde el registro se somete a una corrección de línea base y a un proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia.

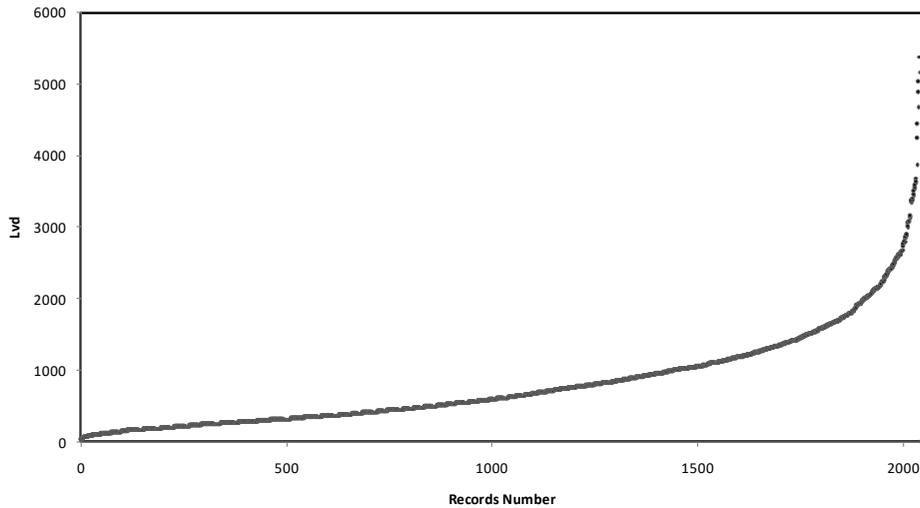
**Tabla 2.** Terremotos utilizados para la selección de registros.

N°	Earthquake Event	Year	Stations	Mw
1	Helena, Montana-01	1935	1	6,00
2	Helena, Montana-02	1935	1	6,00
3	Imperial Valley-02	1940	1	6,95
4	Imperial Valley-03	1951	1	5,60
5	Imperial Valley-04	1953	1	5,50
6	Northern Calif-03	1954	1	6,50
7	Hollister-01	1961	1	5,60
8	Hollister-02	1961	1	5,50
9	Parkfield	1966	4	6,19
10	Northern Calif-05	1967	1	5,60
11	San Fernando	1971	12	6,61
12	Managua, Nicaragua-01	1972	1	6,24
13	Point Mugu	1973	1	5,65
14	Oroville-01	1975	1	5,89
15	Friuli, Italy-01	1976	1	6,50
16	Gazli, USSR	1976	1	6,80
17	Friuli, Italy-03	1976	3	5,50
18	Friuli, Italy-02	1976	3	5,91
19	Santa Barbara	1978	2	5,92
20	Tabas, Iran	1978	3	7,35
21	Coyote Lake	1979	9	5,74
22	Norcia, Italy	1979	2	5,90
23	Imperial Valley-06	1979	29	6,53
24	Imperial Valley-08	1979	1	5,62
25	Livermore-01	1980	5	5,80
26	Mammoth Lakes-01	1980	3	6,06
27	Mammoth Lakes-02	1980	3	5,69
28	Mammoth Lakes-03	1980	4	5,91
29	Mammoth Lakes-04	1980	4	5,70
30	Mammoth Lakes-05	1980	2	5,70
31	Mammoth Lakes-06	1980	4	5,94
32	Victoria, Mexico	1980	3	6,33
33	Irpinia, Italy-01	1980	8	6,90
34	Irpinia, Italy-02	1980	6	6,20
35	Taiwan SMART1(5)	1981	7	5,90
36	Corinth, Greece	1981	1	6,60
37	Westmorland	1981	6	5,90
38	Coalinga-01	1983	18	6,36
39	Coalinga-05	1983	10	5,77
40	New Zealand-01	1984	1	5,50
41	Morgan Hill	1984	14	6,19
42	Lazio-Abruzzo, Italy	1984	3	5,80
43	Bishop (Rnd Val)	1984	1	5,82
44	Nahanni, Canada	1985	3	6,76
45	Mt. Lewis	1986	1	5,60
46	N. Palm Springs	1986	12	6,06
47	Chalfant Valley-01	1986	5	5,77
48	Chalfant Valley-02	1986	9	6,19
49	Chalfant Valley-03	1986	3	5,65
50	Kalamata, Greece-01	1986	1	6,20
51	San Salvador	1986	2	5,80
52	Baja California	1987	1	5,50
53	Whittier Narrows-01	1987	76	5,99
54	Superstition Hills-01	1987	1	6,22
55	Superstition Hills-02	1987	11	6,54
56	Spitak, Armenia	1988	1	6,77
57	Loma Prieta	1989	30	6,93
58	Griva, Greece	1990	1	6,10
59	Erzican, Turkey	1992	1	6,69
60	Cape Mendocino	1992	4	7,01
61	Landers	1992	8	7,28
62	Big Bear-01	1992	1	6,46
63	Northridge-01	1994	61	6,69
64	Double Springs	1994	1	5,90

N°	Earthquake Event	Year	Stations	Mw
65	Kobe, Japan	1995	14	6,90
66	Kozani, Greece-01	1995	1	6,40
67	Dinar, Turkey	1995	1	6,40
68	Kocaeli, Turkey	1999	5	7,51
69	Chi-Chi, Taiwan	1999	85	7,62
70	Duzce, Turkey	1999	10	7,14
71	St Elias, Alaska	1979	1	7,54
72	Upland	1990	2	5,63
73	Manjil, Iran	1990	1	7,37
74	Sierra Madre	1991	7	5,61
75	Northridge-02	1994	10	6,05
76	Northridge-04	1994	2	5,93
77	Little Skull Mtn,NV	1992	2	5,65
78	Northwest China-01	1997	1	5,90
79	Northwest China-02	1997	1	5,93
80	Northwest China-03	1997	1	6,10
81	Northwest China-04	1997	1	5,80
82	Hector Mine	1999	1	7,13
83	Denali, Alaska	2002	1	7,90
84	Chi-Chi, Taiwan-02	1999	12	5,90
85	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	23	6,20
86	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	15	6,20
87	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	16	6,30
88	Loma Prieta	1989	1	6,93
89	Friuli, Italy-03	1976	1	5,50
90	Taiwan SMART1(5)	1981	19	5,90
91	Lazio Abruzzo, Italy	1984	2	5,80
92	Cape Mendocino	1992	6	7,01
93	Landers	1992	3	7,28
94	Northridge-02	1994	1	6,05
95	Northridge-04	1994	1	5,93
96	Chi-Chi (aftershock 3), Taiwan	1999	1	6,20
97	Tottori, Japan	2000	17	6,61
98	San Simeon, CA	2003	3	6,5
99	Bam, Iran	2003	1	6,6
100	Parkfield-02, CA	2004	72	6,00
101	Niigata, Japan	2004	18	6,63
102	Friuli (aftershock 9), Italy	1976	3	5,5

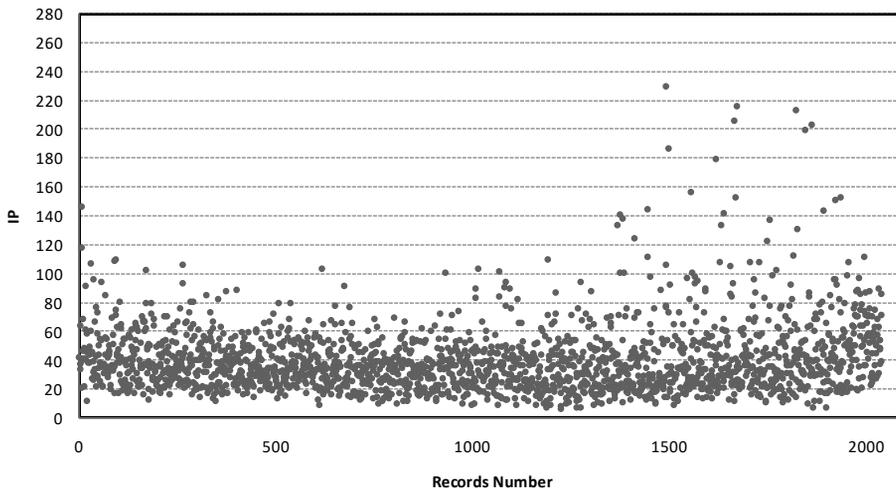
N°	Earthquake Event	Year	Stations	Mw
103	Basso Tirreno, Italy	1978	2	6
104	Umbria-03, Italy	1984	4	5,6
105	Lazio Abruzzo (aftershock 1), Italy	1984	3	5,5
106	Potenza, Italy	1990	1	5,8
107	Sicilia-Orientale, Italy	1990	2	5,6
108	Umbria Marche (foreshock), Italy	1997	5	5,7
109	Umbria Marche, Italy	1997	7	6
110	Umbria Marche (aftershock 1), Italy	1997	7	5,5
111	Umbria Marche (aftershock 2), Italy	1997	9	5,6
112	Montenegro, Yugo.	1979	5	7,10
113	L'Aquila, Italy	2009	11	6,30
114	L'Aquila (aftershock 1), Italy	2009	12	5,60
115	Chuetsu-oki	2007	57	6,80
116	Iwate	2008	36	6,90
117	El Mayor-Cucapah	2010	16	7,20
118	Big Bear-01	1992	2	6,46
119	Joshua Tree, CA	1992	5	6,10
120	Darfield, New Zealand	2010	29	7,00
121	Christchurch, New Zealand	2011	21	6,2
122	El Mayor-Cucapah	2010	1	7,20
123	Duzce, Turkey	1999	3	7,14
124	Parkfield-02, CA	2004	2	6,00
125	El Mayor-Cucapah	2010	1	7,20

Para el set de registros sísmicos seleccionados se calculó la longitud desarrollada de velocidad  $Ldv$ , los valores varían de 28.3 a 5387.7 ( $cm$ ,  $s$ ). Para una mejor interpretación, los valores de  $Ldv$  se muestran en la figura 3 ordenados en forma creciente. A pesar de la gran diversidad de movimientos sísmicos, se aprecia una variación prácticamente continua, sin saltos bruscos. Estos resultados indican que  $Ldv$  es una característica inherente en la historia del tiempo de la velocidad del suelo.



**Figura 3.** Longitud desarrollada de la velocidad para los 2042 componentes 2042 clasificados de menor a mayor.

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

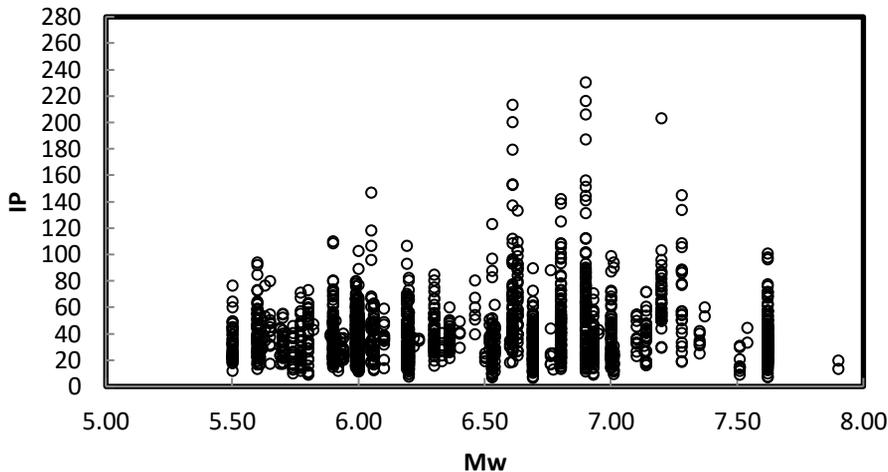


**Figura 4.** Valores de  $IP$  correspondientes a los registros 2042 seleccionados.

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 mencionados

establecen umbrales de magnitud sísmica mínima entre 5.6 y 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 (Fig. 5), se puede observar que las magnitudes moderadas o incluso bajas pueden generar registros de tipo pulso. La figura 5 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 5.** Representación de la magnitud del momento ( $M_w$ ) versus el índice de impulsividad ( $IP$ ).

#### 4 Clasificación 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.

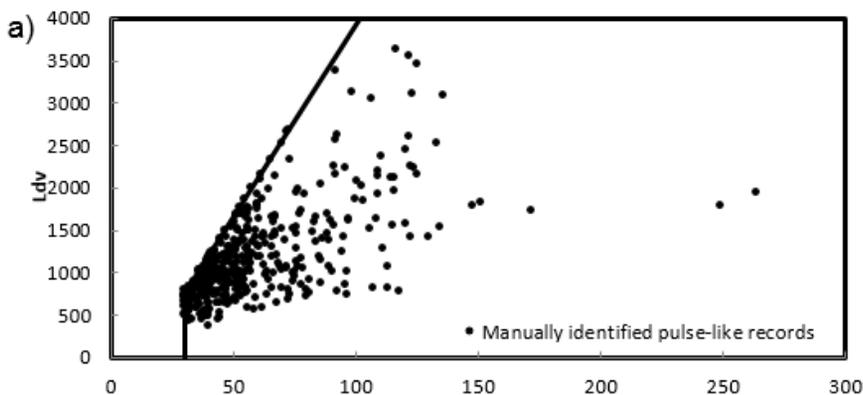
##### 4.1 Identificación mediante regresión logística

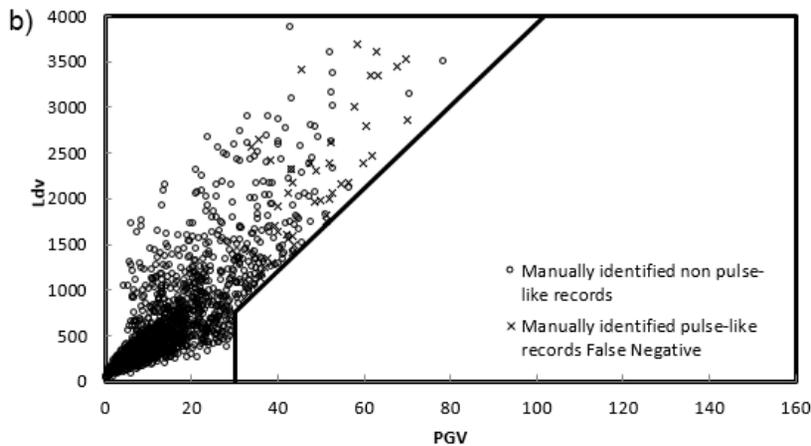
Dado el carácter binario de la clasificación que se busca (Tipo pulso y tipo no pulso) y que se cuenta con un número suficiente de datos, una regresión logística binaria fue usada para clasificar los registros. Para obtener la regresión se siguieron los procedimientos descritos en Agresti (2002) y se 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 (Agresti, 2002). 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  $PGV > 30$  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 (En este estudio no se analizó estos casos con un tratamiento de señales sísmicas particularizado). La figura 6 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  $PGV < 30$  cm/s que establece el límite entre la zona tipo pulso y tipo no pulso. La figura 6 (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 6 (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 1 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 6. (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 3).

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 1 contiene una lista de los 2042 registros considerados en este estudio, clasificados según sus  $IP_R$  e  $IP$ .

**Tabla 3.** Clasificación Impulsividad de registros tipo pulso.

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

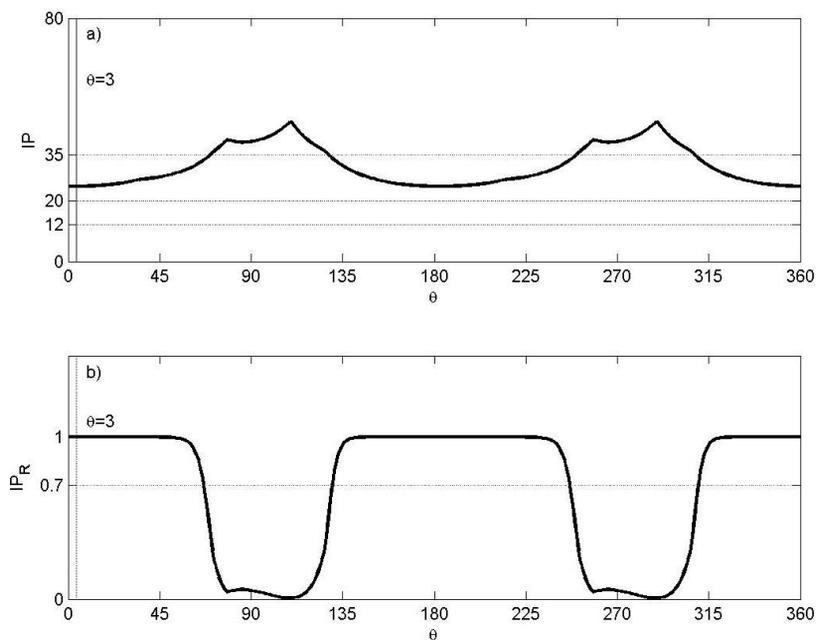
### 5 Análisis del índice de Impulsividad para las dos componentes horizontales

En esta sección, se analiza la impulsividad partiendo de los dos componentes horizontales de un registro sísmico. La orientación de estos componentes puede ser la correspondiente a la dirección registrada por el instrumento de medición o puede

ser cualquier otra dirección obtenida mediante rotación. Para este propósito, seleccionamos un conjunto de 155 series de velocidad de tiempo con orientación normal de falla y sus respectivos componentes paralelos. El conjunto de registros se conformó de la siguiente manera: 91 registros clasificadas como tipo pulso por Baker, (2007), 51 registros clasificadas como no pulso por Baker, (2007) y 13 registros estudiadas por Mukhopadhyay y Gupta (2013).

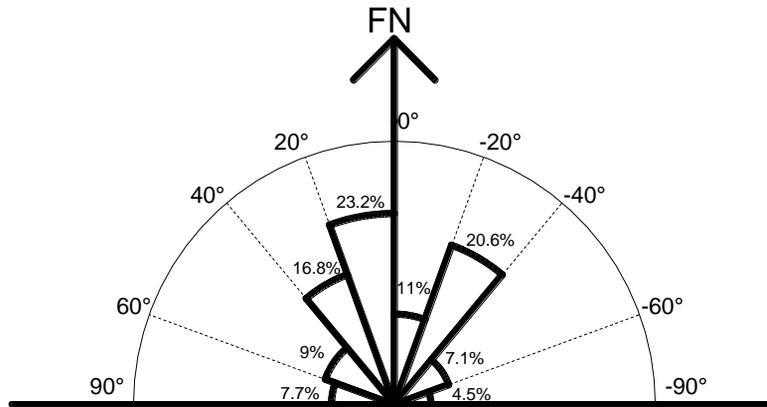
### 5.1 Influencia de la orientación

Una vez que se identifica un registro como pulso, se pueden estudiar diferentes orientaciones analizando la variación mostrada por  $IP$ . Por lo tanto, se puede determinar la dirección en la que se produce el mayor nivel de impulsividad. Las rotaciones se realizan a partir de componentes horizontales que barren los  $360^\circ$ , y en cada orientación, se calculan el  $IP_R$  y el  $IP$  para ambos componentes. La dirección de la máxima impulsividad será la que presente el  $IP$  más bajo en correspondencia con un  $IP_R$  superior a 0.7. La figura 7 muestra los valores alcanzados por  $IP_R$  e  $IP$  en relación con el ángulo de rotación para un caso particular. En este caso, las direcciones donde el registro no es impulsivo ( $IP_R < 0.7$ ),  $IP$  asume valores bajos de impulsividad.



**Figura 7.** (a) Valores de  $IP$  variando  $\theta$  de 0 a  $360^\circ$ . (b) Valores de  $IP_R$  variando  $\theta$  de 0 a  $360^\circ$ . Earthquake Chi-Chi Taiwan, estación TCU 075, la dirección de  $\theta = 3$  corresponde la máxima impulsividad.

Después de calcular la variación de  $IP$  con la orientación, se encontró que en muchos casos la dirección del Índice de Impulsividad mínima ( $IP_{min}$ ) difiere con respecto a la dirección normal al plano de falla. La figura 8 muestra el número de registros (%) en los que el  $IP_{min}$  tiene una orientación distinta a la normal del plano de falla.



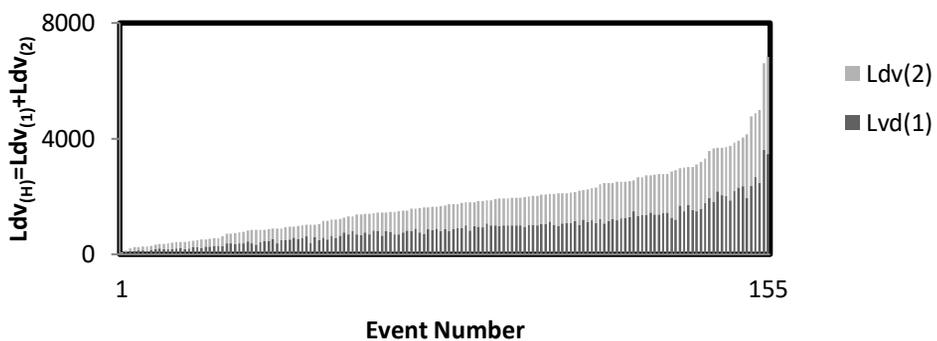
**Figura 8.** Cantidad de registros (%) cuya orientación del *IPmín* difiera de la dirección normal a la falla (FN).

## 5.2 Longitud desarrollada de velocidad horizontal

A partir de las dos componentes horizontales de la serie de historia del movimiento de la velocidad, normales entre sí ( $v_1(t)$  y  $v_2(t)$ ), se define la Longitud Desarrollada de Velocidad Horizontal  $Ldv_{(H)}$  como:

$$Ldv_{(H)} = Ldv_{(1)} + Ldv_{(2)} \quad (6)$$

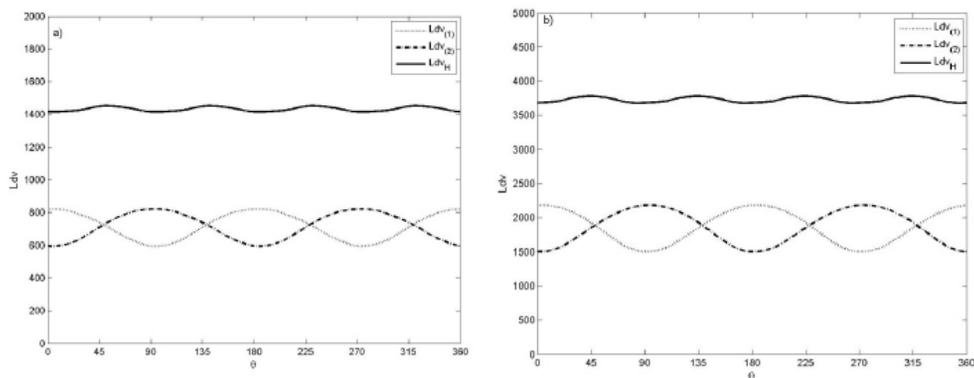
Para los 155 pares de componentes que componen el set de registros,  $Ldv_{(H)}$  se calculó utilizando la ecuación (6). La figura 9 muestra los resultados clasificado en orden creciente correspondiente a la dirección normal y paralela a la falla. A pesar de que la orientación del registro es normal y paralela a la falla, no se observan diferencias importantes entre las longitudes desarrolla de la velocidad de ambos componentes.



**Figura 9.** Longitud desarrollada de velocidad horizontal  $Ldv(H) = Ldv(1)$  y  $Ldv(2)$ .

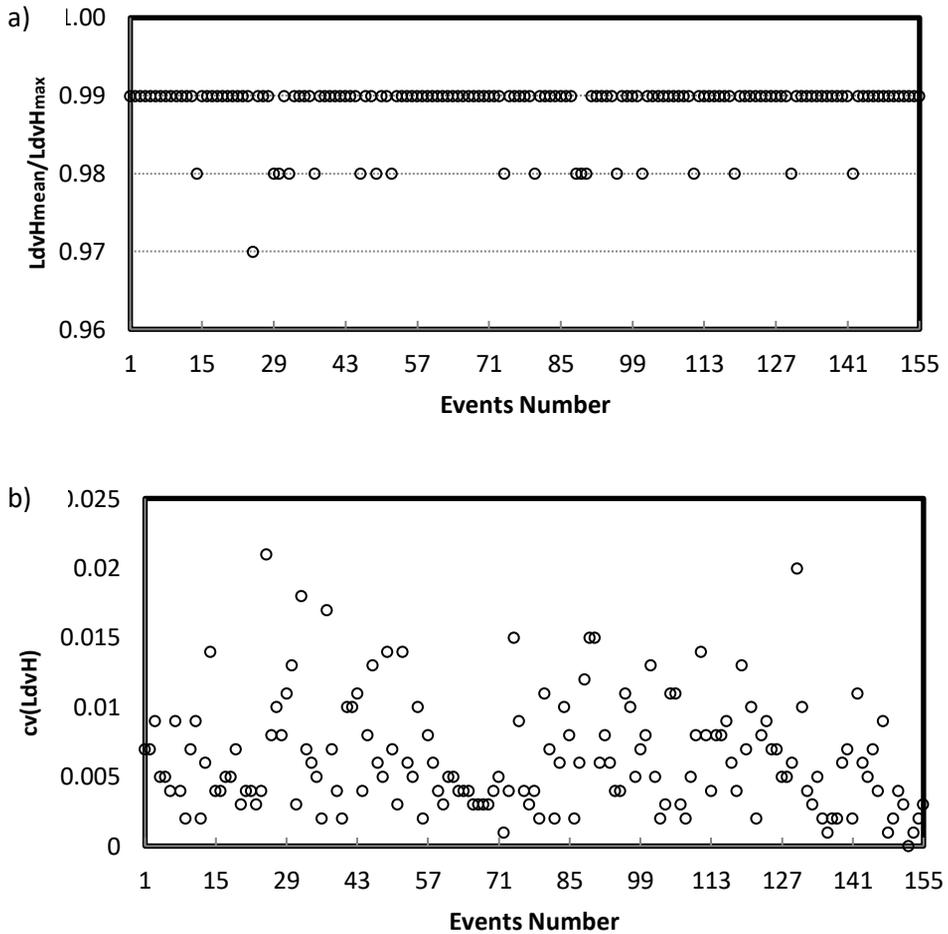
### 5.3 Variabilidad de $Ldv_{(H)}$ con la orientación

Para estudiar cómo varía  $Ldv_{(H)}$  con la orientación se rotó cada una de las dos componentes  $v_1(t)$  y  $v_2(t)$  distintos ángulos  $\theta_i$ . Para cada nueva orientación se calcularon las respectivas longitudes  $Ldv_{(1, \theta_i)}$  y  $Ldv_{(2, \theta_i+90)}$ . La figura 10 muestra para los terremotos de Imperial Valley-06 (1979), estación El Centro Array #7 y el Terremoto Chi-Chi, Taiwan (1999), estación TCU075; dos casos de la variación de las longitudes desarrolladas de velocidad en función del ángulo  $\theta_i$  cuando se barre entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  con un paso  $\Delta\theta=1^\circ$ . Obviamente, al rotar una componente  $90^\circ$  su dirección es coincidente con la dirección de la componente normal previa a la rotación; así  $Ldv_{(1, \theta+90)}$  es igual a  $Ldv_{(2, \theta)}$ . De la misma manera,  $Ldv_{(1, \theta)}$  es igual a  $Ldv_{(1, \theta+180)}$ .



**Figura 10.** Variación de  $Ldv_{(1)}$ ,  $Ldv_{(2)}$  y  $Ldv_{(H)}$  variando  $\theta_i$  de  $0$  a  $360^\circ$  con  $\Delta\theta=1^\circ$ :  
(a) Terremoto Imperial Valley-06 (1979), estación El Centro Array #7; (b)  
Terremoto Chi-Chi, Taiwan (1999), estación TCU075.

Si se analiza el valor que toma la Longitud Desarrollada de Velocidad Horizontal  $Ldv_{(H, \theta_i)} = Ldv_{(1, \theta_i)} + Ldv_{(2, \theta_i)}$  cuando las componentes son rotadas diferentes ángulos se observa una muy leve variación cuando  $\theta_i$  barre  $360^\circ$ . En términos ingenieriles se podría decirse que  $Ldv_{(H)}$  es prácticamente constante y que representa una propiedad inherente de la velocidad horizontal del suelo y puede considerarse como un parámetro que caracteriza el movimiento horizontal en términos de velocidad. Para evaluar la variación de  $Ldv_{(H)}$  con la orientación se procedió a realizar para cada par de componentes el cociente entre el valor medio  $Ldv_{(H)(mean)}$  y el valor máximo alcanzado  $Ldv_{(H)(max)}$  en las 360 orientaciones. La figura 11(a) muestra los resultados encontrados, donde el máximo cociente es aproximadamente del 3%. Adicionalmente se determinó para  $Ldv_{(H)}$  el coeficiente de variación, definido como el cociente entre la desviación estándar y la media. La figura 11(b) muestra los coeficientes de variación para cada par de componentes. La máxima variación encontrada no supera el 2.2% en tanto que el 81% de los casos, el coeficiente de variación está por debajo del 1%.



**Figura 11.** (a) Cociente entre el valor medio  $Ldv_{H(mean)}$  y el valor máximo que alcanza  $Ldv_{H(max)}$  en las 360 orientaciones que alcanza  $Ldv_{H(\theta)}$  para cada uno de los 155 pares de componentes estudiadas. (b) Coeficiente de variación de  $Ldv_{H(\theta)}$  según las distintas orientaciones para cada uno de los 155 pares de componentes estudiados.

### 5.4 Polarización de los Pulsos de Velocidad

Usando  $Ldv_{(H)}$  es posible evaluar si el carácter impulsivo de un registro está polarizado dependiendo de una dirección predominante. Dado que  $Ldv_{(H)} = Ldv_{(1)} + Ldv_{(2)}$  es prácticamente constante e independiente de la orientación, es posible evaluar el grado de polarización de la velocidad del suelo que muestra una dirección dada  $\theta_i$  calculando la relación entre  $Ldv_{(\theta_i)}$  para la orientación en estudio y  $Ldv_{(H)}$  como se muestra en la ecuación (7).

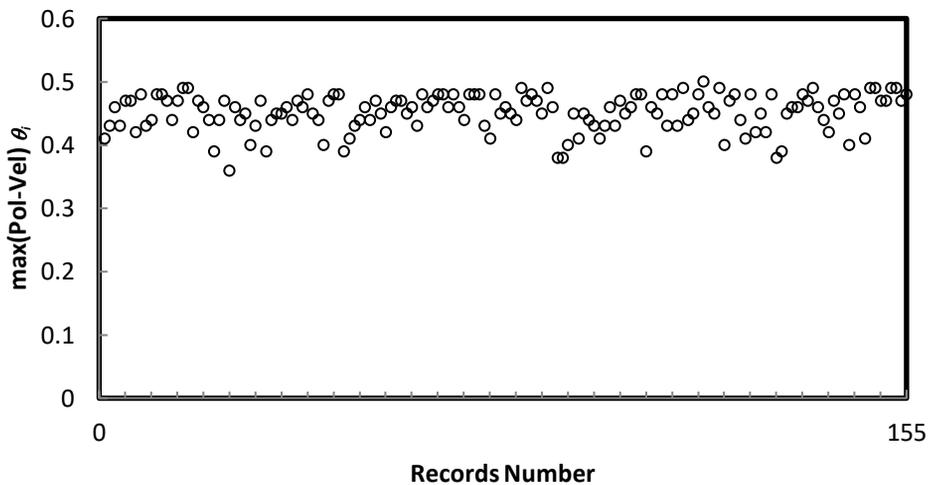
$$(Pol - Vel)_{\theta_i} = \frac{Ldv_{(\theta_i)}}{Ldv_{(\theta_i)} + Ldv_{(\theta_i+90)}} = \frac{Ldv_{(\theta_i)}}{Ldv_H} \tag{7}$$

Los valores que tienden a cero indican una gran polarización del movimiento del suelo en la dirección bajo análisis, mientras que los valores cercanos a 0.5 indican un fuerte acoplamiento del movimiento en ambas direcciones horizontales.

Los valores que tienden a uno indican que la polarización está en la dirección normal a la dirección estudiada. Dada la independencia con respecto a la orientación  $Ldv_{(H)}$ , la dirección de la polarización más grande de la velocidad del suelo se puede identificar usando la ecuación (8)

$$(Pol - Vel)_{MAX} = \frac{\min[Ldv_{(\theta)}]}{Ldv_H} \quad (8)$$

La figura 12 muestra un gráfico en el que el eje Y representa el valor correspondiente a la polarización de velocidad máxima de acuerdo con la ecuación (8). En ciertos casos, la polarización máxima alcanza 0,31, mientras que más del 90% muestra valores que oscilan entre 0,4 y 0,5.



**Figura 12.** Muestra los valores correspondientes a la máxima polarización de la velocidad respecto al set de registros analizados.

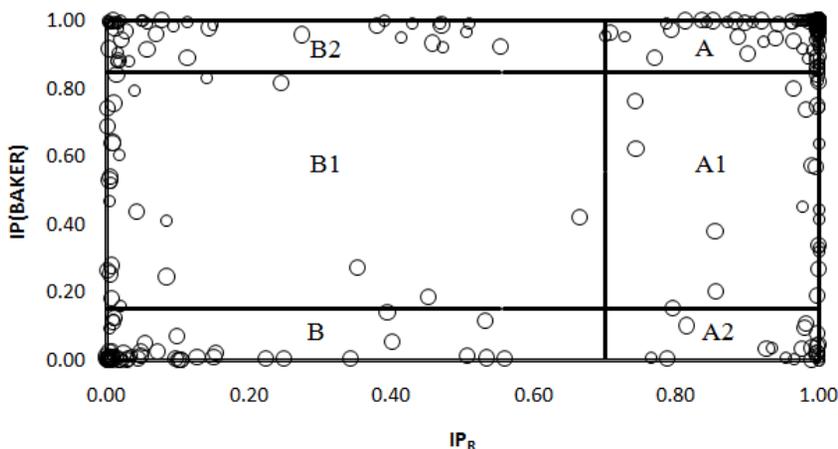
## 6 Análisis comparativo

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 13 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 ( $IPB$ ) 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 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 13.** Distribución de los índices de pulso por regresión " $IP_R$ " frente a los indicadores de pulso de Baker (2007).

## 7 Conclusiones

- Se propone una nueva metodología para identificar registros sísmicos tipo pulso utilizando un Índice de Impulsividad por Regresión ( $IP_R$ ), obtenido del historial de tiempo de velocidad del suelo.
- 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.

e) Una vez que se analiza la variación de la impulsividad con la orientación, la dirección de la impulsividad máxima en muchos casos no coincide con la dirección normal a la falla.

## 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.

This paper is a Spanish version published by Elsevier, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2017. (94), 234-243.

## REFERENCIAS

1. Abrahamson NA. Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis. In: Sixth international conference on seismic zonation. 2000.
2. Agresti, A. (2002). *Categorical Data Analysis*, Wiley, New York, 710 pp.
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. Alavi B, Krawinkler H. Effects of near-fault ground motions on frame structures. Technical Report Blume Center Report 138.2001, Stanford, California.
5. Anderson JC, Bertero VV. Uncertainties in establishing design earthquakes. J. Struct. Eng. 1987, ASCE 113(8), 1709-1724.

6. Ancheta, T., R. Darragh, J. Stewart, E. Seyhan, W. Silva, B. Chiou, K. Wooddell, R. Graves, A. Kottke, D. Boore, T. Kishida, y J. Donahue (2013). PEER NGA-West2 database, Technical Report 2013/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.
7. Arias A. A measure of the earthquake intensity in seismic design for nuclear power plants. MIT Press: Cambridge, MA, 1970; pp. 438-468.
8. Baker JW. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2007; 97:1486–501.
9. Bertero VV, MahinSA, Herrera RA. Aseismic design implications of San Fernando earthquake records. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 1978. 6(1), 31-42
10. Bray J, Rodriguez-Marek A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2004. 24, 815-828. Elsevier Ltd.
11. 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.
12. Cox KE, Ashford S A. Characterization of large velocity pulses for laboratory testing. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Berkeley, California, 60, 2002.
13. Fu Q, Menun C. Seismic-environment-based simulation of near-fault ground motions. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering* 2004. Vancouver, Canada, 15 p.
14. Hall JF, Heaton TH, Halling MW, Wald DJ. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthq. Spectra* 1995. 11,Nº 4, 569–605.
15. 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).
16. Howard JK, Tracy CA, Burns RG. Comparing observed and predicted directivity in near-source ground motion. *Earthquake Spectra* 2005. Volume 21, Nº 4, November 2005, 1063-1092.
17. Huang Y, Whittaker A, Luco N. Maximum spectral demands in the near-fault region, *Earthquake Spectra* 2008. 24, 319–341.
18. Iwan, WD. Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions. *J. Struct. Eng.* 1997. 123, no. 4, 397–404.
19. 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).

20. Krawinkler H. (1995). New trends in seismic design methodology. Department of Civil Engineering University Calif. USA.
21. Mavroeidis GP, Papageorgiou AS. A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2003; 93(3):1099–1131.
22. Maniatakis Ch A, Taflampas IM, Spyrakos C.C. Identification of near-fault earthquake record Characteristics. In: *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper No. S28-004; 2008 (on CD)*.
23. 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.
24. Naeim, F. On seismic design implications of the 1994 Northridge Earthquake records, *Earthquake Spectra* 1995. 11, 91–109.
25. NGAdatabaseflatfile. <http://peer.berkeley.edu/nga/flatfile.html>. [15 Dic; 2014].
26. Panella DS, Frau CD, Tornello ME. Identificación de registros sísmicos impulsivos para uso en ingeniería estructural. *Mecánica Computacional*. Vol. XXXII, págs. 851-863. Mendoza, 19-22Noviembre 2013. ISSN 1666-6070.
27. Rupakhety R, Sigbjörnsson R. Can Simple Pulses Adequately Represent Near-Fault Ground Motions?, *Journal of Earthquake Engineering* 2011. 15:8, 1260-1272.
28. 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.
29. Somerville, PG., Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, *Phys. Earth Planet* 2003. Interiors 137, no. 1, 12.
30. Somerville PG. Magnitude scaling of near fault ground motion. *Proc. Int. Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi earthquake 2000*. Vol. 1, 59-70.
31. Spudich P, and Chiou, BSJ. Directivity in NGA earthquake ground motions: Analysis using isochrone theory. *Earthquake Spectra* 2008. 24:1, 279-298.
32. Zamora M, Riddell R. Elastic and Inelastic Response Spectra Considering Near-Fault Effects. *Journal of Earthquake Engineering* 2011; 15:5, 775-808.
33. 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.

## Apéndice B. Rutina para el cálculo

Esta rutina en Matlab realiza la determinación de: Índice de Impulsividad, Índice de Impulsividad con regresión Logística, Longitud desarrollada de la velocidad, Velocidad cuadrática acumulada, Intensidad de Arias.

La rutina está preparada para utilizar un registro sísmico de la base de datos NGA-West2. Solo debe colocar el registro de aceleración del sismo que necesite calcular, como ejemplo se encuentra cargado el sismo: `RSN1_HELENA.A_A-HMC270.AT2`.

```

clc, clear

filename = 'RSN1_HELENA.A_A-HMC270.AT2';% Archivo de base de
datos NGA-West2
file_in = fopen(filename, 'r');
fori=1:4
ans = fgetl(file_in);
end
str10 = ans;% Cantidad de datos y dt extraídos del archivo
analizado.
str11 = sprintf('%s', str10(18:26));%dt, extracción de paso
del tiempo del registro analizado
dt=str2num(str11);
[a1, N] = fscanf(file_in, '%f');% Valores de Aceleración en
(g) y Cantidad de puntos
fclose(file_in);
v1 = cumsum(a1)' .* dt .*981 ;%velocidad de registros en cm/s2
m=length(v1);
t=(0:1:(m-1))*dt;
PGA1=max(abs(a1));% Máximo valor absoluto de Aceleración
PGV1=max(abs(v1));% Máximo valor absoluto de Velocidad
% Cálculo de la longitud desarrollada de la velocidad
LdT1=0;
fori=1:m-1;
Ldv1(i)=(((v1(i+1)-v1(i)).^2+dt.^2).^0.5);
LdT1=LdT1+Ldv1(i);
end
Ip1=LdT1/PGV1;% Cálculo del Índice de Impulsividad IP=LdV/PGV
Ipr1=1/(1+exp(5-0.45*PGV1+0.01*LdT1));%Cálculo de IPR
int_a2 = cumsum((a1'*9.81).^2)*pi*dt/(2*9.81);% Intensidad de
Arias
arias = int_a2(end);
EP = (int_a2/arias)*100;
CSV = cumsum(v1.^2) ./ sum(v1.^2);% Velocidad absoluta
acumulada
str1 = sprintf(filename);%Nombre de Registro Analizado
str2 = sprintf('%s', str1(1:end-4));
str3 = sprintf('A_%s', str1(1:end-4));

```

```

claim = str3;
new_claim = strrep(claim, '.', '_');
%GRÁFICO
A=0;
B=40;
C=-100;
D=100;
h1=figure;
plot(t,v1,t,EP,t,CSV*100,'k-','LineWidth',2),axis([A B -100
100]),set(gca,'xtick',[A:10:B],'ytick',[-100,-
30,0,30,100],'FontSize',10),set(gca,'xtickLabel',{'0','10','2
0','30','40'}),text((A+0.5),(D-
5),['',num2str(str2)],'FontSize',10),text((A+33),(C+35),['IPr
=',num2str((Ipr1),'%100.2f\n')'],'FontSize',10),text((A+33),(C
+40),['IP=',num2str((Ip1),'%100.1f\n')'],'FontSize',10),text((
A+33),(C+45),['PGV=',num2str(max(abs(v1)),'%100.1f\n')'],'Font
Size',10),text((A+33),(C+50),['Ldv=',num2str(LdT1,'%100.1f\n'
)],'FontSize',10),text((A+33),(C+55),['dt=',num2str(dt,'%100.
3f\n')'],'FontSize',10),legend('Registro Original','Intensidad
de Arias(%)','Veloc. CuadraticaAcumulada(%)','Location',
'southeast'),ylabel('Velocidad(cm/s)') ,xlabel('Tiempo
(s)'),grid; figure(gcf);
%guardar gráficos
saveas(h1,new_claim,'jpg')
nombre1=str2;
datos1=[PGA1 PGV1 LdT1 Ip1 Ipr1];
fprintf('%s %5.3f %5.1f %5.1f %5.1f %1.2f \n',nombre1,datos1)

```