

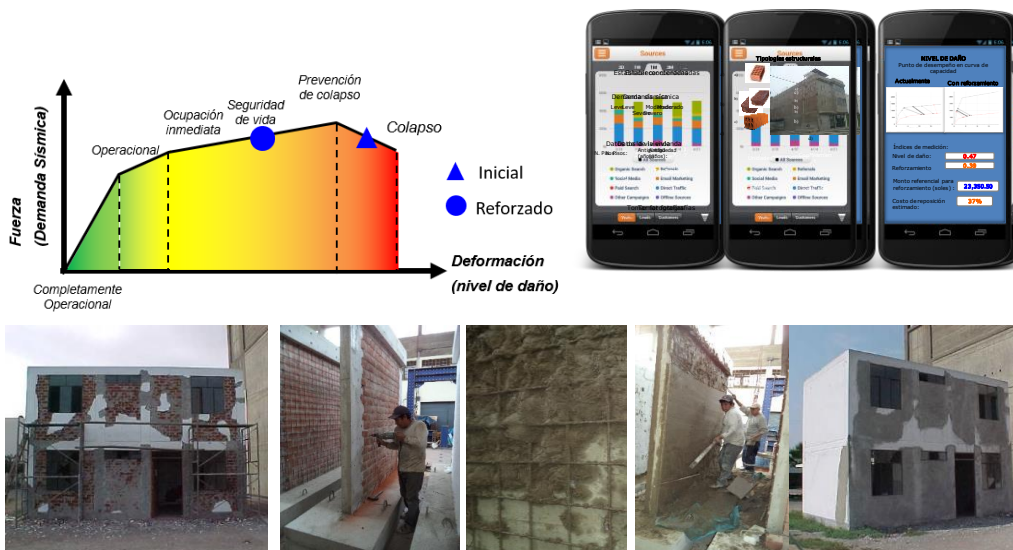


PROYECTO 115-2018-FONDECYT

IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL BASADA EN UNA
METODOLOGÍA INTEGRAL PARA EL CÁLCULO DE VULNERABILIDAD,
RIESGO Y VIABILIDAD DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EN
VIVIENDAS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA FRENTE A ESCENARIOS
SÍSMICOS DIVERSOS

INFORME No. 4
HITO 1

SET DE CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO EN LIMA CON LAS FUENTES
SÍSMICAS DE INFLUENCIA



Coordinador de Proyecto:

Dr. Ing. Miguel Díaz Figueroa

Co - investigadores:

Dr. Ing. Carlos Zavala, Dr. Ing. Zenon Aguilar, Dr. Ing. Roy Reyna, Mag. Ing. Jorge Gallardo,
MSc. Ing. Erika Flores, Dr. Ing. Zenon Aguilar, Bach. Ing. Víctor Astorayme, Bach. Ing. Michel
Amancio, Bach. Ing. Luis Lopez.

MAYO – 2019



CONTENIDO

CONTENIDO.....	1
LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABLAS.....	4
1. ANTECEDENTES	6
2. OBJETIVOS	6
3. LIMITACIONES DEL ESTUDIO	6
4. PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO	7
4.1 Data sísmica analizada	8
4.1.1 Homogenización de datos.....	8
4.1.2 Depuración del catálogo sísmico	10
4.1.3 Eliminación de duplicados.....	12
4.2 Distribución Espacial Sísmica	14
4.3 Evaluación y Caracterización de las Fuentes Sismogénicas ..	16
4.4 Estimación de los Parámetros Sísmológicos de las Fuentes Sismogénicas	27
4.5 Ecuaciones de Predicción del Movimiento del Suelo (GMPE) 30	
4.5.1 Modelo de Predicción del Movimiento del Suelo de Youngs et al. (1997)	32
4.5.2 Modelo de Predicción del Movimiento del Suelo de Zhao et al. (2006)	34
4.5.3 Modelo de Predicción del Movimiento del Suelo de BC HYDRO (Abrahamson et al. 2016).....	37
4.5.4 Modelo de Predicción del Movimiento del Suelo de Sadigh et al. (1997)	42
4.5.5 Ecuación de Atenuación de Chiou and Youngs (2014).....	45
4.5.6 Ecuación de Atenuación de Abrahamson et al. (2016)	53



4.5.7	Ecuación de Atenuación de Bozorgnia y Campbell (2014)	58
4.6	Árbol Lógico de Decisión	67
4.6.1	Eventos de Interfase	67
4.6.2	Eventos de Intraplaca	67
4.6.3	Eventos Corticales	67
4.7	Determinación del Peligro Sísmico	68
5.	CONSIDERACIÓN DE EFECTOS DE SITIO	69
5.1	Microzonificación	69
5.2	Aceleraciones en superficie considerando condiciones de sitio 70	
6.	CONCLUSIONES	72
7.	REFERENCIAS.....	73



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de decisiones para homogenización de data según Boore y Joyner (1982), GSHAP y el ISC	10
Figura 2. Análisis de Completitud del Catálogo.....	12
Figura 3. Árbol de decisiones para eliminación de duplicados.....	13
Figura 4. Sismicidad para Lima para el período 1963-2015, $M_w > 4$	16
Figura 5. Perfiles vertical de sismicidad para el período 1555-2016 ($M_w > 4$) 16	
Figura 6. Comparación de la distribución espacial sísmica y las fuentes sísmogénicas propuestas.....	17
Figura 7. Fuentes Sísmogénicas de Subducción de Interfase.....	24
Figura 8. Fuentes Sísmogénicas de Subducción de Intraplaca.....	25
Figura 9. Fuentes Sísmogénicas de Corteza Superficial o Continentales.....	26
Figura 3. Curva de probabilidad anual de excedencia para aceleración espectral	68



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Integridad del Catálogo Sísmico.....	11
Tabla 2. Coordenadas geográficas de las Fuentes de Interfase	18
Tabla 3. Coordenadas geográficas de las Fuentes de Intraplaca.....	19
Tabla 4. Coordenadas geográficas de las Fuentes Continentales	21
Tabla 5. Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas.....	29
Tabla 6. del Sitio (Fuente ASCE-SEI 7-10).....	31
Tabla 7. Esquema de clasificación Geomatrix 3rd Letter	33
Tabla 8. Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca propuesta por Youngs et al. (1997)	34
Tabla 9. Esquema de clasificación de Molas & Yamazaki (1995)	35
Tabla 10. Coeficientes de la ley de atenuación de aceleración espectral a nivel de roca (Suelo tipo B) propuesto por Zhao et al. (2006)	36
Tabla 11. Coeficientes de regresión para la subducción mediana (unidades en g) del modelo GMPE. BC Hydro (2016)	39
Tabla 12. Coeficientes de regresión para la subducción mediana (unidades en g) del modelo GMPE. BC Hydro (2016) (cont.)	40
Tabla 13. Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca propuesta por Sadigh et al. (1997)	44
Tabla 14. Coeficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo	48
Tabla 15. Coeficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo	49
Tabla 16. Coeficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo	50
Tabla 17. Coeficientes del modelo de respuesta de sitio para $\ln(y)$	51
Tabla 18. Coeficientes de respuesta media	55
Tabla 19. Coeficientes de respuesta media	56
Tabla 20. Coeficientes de respuesta de suelo linear y no linear	57
Tabla 21. Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical	62



Tabla 22. Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical	63
Tabla 23. Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical	64
Tabla 24. Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical	65
Tabla 25. Valores de $\Delta C1$ recomendados para fuentes de intraplaca	67
Tabla 26. Factores de Amplificación Sísmica.....	71



INFORME No. 4-HITO 1

**SET DE CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO EN LIMA CON LAS FUENTES
SÍSMICAS DE INFLUENCIA**

1. ANTECEDENTES

En fecha 27 de noviembre del 2018 se suscribió el Convenio 115-2018-FONDECYT entre el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) con el objeto de otorgar el financiamiento para la ejecución del proyecto titulado “Implementación de una herramienta digital basada en una metodología integral para el cálculo de vulnerabilidad, riesgo y viabilidad de reforzamiento estructural en viviendas de albañilería confinada frente a escenarios sísmicos diversos”, en adelante denominado el Proyecto. El Proyecto, de acuerdo a la propuesta aprobada, se desarrolla en el Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería de Civil (FIC), de la UNI.

En el presente informe se describe la metodología para calcular el set de curvas de peligro sísmico en Lima con las fuentes sísmicas de influencia desarrollado por el Dr. Aguilar et al., representante de la empresa colaboradora ZER GEOSYSTEM.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente informe es realizar el análisis para establecer las curvas de peligro sísmico en Lima Metropolitana y el Callao.

3. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

La evaluación y análisis de peligro sísmico está sujeta a desarrollos constantes como parte de la ciencia e ingeniería en las metodologías y estándares de la práctica actual, por lo que los valores calculados en este informe están sujetos a nuevas actualizaciones.

En tal sentido, el CISMID recomienda actualizar los resultados del presente informe, al momento que nueva información sismotectónica se encuentre disponible o se desarrollen nuevas y avanzadas teorías científicas para el desarrollo y análisis de peligro sísmico.



4. PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO

El peligro sísmico es una medida de la probabilidad que el sismo más fuerte que puede ocurrir en una zona, en un cierto número de años, exceda (o no exceda) un determinado nivel de intensidad sísmica (intensidad, aceleración, velocidad, etc.).

Cornell (1968) propuso una metodología para realizar el análisis de peligro sísmico probabilísticamente. Esta metodología fue sistematizada por Mc Guire (1974, 1976) en su programa de cómputo RISK, el cual es ampliamente usado en la actualidad, convirtiéndose en una herramienta básica para este análisis.

La concepción básica del método consiste en la determinación y caracterización de las fuentes sismogénicas que definen la sismicidad de la región en estudio; para esto es necesario revisar la actividad sísmica del pasado y analizar las características tectónicas de la región. Seguidamente se determinan los parámetros de sismicidad local de cada una de las fuentes o zonas sismogénicas y con la ayuda de modelos de predicción de movimiento del suelo definidos para cada tipo de fuentes, se determinan los valores probables de intensidades del movimiento sísmico que pueden esperarse en un determinado lugar.

Se conoce que el movimiento sísmico del terreno en un lugar determinado está directamente influenciado por factores como el mecanismo de la fuente, el camino de propagación de las ondas y las condiciones locales del suelo en el sitio de interés. Dado que los modelos de predicción de movimiento del suelo son generalmente desarrolladas considerando información obtenida en roca base o suelo rígido de la actividad sísmica de diversas partes del mundo, los valores de aceleración estimados generalmente no reflejan la amplificación de las ondas producto de las condiciones locales del suelo en un punto de interés determinado.

El análisis de peligro sísmico probabilístico es expresado en curvas de Probabilidad Anual de Excedencia vs. Aceleración Espectral, las cuales permiten estimar adecuadamente las ordenadas espectrales asociados a un nivel de excedencia uniforme a lo largo del espectro, mediante la determinación de espectros de respuesta de peligro uniforme, utilizando metodologías establecidas en la literatura técnica, en lugar de escalar una forma espectral al valor de aceleración máxima del suelo estimada mediante un estudio de peligro sísmico probabilístico, lo cual conduce a una distribución



no uniforme del peligro a lo largo del espectro y por tanto a un nivel de riesgo diferente de acuerdo a la importancia de la estructura a diseñar.

En el presente análisis del peligro sísmico para el departamento de Lima se han empleado modelos de predicción de movimiento del suelo para cuantificar la aceleración horizontal máxima del suelo en la base, así como también para estimar los niveles de demanda sísmica para diferentes periodos de vibración del suelo, utilizando para ello modelos de predicción de movimiento del suelo para ordenadas espectrales publicados en la literatura técnica. Dada esta tendencia mundial, para la evaluación de la peligrosidad sísmica, se empleará los modelos de predicción de movimiento del suelo para ordenadas espectrales propuestas por Youngs *et al.* (1997), Zhao *et al.* (2006), McVerry *et al.* (2006), y BC HYDRO (Abrahamson 2016) que diferencian los mecanismos focales para sismos de subducción de interfase e intraplaca en la estimación de la máxima aceleración espectral para diferentes periodos estructurales. Además, se ha empleado el modelo de atenuación para aceleraciones espectrales propuestas por Sadigh, *et al.*, (1997) y las leyes de la “*New Generation Attenuation Model*” (NGA2) para sismos continentales.

4.1 Data sísmica analizada

Para este análisis se ha recurrido al catálogo sísmico para el Perú, que fue compilado utilizando los catálogos del Instituto Geofísico del Perú (IGP); el catálogo del International Seismological Centre (ISC); el catálogo del National Earthquake Information Center (NEIC); el catálogo del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); y el catálogo del Global Centroid Moment Tensor (Global CMT) para el periodo actualizado hasta el primero de enero de 2016. El catálogo sísmico fue analizado gráfica y estadísticamente considerando el tiempo, la profundidad y la magnitud de los eventos sísmicos registrados en el área de estudio.

4.1.1 Homogenización de datos

Debido a la gran importancia de tener un parámetro uniforme y homogéneo para comparar el tamaño de los sismos en la evaluación del peligro sísmico, el catálogo compilado fue examinado minuciosamente, homogenizando las magnitudes a Magnitud Momento (M_w) y eliminando los eventos registrados con magnitud cero o sin magnitud.



Para este fin, se ha considerado los valores de magnitud de ondas de cuerpo (m_b) equivalentes a M_w si las magnitudes m_b se encuentran dentro del intervalo de 4 a 6; los valores de magnitud de ondas de superficie (M_s) equivalentes a M_w si las magnitudes M_s se encuentran dentro del intervalo M_s de 5 a 8; y los valores de magnitud local (M_L) equivalentes a M_w si las magnitudes M_L se encuentran dentro del intervalo de 4 a 7 (Boore y Joyner, 1982). Para magnitudes reportadas fuera de estos intervalos, el proceso de conversión de magnitudes de diferentes escalas a magnitud momento (M_w) fue empleando las siguientes relaciones:

- Para eventos con magnitudes m_b (ondas de cuerpo) reportadas, M_S es calculado usando las expresiones dadas por el GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program):

$$M_S = 1.644 m_b - 3.753 \quad m_b < 5.9$$

$$M_S = 2.763 m_b - 10.301 \quad m_b \geq 5.9$$

- Para eventos con magnitudes M_s (ondas superficiales) reportadas u obtenidas, M_w es calculado usando las expresiones dadas por el ISC (International Seismological Center; Scordilis, 2006):

$$M_w = 0.67 (\pm 0.005) M_s + 2.07 (\pm 0.03) \quad 3.0 \leq M_s \leq 6.1$$

$$M_w = 0.99 (\pm 0.02) M_s + 0.08 (\pm 0.13) \quad 6.2 \leq M_s \leq 8.2$$

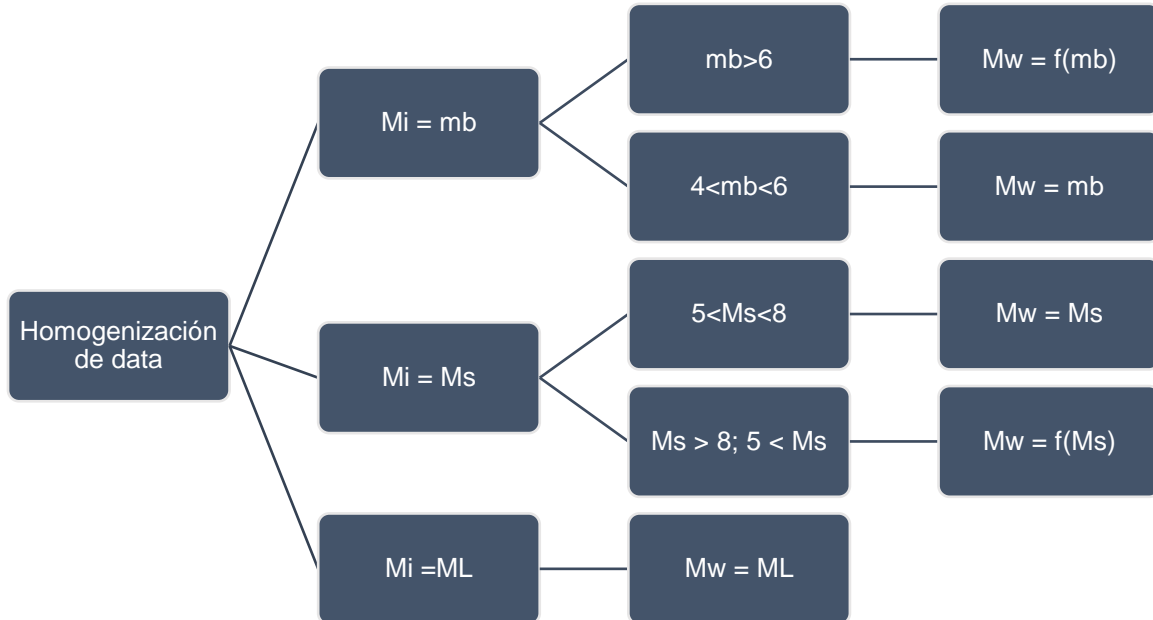


Figura 1. Árbol de decisiones para homogenización de data según Boore y Joyner (1982), GSHAP y el ISC

4.1.2 Depuración del catálogo sísmico

La depuración de los catálogos sísmicos es considerada aún un proceso subjetivo, no es una ciencia exacta, ya que se sabe que no existe ninguna diferencia física entre temblores previos, eventos principales y réplicas. Por lo que existen diversas investigaciones que han tratado de buscar una estandarización para el depurado, pero hasta el momento solo se han conseguido distintos puntos de vista en cuanto a los parámetros a analizar. La depuración es primordial para poder eliminar todas las réplicas y premonitores dejando únicamente eventos principales y mutuamente independientes entre sí.

En principio, existen dos enfoques para la depuración: método estocástico (o probabilístico) y método determinístico. Los métodos estocásticos calculan las probabilidades para cada terremoto para ser activado por una anterior (por ejemplo Zhuang et al., 2002, Marsan y Lengliné, 2008). Cualquier terremoto puede, por lo tanto, tener una probabilidad de ser asociado con un número diferente de grupos. Para los algoritmos determinísticos cualquier terremoto puede ser parte de solo un grupo. Aquí nos centramos en los algoritmos deterministas, donde dos enfoques diferentes se pueden distinguir: (1) algoritmos vinculantes, donde los grupos están vinculados por los terremotos



más pequeños y se les permite crecer en el tiempo y espacio a medida que avanza la sismicidad (p. ej., Reasenberg 1985; Frohlich y Davis 1990; Davis y Frohlich 1991); y (2) los algoritmos de ventana, donde se utilizan ventanas de magnitud dependiente en el espacio y el tiempo para identificar los terremotos de la misma agrupación (e.g., Utsu 1969; Gardner y Knopoff 1974; Kellis-Borok y Kossobokov 1986).

En cuanto a los métodos estocásticos, Zhuang et al. (2002) concluye que para evitar las dificultades aleatorias que involucran los eventos sísmicos, el método de depuración debe basarse en un modelo estocástico para cuantificar objetivamente las observaciones, tal que cualquier evento tenga la misma probabilidad de ser un evento previo o un evento generado por otros. Por lo tanto, el objetivo de este método de depuración es estimar esta probabilidad para cada evento.

Asimismo, al no ser todos los eventos sísmicos importantes en la respuesta de las estructuras, se consideran únicamente los eventos con magnitud M_w mayor o iguales a 4.0 en el presente estudio. La integridad del catálogo podemos ver la en la Figura 2.3, distribuido por su frecuencia anual versus el tiempo (anterior al 1 de enero del 2016), agrupados por conjuntos de magnitud.

En consecuencia, para eventos con magnitudes M_w entre 4.0 a 5.0, son 52 años de observación homogénea; para magnitudes entre 5.1 a 6.0 son 56 años de observación, para las magnitudes de 6.1 a 7.0 son 62 años, y para eventos con magnitudes 7.1 a 8.0 son 110 años de observación.

Tabla 1. Integridad del Catálogo Sísmico

Rango [Mw]	Catálogo completo desde
≤ 5.0	1964
5.1 - 6.0	1960
6.1 - 7.0	1954
7.1 - 8.0	1906
≥ 8.1	1555

El análisis gráfico de completitud del catálogo sísmico se presenta en la Figura 2.3

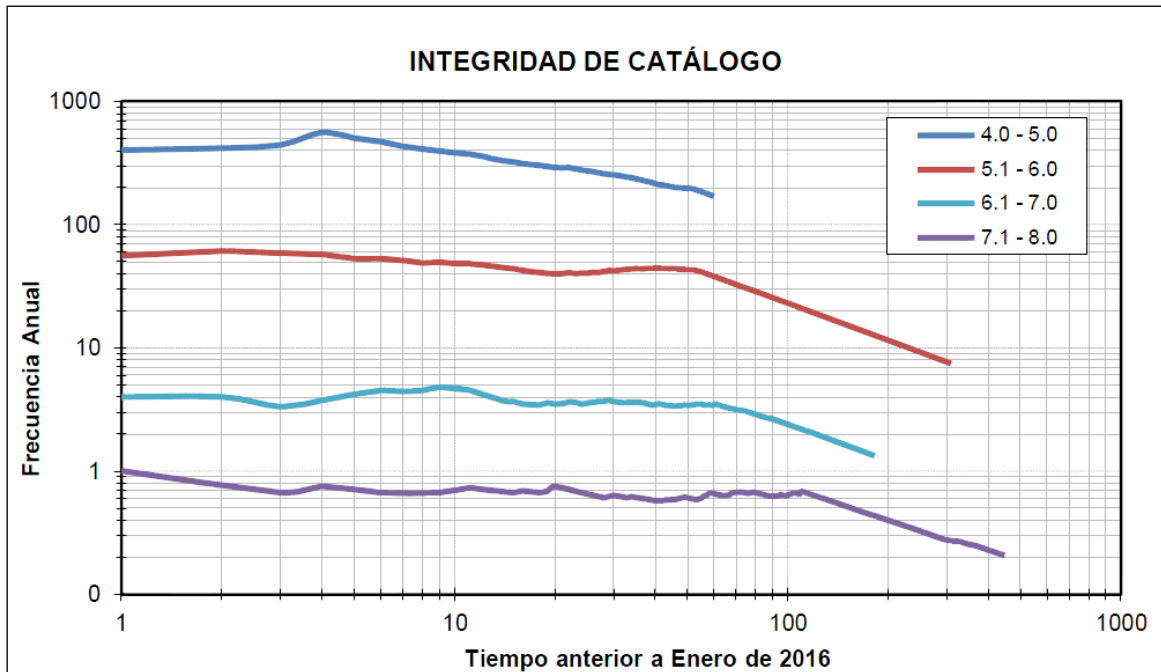


Figura 2. Análisis de Completitud del Catálogo

Esta depuración depende de distintos filtros, el primero y más sistematizado es mediante el uso del programa ZMAP (Wiemer, 2001) versión 6.0, bajo la metodología de depuración propuesta por Reasenberg (1985), posteriormente se aplicó un segundo filtrado mediante la metodología de depuración de Maeda (1996) y finalmente se realizó un análisis exhaustivo espacial-temporal con el propósito de eliminar aquellos eventos sísmicos del catálogo que refieren al mismo sismo.

4.1.3 Eliminación de duplicados

La depuración de los catálogos sísmicos es considerada aún un proceso subjetivo, no es una ciencia exacta, ya que se sabe que no existe ninguna

Debido a que la base de datos del catálogo sísmico comprende los catálogos de diversas entidades (IGP, NEIC, USGS, NOAA, ISC), luego se esperarí encontrar en diversas oportunidades el mismo sismo, consecuentemente, dado que estos eventos no pueden ser depurados como réplicas o antecesores ya que escapan ante los filtros de Reasenberg y de Maeda es que esta eliminación de duplicados es algo menos sistematizado.

Para el análisis de eliminación de duplicados simplemente verificando que el tiempo de origen de los dos eventos que se analicen no sean menores a 60 s, que su distancia no sea menor a 0.3° , y que la diferencia de magnitudes no sea menor a 0.3 para sismos de poca magnitud y 0.2 para sismos de mayor magnitud (más relevantes: $M_w > 6.0$).

De encontrarse eventos duplicados se escogerá el evento de mayor magnitud y se eliminará el (los) duplicados encontrados.

Cabe destacar que en los catálogos se asigna la profundidad de 33 km a todo aquel evento cuya profundidad se desconozca o no haya sido adecuadamente calculada, en el presente estudio, se ha prescindido de aquella data cuya profundidad no ha sido apropiadamente definida con el propósito de que éstos no sean incluidos en un mecanismo focal que no le corresponda (Interfase, intraplaca, cortical).

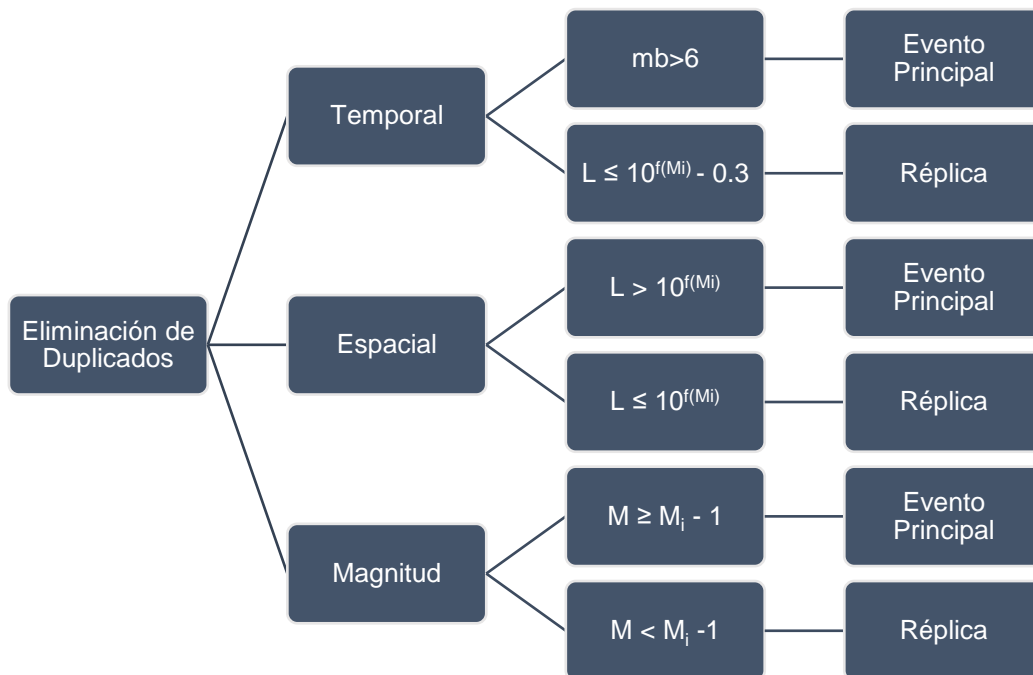


Figura 3. Árbol de decisiones para eliminación de duplicados



4.2 Distribución Espacial Sísmica

La sismicidad con foco a profundidad superficial se localiza en la zona oceánica en dirección paralela a la línea de costa (Stauder, 1975; Barazangi & Isacks, 1976), produciendo terremotos de magnitud elevada con relativa frecuencia. El terremoto de 1970 localizado en esta zona, es considerado uno de los más catastróficos en el mundo por haber producido la muerte de 67 000 personas, 250 000 desaparecidos y 180 000 herido (Silgado, 1978). Otro grupo importante de terremotos son los producidos por la subsidencia del escudo brasileño bajo la Cordillera Andina, estando la mayor parte de estos sismos localizados en la zona de transición entre la Cordillera Oriental y el margen occidental de la zona Subandina (entre 3° - 13°S). En esta zona del Altiplano también existen sismos superficiales pero son menos numerosos y más dispersos. Asimismo, se observa la existencia de zonas de bajo índice de sismicidad ente la línea de costa y la Cordillera Occidental (4°S-13°S) y en la región Sur de Perú (13°S-16°S), mostrando que en estas zonas el régimen de deformación cortical probablemente es menor o que existen períodos mayores de recurrencia para terremotos de magnitud elevada.

Con fines de mostrar la sismicidad se ha realizado una sección transversal de la sismicidad tomando un área de 350 km de ancho por 1000 km de largo (véase Figura 2.6, 2.7).

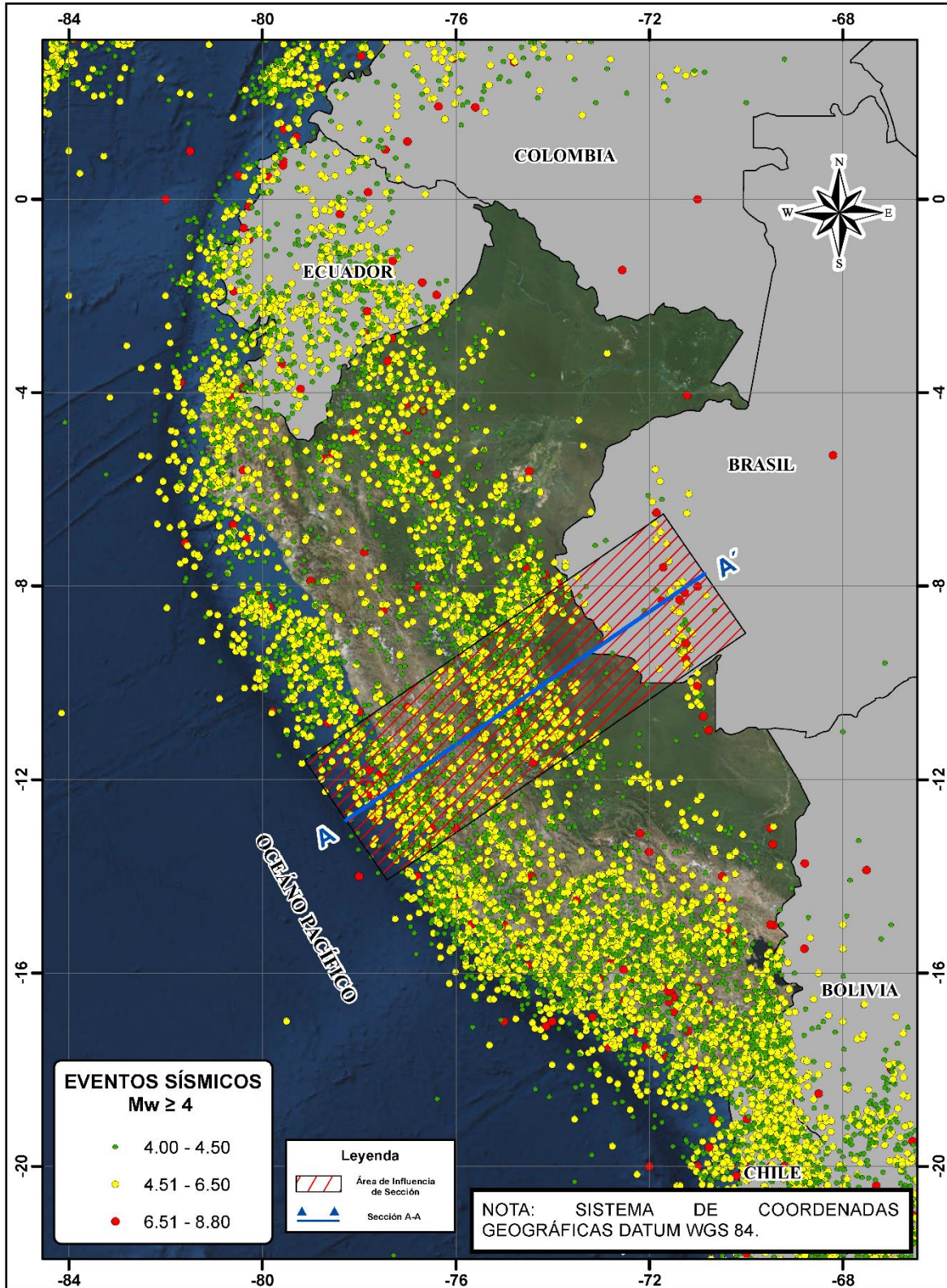


Figura 4. Sismicidad para Lima para el período 1963-2015, $M_w > 4$.

En el perfil (Figura 2.7) se observa que la distribución de focos de los sismos aumenta de oeste a este, se observa una concentración de sismos de mecanismo focal de interfase e intraplaca siendo estos los de mayores magnitudes a lo largo de toda la sección, aumentando progresivamente la profundidad hasta 150 km. La distribución de focos sigue una línea con pendiente de 20° inicialmente. Posterior a ello, a una distancia aproximada de 300 km desde la fosa la subducción se torna prácticamente horizontal. Estas características ya fueron descritas por otros autores (Stauder, 1975; Rodríguez y Tavera, 1991).

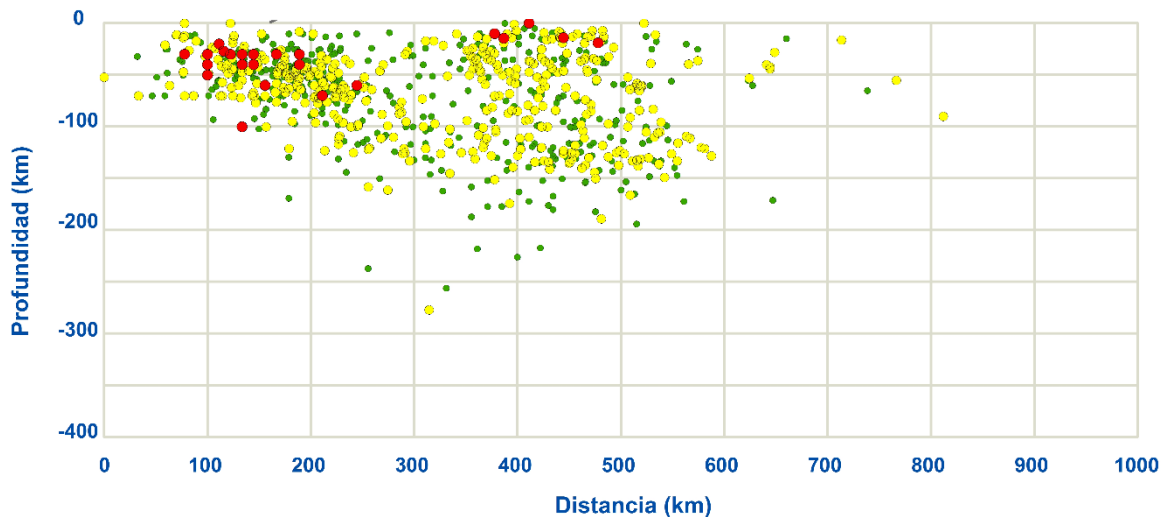


Figura 5. Perfiles vertical de sismicidad para el período 1555-2016 ($M_w > 4$)

4.3 Evaluación y Caracterización de las Fuentes Sismogénicas

Se han tomado las fuentes sismogénicas de subducción y de corteza para el Perú propuestas por Aguilar et al. (2016), en los cuales se han diferenciado los mecanismos de interfase y de intraplaca superficial e intermedias, considerando el patrón de comportamiento de cada una de ellas mediante el procesamiento estadístico de la información sísmica actualizada al año 2016. En dicho trabajo se establecieron fuentes sismogénicas de subducción, en las cuales se han diferenciado los mecanismos de interfase (F1, F2, F3, F4, F5 y F6) y de intraplaca superficial (F7, F8, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15 y F16) e intermedias (F17, F18, F19 y F20). Así mismo se han utilizado nueve fuentes sísmicas continentales (F21, F22, F23, F24, F25, F26, F27, F28 y F29).

La geometría de estas fuentes es concordante con el modelo de subducción propuesto por Cahill e Isacks (1992).

No todas las fuentes sismogénicas tienen efectos sobre el departamento de Lima es por ello que se seleccionaron aquellas que estén dentro de un radio de 400 km, la cual es una distancia apropiada para estimar las aceleraciones del terreno con los modelos de predicción del movimiento del suelo, pues éstas tienen un rango de validez mayor que no supera los 350km en algunos casos.

Siendo las fuentes de subducción interfase (F2, F3 y F4); las fuentes de subducción de intraplaca (F8, F9, F10, F11, F13, F14, F15, F16 y F18) y las fuentes sísmicas continentales (F21, F22, F23, F27, F28 y F29) las que se han considerado para el análisis de recurrencia y posterior cálculo de peligro sísmico.

A continuación se muestra una vista en 3D de la distribución espacial de los focos y de las fuentes sismogénicas de subducción seleccionadas para el cálculo de peligro sísmico, Donde las fuentes tipo área de color azul y rojo corresponden a las fuentes sismogénicas de interfase e intraplaca respectivamente.

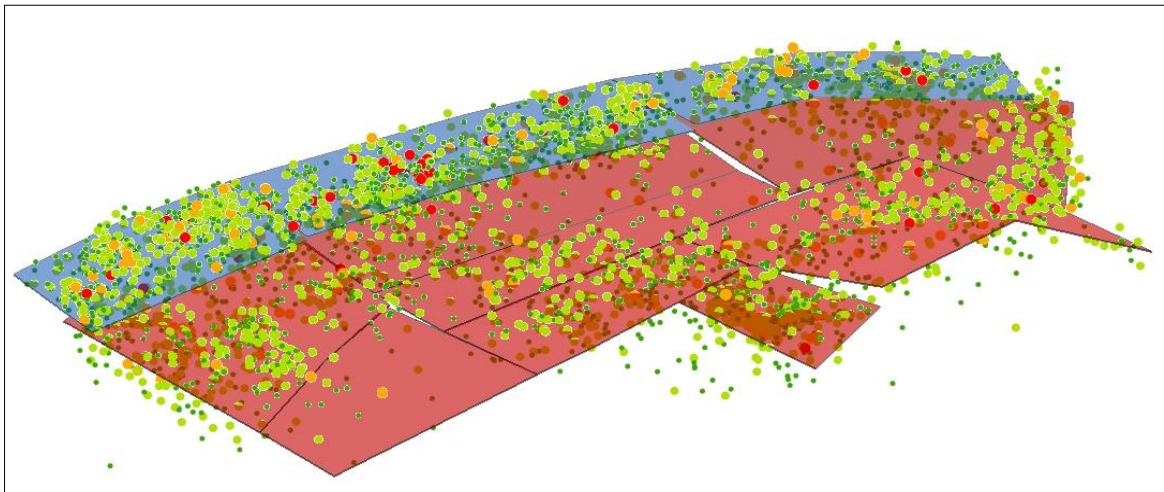


Figura 6. Comparación de la distribución espacial sísmica y las fuentes sismogénicas propuestas

Las coordenadas geográficas de las fuentes sismogénicas que han sido aplicadas para la evaluación del peligro sísmico sobre La región de Lima se indican en la *Tabla 2*, *Tabla 3* y *Tabla 4*; y en la **Figura 7**, **Figura 8** y **Figura 9**.



Tabla 2. *Coordenadas geográficas de las Fuentes de Interfase*

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°)	Latitud (°)	
F-2	-81.851	-3.458	25
	-82.054	-5.322	25
	-80.995	-8.522	25
	-79.269	-7.736	50
	-80.368	-5.595	50
	-79.699	-2.439	50
	-81.236	-2.274	25
F-3	-80.995	-8.522	25
	-79.490	-11.070	25
	-77.155	-14.392	25
	-75.834	-13.548	60
	-77.358	-11.389	60
	-79.269	-7.736	60
F-4	-75.800	-15.800	25
	-74.360	-16.880	25
	-73.430	-16.039	65
	-75.834	-13.548	65
	-77.155	-14.392	25



Tabla 3. *Coordenadas geográficas de las Fuentes de Intraplaca*

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°)	Latitud (°)	
F-8	-81.334	-3.969	50
	-80.840	-5.926	50
	-79.881	-8.015	50
	-77.474	-6.920	120
	-78.667	-4.725	120
	-77.716	-2.798	200
	-80.017	-1.630	90
F-9	-78.423	-7.352	100
	-79.881	-8.015	60
	-77.881	-11.686	60
	-76.381	-13.899	60
	-74.775	-12.871	120
	-76.441	-10.831	130
F-10	-73.778	-16.347	70
	-71.584	-14.405	140
	-73.127	-13.631	125
	-74.555	-12.725	120
	-76.381	-13.899	60



Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°)	Latitud (°)	
	-75.782	-14.883	60
	-74.709	-15.750	60
F-13	-77.716	-2.798	200
	-78.667	-4.725	120
	-76.472	-8.763	130
	-75.489	-8.120	140
	-74.558	-6.771	150
	-76.164	-4.332	130
	-75.255	-2.911	150
F-14	-76.441	-10.831	130
	-74.775	-12.871	120
	-73.794	-12.219	130
	-76.472	-8.763	130
	-77.474	-6.920	120
	-78.423	-7.352	120
F-15	-75.116	-10.513	145
	-73.794	-12.219	130
	-72.577	-11.410	135
	-73.319	-10.572	150



Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°)	Latitud (°)	
	-74.417	-9.331	150
	-75.489	-8.120	140
	-76.472	-8.763	130
F-16	-73.119	-13.635	120
	-71.584	-14.405	150
	-70.646	-13.766	135
	-72.575	-11.405	135
	-74.555	-12.725	125
F-18	-75.489	-8.120	140
	-74.417	-9.331	150
	-73.051	-8.124	185
	-74.558	-6.771	180

Tabla 4. *Coordenadas geográficas de las Fuentes Continentales*

Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°)	Latitud (°)	
F-21	-79.173	-7.916	30
	-77.365	-7.009	30
	-78.581	-4.449	30
	-80.368	-5.595	30



Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°)	Latitud (°)	
F-22	-79.173	-7.916	30
	-77.358	-11.389	30
	-75.834	-13.548	30
	-75.647	-13.742	30
	-74.411	-12.807	30
	-75.315	-12.019	30
	-76.798	-8.551	30
	-77.365	-7.009	30
F-23	-75.677	-13.764	30
	-73.090	-16.383	30
	-72.106	-14.949	30
	-73.789	-13.349	30
	-74.411	-12.807	30
F-27	-78.152	-5.348	30
	-77.365	-7.009	30
	-76.798	-8.551	30
	-75.145	-7.359	30
	-75.430	-6.292	30
	-76.304	-4.610	30



Fuente	Coordenadas Geográficas		Profundidad (km)
	Longitud (°)	Latitud (°)	
F-28	-76.798	-8.551	30
	-75.315	-12.019	30
	-73.789	-13.349	30
	-72.276	-11.656	30
	-73.668	-10.523	30
	-74.957	-8.744	30
	-75.145	-7.359	30
F-29	-73.789	-13.349	30
	-72.106	-14.949	30
	-70.484	-15.743	30
	-69.414	-12.956	30
	-72.276	-11.656	30

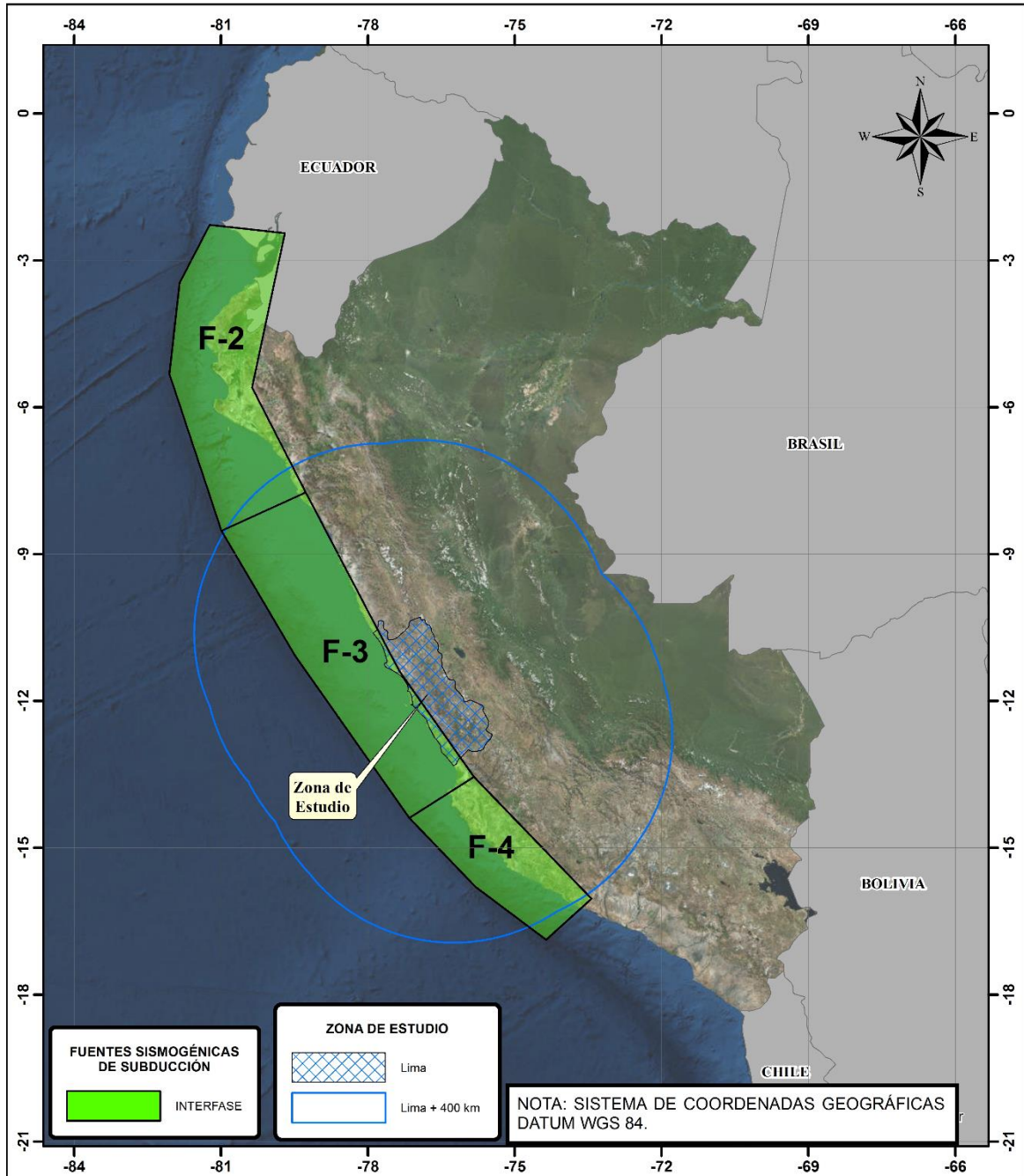


Figura 7. Fuentes Sismogénicas de Subducción de Interfase

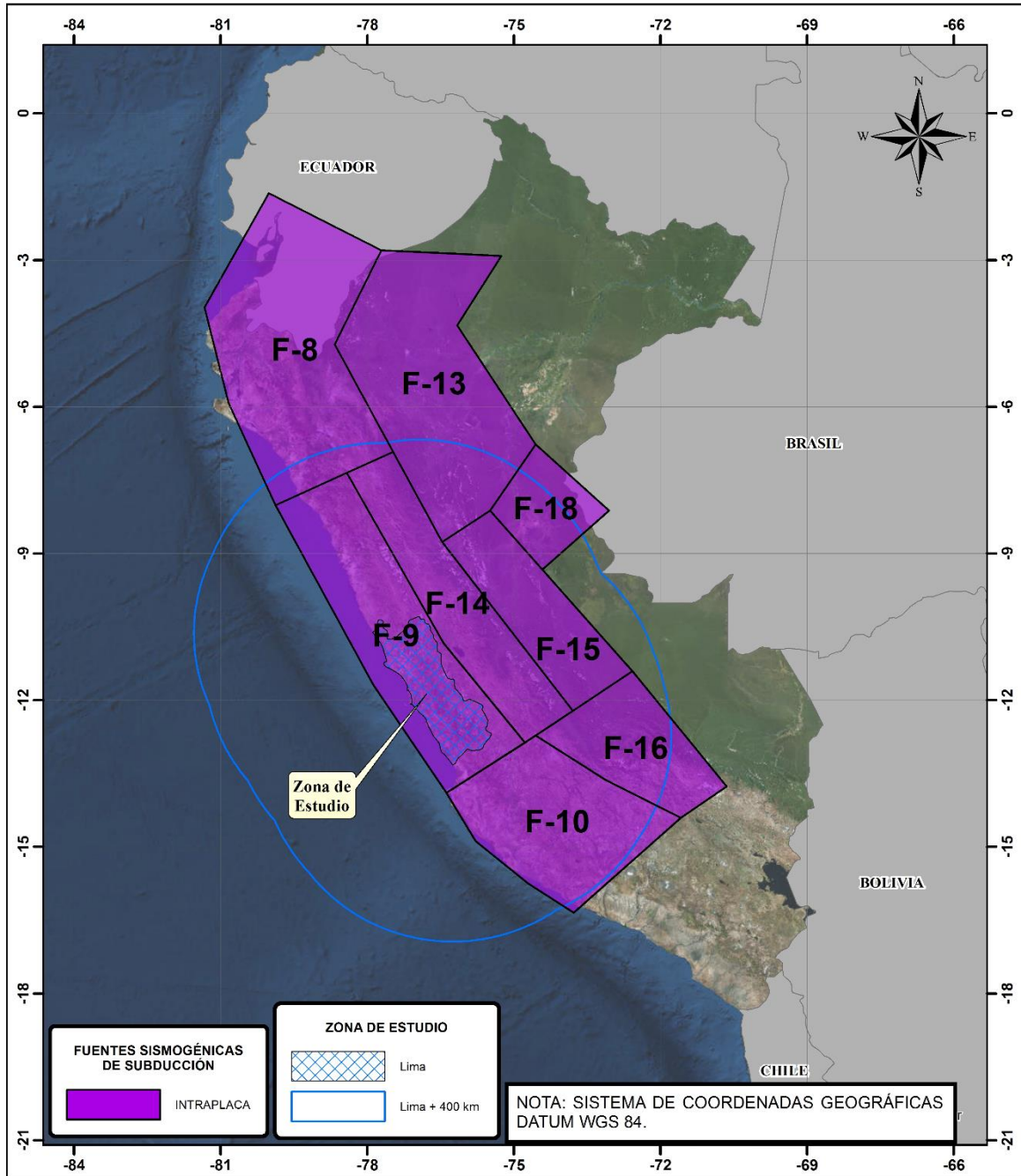


Figura 8. Fuentes Sísmicas de Subducción de Intraplaca

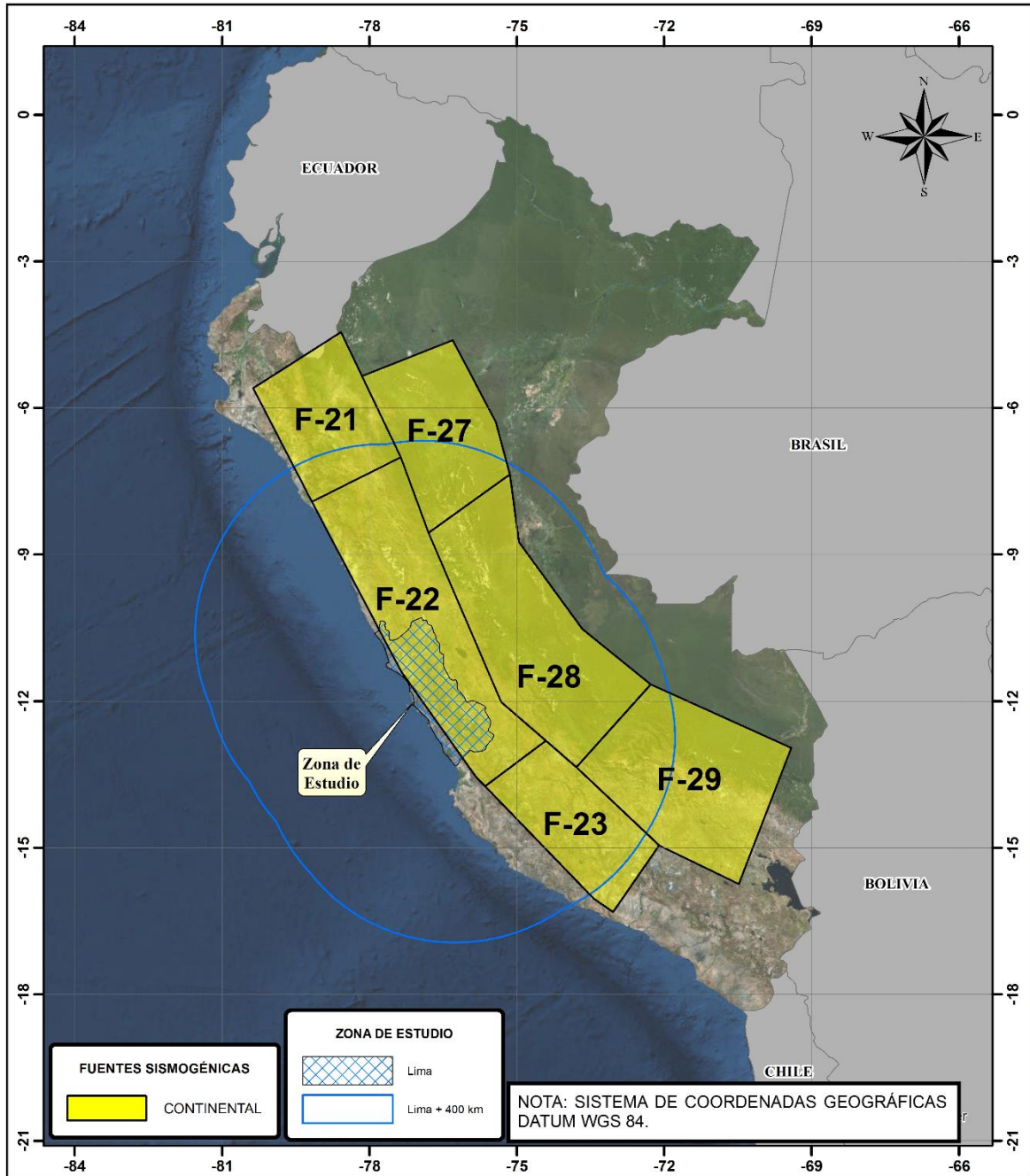


Figura 9. Fuentes Sismogénicas de Corteza Superficial o Continentales



4.4 Estimación de los Parámetros Sismológicos de las Fuentes Sismogénicas

Definidas las fuentes sismogénicas, se distribuyó espacialmente los sismos del catálogo sísmico sobre los volúmenes de influencia de las fuentes sismogénicas, determinándose de esta manera los eventos delimitados en cada fuente.

La caracterización de las fuentes sismogénicas fue realizada a través del cálculo de sus parámetros sismológicos, considerando el modelo exponencial doblemente truncado de Gutenberg y Richter.

$$\log \lambda_m = a - bm$$

Donde:

- a Representa la tasa de actividad de la fuente entendida como la tasa absoluta de recurrencia de terremotos con magnitudes mayores a cero.
- b Está relacionado a la probabilidad relativa de sismos con diferentes magnitudes.
- λ_m Tasa o relación anual de excedencia, entendida como el número acumulativo de sismos de magnitudes mayores a la magnitud "m".

El modelo exponencial truncado a menudo se escribe de la siguiente manera:

$$\lambda m = v_0 \cdot \exp(-\beta_m)$$

Donde:

- $v_0 = 10^a$
- $\beta = b \cdot \ln(10) \cong 2.3 b$

Las magnitudes de los sismos se distribuyen exponencialmente, lo cual implica que la tasa de recurrencia es mayor en sismos de menor magnitud. A pesar de que la relación de recurrencia sísmica puede ser aplicada a un infinito rango de magnitudes, es común limitar dichos valores sólo entre las magnitudes máxima y mínima registradas.



Para el cálculo de la tasa, se ha determinado los periodos de completitud del catálogo sísmico por rangos de magnitudes mencionados anteriormente en la *Tabla 1*. Los parámetros de recurrencia sísmica, para diferentes periodos de observación y diferentes magnitudes, se obtuvieron con el método propuesto por Weichert (1980). La metodología se basa en la estimación de la máxima probabilidad de los parámetros N_0 y β , de la relación $\text{Log}(N) = N_0 \exp(-\beta m)$, ésta es extendida al caso de un grupo de eventos de magnitud con diferentes periodos de observación.

Los periodos de observación son independientemente determinados (Stepp, 1972) el cual se encuentra ligado a la capacidad sismológica histórica. De manera similar, el máximo sismo regional debe ser independientemente estimado de las consideraciones geofísicas, como una máxima longitud de falla o un sismo histórico.

Si escogemos arbitrariamente una ley de recurrencia y la truncamos, la probabilidad de que un sismo, teniendo una magnitud entre m y $m+dm$ es:

$$p(m)dm = \text{const.} \beta e^{-\beta m} dm \quad m_0 \leq m \leq m_x$$

$$p(m)dm = 0 \quad (\text{cero de otro modo})$$

Integrando bajo los intervalos de magnitud, nos lleva a la función de probabilidad L , para n_i eventos, de magnitud clase m_i :

$$L(\beta | n_i, m_i, t_i) = \frac{N!}{\prod_i n_i!} \prod_i p_i^{n_i}$$

Donde:

$$p_i = \frac{t_i \exp(-\beta m_i)}{t_j \exp(-\beta m_j)}$$

Los máximos o mínimos de $\text{Ln}(N)$ son obtenidos de:

$$\frac{\sum_i t_i m_i \exp(-\beta m_i)}{\sum_j t_j \exp(-\beta m_j)} = \frac{\sum n_i m_i}{N} = \bar{m}$$

Donde, el valor de β se halla por métodos iterativos.

La siguiente ecuación determina la tasa; está definida como el número de sismos por tiempo. Para diferentes periodos de tiempos, la tasa está dado por:

$$N_a = N \sum_i \exp(-\beta m_i) / \sum_j t_j \exp(-\beta m_j)$$

Nota: Para idénticos periodos de tiempo (t_i) la tasa está dada por N/t .

Para la fuente de subducción F-3 se ha definido dividido en 2 partes con el objetivo de capturar de una manera más adecuada los patrones de sismicidad de la región que representa. En la *Tabla 5* se presentan los parámetros de sismicidad local de las fuentes sismogénicas

Tabla 5. *Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas*

Fuente	Parámetros Sismológicos			
	M _{mín}	M _{máx}	β	Tasa
F-2	4.5	8.0	1.302	4.20
F-3	4.7	7.0	1.945	5.75
F-3.1	7	8.4	0.953	0.10
F-4	4.1	8.4	1.393	10.30
F-8	4.4	6.5	1.990	3.38
F-9	4.2	7.2	1.538	5.39
F-10	4.5	7.1	1.424	1.27
F-13	4.3	7.4	1.491	3.71
F-14	4.2	6.5	1.280	2.07
F-15	4.6	6.0	2.334	2.52
F-18	4.8	7.0	2.413	3.13



Fuente	Parámetros Sismológicos			
	M _{mín}	M _{máx}	β	Tasa
F-16	4.3	6.8	1.366	0.64
F-21	4	7.1	0.580	0.46
F-22	4.5	7.0	1.371	0.81
F-23	4.5	7.1	1.384	0.68
F-27	4.8	6.7	2.162	1.27
F-28	4.5	6.9	1.667	2.85
F-29	4.4	6.9	1.310	1.39

4.5 Ecuaciones de Predicción del Movimiento del Suelo (GMPE)

Las ecuaciones de predicción del movimiento (GMPE por sus siglas en inglés) son expresiones matemáticas que estiman la propagación de las ondas sísmicas desde una fuente al área del proyecto.

Varios factores se combinan para controlar la amplitud o intensidad, incluyendo refracción, reflexión, difracción, propagación geométrica y absorción.

Las GMPEs estiman el movimiento del suelo como una función de la magnitud, distancia, y condiciones del lugar (p ej., suelo, roca, o V_{S30}). Las relaciones son derivadas por ajuste de ecuaciones para datos obtenidos de la instrumentación de movimientos del suelo para una región específica. Algunas relaciones, tales como el modelo del BC Hydro (Abrahamson *et al.* 2016), incluyen rupturas simuladas para aproximar el movimiento del suelo cuando no se disponen de datos.

Dichas ecuaciones pueden adoptar muy diversas formas. Para estimar el peligro sísmico en el departamento de Lima se han utilizado los modelos de predicción del movimiento del suelo para ordenadas espectrales de Youngs *et al.* (1997), Zhao *et al.* (2006), y BC

HYDRO (Abrahamson *et al.* 2016) que diferencian los mecanismos focales para sismos de subducción de interfase e intraplaca.

Para sismos corticales se emplearon los GMPE propuesta por Sadigh *et al.* (1997) y las de la NGA2 (Nueva Generación de relaciones de Atenuación 2): Campbell & Bozorgnia (2014); Chiou & Youngs (2014) y Abrahamson & Silva (2014).

Los resultados obtenidos en el presente análisis del peligro sísmico sobre la Región Lima son aquellos valores de aceleración esperados sobre suelo tipo B (roca) cuya clasificación de sitio ha sido caracterizada de acuerdo al código IBC (International Building Code, 2015) y a las estandarizaciones de la ASCE SEI 7 (American Society of Civil Engineers, 2010)

Tabla 6. *del Sitio (Fuente ASCE-SEI 7-10)*

TIPO DE SUELO	NOMBRE DE SUELO	PROPIEDADES PROMEDIO EN LOS 30 PRIMEROS METROS (TABLA 20.3-1 SITE CLASSIFICATION ASCE/SEI 7-10)		
		Velocidad de onda de corte, \bar{v}_s (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, \bar{N}	Resistencia al corte no drenada, \bar{s}_u (psf)
A	Roca muy dura	$\bar{v}_s > 1,500$	N/A	N/A
B	Roca	$760 < \bar{v}_s \leq 1,500$	N/A	N/A
C	Suelo muy denso o roca blanda	$360 < \bar{v}_s \leq 760$	$\bar{N} > 50$	$\bar{s}_u \geq 2,000$
D	Suelo firme	$180 \leq \bar{v}_s \leq 360$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$1,000 \leq \bar{s}_u \leq 2,000$
E	Suelo blando	$\bar{v}_s < 180$	$\bar{N} < 15$	$\bar{s}_u < 1,000$
F	-	Cualquier perfil de suelo con más de 3 m de espesor que tenga las siguientes características: 1. Índice de plasticidad (IP) > 20 2. Contenido de humedad (w) ≥ 40 % y 3. Resistencia al corte no drenada $\bar{s}_u < 500$ psf		

F	-	<p>Cualquier perfil de suelo que contenga una o más de las siguientes características:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Suelos vulnerables a una posible fractura o colapso bajo efecto sísmico, por ejemplo: suelos licuables, arcillas altamente sensibles y suelos débilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas (H >3 m de turba y/o arcillas altamente orgánicas, donde H = espesor del suelo) 3. Arcillas de muy alta plasticidad (H >7.6 m con índice de plasticidad IP > 75) 4. Arcillas gruesas suaves a medias (H >36 m)
---	---	---

Nota: 1 libra por pie cuadrado (psf) = 0.0479 kPa. N/A = No aplicable

La velocidad promedio de ondas de corte \bar{v}_s de acuerdo al código IBC y a los estándares de la ASCE, se determina de la siguiente manera:

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

- d_i : Espesor de cada capa entre 0.0 m y 30.0 m
- v_{si} : Velocidad de ondas de corte de cada capa (m/s)

De acuerdo al *Tabla 6*, se considera una clasificación Tipo B (roca) para velocidades promedio de ondas de corte V_{s30} entre 760 m/s y 1500 m/s.

4.5.1 Modelo de Predicción del Movimiento del Suelo de Youngs et al. (1997)

Youngs *et al.* (1997) desarrollaron modelos de predicción de movimiento del suelo para zonas de subducción de sismos de interfase e intraplaca, usando datos de sismos registrados en Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú (14 registros) y las islas Salomón, para distancias entre 10 y 500 km, teniendo en cuenta las características del sitio.

Youngs *et al.* (1997) definieron las características del sitio en tres grupos: roca, suelo duro poco profundo y suelo profundo, consideraron eventos en roca a todos aquellos

con velocidad de ondas de corte cercanos a los 750 m/s, eventos en suelo profundo aquellos con distancias a la roca mayores a 20 m y con velocidades de corte entre 180 y 360 m/s, y eventos en suelo poco profundo aquellos donde la profundidad del suelo es menor a 20 m.

Además se utilizó la magnitud de Momento Sísmico M_w (Hanks y Kanamori, 1979) para la medida del evento. La localización epicentral, profundidad, magnitud y mecanismo focal fueron obtenidos de publicaciones especiales o del Harvard Centroid Moment Tensor Solutions. Las relaciones propuestas por Youngs *et al.* (1997) corresponden a un amortiguamiento de 5%. En este estudio se ha utilizado las relaciones de atenuación para ordenadas espectrales propuesta por Youngs *et al.* (1997) para roca.

Tabla 7. Esquema de clasificación Geomatrix 3rd Letter

Tipo del Suelo	Nombre del Suelo	Velocidad de onda de corte, \bar{v}_s (m/s)	Comparativa Clasificación ASCE
A	Roca	$\bar{v}_s > 750$	B
B	Suelo rígido superficial	$360 < \bar{v}_s \leq 750$	C
C	Suelo profundo	$180 < \bar{v}_s \leq 360$	D
D	Suelo firme	$\bar{v}_s \leq 180$	E

La relación de atenuación para ordenadas espectrales propuesta por Youngs en roca es:

$$\ln(Sa) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818 \times e^{0.554M}) + 0.00607H + Z_T$$

Con desviación estándar de $\ln(Sa) = C_4 + C_5 \times M$

Donde:

- Sa = Aceleración espectral expresada en g.
- M = Magnitud de momento sísmico M_w .

- r_{rup} = Distancia más cercana al área de ruptura en km.
- H = Profundidad focal en km.
- $Z_T = 0$ para sismos de interfase, 1 para sismos de intraplaca.

LA *Tabla 8* presenta los coeficientes de la ley de atenuación de aceleración espectral en roca propuesta por Youngs *et al.* (1997)

Tabla 8. Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca propuesta por Youngs *et al.* (1997)

Periodo (s)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
0.000	0.000	0.0000	-2.552	1.45	-0.1
0.075	1.275	0.0000	-2.707	1.45	-0.1
0.100	1.188	-0.0011	-2.655	1.45	-0.1
0.200	0.722	-0.0027	-2.528	1.45	-0.1
0.300	0.246	-0.0036	-2.454	1.45	-0.1
0.400	-0.115	-0.0043	-2.401	1.45	-0.1
0.500	-0.400	-0.0048	-2.360	1.45	-0.1
0.750	-1.149	-0.0057	-2.286	1.45	-0.1
1.000	-1.736	-0.0064	-2.234	1.45	-0.1
1.500	-2.634	-0.0073	-2.160	1.50	-0.1
2.000	-3.328	-0.008	-2.107	1.55	-0.1
3.000	-4.511	-0.0089	-2.033	1.65	-0.1

4.5.2 Modelo de Predicción del Movimiento del Suelo de Zhao *et al.* (2006)

Zhao *et al.* (2006) propusieron una ley de atenuación para zonas de subducción de sismos de interfase e intraplaca, usando datos de sismos registrados básicamente en



Japón (basado en data sísmica adquirida hasta el 2003), Irán y la zona oeste de Estados Unidos con un total de 4726 sismos para mecanismos de subducción de corteza superficial, interfase e intraplaca.

Zhao *et al.* (2006) usaron cinco clasificaciones de sitio, SC I, II, III y IV, correspondientes aproximadamente a cuatro clases: roca dura, roca, suelo duro, suelo medio, y suelo suelto, definido por Molas & Yamazaki (1995). Se consideró eventos en roca a todos aquellos con velocidades de corte mayores a los 600 m/s, eventos en suelos duro con velocidades de corte entre los 300 m/s y 600 m/s, eventos en suelos medio con velocidades entre 200 m/s y 300 m/s y eventos en suelos suelto con velocidades menores a 200 m/s.

Tabla 9. Esquema de clasificación de Molas & Yamazaki (1995)

Tipo del Suelo	Nombre del Suelo	V_{30} calculado del periodo de sitio (m/s)	Comparativa Clasificación ASCE
Hard Rock	Roca dura	$V_{30} > 1100$	A + B
SC I	Roca	$V_{30} > 600$	B + C
SC II	Suelo duro	$300 < V_{30} \leq 600$	C + D
SC III	Suelo medio	$200 < V_{30} \leq 300$	D
SC IV	Suelo suelto	$V_{30} \leq 200$	E + F

La relación de atenuación para ordenadas espectrales propuesta por Zhao *et al.* (2006) en roca es:

$$\log_e(y_{i,j}) = aM_{wi} + bx_{i,j} - \log_e(r_{i,j}) + e(h - h_c)\delta_h + F_R + S_I - S_S + S_{SL} \log_e(x_{i,j}) + C_k + \xi_{i,j} + \eta_i$$

$$r_{i,j} = x_{i,j} + c \exp(dM_{wi})r_i$$

Donde:

- y = Es el valor del PGA (en gals) considerando el 5 % de amortiguamiento de aceleración en espectro de respuesta para un periodo espectral T .

**Facultad de Ingeniería Civil
Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas
y Mitigación de Desastres
Laboratorio de Estructuras**

- M_w = Magnitud momento.
- x = Es la distancia a la fuente (km)
- h = profundidad focal (km)

Además, el parámetro de falla-reversa F_R aplica únicamente para eventos continentales o de corteza superficial con mecanismo de falla reversa y es 0 (cero) para cualquier otro tipo de evento diferente. El parámetro tectónico por el tipo de fuente S_i aplica para eventos de interfase y adquiere el valor de 0 (cero) para cualquier otro evento, y S_s aplica a eventos de intraplaca únicamente y es cero para cualquier otro tipo de evento. S_{SL} es un factor independiente de la magnitud de los sismos el cual conduce a una modificación referente a los eventos de intraplaca. C_k es el término que involucra a la clase del sitio (tipo de suelo). En este caso, la ley de atenuación de Zhao fue empleada considerando un suelo tipo B (roca, donde $C_k=C1$).

El subscrito i denota el número del evento y j denota el número de registro del evento i . El coeficiente h_c es la constante de profundidad, donde h es más grande que h_c , el término $e^{(h-h_c)}$ tiene un efecto que depende de δ_h que toma el valor de cero para $h < h_c$ y 1 para $h > h_c$. Cuando h es más grande que 125 km, $h=125$ km es seleccionado. Finalmente, el factor η_i es una variable aleatoria que refiere al error del intra-evento.

Adicional a ello, los coeficientes asignados para los diversos periodos estructurales que conforman los espectros de peligro uniforme (21 periodos) son presentados en la *Tabla 10*.

Tabla 10. Coeficientes de la ley de atenuación de aceleración espectral a nivel de roca (Suelo tipo B) propuesto por Zhao *et al.* (2006)

Periodo	A	B	C	D	E	F_R	S_i	S_s	S_{SL}	C1
PGA	1.101	-0.00564	0.0055	1.080	0.01412	0.251	0.000	2.607	-0.528	1.111
0.05	1.076	-0.00671	0.0075	1.060	0.01463	0.251	0.000	2.764	-0.551	1.684
0.10	1.118	-0.00787	0.0090	1.083	0.01423	0.240	0.000	2.156	-0.420	2.061
0.15	1.134	-0.00722	0.0100	1.053	0.01509	0.251	0.000	2.161	-0.431	1.916
0.20	1.147	-0.00659	0.0120	1.014	0.01462	0.260	0.000	1.901	-0.372	1.669
0.25	1.149	-0.00564	0.0140	0.966	0.01459	0.269	0.000	1.814	-0.360	1.468



0.30	1.163	-0.00590	0.0150	0.934	0.01458	0.259	0.000	2.181	-0.450	1.172
0.40	1.200	-0.00422	0.0100	0.959	0.01257	0.248	-0.041	2.432	-0.506	0.655
0.50	1.250	-0.00338	0.0060	1.008	0.01114	0.247	-0.053	2.629	-0.554	0.071
0.60	1.293	-0.00282	0.0030	1.088	0.01019	0.233	-0.103	2.702	-0.575	-0.429
0.70	1.336	-0.00258	0.0025	1.084	0.00979	0.220	-0.146	2.654	-0.572	-0.866
0.80	1.386	-0.00242	0.0022	1.088	0.00944	0.232	-0.164	2.480	-0.540	-1.325
0.90	1.433	-0.00232	0.0020	1.109	0.00972	0.220	-0.206	2.332	-0.522	-1.732
1.00	1.479	-0.00220	0.0020	1.115	0.01005	0.211	-0.239	2.233	-0.509	-2.152
1.25	1.551	-0.00207	0.0020	1.083	0.01003	0.251	-0.256	2.029	-0.469	-2.923
1.50	1.621	-0.00224	0.0020	1.091	0.00928	0.248	-0.306	1.589	-0.379	-3.548
2.00	1.694	-0.00201	0.0025	1.055	0.00833	0.263	-0.321	0.966	-0.248	-4.410
2.50	1.748	-0.00187	0.0028	1.052	0.00776	0.262	-0.337	0.789	-0.221	-5.049
3.00	1.759	-0.00147	0.0032	1.025	0.00644	0.307	-0.331	1.037	-0.263	-5.431
4.00	1.826	-0.00195	0.0040	1.044	0.00590	0.353	-0.390	0.561	-0.169	-6.181
5.00	1.825	-0.00237	0.0050	1.065	0.00510	0.248	-0.498	0.225	-0.120	-6.347

4.5.3 Modelo de Predicción del Movimiento del Suelo de BC HYDRO (Abrahamson et al. 2016)

En el 2007, BC Hydro, el principal dueño de presas en Columbia Británica, Canadá, comenzó la mayor actualización de evaluación de peligro sísmico en las zonas de presas. Un tema clave fue los movimientos de sismos de zonas largas de subducción en Cascadia. Las nuevas ecuaciones de predicción de movimientos (GMPEs) desarrolladas como parte del estudio de Abrahamson *et al.* (2015) está descrito a detalle en BC Hydro (2016).

Para el estudio de BC Hydro (2012), los datos de movimiento inicial fue tomado de Atkinson y Boore (2003, 2008), que incluye una compilación de datos de Crouse *et al.* (1988), Crouse (1991) y Youngs *et al.* (1997). Adicionalmente, los datos de movimientos de subducción fueron obtenidos de eventos en Japón (Zhao, 2008), Taiwan (Cheng,



2008), Sudamérica y América Central (Pacific Engineering, 2008) y México (Macias-Carrasco, 2008)

Los datos totales consisten en 9946 registros de pares de movimientos (dos componentes horizontales) de 292 sismos de zona de subducción. Un total de 3557 pares de registros son de 163 eventos de interfase y 6389 pares de registros son de 129 eventos en intraplaca.

Para una distancia menor a 100 km el modelo de BC Hydro predice movimientos medianos que caen dentro del rango de las actuales GMPEs. A largas distancias, el modelo de BC Hydro predice bajos movimientos basados en atenuaciones fuertes. Para largas distancias y magnitudes, el modelo BC Hydro tiende a limitar el rango del modelo de predicción GMPE para eventos intraplaca.

Una estimación del V_{S30} fue desarrollado para cada estación en el conjunto de datos. En algunos casos, los valores medidos V_{S30} estaban disponibles, pero, para la mayoría de las estaciones, se utilizaron las correlaciones entre las clasificaciones de sitio y los valores medios V_{S30} para estimar V_{S30} .

De las evaluaciones realizadas, la forma funcional fue usada para el análisis de regresión:

$$\ln(Sa_{\text{Interface}}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{\text{rup}} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{\text{rup}} + f_{\text{mag}}(M) + f_{\text{FABA}}(R_{\text{rup}}) + f_{\text{site}}(\text{PGA}_{1100}, V_{S30})$$

$$\ln(Sa_{\text{Slab}}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_{14} F_{\text{event}} + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{\text{hypo}} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{\text{hypo}} + \theta_{10} F_{\text{event}} + f_{\text{mag}}(M) + f_{\text{depth}}(Z_h) + f_{\text{FABA}}(R_{\text{hypo}}) + f_{\text{site}}(\text{PGA}_{1100}, V_{S30})$$

Donde

- Sa = aceleración espectral en unidades de g
- M = Magnitud de momento
- Z_h = Profundidad hipocentral (km)
- $F_{\text{event}} = 0$ para eventos de interface, 1 para eventos de intraplaca
- $F_{\text{FABA}} = 0$ para ante-arco o sitios desconocido, 1 para tras-arco

El modelo para el escalado de magnitud está dado por:

- $f_{\text{mag}}(M) = \theta_4(M - (C_1 + \Delta C_1)) + \theta_{13}(10 - M)^2$ for $M \leq C_1 + \Delta C_1$

Facultad de Ingeniería Civil
Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas
y Mitigación de Desastres
Laboratorio de Estructuras

- $f_{mag}(M) = \theta_5(M - (C_1 + \Delta C_1)) + \theta_{13}(10 - M)^2$ for $M > C_1 + \Delta C_1$
- Donde $C_1 = 7.8$

El modelo para el escalado de profundidad está dado por:

- $f_{depth}(Z_h) = \theta_{11}(\min(Z_h, 120) - 60)F_{event}$
- El modelo para el escalado ante-arco/tras-arco está dado por:
- $f_{FABA}(R) = \theta_7 + \theta_8 \ln((\max(R_{hypo}, 85))/40)F_{FABA}$ for $F_{event} = 1$
- $f_{FABA}(R) = \theta_{15} + \theta_{16} \ln((\max(R_{rup}, 100))/40)F_{FABA}$ for $F_{event} = 0$

El modelo para escalado de respuesta de sitio está dado por:

- for $V_{S30} < V_{lin}$
- $f_{site}(PGA_{1000}, V_{S30}) = \theta_{12} \ln(V_s^*/V_{lin}) - b \ln(PGA_{1000} + c) - b \ln(PGA_{1000} + c(V_s^*/V_{lin})^n)$
- for $V_{S30} \geq V_{lin}$
- $f_{site}(PGA_{1000}, V_{S30}) = \theta_{12} \ln(V_s^*/V_{lin}) + b \ln(V_s^*/V_{lin})$
- Donde
- PGA_{1000} = Valor medio PGA para $V_{S30} = 1\ 000$ m/sec

Donde:

- $V_s^* = 1000$ for $V_{S30} > 1000$
- $V_s^* = V_{S30}$ for $V_{S30} \leq 1000$

Tabla 11. Coeficientes de regresión para la subducción mediana (unidades en g) del modelo GMPE. BC Hydro (2016)

Periodo	Vlin	b	θ_1	θ_2	θ_6	θ_7	θ_8	θ_{10}	θ_{11}
0.000	865.1	-1.186	4.2203	-1.350	-0.0012	1.0988	-1.42	3.12	0.0130
0.020	865.1	-1.186	4.2203	-1.350	-0.0012	1.0988	-1.42	3.12	0.0130

Periodo	Vlin	b	θ_1	θ_2	θ_6	θ_7	θ_8	θ_{10}	θ_{11}
0.050	1053.5	-1.346	4.5371	-1.400	-0.0012	1.2536	-1.65	3.37	0.0130
0.075	1085.7	-1.471	5.0733	-1.450	-0.0012	1.4175	-1.80	3.37	0.0130
0.100	1032.5	-1.624	5.2892	-1.450	-0.0012	1.3997	-1.80	3.33	0.0130
0.150	877.6	-1.931	5.4563	-1.450	-0.0014	1.3582	-1.69	3.25	0.0130
0.200	748.2	-2.188	5.2684	-1.400	-0.0018	1.1648	-1.49	3.03	0.0129
0.250	654.3	-2.381	5.0594	-1.350	-0.0023	0.9940	-1.30	2.80	0.0129
0.300	587.1	-2.518	4.7945	-1.280	-0.0027	0.8821	-1.18	2.59	0.0128
0.400	503.0	-2.657	4.4644	-1.180	-0.0035	0.7046	-0.98	2.20	0.0127
0.500	456.6	-2.669	4.0181	-1.080	-0.0044	0.5799	-0.82	1.92	0.0125
0.600	430.3	-2.599	3.6055	-0.990	-0.0050	0.5021	-0.70	1.70	0.0124
0.750	410.5	-2.401	3.2174	-0.910	-0.0058	0.3687	-0.54	1.42	0.0120
1.000	400.0	-1.955	2.7981	-0.850	-0.0062	0.1746	-0.34	1.10	0.0114
1.500	400.0	-1.025	2.0123	-0.770	-0.0064	-0.0820	-0.05	0.70	0.0100
2.000	400.0	-0.299	1.4128	-0.710	-0.0064	-0.2821	0.12	0.70	0.0085
2.500	400.0	0.000	0.9976	-0.670	-0.0064	-0.4108	0.25	0.70	0.0069
3.000	400.0	0.000	0.6443	-0.640	-0.0064	-0.4466	0.30	0.70	0.0054
4.000	400.0	0.000	0.0657	-0.580	-0.0064	-0.4344	0.30	0.70	0.0027
5.000	400.0	0.000	-0.4624	-0.540	-0.0064	-0.4368	0.30	0.70	0.0005
6.000	400.0	0.000	-0.9809	-0.500	-0.0064	-0.4586	0.30	0.70	-0.0013
7.500	400.0	0.000	-1.6017	-0.460	-0.0064	-0.4433	0.30	0.70	-0.0033
10.000	400.0	0.000	-2.2937	-0.400	-0.0064	-0.4828	0.30	0.70	-0.0060

Tabla 12. Coeficientes de regresión para la subducción mediana (unidades en g) del modelo GMPE. BC Hydro (2016) (cont.)



Periodo	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	φ	τ	σ
0.000	0.980	-0.0135	-0.40	0.9996	-1.00	0.60	0.43	0.74
0.020	0.980	-0.0135	-0.40	0.9996	-1.00	0.60	0.43	0.74
0.050	1.288	-0.0138	-0.40	1.1030	-1.18	0.60	0.43	0.74
0.075	1.483	-0.0142	-0.40	1.2732	-1.36	0.60	0.43	0.74
0.100	1.613	-0.0145	-0.40	1.3042	-1.36	0.60	0.43	0.74
0.150	1.882	-0.0153	-0.40	1.2600	-1.30	0.60	0.43	0.74
0.200	2.076	-0.0162	-0.35	1.2230	-1.25	0.60	0.43	0.74
0.250	2.248	-0.0172	-0.31	1.1600	-1.17	0.60	0.43	0.74
0.300	2.348	-0.0183	-0.28	1.0500	-1.06	0.60	0.43	0.74
0.400	2.427	-0.0206	-0.23	0.8000	-0.78	0.60	0.43	0.74
0.500	2.399	-0.0231	-0.19	0.6620	-0.62	0.60	0.43	0.74
0.600	2.273	-0.0256	-0.16	0.5800	-0.50	0.60	0.43	0.74
0.750	1.993	-0.0296	-0.12	0.4800	-0.34	0.60	0.43	0.74
1.000	1.470	-0.0363	-0.07	0.3300	-0.14	0.60	0.43	0.74
1.500	0.408	-0.0493	0.00	0.3100	0.00	0.60	0.43	0.74
2.000	-0.401	-0.0610	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
2.500	-0.723	-0.0711	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
3.000	-0.673	-0.0798	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
4.000	-0.627	-0.0935	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
5.000	-0.596	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
6.000	-0.566	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
7.500	-0.528	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
10.000	-0.504	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74



4.5.4 Modelo de Predicción del Movimiento del Suelo de Sadigh et al. (1997)

Sadigh *et al.* (1997) han desarrollado relaciones de atenuación para la máxima aceleración del suelo y aceleraciones espectrales de respuesta horizontal (5 % de amortiguamiento) para sismos continentales, los cuales los definen como aquellos sismos que ocurren en fallas dentro de los 20 a 25 km. Estas relaciones están basadas principalmente en datos de movimientos fuertes de eventos sísmicos de California (costa oeste de los Estados Unidos) y en datos obtenidos de los sismos de Gazli (Rusia, 1976), Tabas (Irán, 1978) y de la URSS e Irán, por medio de un análisis de regresión utilizando una base de datos de 121 acelerogramas de terremotos en magnitud momento. La relación de atenuación que a continuación se presentan ha sido desarrollada para roca, sismos de magnitud momento mayor o igual a 4.0 y distancias de hasta 100 km.

Sadigh *et al.* (1997) demostraron que las relaciones de atenuación muestran una esperada tendencia para movimientos entre suelos y roca, es decir, las amplitudes de suelos son más largas que las rocas, donde los movimientos en roca son bajas por la amplificación de sitio en las capas de suelo de bajas velocidades. Cuando los movimientos de roca son altos, los movimientos de suelo se vuelven más lentos que los movimientos de rocas, presumiblemente por los efectos no lineales de respuesta de sitio.

Sadigh *et al.* (1993) indica que dentro de los 10 km de superficie de ruptura hay diferencias sistemáticas entre los componentes de falla normal y falla paralela de movimientos de largo periodo. Específicamente, recomiendan que el componente de falla normal sea incrementado por 20 % sobre los valores geométricos promedios para periodos espectrales de 2.0 segundos a más, y el componente de falla paralela debe esperarse sea 20 % más bajo que el valor geométrico promedio.

En cuanto a la clasificación de sitio, Sadigh *et al.* (1993) usa dos categorías generales de clasificación: roca y suelos profundos, y basándose en estudios de velocidad de corte, indica que a la roca lo considera con $\bar{v}_s \geq 750$ m/s, y para los suelos profundos debe encontrarse con horizontes de 20 m sobre la base de roca.

Históricamente hay más datos para aceleración pico que para respuesta de aceleración espectral, y la lista de acelerogramas digitalizadas y procesadas tiende a ser registros de amplitudes más largas que cualquier sismo individual. Por lo tanto, el procedo que



Sadigh *et al.* (1997) usaron para desarrollar la relación de atenuación consiste en dos etapas. La primera, las relaciones de atenuación son desarrolladas para PGA por análisis de regresión usando la forma general:

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2M + C_3 \ln(r_{rup} + C_4 e^{C_5 M}) + C_6 Z_T$$

Donde Z_T es un indicador variable que toma el valor de 1 para eventos inversos y 0 para eventos de deslizamiento. Sadigh *et al.* (1997) encontró la necesidad de desarrollar diferentes coeficientes para eventos largos y más pequeños que $M \approx 6\frac{1}{2}$ para tener en cuenta los efectos de saturación de campo cercano.

En la segunda etapa del análisis, las relaciones para amplificación espectral (SA/PGA) se ajusta a los datos de ordenadas de respuesta espectral normalizada por el PGA de los registros. La relación desarrollada para trabajar bien es:

$$\ln(SA/PGA) = C_7 + C_8(8.5 - M)^{2.5} + C_9 \ln(r_{rup} + C_4 e^{C_5 M})$$

La relación de atenuación final desarrollada para SA es obtenida combinando las ecuaciones de las dos etapas para ordenadas espectrales:

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M + C_3 (8.5M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup} + e^{(C_5 + C_6 M)}) + C_7 \ln(r_{rup} + 2)$$

Donde:

- y = Aceleración espectral en g
- M = Magnitud momento (M_w)
- r_{rup} = Distancia más cercana al área de ruptura (km)

Los coeficientes de la ley de atenuación (*Tabla 13*) difieren para $M_w \leq 6.5$ y $M_w > 6.5$ para un mismo valor del periodo espectral, y las desviaciones estándar están expresadas por relaciones dadas de acuerdo al periodo y varían en función de la magnitud.

Tabla 13. *Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca propuesta por Sadigh et al. (1997)*

Periodo	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
M ≤ 6.5							
PGA	-0.624	1.0	0.000	-2.100	1.29649	0.250	0.000
0.03	-0.624	1.0	0.000	-2.100	1.29649	0.250	0.000
0.07	0.110	1.0	0.006	-2.128	1.29649	0.250	-0.082
0.10	0.275	1.0	0.006	-2.148	1.29649	0.250	-0.041
0.20	0.153	1.0	-0.004	-2.080	1.29649	0.250	0.000
0.30	-0.057	1.0	-0.017	-2.028	1.29649	0.250	0.000
0.40	-0.298	1.0	-0.028	-1.990	1.29649	0.250	0.000
0.50	-0.588	1.0	-0.040	-1.945	1.29649	0.250	0.000
0.75	-1.208	1.0	-0.050	-1.865	1.29649	0.250	0.000
1.00	-1.705	1.0	-0.055	-1.800	1.29649	0.250	0.000
1.50	-2.407	1.0	-0.065	-1.725	1.29649	0.250	0.000
2.00	-2.945	1.0	-0.070	-1.670	1.29649	0.250	0.000
3.00	-3.700	1.0	-0.080	-1.610	1.29649	0.250	0.000
4.00	-4.230	1.0	-0.100	-1.570	1.29649	0.250	0.000
M > 6.5							
PGA	-1.237	1.1	0.000	-2.100	-0.48451	0.524	0.000
0.03	-1.237	1.1	0.000	-2.100	-0.48451	0.524	0.000
0.07	-0.540	1.1	0.006	-2.128	-0.48451	0.524	-0.082



Periodo	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
0.10	-0.375	1.1	0.006	-2.148	-0.48451	0.524	-0.041
0.20	-0.497	1.1	-0.004	-2.080	-0.48451	0.524	0.000
0.30	-0.707	1.1	-0.017	-2.028	-0.48451	0.524	0.000
0.40	-0.948	1.1	-0.028	-1.990	-0.48451	0.524	0.000
0.50	-1.238	1.1	-0.040	-1.945	-0.48451	0.524	0.000
0.75	-1.858	1.1	-0.050	-1.865	-0.48451	0.524	0.000
1.00	-2.355	1.1	-0.055	-1.800	-0.48451	0.524	0.000
1.50	-3.057	1.1	-0.065	-1.725	-0.48451	0.524	0.000
2.00	-3.595	1.1	-0.070	-1.670	-0.48451	0.524	0.000
3.00	-4.350	1.1	-0.080	-1.610	-0.48451	0.524	0.000
4.00	-4.880	1.1	-0.100	-1.570	-0.48451	0.524	0.000

4.5.5 Ecuación de Atenuación de Chiou and Youngs (2014)

Chiou y Youngs han desarrollado una actualización de su modelo realizado el 2008 para la máxima aceleración del suelo (PGA) y aceleraciones espectrales de respuesta horizontal (5 % de amortiguamiento) causados por sismos continentales. La evaluación preliminar de la data de NGA-West2 indica la necesidad de incluir la regionalización para el reporte de diferencias regionales en la atenuación por distancia y respuesta del suelo de la fuente distante. La base de datos para la actualización del modelo fue restringida principalmente para movimientos de campos libres de sismos corticales en California. La data de 18 buenos registros de sismos $M_w \geq 6$ que ocurrieron fuera de California se añadió para complementar la data de California.



Facultad de Ingeniería Civil Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres Laboratorio de Estructuras



Anteriormente, desarrollaron el compilado de las ecuaciones usando la data para distancias de 70 km o menos. Esta restricción de la data pretendía eludir las consecuencias no deseadas del muestreo en la amplitud del movimiento causado por el truncamiento de datos a amplitudes bajas y grandes distancias. En esta actualización, en vez de aplicar un truncamiento uniforme de distancia para todos los sismos, se usó la distancia máxima empleable ($R_{\text{máx}}$) para cada sismo para tomar ventaja de la data empleable a distancias mayores a 70 km.

Las ecuaciones de atenuación del 2008 no modelan explícitamente los efectos de directividad. En cambio, fueron aplicados como un factor posterior. Incorporando el efecto de directividad como parte de la actualización fue el objetivo principal de estas nuevas ecuaciones. Entre las cinco parametrizaciones de directividad discutido en Spudich *et al.* (2013), encogieron el parámetro de punto directo (DPP) como el vaticinador del efecto de directividad.

La formulación revisada de la ecuación de predicción de movimiento está dada por las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \ln(y_{refij}) = & c_1 + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2 \times \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{RVi} \\
 & + \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2 \times \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{NMI} \\
 & + \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2 \times \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} \Delta Z_{TORi} \\
 & + \left\{ c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh(2 \times \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} (\cos \delta_i)^2 + c_2(M_i - 6) \\
 & + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) \\
 & + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6 \times \max(M_i - c_{HM}, 0))) \\
 & + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}\right) + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M_i - c_{\gamma 3}, 0))} \right\} R_{RUPij} \\
 & + c_8 \max\left(1 - \frac{\max(R_{RUPij} - 40.0)}{30}, 0\right) \\
 & \times \min\left(\frac{\max(M_i - 5.5, 0)}{0.8}, 1\right) e^{-c_{8a}(M_i - c_{8b})^2} \Delta DPP_{ij} \\
 & + c_9 F_{HWij} \cos \delta_i \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh\left(\frac{R_{Xij}}{c_{9b}}\right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{JBij}^2 + Z_{TORi}^2}}{R_{RUPij} + 1} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \ln(y_{ij}) = & \ln(y_{refij}) + \eta_i + \phi_1 \times \min\left(\ln\left(\frac{V_{S30j}}{1130}\right)\right) \\
 & + \phi_2 \left(e^{\phi_3(\min(V_{S30j}, 1130) - 360)} - e^{\phi_3(1130 - 360)} \right) \ln\left(\frac{y_{refij} e^{\eta_i} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\
 & + \phi_5 (1 - e^{-\Delta Z_{1.0j}/\phi_6}) + \varepsilon_{ij}
 \end{aligned}$$

Las variables de predicción de las ecuaciones presentadas son:

- M = Magnitud momento
- R_{RUP} = Distancia más cercana (km) al plano de ruptura
- R_{JB} = Distancia más cercana (km) a la proyección de la superficie del plano de ruptura
- R_X = Coordenada de sitio (km) medida perpendicularmente al origen del evento desde la línea de falla

- F_{HW} = Muro colgante: 1 para $RX \geq 0$ y 0 para $RX < 0$
- δ = Ángulo de inclinación de la falla
- Z_{TOR} = Profundidad (km) a la parte superior del plano de ruptura
- ΔZ_{TOR} = Z_{TOR} centrado en el promedio de Z_{TOR} dependientes de M
- F_{RV} = Fallamiento inverso: 1 para $30^\circ \leq \lambda \leq 150^\circ$ (combinación de inverso e inverso oblicuo), 0 para el resto; λ es el ángulo de ataque
- F_{NM} = Fallamiento normal: 1 para $-120^\circ \leq \lambda \leq -60^\circ$ (excluyendo normal oblicuo), 0 para el resto
- V_{S30} = Tiempo de viaje promedio para las velocidades de ondas de corte (m/s) de los primeros 30 m de suelo.
- $Z_{1.0}$ = Profundidad (m) hasta la velocidad de onda de corte de 1.0 km/s
- $\Delta Z_{1.0}$ = $Z_{1.0}$ centrado en el promedio de $Z_{1.0}$ dependientes de V_{S30}
- DPP = Parámetro de punto directo para el efecto de directividad
- ΔDPP = DPP centrado en el promedio DPP del sitio y sismo específico

Tabla 14. *Coeficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo*

Periodo	C_1	C_{1a}	C_{1b}	C_{1c}	C_{1d}	C_n	C_M	C_3
PGA	-1.5065	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	16.0875	4.9993	1.9636
0.020	-1.4798	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	15.7118	4.9993	1.9636
0.030	-1.2972	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	15.8819	4.9993	1.9636
0.040	-1.1007	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	16.4556	4.9993	1.9636
0.050	-0.9292	0.1650	-0.2550	0.1650	0.2550	17.6453	4.9993	1.9636
0.075	-0.6580	0.1650	-0.2540	0.1650	0.2540	20.1772	5.0031	1.9636
0.100	-0.5613	0.1650	-0.2530	0.1650	0.2530	19.9992	5.0172	1.9636
0.120	-0.5342	0.1650	-0.2520	0.1650	0.2520	18.7106	5.0315	1.9795
0.150	-0.5462	0.1650	-0.2500	0.1650	0.2500	16.6246	5.0547	2.0362
0.170	-0.5858	0.1650	-0.2480	0.1650	0.2480	15.3709	5.0704	2.0823

Periodo	C ₁	C _{1a}	C _{1b}	C _{1c}	C _{1d}	C _n	C _M	C ₃
0.200	-0.6798	0.1650	-0.2449	0.1650	0.2449	13.7012	5.0939	2.1521
0.250	-0.8663	0.1650	-0.2382	0.1650	0.2382	11.2667	5.1315	2.2574
0.300	-1.0514	0.1650	-0.2313	0.1650	0.2313	9.1908	5.1670	2.3440
0.400	-1.3794	0.1650	-0.2146	0.1650	0.2146	6.5459	5.2317	2.4709
0.500	-1.6508	0.1650	-0.1972	0.1650	0.1972	5.2305	5.2893	2.5567
0.75	-2.1511	0.1650	-0.1620	0.1650	0.1620	3.7896	5.4109	2.6812
1.000	-2.5365	0.1650	-0.1400	0.1650	0.1400	3.3024	5.5106	2.7474
1.500	-3.0686	0.1650	-0.1184	0.1650	0.1184	2.8498	5.6705	2.8161
2.000	-3.4148	0.1645	-0.1100	0.1645	0.1100	2.5417	5.7981	2.8514
3.000	-3.9013	0.1168	-0.1040	0.1168	0.1040	2.1488	5.9983	2.8875
4.000	-4.2466	0.0732	-0.1020	0.0732	0.1020	1.8957	6.1552	2.9058
5.000	-4.5143	0.0484	-0.1010	0.0484	0.1010	1.7228	6.2856	2.9169
7.500	-5.0009	0.0220	-0.1010	0.0220	0.1010	1.5737	6.5428	2.9320
10.000	-5.3461	0.0124	-0.1000	0.0124	0.1000	1.5265	6.7415	2.9396

Tabla 15. *Coefficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo*

Periodo	C ₅	C _{HM}	C ₆	C ₇	C _{7b}	C ₈	C _{8b}
PGA	6.4551	3.0956	0.4908	0.0352	0.0462	0.0000	0.4833
0.020	6.4551	3.0963	0.4925	0.0352	0.0472	0.0000	1.2144
0.030	6.4551	3.0974	0.4992	0.0352	0.0533	0.0000	1.6421
0.040	6.4551	3.0988	0.5037	0.0352	0.0596	0.0000	1.9456
0.050	6.4551	3.1011	0.5048	0.0352	0.0639	0.0000	2.1810
0.075	6.4551	3.1094	0.5048	0.0352	0.0630	0.0000	2.6087

Periodo	C ₅	C _{HM}	C ₆	C ₇	C _{7b}	C ₈	C _{8b}
0.100	6.8305	3.2381	0.5048	0.0352	0.0532	0.0000	2.9122
0.120	7.1333	3.3407	0.5048	0.0352	0.0452	0.0000	3.1045
0.150	7.3621	3.4300	0.5045	0.0352	0.0345	0.0000	3.3399
0.170	7.4365	3.4688	0.5036	0.0352	0.0283	0.0000	3.4719
0.200	7.4972	3.5146	0.5016	0.0352	0.0202	0.0000	3.6434
0.250	7.5416	3.5746	0.4971	0.0352	0.0090	0.0000	3.8787
0.300	7.5600	3.6232	0.4919	0.0352	-0.0004	0.0000	4.0711
0.400	7.5735	3.6945	0.4807	0.0352	-0.0155	0.0000	4.3745
0.500	7.5778	3.7401	0.4707	0.0352	-0.0278	0.0991	4.6099
0.750	7.5808	3.7941	0.4575	0.0352	-0.0477	0.1982	5.0376
1.000	7.5814	3.8144	0.4522	0.0352	-0.0559	0.2154	5.3411
1.500	7.5817	3.8284	0.4501	0.0352	-0.0630	0.2154	5.7688
2.000	7.5818	3.8330	0.4500	0.0352	-0.0665	0.2154	6.0723
3.000	7.5818	3.8361	0.4500	0.0160	-0.0516	0.2154	6.5000
4.000	7.5818	3.8369	0.4500	0.0062	-0.0448	0.2154	6.8035
5.000	7.5818	3.8376	0.4500	0.0029	-0.0424	0.2154	7.0389
7.500	7.5818	3.8380	0.4500	0.0007	-0.0348	0.2154	7.4666
10.000	7.5818	3.8380	0.4500	0.0003	-0.0253	0.2154	7.7700

Tabla 16. *Coefficientes del modelo $\ln(y_{ref})$ dependientes del periodo*

Periodo	C ₉	C _{9a}	C _{9b}	C _{11b}	C _{g1}	C _{g2}	C _{g3}
PGA	0.9228	0.1202	6.8607	-0.4536	-0.0071	-0.0068	4.2542
0.020	0.9296	0.1217	6.8697	-0.4536	-0.0072	-0.0068	4.2386

Periodo	C _g	C _{9a}	C _{9b}	C _{11b}	C _{g1}	C _{g2}	C _{g3}
0.030	0.9396	0.1194	6.9113	-0.4536	-0.0079	-0.0068	4.2519
0.040	0.9661	0.1166	7.0271	-0.4536	-0.0083	-0.0068	4.2960
0.050	0.9794	0.1176	7.0959	-0.4536	-0.0087	-0.0068	4.3578
0.075	1.0260	0.1171	7.3298	-0.4536	-0.0095	-0.0062	4.5455
0.100	1.0177	0.1146	7.2588	-0.4536	-0.0098	-0.0053	4.7603
0.120	1.0008	0.1128	7.2372	-0.4536	-0.0099	-0.0047	4.8963
0.150	0.9801	0.1106	7.2109	-0.4536	-0.0099	-0.0038	5.0644
0.170	0.9652	0.1150	7.2491	-0.4536	-0.0098	-0.0033	5.1371
0.200	0.9459	0.1208	7.2988	-0.4440	-0.0095	-0.0027	5.1880
0.250	0.9196	0.1208	7.3691	-0.3539	-0.0089	-0.0021	5.2164
0.300	0.8829	0.1175	6.8789	-0.2688	-0.0083	-0.0018	5.1954
0.400	0.8302	0.1060	6.5334	-0.1793	-0.0073	-0.0013	5.0899
0.500	0.7884	0.1061	6.5260	-0.1428	-0.0065	-0.0011	4.7854
0.750	0.6754	0.1000	6.5000	-0.1138	-0.0051	-0.0011	4.3304
1.000	0.6196	0.1000	6.5000	-0.1062	-0.0043	-0.0012	4.1667
1.500	0.5101	0.1000	6.5000	-0.1020	-0.0030	-0.0017	4.0029
2.000	0.3917	0.1000	6.5000	-0.1009	-0.0023	-0.0023	3.8949
3.000	0.1244	0.1000	6.5000	-0.1003	-0.0013	-0.0033	3.7928
4.000	0.0086	0.1000	6.5000	-0.1001	-0.0011	-0.0036	3.7443
5.000	0.0000	0.1000	6.5000	-0.1001	-0.0010	-0.0036	3.7090
7.500	0.0000	0.1000	6.5000	-0.1000	-0.0010	-0.0037	3.6632
10.000	0.0000	0.1000	6.5000	-0.1000	-0.0010	-0.0037	3.6230

Tabla 17. *Coefficientes del modelo de respuesta de sitio para $\ln(y)$*



Periodo	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6
PGA	-0.5210	-0.1417	-0.007010	0.102151	0.0000	300
0.020	-0.5055	-0.1364	-0.007279	0.108360	0.0000	300
0.030	-0.4368	-0.1403	-0.007354	0.119888	0.0000	300
0.040	-0.3752	-0.1591	-0.006977	0.133641	0.0000	300
0.050	-0.3469	-0.1862	-0.006467	0.148927	0.0000	300
0.075	-0.3747	-0.2538	-0.005734	0.190596	0.0000	300
0.100	-0.4440	-0.2943	-0.005604	0.230662	0.0000	300
0.120	-0.4895	-0.3077	-0.005696	0.253169	0.0000	300
0.150	-0.5477	-0.3113	-0.005845	0.266468	0.0000	300
0.170	-0.5922	-0.3062	-0.005959	0.265060	0.0000	300
0.200	-0.6693	-0.2927	-0.006141	0.255253	0.0000	300
0.250	-0.7766	-0.2662	-0.006439	0.231541	0.0000	300
0.300	-0.8501	-0.2405	-0.006704	0.207277	0.0010	300
0.400	-0.9431	-0.1975	-0.007125	0.165464	0.0040	300
0.500	-1.0044	-0.1633	-0.007435	0.133828	0.0100	300
0.750	-1.0602	-0.1028	-0.008120	0.085153	0.0340	300
1.000	-1.0941	-0.0699	-0.008444	0.058595	0.0670	300
1.500	-1.1142	-0.0425	-0.007707	0.031787	0.1430	300
2.000	-1.1154	-0.0302	-0.004792	0.019716	0.2030	300
3.000	-1.1081	-0.0129	-0.001828	0.009643	0.2770	300
4.000	-1.0603	-0.0016	-0.001523	0.005379	0.3090	300
5.000	-0.9872	0.0000	-0.001440	0.003223	0.3210	300
7.500	-0.8274	0.0000	-0.001369	0.001134	0.3290	300

Periodo	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6
10.000	-0.7053	0.0000	-0.001361	0.000515	0.3300	300

4.5.6 Ecuación de Atenuación de Abrahamson et al. (2016)

Los modelos empíricos de predicción de movimiento para la componente horizontal promedio de sismos corticales en regiones tectónicas activas son derivadas usando la base de datos PEER NGA-West2. Este modelo es aplicable a magnitudes momento entre 3.0 a 8.5, distancias entre 0 a 300 km, y periodos espectrales de 0 a 10 s. Los parámetros de ingreso del modelo son los mismos usados por Abrahamson y Silva (2008), con las siguientes excepciones: el nivel de ingreso de datos para efectos no lineales está basado en la aceleración espectral en el periodo de interés en vez del PGA; y el escalamiento de la distancia para el efecto de Hanging Wall (HW – bloque de roca que descansa sobre una falla inclinada) de los extremos de la ruptura incluye una dependencia en el azimut de la fuente de sitio. Las diferencias regionales en la atenuación de distancia y longitud y escalamiento V_{S30} entre California, Japón, China y Taiwán son incluidos. El escalamiento para el efecto HW es mejorado usando restricciones de simulaciones numéricas. La desviación estándar es dependiente de la magnitud, con magnitudes más pequeñas que conducen a desviaciones estándar más largas en periodos cortos, pero desviaciones estándar más pequeñas a largos periodos. Los efectos de directividad no son incluidos mediante parámetros explícitos, pero son capturados por la variabilidad de los datos empíricos.

La data final consiste en 15 750 registros de 326 sismos, de los cuales 221 son eventos de desgarre, 79 de los cuales son eventos inversos (ambos cubriendo el rango entero de magnitudes) y 29 son eventos normales, mayormente entre $4.6 < M < 6.0$.

Existen cuatro diferencias fundamentales en la forma de funcionamiento de las ecuaciones comparadas con las realizadas el 2008: (1) el modelo está extendido para magnitudes pequeñas; (2) el escalado del HW está mejor sintetizado por las simulaciones; (3) se ha incluido las diferencias regionales en la atenuación de largas distancias; y (4) las diferencias regionales en el escalado de V_{S30} han sido incluidas.

El modelo para ecuación de predicción de movimiento está dado por:

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{RUP}) + F_{RV}f_7(M) + F_Nf_8(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{JB}) + f_5(\widehat{S}a_{1180}, V_{S30}) \\ + F_{HW}f_4(R_{JB}, R_{RUP}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) \\ + f_1(M, R_{RUP}) + f_{10}(Z_1, V_{S30}) + Regional(V_{S30}, R_{RUP})$$

Las definiciones de los parámetros usados en el análisis de regresión son:

- M Magnitud momento
- C_{RJB} Centroide RJB
- Z_{TOR} Profundidad hasta la parte superior de la ruptura (km)
- F_{RV} Indicador para sismos de falla inversa
- F_N Indicador para sismos de falla normal
- F_{AS} Indicador para réplicas
- R_{RUP} Distancia de la ruptura (km)
- V_{S30} Velocidad de ondas de corte para los superiores 30 m (m/s)
- Z_1 Profundidad hasta la $V_S = 1.0$ km/s en el sitio (m)
- $\widehat{S}a_{1180}$ Mediana del pico de aceleración espectral (g) para $V_{S30} = 1,180$ m/s
- F_{HW} Indicador para sitios de 'hanging wall'
- R_{JB} Distancia Joyner-Boore (km)
- R_x Distancia horizontal (km) desde el límite superior de ruptura
- R_{y0} Distancia horizontal hasta el final de la ruptura medida en forma paralela a la fuente
- Dip Inclinación de la falla en grados
- W Ancho de la ruptura de buzamiento (km)

La forma básica de la dependencia de magnitud y distancia para sismos corticales se presenta:

$$f_1 = \begin{cases} a_1 + a_5(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)] \ln(R) + a_{17}R_{RUP} & \text{para } M > M_1 \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)] \ln(R) + a_{17}R_{RUP} & \text{para } M_2 \leq M < M_1 \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M_2)^2 + a_6(M - M_2) + a_7(M - M_2)^2 + [a_2 + a_3(M - M_1)] \ln(R) + a_{17}R_{RUP} & \text{para } M < M_2 \end{cases}$$

Donde:

$$R = \sqrt{R_{RUP}^2 + c_{4M}^2}$$

El término que ha sido añadido a R_{RUP} dentro de la raíz cuadrada se refiere típicamente como "profundidad ficticia", debido a la forma en que afecta al término distancia.

$$c_{4M}(M) = \begin{cases} c_4 & \text{para } M > 5 \\ c_4 - (c_4 - 1)(5 - M) & \text{para } 4 < M \leq 5 \\ 1 & \text{para } M \leq 4 \end{cases}$$

Gracias al modelo de estilo de fallamiento (SOF) se encontró que el factor de la diferencia entre movimiento del suelo para diferentes estilos de fallas no fue visto para largos grupos de magnitudes pequeñas de la data de California.

$$f_7(M) = \begin{cases} a_{11} & \text{para } M > 5.0 \\ a_{11}(M - 4) & \text{para } 4 < M \leq 5 \\ 0 & \text{para } M \leq 4.0 \end{cases}$$

$$f_8(M) = \begin{cases} a_{12} & \text{para } M > 5.0 \\ a_{12}(M - 4) & \text{para } 4 < M \leq 5 \\ 0 & \text{para } M \leq 4.0 \end{cases}$$

El modelo para la dependencia de V_{S30} de la amplificación de sitio es similar a los realizado en el 2008, pero ahora se usa la aceleración espectral media en roca dura ($\widehat{S}a_{1180}$) en vez de PGA para definir la fuerza de la sacudida.

$$f_5(\widehat{S}a_{1180}, V_{S30}) = \begin{cases} (a_{10} + bn) \ln\left(\frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}}\right) & \text{para } V_{S30} \geq V_{Lin} \\ (a_{10}) \ln\left(\frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}}\right) - b \ln(\widehat{S}a_{1180} + c) + b \ln\left(\widehat{S}a_{1180} + c \left(\frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}}\right)^n\right) & \text{para } V_{S30} < V_{Lin} \end{cases}$$

$$V_{S30}^* = \begin{cases} V_{S30} & \text{para } V_{S30} < V_1 \\ V_1 & \text{para } V_{S30} \geq V_1 \end{cases}$$

$$V_1 = \begin{cases} 1500 & \text{para } T \leq 0.5 \text{ s} \\ \exp\left(-0.35 \ln\left(\frac{T}{0.5}\right) + \ln(1500)\right) & \text{para } 0.5 \text{ s} < T < 3 \text{ s} \\ 800 & \text{para } T \geq 3 \text{ s} \end{cases}$$

Tabla 18. Coeficientes de respuesta media



Periodo	C ₄	M ₁	M ₂	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
PGA	4.50	6.75	5.00	0.587	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.02	4.50	6.75	5.00	0.598	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.03	4.50	6.75	5.00	0.602	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.05	4.50	6.75	5.00	0.707	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.08	4.50	6.75	5.00	0.973	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.10	4.50	6.75	5.00	1.169	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.15	4.50	6.75	5.00	1.442	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.20	4.50	6.75	5.00	1.637	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.25	4.50	6.75	5.00	1.701	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.30	4.50	6.75	5.00	1.712	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.40	4.50	6.75	5.00	1.662	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.50	4.50	6.75	5.00	1.571	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
0.75	4.50	6.75	5.00	1.299	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
1.00	4.50	6.75	5.00	1.043	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
1.50	4.50	6.75	5.00	0.665	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
2.00	4.50	6.75	5.00	0.329	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
3.00	4.50	6.82	5.00	-0.060	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
4.00	4.50	6.92	5.00	-0.299	-0.790	0.275	-0.1	-0.41
5.00	4.50	7.00	5.00	-0.562	-0.765	0.275	-0.1	-0.41
6.00	4.50	7.06	5.00	-0.875	-0.711	0.275	-0.1	-0.41
7.50	4.50	7.15	5.00	-1.303	-0.634	0.275	-0.1	-0.41
10.00	4.50	7.25	5.00	-1.928	-0.529	0.275	-0.1	-0.41

Tabla 19. Coeficientes de respuesta media



Periodo	a_6	a_8	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{17}
PGA	2.154	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0072
0.02	2.146	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0073
0.03	2.157	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0075
0.05	2.085	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0080
0.08	2.029	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0089
0.10	2.041	-0.015	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0095
0.15	2.121	-0.022	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0095
0.20	2.224	-0.030	0.00	-0.1	0.60	-0.30	1.10	-0.0086
0.25	2.312	-0.038	0.00	-0.1	0.60	-0.24	1.10	-0.0074
0.30	2.338	-0.045	0.00	-0.1	0.60	-0.19	1.03	-0.0064
0.40	2.469	-0.055	0.00	-0.1	0.58	-0.11	0.92	-0.0043
0.50	2.559	-0.065	0.00	-0.1	0.56	-0.04	0.84	-0.0032
0.75	2.682	-0.095	0.00	-0.1	0.53	0.07	0.68	-0.0025
1.00	2.763	-0.110	0.00	-0.1	0.50	0.15	0.57	-0.0025
1.50	2.836	-0.124	0.00	-0.1	0.42	0.27	0.42	-0.0022
2.00	2.897	-0.138	0.00	-0.1	0.35	0.35	0.31	-0.0019
3.00	2.906	-0.172	0.00	-0.1	0.20	0.46	0.16	-0.0015
4.00	2.889	-0.197	0.00	-0.1	0.00	0.54	0.05	-0.0010
5.00	2.898	-0.218	0.00	-0.1	0.00	0.61	-0.04	-0.0010
6.00	2.896	-0.235	0.00	-0.1	0.00	0.65	-0.11	-0.0010
7.50	2.870	-0.255	0.00	-0.1	0.00	0.72	-0.19	-0.0010
10.00	2.843	-0.285	0.00	-0.1	0.00	0.80	-0.30	-0.0010

Tabla 20. Coeficientes de respuesta de suelo linear y no linear



Periodo	a_{10}	V_{Lin}	b	n	c	a_{43}	a_{44}	a_{45}	a_{46}
PGA	1.735	660	-1.47	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.02	1.718	680	-1.46	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.03	1.615	770	-1.39	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.05	1.358	915	-1.22	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.08	1.258	960	-1.15	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.10	1.310	910	-1.23	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.15	1.660	740	-1.59	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.05
0.20	2.220	590	-2.01	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	-0.03
0.25	2.770	495	-2.41	1.5	2.4	0.10	0.05	0.00	0.00
0.30	3.250	430	-2.76	1.5	2.4	0.10	0.05	0.03	0.03
0.40	3.990	360	-3.28	1.5	2.4	0.10	0.07	0.06	0.06
0.50	4.450	340	-3.60	1.5	2.4	0.10	0.10	0.10	0.09
0.75	4.750	330	-3.80	1.5	2.4	0.14	0.14	0.14	0.13
1.00	4.300	330	-3.50	1.5	2.4	0.17	0.17	0.17	0.14
1.50	2.600	330	-2.40	1.5	2.4	0.22	0.21	0.20	0.16
2.00	0.550	330	-1.00	1.5	2.4	0.26	0.25	0.22	0.16
3.00	-0.950	330	0.00	1.5	2.4	0.34	0.30	0.23	0.16
4.00	-0.950	330	0.00	1.5	2.4	0.41	0.32	0.23	0.14
5.00	-0.930	330	0.00	1.5	2.4	0.51	0.32	0.22	0.13
6.00	-0.910	330	0.00	1.5	2.4	0.55	0.32	0.20	0.10
7.50	-0.870	330	0.00	1.5	2.4	0.49	0.28	0.17	0.09
10.00	-0.800	330	0.00	1.5	2.4	0.42	0.22	0.14	0.08

4.5.7 Ecuación de Atenuación de Bozorgnia y Campbell (2014)

El desarrollo de este modelo empírico de movimiento NGA-West2 Bozorgnia-Campbell analizado para la componente vertical del PGA, PGV, y amortiguamiento elástico de 5 % de respuesta de aceleración espectral (PSA) en rangos de periodos verticales de 0.01 a 10.00 segundos. En el desarrollo se usó la extensa base de datos mundial PEER NGA-West2. Para el nuevo GMM vertical se consideró válido para sismos corticales en regiones tectónicas activas para rangos de magnitud de 3.3 a 8.5 Mw, dependiendo del tipo de falla, y distancias tan lejanas como 300 km de la falla.

La data entera de NGA-West2 incluye más de 21 000 registros de tres componentes de sismos continentales en regiones tectónicas activas con magnitudes de rangos de 3.0 a 7.9 Mw. Además la base de datos incluye registros de distancias más allá de 100 km, el límite práctico que se usó para este estudio fue de 500 km en términos de distancia más cercana al plano de la falla de ruptura (R_{RUP}).

La forma general de funcionamiento para el GMM vertical está dado por la expresión

$$\ln Y_V = \begin{cases} \ln PGA & PSA < PGA \\ f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn}; & otherwise \end{cases}$$

Donde $\ln Y_V$ es el logaritmo natural de la predicción media de la GMIM vertical de interés, definido como PGA (g), PGV (cm/s), y PSA (g), y los términos ' f ' representa el escalamiento de los GMIM con la magnitud del sismo, atenuación geométrica, tipo de fallamiento, geometría del 'hanging wall', respuesta de sitio, respuesta de área, profundidad hipocentral, inclinación de falla y atenuación inelástica, respectivamente.

Magnitud

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1 M & M \leq 4.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 4.5) & 4.5 < M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 4.5) + c_3 (M - 5.5) & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 4.5) + c_3 (M - 5.5) + c_3 (M - 6.5) & M > 6.5 \end{cases}$$

Atenuación Geométrica

$$f_{dis} = (c_5 + c_6 M) \ln \left(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_7^2} \right)$$

Tipo de Fallamiento

$$f_{flt} = f_{flt,F} f_{flt,M}$$

$$f_{flt,F} = c_8 F_{RV} + c_9 F_{NM}$$

$$f_{flt,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 4.5 \\ M - 4.5; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 1; & M > 5.5 \end{cases}$$

Hanging-Wall

$$f_{hng} = c_{10} f_{hng,R_X} f_{hng,R_{RUP}} f_{hng,M} f_{hng,Z} f_{hng,\delta}$$

$$f_{hng,R_X} = \begin{cases} 0; & R_X < 0 \\ f_1(R_X); & 0 \leq R_X < R_1 \\ \text{máx}[f_2(R_X), 0]; & R_X \geq R_1 \end{cases}$$

$$f_1(R_X) = h_1 + h_2(R_X/R_1) + h_3(R_X/R_1)^2$$

$$f_2(R_X) = h_4 + h_5 \left(\frac{R_X - R_1}{R_2 - R_1} \right) + h_6 \left(\frac{R_X - R_1}{R_2 - R_1} \right)^2$$

$$R_1 = W \cos(\delta)$$

$$R_2 = 62M - 350$$

$$f_{hng,R_{RUP}} = \begin{cases} 1; & R_{RUP} = 0 \\ (R_{RUP} - R_{JB})/R_{RUP}; & R_{RUP} > 0 \end{cases}$$

$$f_{hng,Z} = \begin{cases} 1 - 0.06Z_{TOR}; & Z_{TOR} \leq 16.66 \\ 0; & Z_{TOR} > 16.66 \end{cases}$$

$$f_{hng,\delta} = (90 - \delta)/45$$

Respuesta de sitio superficial

$$f_{site} = f_{site,G} + S_j f_{site,J}$$

$$f_{site,G} = \begin{cases} c_{11} \ln \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right) + k_2 \left\{ \ln \left[A_{1100} + c \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right)^n \right] - \ln[A_{1100} + c] \right\}; & V_{S30} \leq k_1 \\ (c_{11} + k_2 n) \ln \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right); & V_{S30} > k_1 \end{cases}$$

$$f_{site,J} = \begin{cases} (c_{12} + k_2 n) \left[\ln \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right) - \ln \left(\frac{200}{k_1} \right) \right]; & V_{S30} \leq 200 \\ (c_{13} + k_2 n) \ln \left(\frac{V_{S30}}{k_1} \right); & \text{Todos } V_{S30} \end{cases}$$

Respuesta de área

$$f_{sed} = \begin{cases} (c_{14} + c_{15}S_j)(Z_{2.5} - 1); & Z_{2.5} \leq 1 \\ 0; & 1 < Z_{2.5} \leq 3 \\ c_{16}k_3e^{-0.75[1 - \exp(-0.25(Z_{2.5} - 3))]); & Z_{2.5} > 3 \end{cases}$$

Profundidad hipocentral

$$f_{hyp} = f_{hyp,H} f_{hyp,M}$$

$$f_{hyp,H} = \begin{cases} 0; & Z_{HYP} \leq 7 \\ Z_{HYP} - 7; & 7 < Z_{HYP} \leq 20 \\ 13; & Z_{HYP} > 20 \end{cases}$$

$$f_{hyp,M} = \begin{cases} c_{17}; & M \leq 5.5 \\ [c_{17} + (c_{18} - c_{17})(M - 5.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_{18}; & M > 6.5 \end{cases}$$

Inclinación de falla

$$f_{dip} = \begin{cases} c_{19}\delta; & M \leq 4.5 \\ c_{19}(5.5 - M)\delta; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 0; & M > 5.5 \end{cases}$$

Atenuación Inelástica

$$f_{atn} = \begin{cases} (c_{20} + \Delta c_{20})(R_{RUP} - 80); & R_{RUP} > 80 \\ 0; & R_{RUP} \leq 80 \end{cases}$$

Las definiciones de las variables de predicción aparecen en las ecuaciones dadas en las secciones anteriores como sigue:

- M Magnitud momento
- R_{RUP} Distancia (km) más cercana al plano de la falla de ruptura cosísmica
- R_{JB} Distancia (km) más cercana a la proyección de la superficie del plano de la falla de ruptura cosísmica
- R_x Distancia (km) más cercana a la proyección de la superficie vertical al límite superior la falla de ruptura cosísmica medida perpendicularmente a su promedio de fuente
- W Ancho (km) de la inclinación inferior al plano de ruptura de la falla.

**Facultad de Ingeniería Civil
Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas
y Mitigación de Desastres
Laboratorio de Estructuras**

- λ Ángulo ($^{\circ}$) de ataque definido por el promedio de ángulos de medida de deslizamiento en el plano de ruptura entre la dirección de golpe al vector de deslizamiento.
- F_{RV} Indicador variable que representa la falla inversa e inversa oblicua, donde $F_{RV} = 1$ para $30^{\circ} < \lambda < 150^{\circ}$ y $F_{RV} = 0$ para el resto
- F_{NM} Indicador variable que representa la falla normal y normal oblicua, donde $F_{NM} = 1$ para $-150^{\circ} < \lambda < -30^{\circ}$ y $F_{NM} = 0$ para el resto
- Z_{TOR} Profundidad (km) a la parte superior del plano de ruptura de la falla
- δ Ángulo ($^{\circ}$) promedio de inclinación del plano de ruptura de la falla medido desde un plano horizontal
- V_{S30} Tiempo promedio de la velocidad (m/s) de ondas de corte en los primeros 30 m del sitio
- A_{1100} Es el PGA (g) vertical estimado medio en roca con $V_{S30} = 1100$ m/s
- SJ Indicador variable de los efectos de sitio regional representativo, donde $SJ = 1$ para sitios localizados en Japón y $SJ = 0$ para el resto
- $Z_{2.5}$ Profundidad (km) a los 2.5 km/s de velocidad de ondas de corte debajo del sitio
- Z_{HYP} Profundidad (km) hipocentral del sismo medido desde el nivel del mar

Tabla 21. Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical

Periodo	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
PGA	-4.729	0.984	0.537	-1.499	-0.443	-2.666	0.214	7.166
0.010	-4.674	0.977	0.533	-1.485	-0.445	-2.665	0.214	7.136
0.020	-4.548	0.976	0.549	-1.488	-0.453	-2.699	0.215	6.936
0.030	-4.050	0.931	0.628	-1.494	-0.464	-2.772	0.216	7.235
0.050	-3.435	0.887	0.674	-1.388	-0.552	-2.760	0.202	8.334
0.075	-3.435	0.902	0.726	-1.469	-0.543	-2.575	0.177	8.761

Periodo	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
0.100	-3.930	0.993	0.698	-1.572	-0.470	-2.461	0.166	9.049
0.150	-5.505	1.267	0.510	-1.669	-0.452	-2.349	0.164	8.633
0.200	-6.280	1.366	0.447	-1.750	-0.435	-2.335	0.175	8.742
0.250	-6.789	1.458	0.274	-1.711	-0.410	-2.332	0.183	8.400
0.300	-7.400	1.528	0.193	-1.770	-0.305	-2.297	0.190	7.643
0.400	-8.750	1.739	-0.020	-1.594	-0.446	-2.219	0.185	7.059
0.500	-9.740	1.872	-0.121	-1.577	-0.489	-2.205	0.191	6.375
0.750	-11.050	2.021	-0.042	-1.757	-0.530	-2.143	0.188	5.166
1.000	-12.184	2.180	-0.069	-1.707	-0.624	-2.092	0.176	5.642
1.500	-13.451	2.270	0.047	-1.621	-0.686	-1.913	0.144	5.963
2.000	-13.700	2.271	0.149	-1.512	-0.840	-1.882	0.126	7.584
3.000	-13.900	2.150	0.368	-1.315	-0.890	-1.789	0.105	8.645
4.000	-14.594	2.132	0.726	-1.506	-0.885	-1.781	0.100	10.204
5.000	-15.634	2.116	1.027	-1.721	-0.878	-1.690	0.098	8.386
7.500	-17.129	2.223	0.169	-0.756	-1.077	-1.721	0.125	5.779
10.000	-17.657	2.132	0.367	-0.800	-1.282	-1.948	0.163	4.135

Tabla 22. Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical

Periodo	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅
PGA	0.000	-0.230	0.759	-0.356	1.019	0.373	-0.117	-0.097
0.010	0.000	-0.229	0.759	-0.354	1.015	0.372	-0.119	-0.094
0.020	0.000	-0.270	0.768	-0.344	0.950	0.400	-0.145	-0.081
0.030	0.000	-0.315	0.766	-0.297	1.056	0.394	-0.196	-0.091

Periodo	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅
0.050	0.000	-0.329	0.764	-0.363	1.316	0.422	-0.187	-0.290
0.075	0.000	-0.290	0.795	-0.427	1.758	0.336	-0.095	-0.261
0.100	0.000	-0.203	0.842	-0.429	1.411	0.314	-0.100	-0.091
0.150	0.000	-0.203	0.736	-0.421	1.227	0.289	0.002	-0.092
0.200	0.000	-0.203	0.801	-0.429	0.987	0.290	0.040	-0.081
0.250	0.000	-0.203	0.715	-0.438	0.577	0.303	0.047	0.011
0.300	0.000	-0.203	0.708	-0.421	0.279	0.336	0.026	0.092
0.400	0.000	-0.203	0.683	-0.401	0.358	0.358	0.061	0.122
0.500	0.000	-0.203	0.704	-0.417	0.229	0.432	0.090	0.287
0.750	0.016	-0.203	0.602	-0.490	0.574	0.459	0.178	0.292
1.000	0.032	-0.115	0.394	-0.539	0.980	0.442	0.239	0.316
1.500	0.128	-0.005	0.328	-0.611	0.819	0.520	0.276	0.450
2.000	0.255	0.120	0.112	-0.630	0.044	0.566	0.305	0.424
3.000	0.284	0.170	0.011	-0.562	-0.396	0.562	0.348	0.300
4.000	0.261	0.170	0.000	-0.537	0.001	0.515	0.353	0.257
5.000	0.282	0.177	0.000	-0.442	-0.592	0.511	0.304	0.170
7.500	0.387	0.383	0.000	-0.343	-1.138	0.575	0.168	0.219
10.000	0.322	0.334	0.000	-0.199	-0.325	0.324	0.169	0.127

Tabla 23. Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical

Periodo	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀	$\Delta C_{20}(JI)$	$\Delta C_{20}(CH)$	k ₁
PGA	0.0	0.1020	0.0442	0.00784	-0.0053	-0.0018	0.0039	865
0.010	0.0	0.1026	0.0452	0.00784	-0.0053	-0.0018	0.0039	865



Periodo	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀	$\Delta c_{20}(JI)$	$\Delta c_{20}(CH)$	k ₁
0.020	0.0	0.1059	0.0427	0.00786	-0.0052	-0.0018	0.0036	865
0.030	0.0	0.1175	0.0410	0.00815	-0.0052	-0.0020	0.0033	908
0.050	0.0	0.1238	0.0408	0.00783	-0.0062	-0.0026	0.0039	1054
0.075	0.0	0.1088	0.0516	0.00726	-0.0072	-0.0021	0.0048	1086
0.100	0.0	0.0918	0.0559	0.00644	-0.0072	-0.0018	0.0050	1032
0.150	0.0	0.0720	0.0447	0.00745	-0.0066	-0.0018	0.0048	878
0.200	0.0	0.0602	0.0485	0.00789	-0.0056	-0.0022	0.0041	748
0.250	0.0	0.0500	0.0416	0.00629	-0.0049	-0.0025	0.0034	654
0.300	0.0	0.0382	0.0438	0.00524	-0.0046	-0.0027	0.0031	587
0.400	0.0	0.0264	0.0307	0.00522	-0.0037	-0.0024	0.0024	503
0.500	0.0	0.0163	0.0287	0.00539	-0.0031	-0.0025	0.0021	457
0.750	0.0	-0.0016	0.0277	0.00501	-0.0021	-0.0025	0.0020	410
1.000	0.0	-0.0072	0.0277	0.00506	-0.0012	-0.0023	0.0012	400
1.500	0.0	-0.0262	0.0293	0.00353	-0.0004	-0.0013	0.0004	400
2.000	0.0	-0.0408	0.0221	0.00220	0.0000	-0.0004	0.0000	400
3.000	0.0	-0.0512	0.0321	-0.00137	0.0000	0.0000	0.0000	400
4.000	0.0	-0.0567	0.0225	0.00053	0.0000	0.0000	0.0000	400
5.000	0.0	-0.0429	0.0237	0.00233	0.0000	0.0000	0.0000	400
7.500	0.0	-0.0308	0.0171	-0.00298	0.0000	0.0000	0.0000	400
10.000	0.0	0.0067	-0.0017	0.00092	0.0000	0.0000	0.0000	400

Tabla 24. Coeficientes de la mediana del modelo de movimiento de suelo vertical



Periodo	k ₂	k ₃	a ₂	h ₁	h ₂	h ₃	h ₅	h ₆
PGA	0.0	0.0	0.167	0.241	1.474	-0.715	-0.337	-0.270
0.010	0.0	0.0	0.168	0.242	1.471	-0.714	-0.336	-0.270
0.020	0.0	0.0	0.166	0.244	1.467	-0.711	-0.339	-0.263
0.030	0.0	0.0	0.167	0.246	1.467	-0.713	-0.338	-0.259
0.050	0.0	0.0	0.173	0.251	1.449	-0.701	-0.338	-0.263
0.075	0.0	0.0	0.198	0.260	1.435	-0.695	-0.347	-0.219
0.100	0.0	0.0	0.174	0.259	1.449	-0.708	-0.391	-0.201
0.150	0.0	0.0	0.198	0.254	1.461	-0.715	-0.449	-0.099
0.200	0.0	0.0	0.204	0.237	1.484	-0.721	-0.393	-0.198
0.250	0.0	0.0	0.185	0.206	1.581	-0.787	-0.339	-0.210
0.300	0.0	0.0	0.164	0.210	1.586	-0.795	-0.447	-0.121
0.400	0.0	0.0	0.160	0.226	1.544	-0.770	-0.525	-0.086
0.500	0.0	0.0	0.184	0.217	1.554	-0.770	-0.407	-0.281
0.750	0.0	0.0	0.216	0.154	1.626	-0.780	-0.371	-0.285
1.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
1.500	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
2.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
3.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
4.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
5.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
7.500	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756
10.000	0.0	0.0	0.596	0.117	1.616	-0.733	-0.128	-0.756



4.6 Árbol Lógico de Decisión

4.6.1 Eventos de Interfase

Para las GMPEs seleccionadas, 40 % de la ponderación fue asignada al modelo BC Hydro (2016); 30 % se le asignó a Youngs *et al.* (1997); 20 % a McVerry *et al.* (2006) y por último 10 % para Zhao *et al.* (2006).

4.6.2 Eventos de Intraplaca

Todas las GMPEs utilizadas en este análisis ofrecen resultados similares en el rango de Mw 6-7 para los eventos intraplaca ya que los conjuntos de datos sobre movimiento de suelo para estos eventos son amplios. Una consideración importante al aplicar estas GMPEs es la forma en la que los modelos extrapolan eventos de $M > 8.0$. Los modelos de BC Hydro (2016) y Zhao *et al.* (2006) tienen una fuerte extrapolación a magnitudes grandes, lo cual conlleva a tener fuertes movimientos de suelo para eventos de magnitud superior a 8.0.

Con el fin de controlar la extrapolación en eventos de intraplaca, BC Hydro recomienda utilizar el valor de $\Delta C1 = -0.3$ para todos los periodos espectrales para eventos de este tipo. Adicionalmente, para capturar la incertidumbre epistémica se recomienda un rango adicional de $\Delta C1$ de ± 0.2 además del valor central de $\Delta C1 = -0.3$ (es decir, menor $\Delta C1 = -0.5$, centro $\Delta C1 = -0.3$ y superior $\Delta C1 = -0.1$) para capturar la incertidumbre epistémica en la gran escala de magnitud de los eventos de intraplaca.

Tabla 25. Valores de $\Delta C1$ recomendados para fuentes de intraplaca

Periodo (s)	$\Delta C1$		
	Lower Value	Central Value	Upper Value
All Periods	-0.5	-0.3	-0.1

4.6.3 Eventos Corticales

El modelo de Sadigh *et al.* (1997) y las Relaciones de Atenuación NGA fueron utilizadas como GMPE para las fallas corticales y la zona de fuentes de fondo. Las GMPE's fueron igualmente ponderadas. Las ecuaciones que se implementaron en este estudio emplean

la mejor información disponible, ya que estos modelos han demostrado ser aplicables a nivel mundial.

4.7 Determinación del Peligro Sísmico

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, el peligro sísmico puede calcularse considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas analizadas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se proyectará cada punto de la grilla de análisis que se extiende sobre Lima Metropolitana y el Callao con incremento de 0.1° .

El peligro sísmico del área del proyecto se ha determinado utilizando la información pertinente en la literatura técnica y el programa de cómputo CRISIS 2015 versión 2.2, desarrollado por Ordaz *et al.* (2015), que emplea métodos numéricos conocidos.

A continuación, se muestra la curva de probabilidad anual de excedencia para la aceleración en roca en la zona del litoral peruano. De la misma forma se contará con las curvas para cada punto de estudio (edificio a analizar en Lima Metropolitana y el Callao).

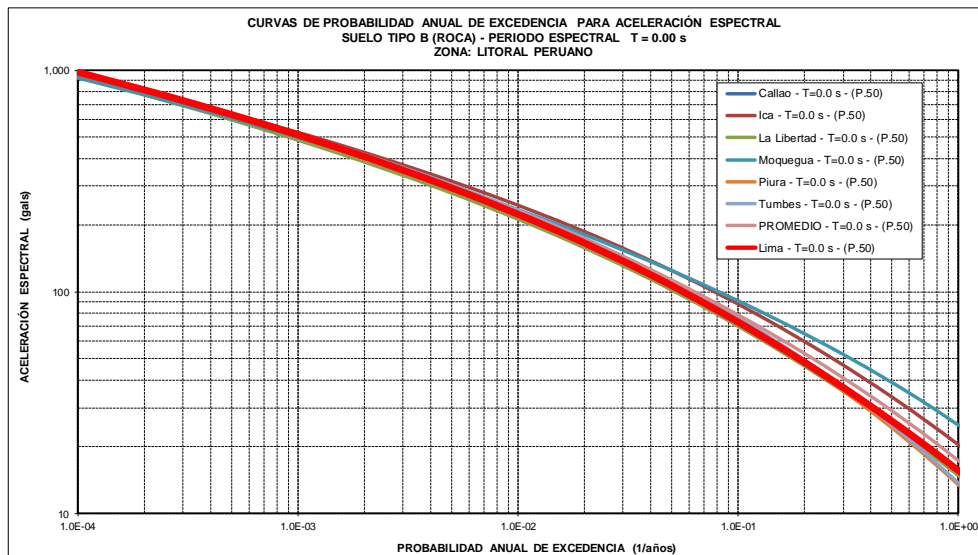


Figura 10. Curva de probabilidad anual de excedencia para aceleración espectral



5. CONSIDERACIÓN DE EFECTOS DE SITIO

El peligro sísmico probabilístico ha sido calculado a nivel de suelo tipo B o Roca según la ASCE 07 - 10 sin embargo, los estratos de suelo superficiales sobre la cual se emplazan las estructuras modifican la intensidad de las ondas sísmicas que se propagan a través de ellas desde las fuentes hasta el ámbito de estudio. Es por ello que los resultados obtenidos del análisis de peligro sísmico se verán afectados por las condiciones de sitio, los cuales han sido estudiados desde el año 2005 en los estudios de microzonificación realizados por el CISMID. A lo largo de estos años se ha venido caracterizando los estratos de la ciudad de Lima a nivel de distrito, usando investigaciones directas e indirectas como los métodos geofísicos para la determinación del perfil sísmico y de vibraciones ambientales para determinar el periodo de vibración empleando el método de Nakamura.

5.1 Microzonificación

Los mapas de microzonificación sísmica se elaboran en función de la superposición de los resultados obtenidos de los mapas de microzonificación geotécnica, los mapas de curvas de isoperiodos y los factores de amplificación determinados. Producto de esta superposición se ha subdividido la clasificación de sitio en 5 zonas, las cuales se describen a continuación. Se recalca que en el mapa de microzonificación tiene incorporado las áreas de peligro de talud.

Zona I: Zonas de afloramiento de roca con diferentes grados de fracturación, depósitos de grava y arena de compacidad densa a muy densa, depósitos de limos y arcillas de consistencia rígida a muy rígida de poco espesor. Se han excluido de esta zona las áreas de taludes rocosos identificadas como de peligro moderado o alto.

El comportamiento dinámico del terreno en esta zona es adecuado, por lo que se espera que no incremente el nivel de peligro sísmico, excepto en las áreas de fuerte pendiente y en las partes altas de los cerros, que pueden presentar amplificaciones por efectos topográficos. Los periodos dominantes del suelo Períodos de vibración ambiental son menores a 0.30 s.

Zona II: Abarca la zona relativamente plana, que se extiende desde el pie de las laderas hacia la zona del valle, conformada predominantemente por suelos gravosos coluviales y estratos de arena mal graduada de moderado espesor.



En esta zona se espera un moderado incremento del nivel de peligro sísmico por efecto del comportamiento dinámico del terreno. Los periodos dominantes del suelo varían de 0.30 s a 0.40 s.

Zona III: Depósitos de arenas de compacidad suelta a media, depósitos de limos y arcillas de consistencia blanda a media.

El comportamiento dinámico del terreno en esta zona es desfavorable por lo que se espera un fuerte incremento del nivel de peligro sísmico. Los periodos dominantes del suelo son mayores a los 0.40 s.

Zona IV: Taludes inestables con fuerte pendiente, canteras informales, depósitos de suelos pantanosos, depósitos de arenas eólicas de compacidad suelta potencialmente licuables. Zonas con alta amplificación sísmica.

El comportamiento dinámico del terreno es el más desfavorable, y donde se han registrado los mayores daños en sismos pasados. Los periodos dominantes del suelo toman valores igual o mayores a 0.40 s.

Zona IV: Depósitos de escombros y/o desechos, rellenos antrópicos en el interior de antiguas excavaciones mineras. La construcción sobre este tipo de terreno no está permitida según norma.

Esta microzonificación se presenta en el mapa M-07 “Mapa de Microzonificación Sísmica de Lima Metropolitana”, las zonas son representadas mediante colores correspondiéndole a la Zona I el color verde, a la Zona II el color amarillo, para la Zona III color naranja, para la Zona IV el color rojo y el color fucsia para la Zona V.

5.2 Aceleraciones en superficie considerando condiciones de sitio

Para poder incluir los efectos de sitio dentro del cálculo de peligro sísmico se pueden seguir diversas metodologías que permiten obtener desde aproximaciones robustas, como es el caso del presente estudio hasta las más exactas, realizadas en un estudio específico para estructuras con elevado nivel de importancia. Es por ello que para el presente estudio se incluirán los efectos de sitio representado como el factor de suelo S para poder realizar la amplificación acorde a lo descrito en la norma peruana de diseño sismorresistente E.030 – 2016. Para las zonas I, II y III tienen sus equivalentes en los suelos S_1 , S_2 y S_3 respectivamente; además para las Zonas IV y V se toma el buen criterio de considerar unos factores mayores y similares a los de la norma E.030 – 2006. El resumen de los parámetros considerados se muestra a continuación:



Tabla 26. *Factores de Amplificación Sísmica*

Zonificación Sísmica	Clasificación de Sitio E.030-2016	Factor de Amplificación (Z4)
Zona I	S1	1.00
Zona II	S2	1.05
Zona III	S3	1.10
Zona IV	-	1.20
Zona V	-	1.30

Se ha considerado para este análisis únicamente las áreas que cuentan con el mapa de microzonificación, puesto que no podemos evaluar otras zonas que no cuenten con la información necesaria. Así mismo se han exonerado del análisis aquellos lugares que no son aptos para la construcción o que no han sido considerados dentro de los mapas de microzonificación, tal es el caso de zonas arqueológicas, zonas recreaciones, zonas de protección paisajística, etc. Los resultados finales considerando las aceleraciones afectadas por los efectos de sitio se muestran en el M-08 “Mapa de Aceleraciones en Superficie Considerando Efectos de Sitio”.



6. CONCLUSIONES

En base al análisis del catálogo sísmico, la sismicidad de Lima Metropolitana y el Callao se concluye que:

- El análisis del peligro sísmico sobre Lima Metropolitana y el Callao ha sido desarrollado en base a la data del catálogo sísmico actualizado hasta el 1 de enero de 2016.
- En el análisis probabilístico de peligro sísmico se ha considerado a las fuentes sismogénicas tipo áreas, habiéndose definido éstas en función a su mecanismo focal como fuentes de interfase, fuentes de intraplaca superficial e intraplaca intermedia y fuentes continentales o de corteza.
- Los modelos de atenuación empleados para el cálculo del peligro sísmico sobre el departamento de Lima son adecuados para el análisis de la sismicidad peruana.
- La evaluación del peligro sísmico realizada para Lima Metropolitana y el Callao está basada en la teoría desarrollada por Cornell (1968) y ha sido realizada empleando el programa de cómputo CRISIS 2015 v2.2, desarrollado y actualizado por Ordaz et al. (2015).
- La evaluación y análisis de peligro sísmico está sujeta a desarrollos constantes como parte de la ciencia e ingeniería en las metodologías y estándares de la práctica actual, por lo que los valores calculados en este informe están sujetos a nuevas actualizaciones. En tal sentido, CISMID recomienda actualizar los resultados del presente informe, al momento que nueva información sismotectónica se encuentre disponible o se desarrollen nuevas y avanzadas teorías científicas para el desarrollo y análisis de peligro sísmico.
- Los efectos de sitio han sido considerados como factores de suelo S, para convertir las aceleraciones obtenidas en el análisis probabilístico en suelo Tipo B (Roca) a superficie, de manera similar a la norma peruana de diseño sismo resistente E.030 - 2018.



7. REFERENCIAS

Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016), "BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes", *Earthquake Spectra Journal of the Earthquake Engineering Research Institute*, Vol. 32, N° 1, pp. 23-44.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2010).

Alva Hurtado J. E. (2004), "Banco de Datos de Mapas de Isosistas en el Perú", Página web del CISMID – FIC – UNI (http://www.cismid-uni.org/p_acelerograf/index.htm).

Alva Hurtado J. E., Meneses J. y Guzmán V. (1984), "Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú", V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, Perú.

Atkinson, G., & Boore, D; (2003), "Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, N° 4, pp. 1703-1729.

Bastías N., Montalva G., Leyton F, Saez E., Ruz F., Troncoso P. (2015), "Evaluation of Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) for Chile Subduction Zone", Conference Paper, ResearchGate.

Berrocal J., (1974), "South American Seismotectonics from SAAS data", Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Edinburg.

Boatwright, J; Boore, D. (1982), "Analysis of the ground accelerations radiated by the 1980 Livermore Valley earthquake for directivity and dynamic source characteristics", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, N° 1, pp. 43-64.

Bolaños A. y Monroy O. (2004), "Espectros de Peligro Sísmico Uniforme", Tesis para Optar el Grado de Magíster en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

Bommer, J. J., (2002), "Deterministic vs. Probabilistic Seismic Hazard Assessment: An Exaggerated and Obstructive Dichotomy", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 6, Special Issue 1, pp. 43 – 73, Imperial College Press.

Boore, D. (1983), "Stochastic simulation of high frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, Num. 6, pp. 1865-1894.



Boore, D.; Joyner, W. (1982), "The empirical prediction of ground motion", Seismological Society of America, Vol. 72, Nº 6, pp. S43-S60.

Boore, D.; Joyner, W. (1984), "A note on the use of random vibratory theory to predict peak amplitudes of transient signals", Seismological Society of America, Vol. 74, Nº 6, pp. 2035-2039.

Brian S.-J. Chiou and Robert R. Youngs (2014) Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. Earthquake Spectra: August 2014, Vol. 30, No. 3, pp. 1117-1153.

Cahill, T., Isacks, B. (1992), "Seismicity and shape of the subducted Nazca plate", Journal of Geophysical Research, Vol. 97, Nº B12, pp 17503-17529.

Campbell KW, Bozorgnia Y (2013). NGA-West2 Campbell & Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 sec, PEER Report 2013/06.

Castillo J. (1993), "Peligro Sísmico en el Perú", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

Castillo, J; Alva, J. (1998), "Peligro sísmico en el Perú", Memorias del VIII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, SPMSIF, Lima, Perú

Chávez, J. (2006), "Leyes de Atenuación para Aceleraciones Espectrales en el Perú", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

Christophersen A., Gerstenberger M. C., Rhoades D. A., Stirling M. W. (2011), "Quantifying the effect of declustering on probabilistic seismic hazard", Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society, Auckland, New Zealand.

Cornell A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America", Vol 58, Nº5 págs. 1538-1606.

Deza E. (1969), "Estudio Preliminar Sobre las Zonas de Transición que Separan Posibles Regiones Sismotectónicas del Margen Occidental de Sudamérica: Zona de Transición en el Perú", I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Lima, Perú.

Dimaté C., Drake L., Yopez H., Ocola L., Rendon H., Grünthal G., Giardini D. (1999), "Seismic hazard assessment in the Northern Andes (PILOTO Project)", Annali di Geofisica, Vol. 42, Num. 6, pp. 1039 – 1055.



Facultad de Ingeniería Civil Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres Laboratorio de Estructuras



Dorbath, L., Cisternas, A. y Dorbath, C. (1990) "Assessment of the Size of large and Great Historical Earthquakes in Peru". BSSA, 80, pp 551-576.

Esteva, L. (1970), "Criterios para la Construcción de Espectros de Diseño", Publicación N 19 del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gamarra, C. A. (2010), "Nuevas Fuentes Sismogénicas para la Evaluación del Peligro Sísmico y Generación de Espectros de Peligro Uniforme en el Perú", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

Grange, F. et al (1984), "Tectonics implications of the microearthquake seismicity and fault plane Solutions in the Southern Peru", Journal of Geophysical Research, Vol. 89, pp 6139-6152.

Gutenberg, B. (1945), "Magnitude determination for deep-focus earthquakes", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 35, pp. 117-130.

Gutenberg, B.; Richter, C. (1956), "Earthquake magnitude: intensity, energy, and acceleration", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 46, pp. 104-145.

Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N.A., Bommer, J.J., Markatis, A., McCoy, E. y Mendis, R. (2006) "An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets". Journal of Earthquake Engineering, Special Issue, accepted for publication.

Hanks, T., McGuire, R. (1981), "The character of high frequency strong ground motion", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, pp. 2071-2095.

Instituto Geofísico del Perú. (2001), "Catálogo Sísmico del Perú 1471 – 1982: Versión Revisada y Actualizada". Lima, Perú.

International Building Code, (2015), International Code Council.

Isacks B., Oliver J. y Sykes L.R., (1968), "Seismology and Global Tectonics", Journal of Geophysical Research, Vol 73, N°18, págs. 5855-5899.

Hynes-Griffin, M.E., Franklin, A.G., 1984. "Rationalizing the Seismic Coefficient Method. Miscellaneous" Paper GL-84-13, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Joyner, W.; Boore, D. (1988), "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion", Earthquake Engineering and Soil Dynamics II – Recent Advances in Ground Motion Evaluation, Geotechnical Special Publication 20, pp. 43-102, ASCE, New York.



Kramer, S. L., (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall, New Jersey, USA.

Macharé J., Fenton, C., Machette, M., Lavenue, A., Costa, C. and Dart, R., (2003), "Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Peru and its Offshore Regions", Open-File Report 03-451, US Geological Survey, U.S.A.

Maeda, K. (1996). "The Use of Foreshocks in Probabilistic Prediction along the Japan and Kuril Trenches", Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86, No. 1A, pp. 242-254.

Marsan D., Lengliné O. (2008), "Extending Earthquakes' Reach Through Cascading", Science Vol. 319, pp. 1076 – 1079.

Martínez, A. (1996), "Licuación de gravas en el Perú", Boletín Técnico M.I.G., Pp.5-10 Lima, Perú.

McVerry G. and Zhao J, (2006) "New Zealand Acceleration Response Spectrum Attenuation Relations for Crustal and Subduction Zone Earthquakes", Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt, New Zealand - email:g.mcverry@gns.cri.nz

Nick Gregor, Norman A. Abrahamson, Gail M. Atkinson, David M. Boore, Yousef Bozorgnia, Kenneth W. Campbell, Brian S.-J. Chiou, I. M. Idriss, Ronnie Kamai, Emel Seyhan, Walter Silva, Jonathan P. Stewart, and Robert Youngs (2014) Comparison of NGA-West2 GMPEs. Earthquake Spectra: August 2014, Vol. 30, No. 3, pp. 1179-1197.

Norman Abrahamson, Nicholas Gregor, and Kofi Addo (2016) BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. Earthquake Spectra: February 2016, Vol. 32, No. 1, pp. 23-44.

Norman A. Abrahamson, Walter J. Silva, and Ronnie Kamai (2014) Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. Earthquake Spectra: August 2014, Vol. 30, No. 3, pp. 1025-1055.

Ordaz M. (1992), "Estimación de movimientos fuertes ante temblores de subducción", Tesis Doctoral, División de Estudios Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ordaz M., Aguilar A., Arboleda J. (2007) "Program for Computing Seismic Hazard: CRISIS 2007 ver 7.0", Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Patwardhan K.; Sadigh I. M.; Idriss and Youngs R. (1978). "Attenuation of Strong Motion Effect of Site Conditions. Transmission Path Characteristics and Focal Depths", submitted to the Bull Seismological Society of America.



Facultad de Ingeniería Civil Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres Laboratorio de Estructuras



Petersen M., Harmsen S., Haller K., Mueller C., Luco N., Hayes G., Dewey J. and Rukstales K. (2010), "Preliminary Seismic Hazard Model for South America", Conferencia: Sismología en Sudamérica y los mecanismos de prevención y mitigación del peligro y riesgo sísmico, Daniel Huaco Editor, Lima, Perú

Pomachagua O. (2000), "Características Generales de la Tectónica y Sismicidad de Perú", Revista de Trabajos de Investigación, CNDG, IGP, pp. 93 – 104. Lima, Perú.

Reasenberg P. (1985), "Second-Order Moment of Central California Seismicity", Journal of Geophysical Research, Vol. 90, Num. B7, pp. 5479 – 5495.

Sadigh K. Chang C., Egan J., Makdisi F., Youngs R. R., (1997), "Attenuation Relationship for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data", Seismological Research Letters, Volume 68, Number 1, January/February.

Scordilis E. (2006), "Empirical global relations converting Ms and mb to moment magnitude", Journal of Seismology, Vol. 10, pp. 225-236.

Sebrier M., Huamán D., Blanc J. L., Macharé J., Bonnot D. y Cabrera J. (1982), "Observaciones acerca de la Neotectónica del Perú", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Silgado E. (1978), "Historia de los Sismos más Notables ocurridos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minería, Boletín N°3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.

Silgado E. (1992), "Investigación de Sismicidad Histórica en la América del Sur en los Siglos XVI, XVII, XVIII y XIX", CONCYTEC, Lima, Perú.

SISRA (1985), "Catálogo de Terremotos para América del Sur" Vol. 7a, 7b y 7c, Proyecto SISRA, CERESIS, Lima, Perú.

Slemmons D. (1982), "Magnitude of Active Faults", U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station, USA.

Stapp J. (1972), "Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard", International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, Proceedings of the International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, Vol. 2., pp. 897 – 909.

Tavera H. (1998), "Mecanismo Focal de Terremotos en Perú y Sismotectónica", Tesis para Optar el Grado de Doctor en Ciencias Físicas, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, España.



Facultad de Ingeniería Civil Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres Laboratorio de Estructuras



Tavera H. y Buforn E (1998), "Sismicidad y Sismotectónica de Perú", Física de la Tierra, N° 10, pp. 187 – 219. España.

Tavera H., Vilca R. y Marín G. (2006), "Inferences on the Geometry of the Nazca Plate in Northwestern Peru Based on Data Collected by a Local Seismograph Network", Earth Science Research Journal, Vol. 10, N° 1, pp. 15 – 24.

Weichert D. (1980), "Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 70, Num. 4, pp. 1337 – 1346.

Wiemer S. (2001), "A software package to analyze seismicity: ZMAP", Seismological Research Letter, Vol. 72, Num. 2, pp. 375 – 383.

Willemann R., Storchak D. (2001), "Data Collection at the International Seismological Centre", Seismological Research Letter, Vol. 72, Num. 4, pp. 440 – 453.

Youngs, R. R., Chiou, S. J., Silva, W. J. and Humprey, J. R. (1997), "Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes", Seismological Research Letters, Vol. 68, Numb. 1, Pp. 58 – 73, USA.

Zhao, J., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., *et al.* (2006), "Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp. 898 – 913, June 2006, doi: 10.1785/0120050122.

Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D. (2002), "Stochastic Declustering of Space-Time Earthquake Occurrences", Journal of the American Statistical Association, Vol. 97, Num. 458, pp. 369 – 380