

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO EN LIMA
Y CALLAO UTILIZANDO EL MÉTODO DEL COCIENTE ESPECTRAL H/V**

Tesis para optar el grado de **Magister en Ingeniería Civil** que presenta el Licenciado:

Julio Rolando Ríos León

Dirigido por:

**Dra. Sandra Santa Cruz Hidalgo
M.C. Javier Francisco Lermo Samaniego**

Lima, Junio de 2018

Resumen

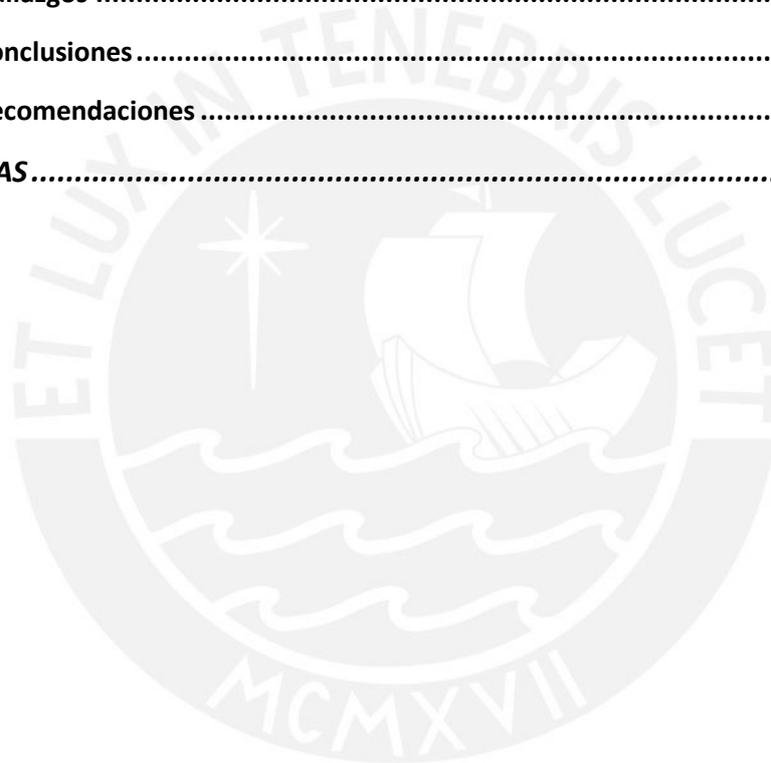
El área metropolitana de Lima y Callao está ubicada en una zona de alto peligro sísmico. Los efectos del suelo han demostrado tener una influencia importante en los daños reportados por terremotos ocurridos en la historia reciente (Lima, 1940; Chimbote, 1966; Ancash, 1970 y Lima, 1974). La ciudad cuenta con mapas de microzonificación sísmica y estudios del comportamiento dinámico del suelo. Sin embargo, el uso de acelerómetros y la omisión de los periodos altos ($T > 0.8$ s) asociados a la profundidad del conglomerado de Lima estarían sesgando resultados. Por ejemplo, registros con sismómetros de banda ancha encontraron que el suelo en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) presenta un periodo predominante de 1 segundo no reportado en estudios previos (Ríos, 2016). En ese sentido, es necesario evaluar el comportamiento dinámico del suelo en la ciudad con un enfoque que utilice las Funciones de Transferencia Empírica (FTE) para proveer información de la estratigrafía del suelo hasta el sustrato rocoso. Para ello, este trabajo utiliza la técnica del cociente espectral H/V en 38 estaciones acelerográficas de Lima y Callao, y 100 estaciones de registro de ruido ambiental. Se utiliza la teoría de las vibraciones casuales (Reinoso et al, 1990; Ordaz y Reinoso, 1987) para estimar espectros de respuesta con terremotos históricos de gran magnitud y provenientes de distintas fuentes sismogénicas. Además, esta metodología permite generar mapas de intensidad sísmica en la ciudad para construcciones con distintos periodos estructurales. El procedimiento de análisis se ejecuta a una menor escala en el distrito de Bellavista. En consecuencia, se demuestra que el comportamiento dinámico del suelo en distintas zonas de Lima y Callao no muestra las mismas aceleraciones ni frecuencias dominantes. Los resultados de este trabajo pretenden aportar mejoras en los espectros de diseño y contribuir en futuras revisiones del código sísmico. Además, se intenta que los resultados sean la base de un enfoque distinto a cerca de la dinámica del suelo que pueda plasmarse en una nueva microzonificación de la ciudad.

Palabras Clave: Comportamiento dinámico del suelo, cociente espectral H/V, registros sísmicos, registros de ruido ambiental.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. METODOLOGÍA	2
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Conceptos sobre Dinámica de Suelos	4
2.1.1. Método de Haskell-Thompson	6
2.1.2. Funciones de Transferencia	7
2.1.3. Amplificación Sísmica	9
2.2. La Dinámica de suelos en los códigos de diseño sísmico.....	10
2.3. El Método del Cociente Espectral H/V	11
3. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS EN LIMA Y CALLAO	15
3.1. Estaciones de registro sísmico.....	15
3.2. Estaciones de ruido ambiental	19
4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO EN LIMA Y CALLAO	28
4.1. Antecedentes	28
4.1.1. Estudios de Peligro Sísmico	28
4.1.2. Geología de Lima	29
4.1.3. Geomorfología de Lima	29
4.1.4. Geotecnia del Lugar	30
4.1.5. Profundidad al Basamento Rocoso	31
4.1.6. Microzonificación sísmica	32
4.2. Evaluación del comportamiento dinámico del suelo	34
4.2.1. Fuentes sísmicas	34
4.2.2. Estaciones de Referencia	37
4.2.3. Ejecución del Procedimiento	37
4.2.4. Escenarios Sísmicos.....	46
4.3. Sismo de Arequipa del 14 de Enero de 2018	56
4.4. Sismo de 8.8 Mw en la ciudad de Lima	60
4.4.1. Estudios Previos	60
4.4.2. Sismo de Maule (Chile, 2010)	62
4.4.3. Ejecución del procedimiento.....	66
4.4.4. Escenarios sísmicos	69
5. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL DISTRITO DE BELLAVISTA	74
5.1. Antecedentes.....	74
5.1.1. Ubicación.....	74
5.1.2. Hidrología	74
5.1.3. Paleovalles	76

5.1.4.	Geotecnia y Geomorfología	76
5.1.5.	Mediciones de ruido ambiental	79
5.1.6.	Microzonificación del distrito de Bellavista	79
5.2.	Evaluación del compartimiento dinámico del suelo en Bellavista	80
5.2.1.	Trabajo de Campo.....	80
5.2.2.	Funciones de Transferencia Empírica (FTE)	80
5.2.3.	Familias Espectrales.....	804
5.2.4.	Mapa de Isoperiodos	86
5.2.5.	Mapa de isoamplificaciones	87
5.2.6.	Ejecución del procedimiento	88
5.2.7.	Escenarios sísmicos.....	91
6.	HALLAZGOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
6.1.	Hallazgos	99
6.2.	Conclusiones	99
6.3.	Recomendaciones	102
REFERENCIAS.....	103



1. INTRODUCCIÓN

Perú es un país altamente sísmico debido a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana. La zona de subducción entre estas dos placas -falla inversa en la cual subduce la placa de Nazca- afecta también los litorales de Colombia, Ecuador y Chile. Esta convergencia se produce a una velocidad promedio de 7.4 cm por año (DeMets et al., 2010), siendo de las más activas del mundo.

Históricamente, el país ha sido afectado por sismos de gran magnitud. Los reportes aparecen en la época de la colonia, en donde la documentación, crónicas y testimonios dan cuenta de la destrucción y repercusión de estos eventos principalmente en las ciudades costeras. Según Dorbath et al (1990), en Perú se definen claramente tres zonas de sismicidad: la zona norte, central y sur. Cada una posee características sísmicas diferentes ligadas a la geometría de subducción. El centro de Perú se caracteriza por una actividad sísmica compleja. El sismo más grande ocurrido en su historia se dio en 1746 y destruyó la ciudad de Lima en su totalidad seguido por un tsunami que inundó gran parte del Callao (Silgado, 1978). Desde aquel terremoto, hubo un silencio sísmico de casi dos siglos. La actividad sísmica reapareció frente a las costas de Lima con los terremotos de 1940, 1942, 1966, 1970 y 1974, siendo los de 1966 (8.1 Mw) y 1974 (8.0 Mw) los de mayor magnitud. Estos fueron registrados en la estación sísmica "Parque de la Reserva" (PQR).

Daños mayores concentrados en zonas específicas de la zona metropolitana han demostrado que los efectos del suelo tienen una influencia importante en el peligro sísmico de la ciudad (Silgado, 1978; Alva, 1994; Repetto y Arango, 1980; Jimenez, 2016). El uso de acelerómetros y la omisión de los periodos largos ($T > 0.8$ s) asociados a la profundidad del conglomerado de Lima en los estudios y mapas de microzonificación sísmica estarían sesgando sus resultados. Por ejemplo, registros con sismómetros de banda ancha encontraron que el suelo en la PUCP presenta un periodo predominante de 1 segundo no reportado en estudios previos (Ríos, 2016).

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es evaluar el comportamiento dinámico del suelo en distintas zonas de Lima y Callao utilizando la técnica del cociente espectral H/V.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Generar acelerogramas sintéticos y espectros de respuesta (ER) en distintos puntos de la ciudad utilizando Funciones de Transferencia Empírica del suelo (FTE) mediante un código elaborado en MATLAB.
- Estudiar el posible efecto del suelo utilizando escenarios sísmicos con registros históricos provenientes de distintas fuentes sismogénicas.
- Aplicar los procedimientos de análisis al distrito de Bellavista y proponer un mapa de microzonificación sísmica.

1.2. METODOLOGÍA

El comportamiento dinámico del suelo se define con Funciones de Transferencia Empírica (FTE) calculadas con el método del Cociente Espectral H/V utilizando registros sísmicos (Lermo et al, 1993) y ruido ambiental (Nakamura, 1989). Para ello, los sismos se obtuvieron de la base de datos de la red acelerográfica del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) y del Instituto Geofísico del Perú (IGP). Asimismo, se realizaron trabajos de campo para conseguir registros de ruido ambiental en distintos puntos de la ciudad de Lima y Callao utilizando sismómetros de banda ancha. En total, se recolectó información de 38 estaciones sísmicas y 100 de registro de ruido ambiental.

Se obtuvieron acelerogramas sintéticos utilizando la Teoría de vibraciones casuales (Reinoso et al, 1990; Ordaz y Reinoso, 1987). Esta metodología consiste en la deconvolución a roca y propagación de registros sísmicos en lugares donde no se registraron. El análisis se realizó en el dominio de la frecuencia con sismos históricos de gran magnitud provenientes de distinta fuente sismogénica o mecanismo de falla. Posteriormente, con los acelerogramas sintéticos se calcularon las respuestas elásticas

máximas en aceleración para diferentes periodos estructurales con un amortiguamiento del 5% de su valor crítico utilizando el método lineal de Newmark (Newmark, 1959). En consecuencia, se obtuvieron espectros de respuesta de cada sismo evaluado. Cabe mencionar que el análisis y los resultados tanto de las FTEs como de los ERs se realizaron en las dos direcciones cardinales (E-O, N-S). Finalmente, se generaron mapas de intensidad sísmica (o escenarios sísmicos) para la aceleración máxima del suelo (PGA) y distintos periodos estructurales. Estos escenarios tomaron en cuenta la mayor aceleración entre las componentes EO y NS.

Se elaboró un código en el programa MATLAB con el objetivo de sistematizar el procedimiento descrito. La figura 1.1 muestra el flujograma del algoritmo realizado. El programa comienza llevando al dominio de las frecuencias un sismo registrado en la estación acelerográfica "A" (estación inicial o de referencia). Se utiliza la FTE del sitio para llevar el registro a roca y estimar un acelerograma sintético mediante la transformada inversa de Fourier. Asimismo, el espectro de Fourier en roca se propaga en la estación acelerográfica "B" mediante la convolución en el dominio de las frecuencias con la FTE del lugar. De esta manera, se genera un acelerograma sintético en "B" utilizando un registro sísmico en "A". Finalmente, el código calcula el espectro de respuesta en "B".

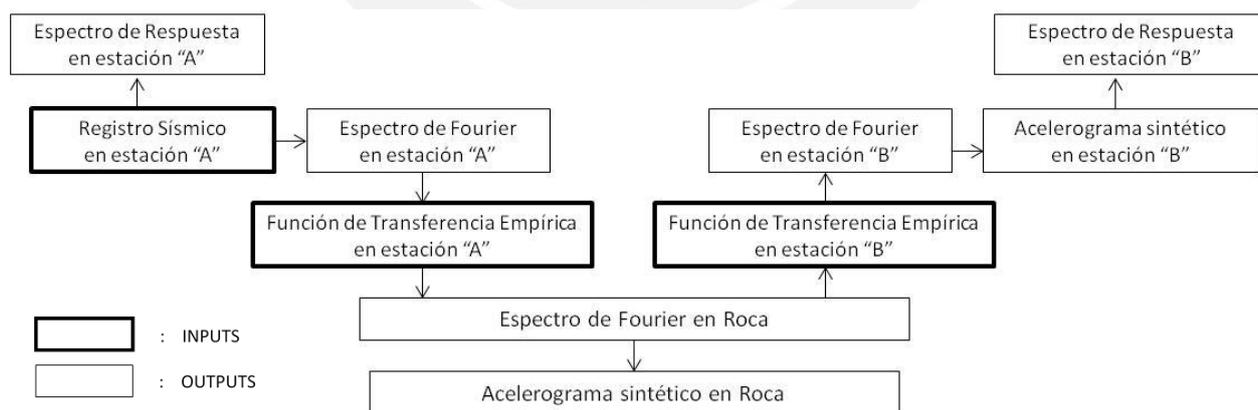


Figura 1.1 Flujograma del Algoritmo implementado en Matlab.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos sobre Dinámica de Suelos

Además de sus características mecánicas y geotécnicas, los suelos presentan propiedades dinámicas. Estas propiedades manifiestan el comportamiento del suelo ante la acción de ondas sísmicas modificando su amplitud, duración y contenido de frecuencias.

La rigidez y el amortiguamiento de los suelos constituyen las principales propiedades dinámicas. La rigidez está en función al módulo de corte (G) y a la profundidad de la estratigrafía (H). El módulo de corte representa la relación esfuerzo-deformación de corte del suelo. Asimismo, el amortiguamiento (ξ) representa la capacidad del suelo de disipar energía, siendo su estimación mucho más compleja.

El valor de G decrece con la deformación del suelo y con su ingreso al rango no lineal. Por practicidad, se toma el valor máximo elástico (G_{max}) (San Bartolomé, 1979). Este valor se relaciona con la velocidad de onda S (V_s) y la densidad del material (ρ) como lo indica la ecuación 2.1. En ese sentido, dado que la densidad según el tipo de roca o suelo no varía significativamente, la velocidad de onda de corte S es un parámetro que representa la rigidez del suelo.

$$G = \rho V_s^2 \quad (2.1)$$

Con base en la teoría unidimensional de propagación de ondas en medios estratificados, formulada por Haskell (1962), el suelo se comporta de manera lineal para cualquier nivel de excitación. Además, tomando en cuenta el principio geológico de superposición de estratos, se asume que el suelo se compone de estratos horizontales lateralmente infinitos. En ese sentido, se descartan los efectos de irregularidad lateral. Estos estratos suprayacen sobre un semiespacio homogéneo que representa el sustrato o basamento rocoso (Limaymanta, 2009).

Según Montecillo (1996), la hipótesis de la incidencia vertical de las ondas S polarizadas horizontalmente permite simplificar el modelo estratigráfico real en un sólo estrato

lateralmente infinito sin que pierda sus características principales: El periodo dominante y la velocidad de la onda de corte S (Figura 2.1).

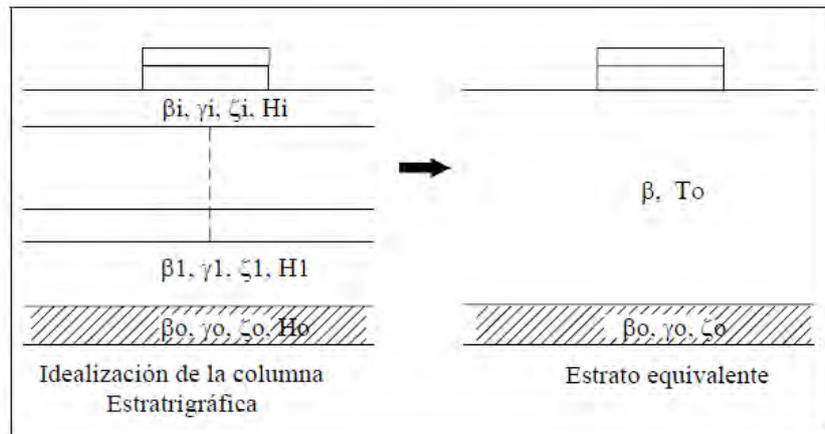


Figura 2.1 Perfil estratigráfico real y Modelo estratigráfico simplificado (Limaymanta, 2009)

Según la Figura 2.1, el perfil estratigráfico representa el medio real y cada estrato está caracterizado por los parámetros de velocidad de ondas S (β_i), la densidad del material (γ_i), el amortiguamiento del estrato (ζ_i) y su espesor (H_i). El semiespacio sobre el cual descansa el medio estratificado queda caracterizado también por los mismos parámetros ($\beta_o, \gamma_o, \zeta_o$).

Tomando como referencia el perfil estratigráfico de la figura 2.1, el tiempo que tardan las ondas en atravesar el i -ésimo estrato equivale a H_i/β_i . Por lo tanto, el tiempo total T que tardan en atravesar todos los estratos de suelo hasta llegar a la superficie es:

$$T = \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad (2.2)$$

Si la estratigrafía se representase por un estrato equivalente de espesor $H = \sum H_i$, la velocidad necesaria para que las ondas tarden el mismo tiempo en atravesarlo sería:

$$\beta = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{\beta_i}} \quad (2.3)$$

La ecuación 2.3 es conocida como la velocidad media del depósito simplificado. Según Aki (1980), la solución de la ecuación de onda para incidencia vertical resuelve que el periodo predominante de vibración del medio (T_o) está dado por:

$$T_o = \frac{4H}{\beta} \quad (2.4)$$

Si se combinan las ecuaciones (2.3) y (2.4) se obtiene:

$$T_o = \frac{4H}{\sum H_i / (\sum H_i / \beta_i)} \quad (2.5)$$

Debido a que $H = \sum H_i$, se obtiene:

$$T_o = \frac{4 \sum H}{\sum H_i / (\sum H_i / \beta_i)} = 4 \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 expresa que el estrato equivalente de la Figura 2.1 puede sustituir el medio estratificado idealizado de la misma figura. De esta manera, β y T_o dadas por las ecuaciones 2.3 y 2.6, respectivamente, se conservan.

Entonces, si T_o caracteriza el medio y depende directamente de las propiedades estratigráficas del mismo, la estimación de su valor puede permitir evaluar el efecto de sitio. Asimismo, se puede estimar la amplificación relativa de sitio (A_r) asociada a T_o , otro parámetro asociado al efecto de sitio. A_r se define como la máxima amplificación que sufre el movimiento de las partículas de suelo blando con respecto al movimiento de las partículas en el semiespacio rocoso.

2.1.1. Método de Haskell-Thompson

Thompson (1950) y Haskell (1962) desarrollaron un método para estimar la respuesta sísmica del suelo mediante la propagación unidimensional (o convolución) de ondas elásticas. El suelo es definido por un modelo estratigráfico compuesto de capas elásticas, homogéneas y horizontales según se muestra en la imagen izquierda de la Figura 2.1.

Las propiedades dinámicas de las capas de suelo son constantes (V_s , ρ , ξ) y su respuesta de impulso unitario ($h(t)$) se define por una función de transferencia (FT) en el dominio de las frecuencias. Si en una columna estratigráfica la capa inferior es sometida a una señal de entrada $e(t)$, la convolución de $e(t)$ y $h(t)$ resultará en la señal de salida $s(t)$. De esta manera, si la señal de entrada se convoluciona a través de todas las capas de suelo de un perfil estratigráfico se obtendrá una señal de salida o acelerograma sintético en la superficie.

En ese sentido, el procedimiento del método consiste en convolucionar una señal sísmica a través de los estratos del suelo. Se espera que la señal de salida $s(t)$ luego de las convoluciones se aproxime a la de un registro sísmico en suelo ($r(x)$), si se toma en cuenta que la señal de entrada representa un registro en el sustrato rocoso. Si $s(t)$ y $r(x)$ se asemejan satisfactoriamente, el modelo estratigráfico representa adecuadamente las características dinámicas del sitio.

2.1.2. Funciones de Transferencia

En ingeniería sísmica, la función de transferencia define el comportamiento dinámico del suelo en el dominio de las frecuencias y se obtiene mediante el cociente espectral de las ondas que llegan a la superficie y las que arriban a la interface suelo-basamento desde el hipocentro. Según el método empleado, pueden ser de dos tipos: Funciones de Transferencia Teórica (FTT) o Empírica (FTE). Las FTTs se obtienen de modelos estratigráficos teórico-analíticos como el método Haskell-Thompson y las FTEs, con métodos empíricos como la técnica del cociente espectral H/V o el método SSR.

a. Funciones de Transferencia Teórica (FTT)

La Figura 2.2 muestra la función de transferencia de un suelo modelado como un solo estrato elástico y homogéneo sin amortiguamiento. Como se observa, la FTT posee amplitudes infinitas en frecuencias iguales a $\pi/2 + n\pi$. Si se consideran distintos niveles de amortiguamiento, el suelo deja de tener amplitudes infinitas y se convierten en máximos para las mismas frecuencias (Figura 2.3).

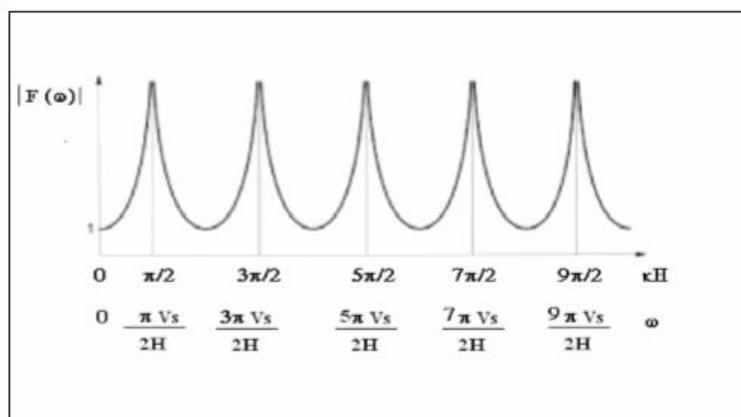


Figura 2.2. Función de Transferencia de un suelo uniforme sobre sustrato rocoso sin amortiguamiento. (Fuente: Trigo, 2007)

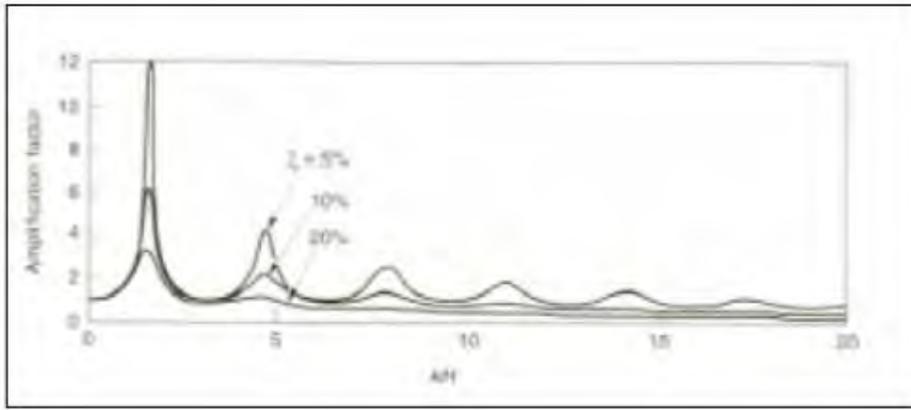


Figura 2.3. Función de transferencia de un suelo uniforme sobre sustrato rocoso para distintos niveles de amortiguamiento. (Fuente: Trigo, 2007)

Las frecuencias a las que se dan estos máximos locales se conocen como frecuencias naturales del suelo y dependen de la velocidad de onda S y del espesor de la capa de sedimentos H, según,

$$\omega_n = \frac{\pi}{2} \frac{V_s}{H} + n\pi \quad \text{con } n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (2.7)$$

La figura 2.4 presenta los movimientos del suelo en sus distintos modos de vibración para las frecuencias de la ecuación 2.7.

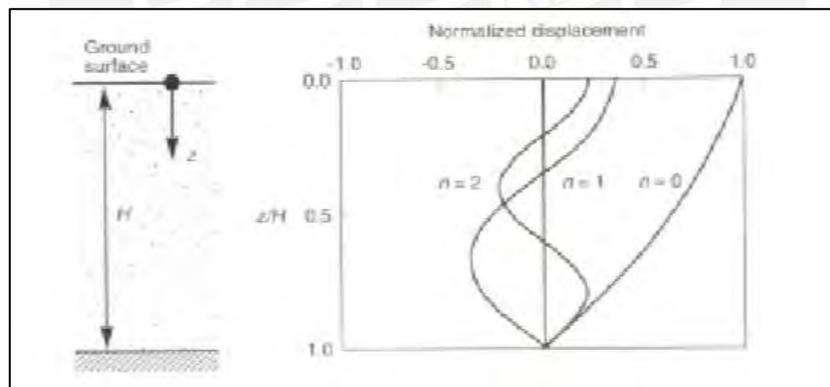


Figura 2.4. Movimiento del suelo para distintos modos de vibración ($n=0$, $n=1$, $n=2$) (Fuente: Trigo, 2007)

En este caso especial, la frecuencia fundamental es la frecuencia más baja, $\omega_0 = \pi V_s / 2H$, cuya inversa corresponde con el periodo predominante del suelo (Ecuación 2.4). En ese sentido, el periodo fundamental del suelo proporciona el armónico predominante del movimiento.

b. Funciones de Transferencia Empírica (FTE)

Las FTEs se obtienen de métodos empíricos que utilizan registros sísmicos o ruido ambiental, entre ellos se encuentran la técnica del Cociente Espectral H/V (Nakamura, 1989) y el método del Cociente Espectral estándar o SSR (Borcherdt, 1970). Si existe un alto contraste de impedancias entre suelo-roca, el periodo fundamental del suelo se visualiza claramente en la gráfica espectral. Los suelos que no son homogéneos y que contienen tipologías variadas o más de un estrato superficial poseen funciones de transferencia menos definidas. Estas gráficas deben de interpretarse con más detenimiento y de manera integral. La figura 2.5 muestra las FTEs para tres puntos de registro en la ciudad de México con los sismos de 1985 y 1989 utilizando el método SSR. La diferencia entre gráficas se debe a que cada una se tomó en zonas con diferente tipo de suelo.

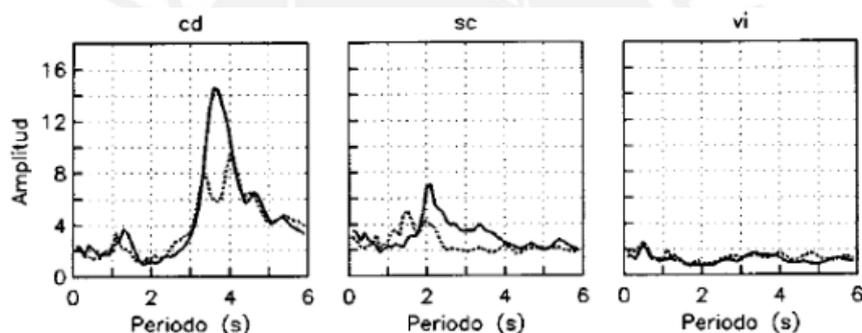


Figura 2.5. Funciones de Transferencia para tres sitios en la Ciudad de México con los sismos de 1985 (línea continua) y el de 1989. (Fuente: Diario Oficial de la Federación, 2014)

2.1.3. Amplificación Sísmica

La amplificación del movimiento sísmico es causada de dos formas: Amplificación geométrica y dinámica (Rodríguez, 2015).

El contraste de impedancia (I_c) entre dos suelos en contacto directo genera la amplificación geométrica. Para el caso de un suelo sedimentario que suprayace sobre el basamento rocoso, el contraste de impedancia puede expresarse de la siguiente forma:

$$I_C = \frac{\rho_B \cdot V_B}{\rho_S \cdot V_S} \quad \text{con } V_B > V_S \dots(2.9)$$

Donde B es el basamento rocoso; S, el suelo sedimentario; ρ , la densidad y V, la velocidad de onda de corte S. El contraste es mayor para suelos constituidos por materiales más jóvenes y menos consolidados.

Cuando las frecuencias predominantes de las ondas sísmicas que llegan al sustrato rocoso se asemejan a la frecuencia fundamental de los depósitos sedimentarios se produce el efecto de resonancia. Este efecto causa una significativa amplificación de la onda sísmica conocida como amplificación dinámica.

2.2. La Dinámica de suelos en los códigos de diseño sísmico

El comportamiento dinámico del suelo se define en función a sus propiedades dinámicas. Los códigos de diseño sismo resistente se basan en estas propiedades para incorporar los efectos del suelo en el diseño sísmico. Actualmente, los códigos se basan en la velocidad de onda de Corte (V_s) de los 30 metros superficiales. Su fundamento considera que a esta profundidad la compacidad y la presión del suelo hacen que dinámicamente se comporte como roca (Boore, 2004).

En la determinación de las propiedades dinámicas del suelo se utilizan métodos teóricos (numéricos y analíticos) y experimentales. Los métodos experimentales son los de mayor aplicación y extensión, debido a su practicidad. Estos se basan en registros sísmicos (fuertes o débiles) o en registros de vibración ambiental (Chávez–García, 2014).

Entre los métodos experimentales con registros sísmicos están el Método Razón Espectral Estándar (SSR) (Borcherdt, 1970) y el Método de Cociente Espectral H/V (HVSR) (Lermo y Chávez-García, 1993). Estos métodos tienen mayor confiabilidad que los de vibración ambiental porque al utilizar registros sísmicos toman en cuenta los efectos no lineales que podría presentar el suelo en movimientos de mayor intensidad. Sin embargo, su aplicación se ve restringida a lugares con redes de estaciones acelerográficas densas y a la vez con una alta sismicidad, situación que típicamente no abunda y limita la utilización estos métodos. Por otro lado, los métodos de vibración ambiental, donde destaca el Método del Cociente Espectral H/V (Nakamura, 1989),

tienen la ventaja de poder aplicarse a cualquier hora del día de forma práctica, flexible y económica (Chávez-García y Montalva, 2014).

2.3. El Método del Cociente Espectral H/V

El método del cociente espectral H/V fue introducido por Nogoshi e Igarashi (1971) y revisado por Nakamura (1989) para estimar la función de transferencia empírica del suelo con registros de ruido ambiental. Posteriormente, Lermo y Chavez-García (1993) adaptaron la técnica para registros sísmicos.

El método consiste en obtener el cociente espectral de las componentes horizontal y vertical de los registros sea de ruido ambiental o de sismos en una sola estación (Ecuación 2.10).

$$T = \frac{H(f)}{V(f)} \dots (2.10)$$

donde T es la función de transferencia y H (f) y V (f), las componentes horizontal y vertical de la señal en el dominio de la frecuencia.

Cuando las ondas arriban desde la fuente sísmica a los depósitos sedimentarios con un ángulo de incidencia próximo a 90 grados (incidencia vertical), la componente horizontal de un registro en la superficie contiene principalmente ondas S y la vertical, ondas P (Langston, 1979). El movimiento vertical no es amplificado por los efectos del sitio, ya que la estratigrafía del suelo no presenta contrastes de impedancia significativos para las ondas P. Por lo tanto, la componente vertical de un registro sísmico contiene fundamentalmente información espectral de la fuente y la trayectoria de las ondas sísmicas (Chávez-García y Montalva, 2014). Para los casos en los que el ángulo de incidencia de las ondas sísmicas no es vertical, los registros presentan además ondas superficiales que hacen que el movimiento vertical ya no contenga únicamente información espectral de la fuente y la trayectoria de ondas.

Nakamura considera que las vibraciones ambientales contienen ondas internas y superficiales (principalmente ondas Rayleigh). Los efectos del suelo se expresan mediante el cociente espectral de las componentes horizontales,

$$FT_H = \frac{H_f}{H_b} \quad (2.11)$$

Donde H_f es el espectro de Fourier horizontal en la superficie y H_b , el espectro de Fourier horizontal en el sustrato o basamento rocoso. H_f y H_b contienen ondas superficiales Rayleigh; por ello, la función de transferencia de la expresión 2.11 no representa adecuadamente los efectos del suelo.

Debido a que los efectos del suelo no amplifican el movimiento vertical, el cociente espectral (FT_v) de la componente vertical en superficie (V_s) y la componente vertical en el basamento rocoso (V_b) refleja el contenido de las ondas Rayleigh existentes en los registros superficiales (Ecuación 2.12).

$$FT_v = \frac{V_s}{V_b} \quad (2.12)$$

Si se asume que las componentes vertical y horizontal de las ondas Rayleigh tienen el mismo valor (elipticidad unitaria), se puede utilizar el cociente (2.11)/ (2.12) para eliminar el efecto de estas ondas en la función de transferencia. Por lo tanto, la amplificación del suelo queda expresada de la siguiente manera:

$$FT = \frac{FT_H}{FT_v} \quad (2.13)$$

Donde FT_H y FT_v son las funciones de transferencia horizontal y vertical, respectivamente. Reemplazando las ecuaciones (2.11) y (2.12) en (2.13), se obtiene:

$$FT = \frac{FT_H}{FT_v} = \frac{H_s/H_b}{V_s/V_b} = \frac{H_s}{V_s} \cdot \frac{1}{H_b/V_b} \quad (2.14)$$

Nakamura sustentó con perforaciones al basamento rocoso (Figura 2.6) que la relación espectral entre las componentes horizontal y vertical en roca, H_b y V_b , era aproximadamente 1 en las frecuencias de interés en ingeniería (0.1-10 Hz). Por lo tanto, de la ecuación 2.14, se demuestra que la función de transferencia empírica del suelo puede obtenerse con el cociente espectral H/V en superficie (Ecuación 2.15). Finalmente, el periodo del suelo pertenece al valor pico de esta función espectral.

$$FT = \frac{H_s}{V_s} \quad (2.15)$$

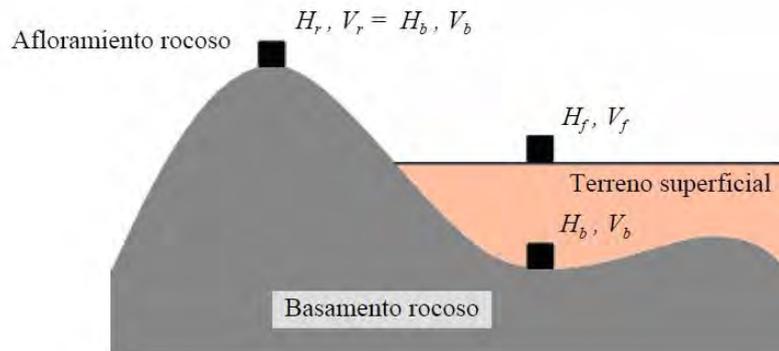


Figura 2.6. Estructura geológica típica de una cuenca sedimentaria (Fuente: Cuadra, 2007).

En resumen, el procedimiento de aplicación del Método del Cociente espectral H/V para el caso de ruido ambiental se presenta a continuación,

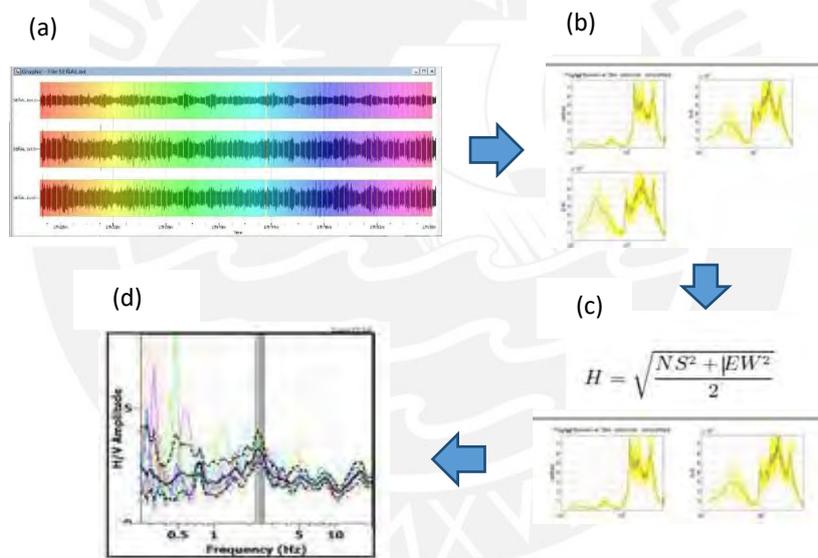


Figura 2.7. Método de cociente espectral H/V (a) Visualización y ventaneo de la señal en sus tres componentes (H_{NS}, H_{EO}, V) (b) Cálculo de espectros suavizados (c) Cálculo de H con el promedio de los espectros horizontales NS y EO. (d) Cálculo del cociente espectral H/V.

Según investigaciones recientes, el método H/V ofrece buenos resultados en la estimación de la función de transferencia del suelo, principalmente en el contenido de frecuencias. La aplicación práctica y de bajo costo del método ha permitido que se utilice extensamente en estudios de microzonificación sísmica. Además, la técnica es versátil y flexible, ya que una sola estación de registro es suficiente para brindar resultados y

pueden obtenerse a cualquier hora y lugar. Ejemplos de su uso en microzonificación sísmica se encuentran en diversos sitios del mundo como Lima Metropolitana, Perú (CISMID, 2004), Zamora Michoacán, México (Vásquez et al, 2005), Barcelona, España (Alfaro et al, 1999), Fateh Jang, Pakistan (Qadri et al, 2015), Japón (Yamanazaki et al, 1997), entre otras.



3. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPÍRICAS EN LIMA Y CALLAO

3.1. Estaciones de registro sísmico

Los datos utilizados corresponden a registros sísmicos en las estaciones de Lima de la red acelerográfica del CISMID e IGP. Las estaciones sísmicas suman un total de 38, entre ellas 30 pertenecen al CISMID, 7 al IGP y 1 a la PUCP, ubicadas según lo detalla la Figura 3.1 y Tabla 3.1.

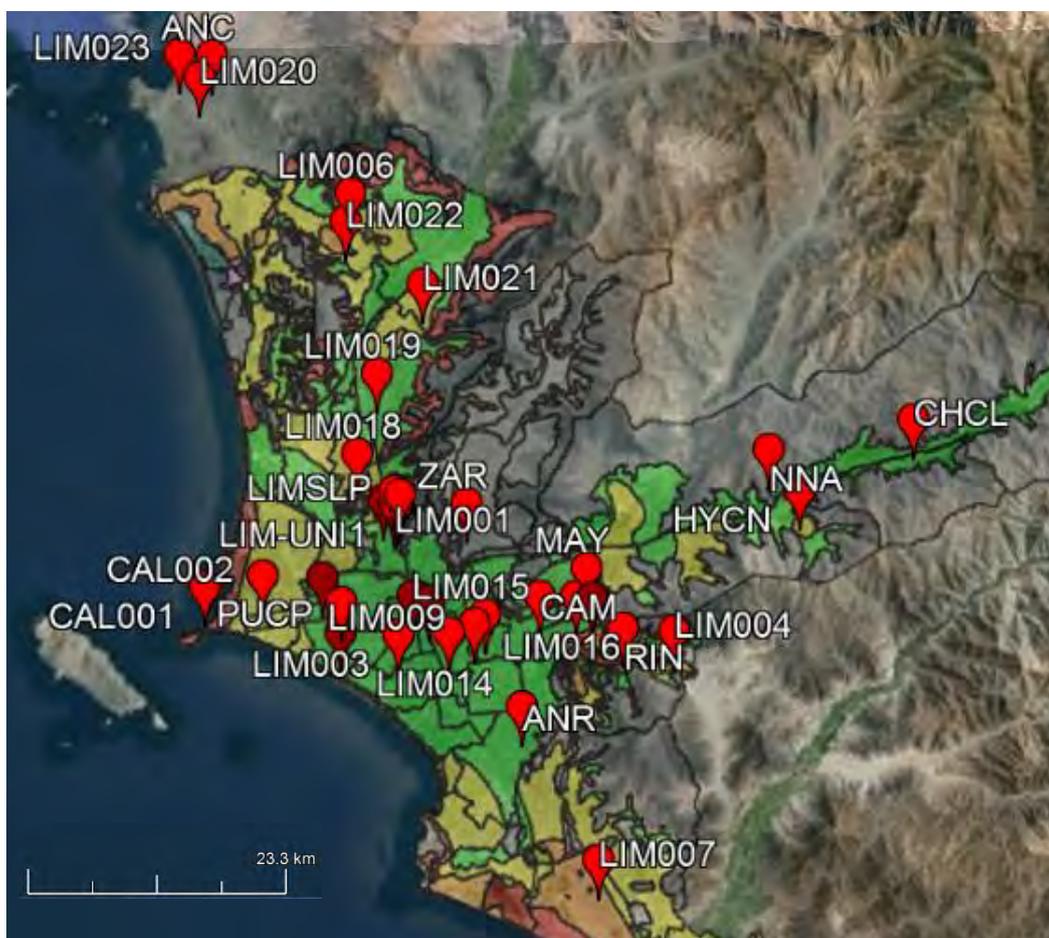


Figura 3.1. Distribución espacial de las estaciones sísmicas en Lima (Adaptado en Google Earth, 2018)

Tabla 3.1. Estaciones sísmicas en la red acelerográfica de la ciudad de Lima

Código	Estaciones	Responsable	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Zonificación
ANC	Ancón	IGP	-11.777	-77.150	47	NZ
ANR	Surco - Sunedu	IGP	-12.130	-76.980	237	I
HYCN	Ate - Huaycán	IGP	-12.010	-76.830	560	II
MAY	Ate - Mayorazgo	IGP	-12.055	-76.944	315	II
CAM	La Molina - Camacho	IGP	-12.070	-76.970	274	I
PUCP	San Miguel - PUCP	PUCP	-12.073	-77.080	70	I
RIN	La Molina - Rinconada	IGP	-12.090	-76.920	270	II
NNA	Lurigancho - Ñaña	IGP	-11.991	-76.844	575	R
ZAR	San Juan de Lurigancho - Zárate	CISMID	-12.020	-77.010	175	NZ
CAL001	Callao - Chucuito	CISMID	-12.070	-77.160	39	IV
CAL002	Callao - Bellavista	CISMID	-12.060	-77.120	50	II
LIMSLP	Independencia -Cerro UNI	CISMID	-12.015	-77.047	134	R
LIMUNI1	Rimac - Estructuras UNI	CISMID	-12.020	-77.050	127	I
LIMUNI2	Rimac - FIGMM UNI	CISMID	-12.020	-77.048	127	I
LIMUNI4	Rimac - Hidráulica UNI	CISMID	-12.020	-77.050	109	I
LIM001	Rimac - Alva Hurtado	CISMID	-12.010	-77.050	115	I
LIM002	Rimac - FIC UNI	CISMID	-12.022	-77.049	146	I
LIM003	San Isidro - CIP	CISMID	-12.090	-77.050	116	I
LIM004	La Molina - Casa Piqué	CISMID	-12.090	-76.900	350	II
LIM005	Cercada de Lima - Reserva	CISMID	-12.073	-77.031	130	I
LIM006	Puente Piedra	CISMID	-11.850	-77.070	194	II
LIM007	Villa El Salvador	CISMID	-12.210	-76.940	167	III
LIM008	San Martín de Porres - Bomberos	CISMID	-12.020	-77.060	102	I
LIM009	San Borja - Sencico	CISMID	-12.090	-77.010	100	I
LIM010	La Molina - USMP	CISMID	-12.070	-76.940	270	II
LIM012	San Miguel - UNFV	CISMID	-12.090	-77.080	59	I
LIM013	Cercado de Lima - UNMSM	CISMID	-12.060	-77.090	60	I
LIM014	La Victoria - CENEPRED	CISMID	-12.090	-77.020	134	I
LIM015	San Luis - INICTEL	CISMID	-12.080	-77.000	175	I
LIM016	La Molina - IMCA	CISMID	-12.070	-76.950	250	II
LIM017	Surco – URP	CISMID	-12.132	-76.979	235	I
LIM018	Los Olivos - Municipalidad	CISMID	-11.993	-77.070	79	I
LIM019	Comas - Municipalidad	CISMID	-11.949	-77.059	189	I
LIM020	Santa Rosa	CISMID	-11.788	-77.157	57	NZ
LIM021	Carabayllo - Municipalidad	CISMID	-11.901	-77.034	189	II
LIM022	Puente Piedra - Municipalidad	CISMID	-11.867	-77.076	219	II
LIM023	ANCÓN CISMID	CISMID	-11.776	-77.168	27	NZ
LIM024	Independencia - Municipalidad	CISMID	-11.997	-77.054	89	I

En cada estación acelerográfica, la función de transferencia empírica se obtuvo con el promedio de las FTEs de registros sísmicos de temblores fuertes y débiles utilizando el método del cociente espectral H/V (Figura 3.2). Se utilizó la FTE promedio, debido a que la amplificación obtenida es razonablemente estable de sismo a sismo, sin importar su magnitud, distancia epicentral o azimut de incidencia (Reinoso y Ordaz, 1999).

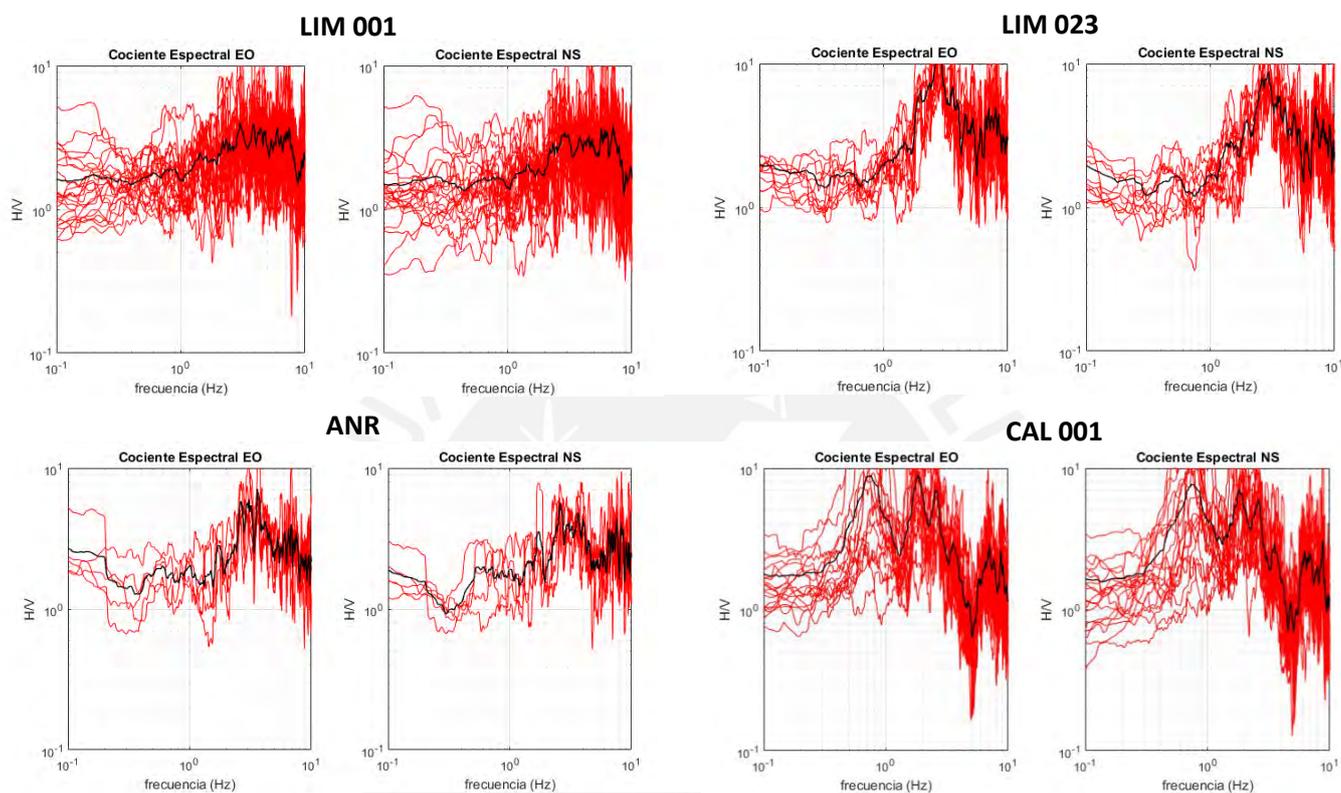


Figura 3.2. Funciones de transferencia empírica EO y NS en las estaciones acelerográficas LIM 001, LIM 023, ANR y CAL 001.

El procesamiento se realizó en un código implementado en el programa MATLAB y el tratamiento de las señales sísmicas incluyó técnicas de filtrado, ventaneo, re muestreo y suavizado.

El filtrado se realizó con un filtro butterworth de 4 polos pasabanda entre 0.1 y 10 Hz. Para obtener las funciones de transferencia, las señales se cortaron con ventanas de 40.96 segundos desde la llegada de la onda de corte S. En los casos en los que la duración del registro desde la llegada de las ondas S era menor a 40.96 segundos, el registro se llenaba de ceros o se incluían en la ventana las ondas P.

Los terremotos ocurridos en los años 60 y 70 se registraron con un muestreo de 50 Hz y, actualmente, los sismos son registrados con muestreos de 100 y 200 Hz. En ese sentido, los sismos utilizados en las estaciones de análisis fueron remuestreados a 50 Hz con el objetivo de no alterar la información de los sismos antiguos que son de mayor importancia. Finalmente, los espectros y cocientes espectrales resultantes se suavizaron mediante la técnica del promedio móvil agrupando los datos en intervalos de 35 puntos.

La Figura 3.3 muestra las funciones de transferencia empíricas calculadas en las 38 estaciones de Lima agrupadas según su ubicación en la microzonificación sísmica actual.

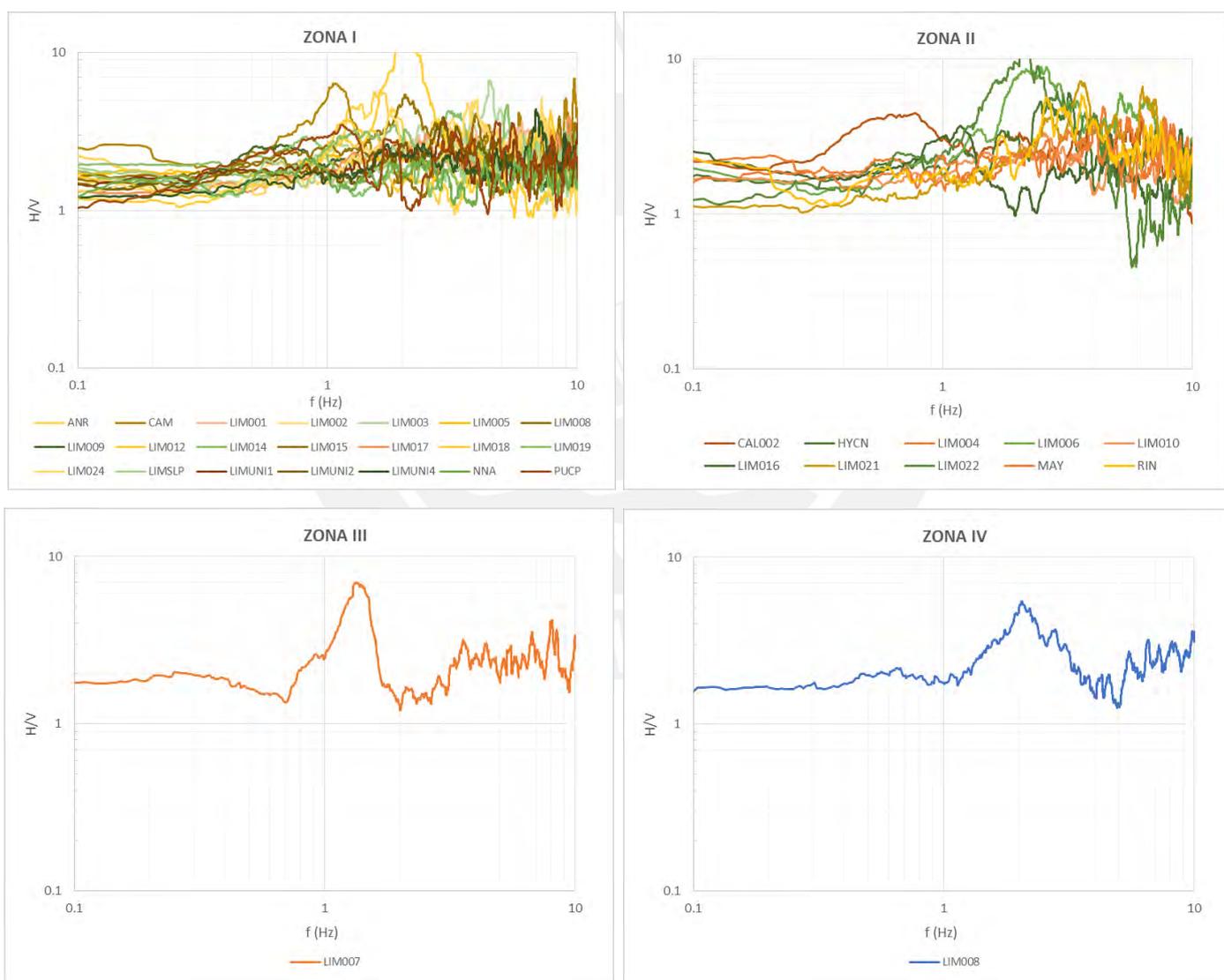


Figura 3.3. Funciones de Transferencia Empírica de las estaciones acelerográficas de Lima agrupadas según la microzonificación elaborada por CISMID (2016).

Como puede observarse en las gráficas de la figura 3.3, las zonas propuestas por la microzonificación de CISMID (2016) no agrupan las FTEs obtenidas de tal forma que posean los mismos picos o formas espectrales.

3.2. Estaciones de ruido ambiental

Las FTEs con ruido ambiental se obtuvieron con registros de campo utilizando sismómetros de banda ancha en distintos puntos de la ciudad de Lima. El equipo utilizado fue un sismómetro GURALP de tres componentes, modelo CMG-6TD-001, serial TG517/A841 de sensibilidad 2×1200 V/m/s con sensor y digitalizador integrados en un solo dispositivo, diseñado para operación autónoma. Las frecuencias abarcadas por el sismómetro comprendían un ancho de banda entre 0.03 y 100 Hz con un muestreo de 100 Hz y resolución de 16 bits.



Figura 3.4. Sismómetro GURALP para registrar vibraciones ambientales.

Mientras se realizó el registro del ruido ambiental, el sismómetro fue conectado a un computador, en el cual podían visualizarse las señales en sus tres componentes (EO, NS y Z) mediante el software SCREAM. Posteriormente, los registros fueron procesados en el programa de licencia abierta Geopsy® (www.geopsy.org). Este software fue creado en el año 2003 por el proyecto SESAME (Site EffectS assessment using Ambient Excitations) enfocado en desarrollar y estandarizar los métodos de ruido ambiental.

En cada lugar de registro, el ruido ambiental se midió por cerca de 30 minutos, verificándose que el área estuviera libre de cualquier fuente de alteración directa. Los puntos de registro se establecieron en función a la microzonificación sísmica actualizada de la ciudad (Véase Figura 3.5).

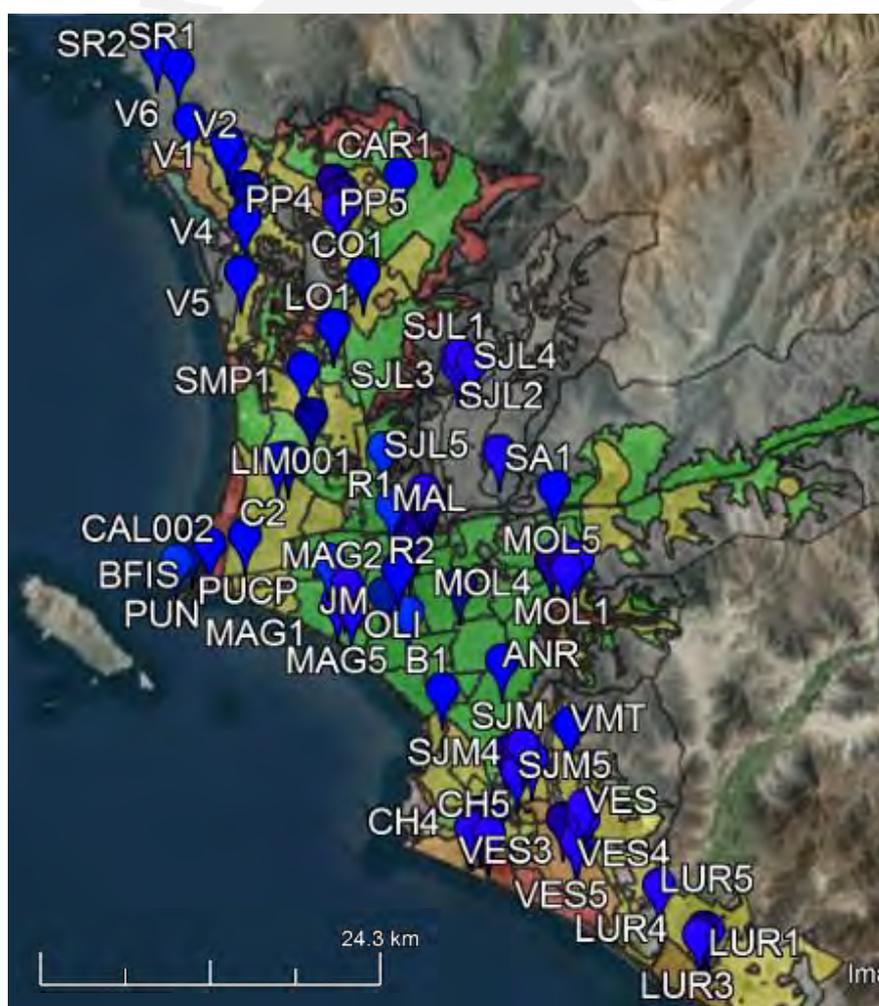


Figura 3.5. Distribución espacial de las estaciones de registro de ruido ambiental en Lima (Adaptado en Google Earth, 2018)

Tabla 3.2. Estaciones de registro de ruido ambiental realizados entre los años 2015 y 2017.

Código	Estaciones	Latitud	Longitud	Zonificación
CAL001	Callao - Chucuito	-12.070	-77.160	IV
CAL002	Callao - Bellavista	-12.060	-77.120	II
LIM001	Rimac - Alva Hurtado	-12.010	-77.050	I
LIM003	San Isidro - CIP	-12.090	-77.050	I
LIM009	San Borja - Sencico	-12.090	-77.010	I
PUCP	Pueblo Libre - PUCP	-12.073	-77.080	I
ANR	Surco - Sunedu	-12.130	-76.980	I
PUN	Callao - La Punta	-12.074	-77.164	IV
BFIS	Callao - Barrio Fiscal	-12.065	-77.145	IV
B1	Barranco - Plaza Butters	-12.143	-77.016	II
CAR1	Carabayllo	-11.864	-77.040	II
C1	Callao	-12.018	-77.102	II
C2	Callao - AIJCH	-12.019	-77.108	II
CO1	Comas	-11.9176	-77.061	II
MAL	Cercada de Lima - Las Malvinas	-12.0435	-77.044	I
JM1	Jesus María – H. Rebaglati	-12.079	-77.040	I
LO1	Los Olivos	-11.946	-77.077	I
SA1	Santa Anita	-12.034	-76.954	I
SR1	Santa Rosa	-11.803	-77.165	NZ
SR2	Santa Rosa	-11.795	-77.177	NZ
OLI	San Isidro - El Olivar	-12.102	-77.035	I
SMP1	San Martin de Porres	-11.969	-77.094	II
SMP2	San Martin de Porres	-11.994	-77.089	I
V1	Ventanilla	-11.846	-77.137	II
V2	Ventanilla	-11.852	-77.135	II
V3	Ventanilla	-11.870	-77.126	II
V4	Ventanilla	-11.888	-77.127	I
V5	Ventanilla	-11.917	-77.129	II
V6	Ventanilla	-11.833	-77.158	III
VMT	Villa María del Triunfo	-12.162	-76.945	II

Tabla 3.3. Estaciones de registro de ruido ambiental elaborados por SENCICO en 2017.

Código	Estaciones	Latitud	Longitud	Zonificación
CL1	Cercado de Lima - P1	-12.058	-77.036	I
CL2	Cercado de Lima – P2	-12.055	-77.037	I
CL3	Cercado de Lima – P3	-12.051	-77.038	I
CL4	Cercado de Lima – P4	-12.051	-77.034	I
CL5	Cercado de Lima – P5	-12.058	-77.030	I
CH1	Chorrillos – P1	-12.217	-76.995	III
CH2	Chorrillos – P2	-12.210	-76.988	IV
CH3	Chorrillos – P3	-12.211	-76.996	IV
CH4	Chorrillos – P4	-12.219	-77.000	III
CH5	Chorrillos – P5	-12.221	-76.990	IV
MOL1	La Molina – P1	-12.072	-76.941	II
MOL2	La Molina – P2	-12.073	-76.949	III
MOL3	La Molina – P3	-12.074	-76.956	II
MOL4	La Molina – P4	-12.069	-76.949	II
MOL5	La Molina – P5	-12.078	-76.947	IV
MAG2	Magdalena – P2	-12.087	-77.069	I
MAG3	Magdalena – P3	-12.090	-77.070	I
MAG4	Magdalena – P4	-12.092	-77.067	I
MAG5	Magdalena – P5	-12.099	-77.066	I
PP1	Puente Piedra – P1	-11.867	-77.078	II
PP2	Puente Piedra – P2	-11.872	-77.073	II
PP3	Puente Piedra – P3	-11.875	-77.074	II
PP4	Puente Piedra – P4	-11.881	-77.071	II
PP5	Puente Piedra – P5	-11.883	-77.075	II
SJL1	San Juan de Lurigancho – P1	-11.962	-77.006	II
SJL2	San Juan de Lurigancho – P2	-11.968	-77.007	II
SJL3	San Juan de Lurigancho – P3	-11.966	-77.003	II
SJL4	San Juan de Lurigancho – P4	-11.966	-76.999	II
SJL5	San Juan de Lurigancho – P5	-12.015	-76.984	III
SJM1	San Juan de Miraflores – P1	-12.173	-76.971	II
SJM2	San Juan de Miraflores – P2	-12.177	-76.980	I
SJM3	San Juan de Miraflores – P3	-12.181	-76.975	I
SJM4	San Juan de Miraflores – P4	-12.181	-76.966	III
SJM5	San Juan de Miraflores – P5	-12.188	-76.974	II
R1	Rímac – P1	-12.036	-77.026	I
R2	Rímac – P2	-12.039	-77.025	I
R3	Rímac – P3	-12.040	-77.027	I
R4	Rímac – P4	-12.042	-77.026	I
R5	Rímac – P5	-12.042	-77.023	I
VES1	Villa El Salvador – P1	-12.207	-76.937	III
VES2	Villa El Salvador – P2	-12.214	-76.949	III
VES5	Villa El Salvador – P5	-12.225	-76.941	III

La señal obtenida en cada estación de registro se cargó en GEOPSY en sus tres componentes (EO, NS, Z). La Figura 3.6 muestra, a manera de ejemplo, el registro realizado en la estación PUCP.

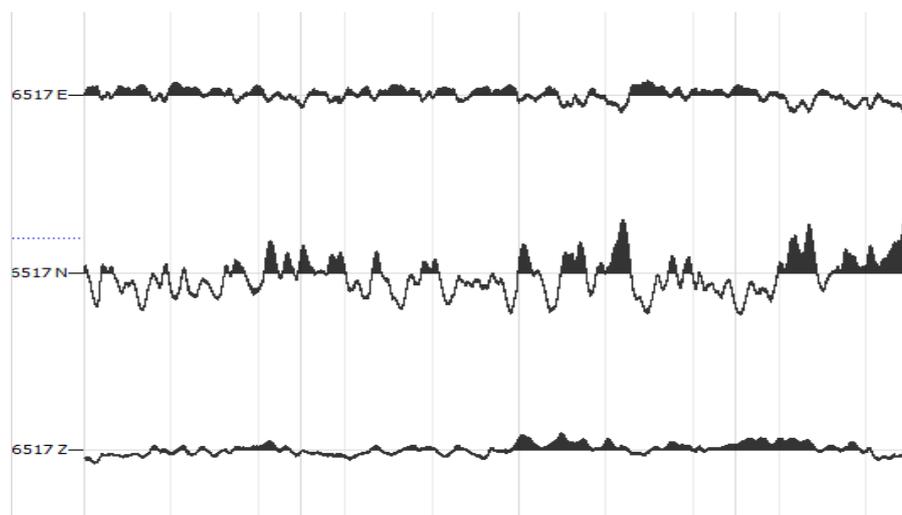


Figura 3.6. Registro de ruido ambiental en la estación PUCP en las componentes EO, NS y Z.

Al ruido ambiental se le aplicó un filtro butterworth pasabanda de 4 polos en el intervalo 0.1 – 10 Hz, debido al interés de evaluar estructuras civiles en este intervalo de frecuencias. La Figura 3.7 muestra el registro filtrado en la estación PUCP. Se aprecia el cambio en la señal antes y después del filtrado.

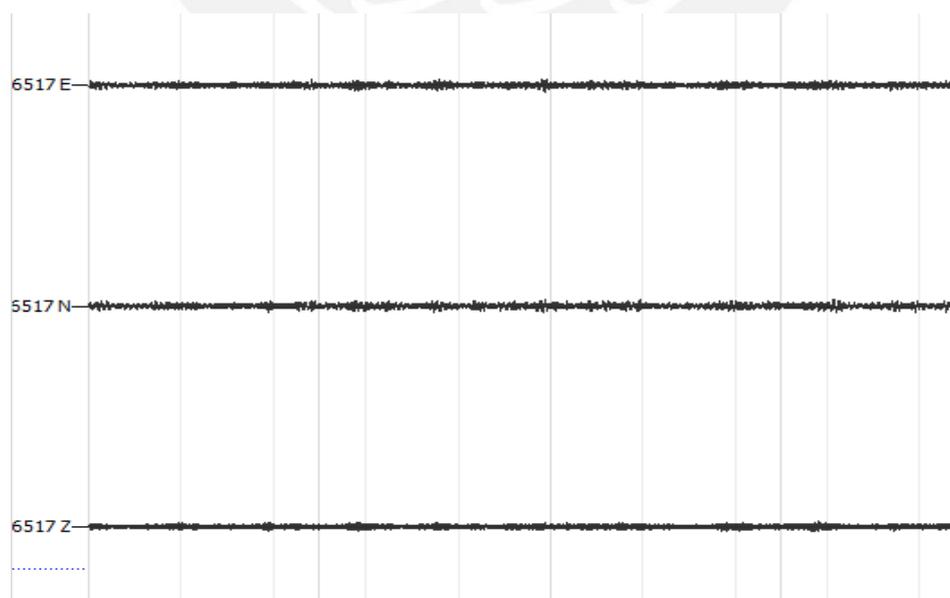


Figura 3.7. Registro filtrado en la estación PUCP en el intervalo 0.1 – 10 Hz.

Para obtener la FTE, se utilizaron ventanas de 40.96 segundos con un traslape de 50% a lo largo del registro. Se estableció el método de la media cuadrática para el promedio de las componentes horizontales.

La Figura 3.8 muestra la FTE promedio y su desviación estándar en la estación PUCP.

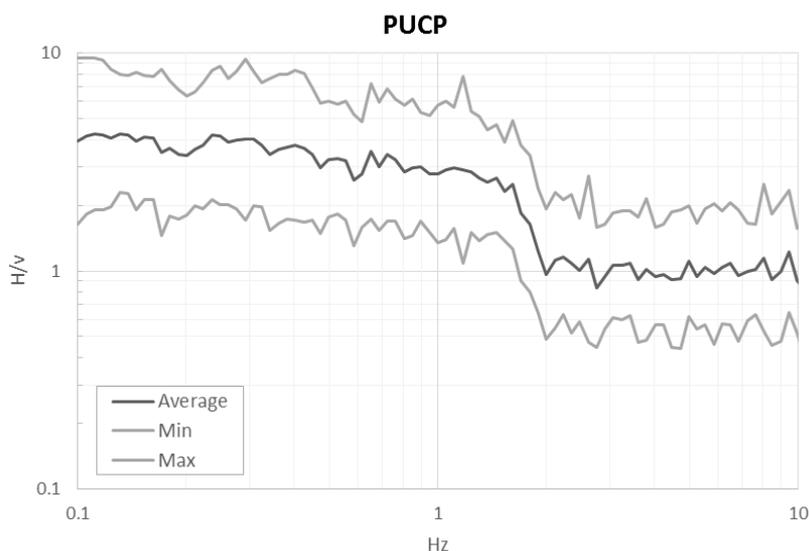


Figura 3.8. FTE con ruido ambiental en la estación PUCP.

La Figura 3.9 muestra las funciones de transferencia empíricas obtenidas en las 100 estaciones de registro con ruido ambiental agrupadas por zonas según su ubicación en la microzonificación sísmica actual. Como se observa, esta agrupación de FTEs no presenta ninguna tendencia o similitud en forma espectral ni frecuencias predominantes.

Por otro lado, las curvas presentan el efecto de oleaje oceánico en el intervalo de frecuencias 0.1 - 0.5 Hz, por ello este rango de valores aparece achurado y no se tomará en cuenta en los resultados. Es importante mencionar que 58 de estos registros fueron realizados entre los años 2015 y 2017 con equipos de la Universidad Autónoma de México (UNAM) a cargo de M.C. Javier Francisco Lermo Samaniego. Los 42 registros restantes estuvieron a cargo de SENCICO en 2017 en el marco del proyecto "Servicio de Consultoría Para la Determinación del Comportamiento Dinámico del Suelo en Función de la Velocidad de Propagación de Ondas". Estos registros se consiguieron de la base de

datos de la institución. Los 100 registros fueron procesados con los mismos criterios de tratamiento de señales.



Figura 3.9. Funciones de Transferencia Empírica de ruido ambiental en Lima agrupadas según la microzonificación elaborada por CISMID (2016).

Con el objetivo de comprobar la validez de la información provista por las FTEs obtenidas, se utilizó el método de Haskell-Thompson para calcular FTTs y confirmar un ajuste satisfactorio entre ambas curvas. La figura 3.10 muestra el caso de la estación PUCP. En la gráfica se aprecian las FTEs con sismo (color rojo), ruido ambiental (color negro) y la FTT para un modelo estratigráfico en PUCP propuesto a partir de referencias de perfiles de velocidad de onda S (Quispe et al, 2014; Ríos, 2016). Las tres curvas

presentan un pico entre 1 y 2 Hz correspondiente al conglomerado. HVSR es la FTE de mayor fiabilidad y presenta, al igual que FTT, picos en 3 y 5 Hz que corresponden a estratos superficiales.

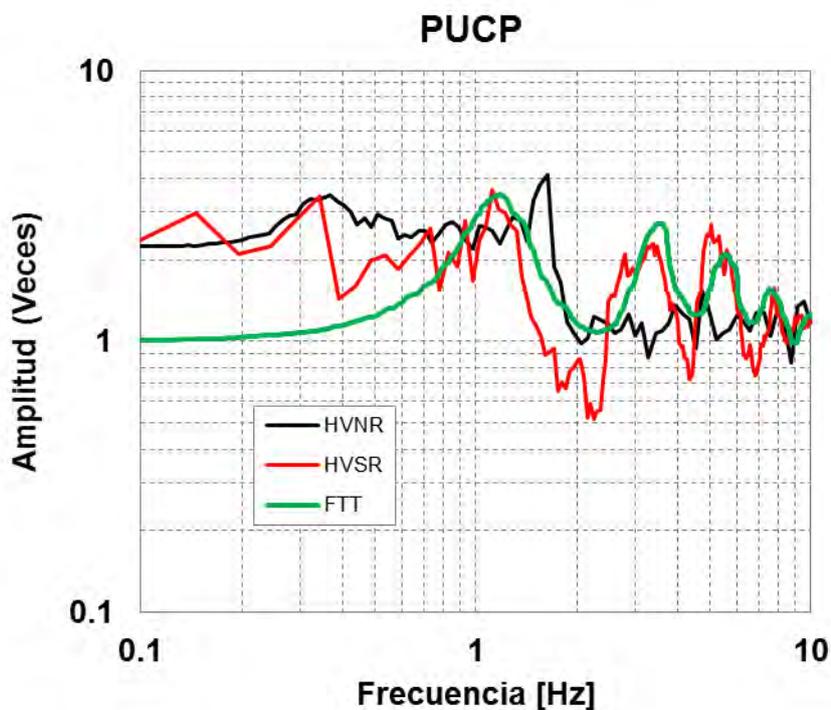


Figura 3.10. Comparación entre FTEs con registros sísmicos (HVSR), ruido ambiental (HVNR) y FTT en estación PUCP.

Asimismo, la figura 3.11 muestra una comparación entre FTEs y FTTs en las estaciones PQR, LIM001 y LIM006. Las FTTs fueron calculadas por Calderon et al (2012) a partir de perfiles de velocidad de onda S obtenidos con el método F-K. En las tres estaciones, se observa un ajuste satisfactorio tanto en la forma espectral como en los picos predominantes de ambas funciones de transferencia. Debe tomarse en cuenta que las FTTs de Calderón consideran en el eje de las abscisas el periodo (T), mientras que las FTEs de este trabajo, la frecuencia (f).

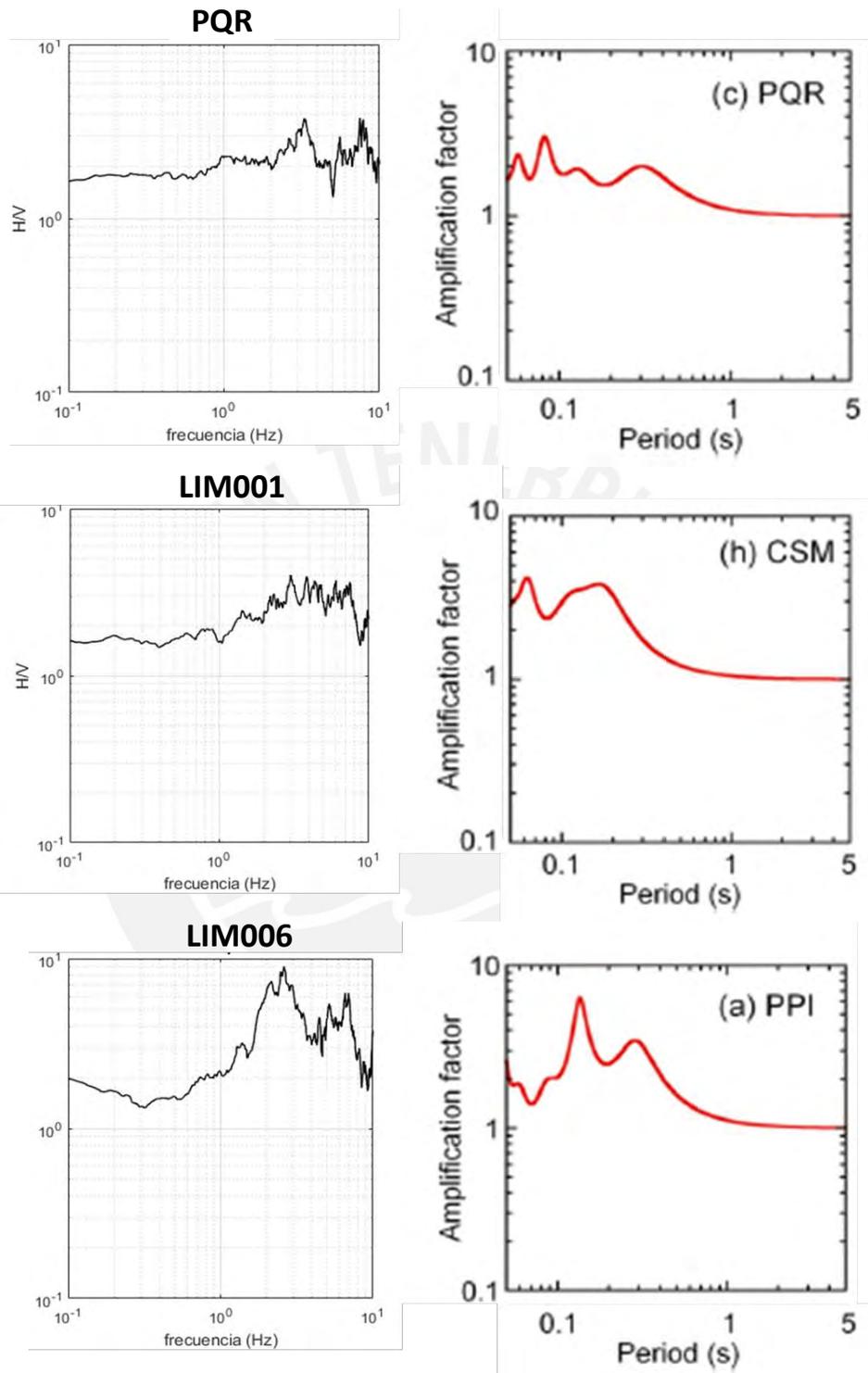


Figura 3.11. Comparación entre FTEs y FTTs en estaciones PQR, LIM001 y LIM006.

4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO EN LIMA Y CALLAO

4.1. Antecedentes

4.1.1. Estudios de Peligro Sísmico

Diversos autores han realizado estudios de peligro sísmico en el territorio peruano (Casaverde y Vargas, 1980; Alva y Castillo, 1993; Bolaños y Monroy, 2004; Yamazaki et al, 2013; Tavera et al, 2014). Para edificaciones, la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente (2016) considera la evaluación del peligro sísmico probabilísticamente para un evento sísmico con periodo de retorno de 475 años. En ese sentido, la norma divide el territorio en 4 zonas como puede observarse en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Mapa de factores de zona en el Perú.
(Fuente: Norma de Diseño Sismorresistente E.030 (2016))

Cada zona brinda un valor de la aceleración máxima horizontal en suelo rígido (Z). Este valor es una fracción de la aceleración de la gravedad (Véase tabla 4.1).

Tabla 4.1. Factores de Zona.
(Fuente: Norma de Diseño Sismoresistente E.030 (2016))

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.1

4.1.2. Geología de Lima

La geología de la ciudad es el resultado de la interacción de placas. Las unidades geológicas que la conforman poseen rocas intrusivas, rocas sedimentarias y depósitos cuaternarios aluviales, coluviales, eólicos y marinos (Figura 4.2). En su mayoría, Lima se asienta sobre depósitos aluviales. Los ríos Rímac y Chillón formaron conos de deyección producto de la erosión de las cordilleras andinas y el transporte de sedimentos.

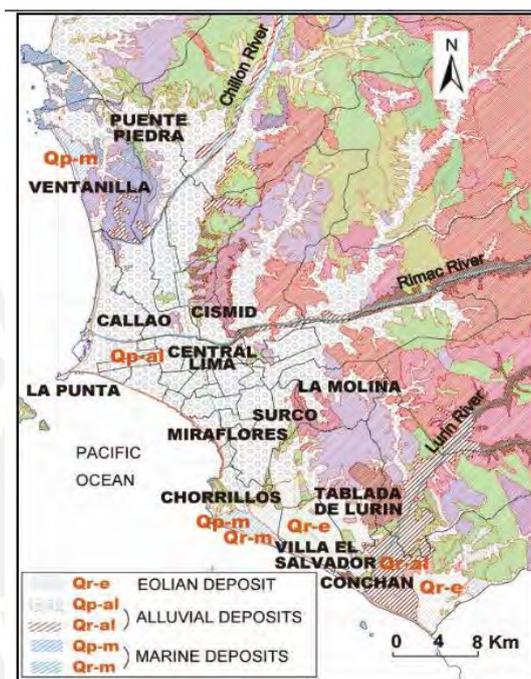


Figura 4.2. Mapa geológico de la Ciudad de Lima.
(Fuente: Palacios et al. (1992); Martínez y Porturas (1975))

4.1.3. Geomorfología de Lima

Para Le Roux et al (2000), la ciudad de Lima puede dividirse principalmente en cuatro elementos geomorfológicos: la Cordillera de los Andes, la planicie costera, los promontorios costeros y las llanuras de inundación aluviales del Holoceno. Villacorta et al. (2015) propone una agrupación de las unidades geomorfológicas según se presentan en la Figura 4.3.

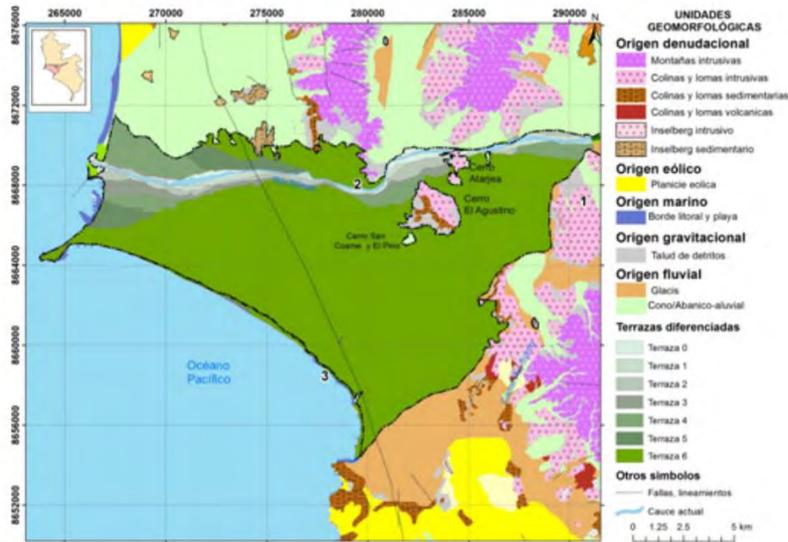


Figura 4.3. Unidades Geomorfológicas en el área de estudio. (Fuente: Villacorta et al, 2015))

4.1.4. Geotecnia del Lugar

La Figura 4.4 presenta el mapa de suelos de Lima. Este trabajo es resultado de la recopilación de información, trabajos de campo y estudios de laboratorio realizados por Martínez (1975) y CISMID (2004). Los tipos de suelo en Lima Metropolitana se clasifican por su composición. El mapa brinda información del suelo encontrado aproximadamente entre los 3 y 5 metros de profundidad (Calderón, 2012).

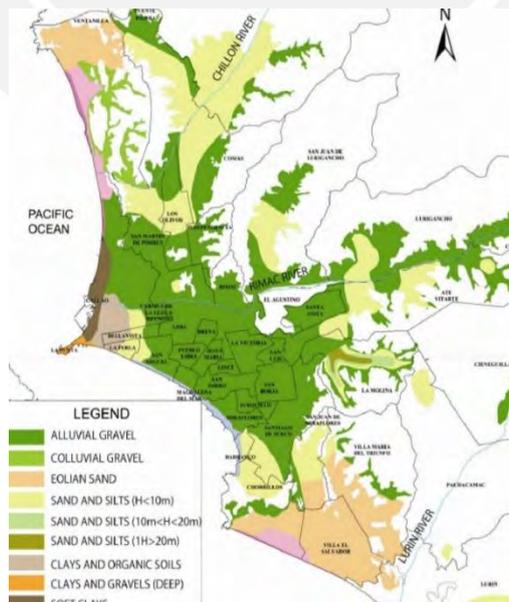


Figura 4.4. Mapa de distribución de suelos en Lima. (Fuente: CISMID, 2004)

El suelo más abundante en la ciudad de Lima (color verde) se clasifica como grava mal gradada (GP). Este conglomerado presenta gravas de 20 a 50 centímetros de diámetro envueltas en una matriz de limo y arena. Además, es común observar estratos de arena fina, limo y arcilla intercalándose entre los estratos de conglomerado.

4.1.5. Profundidad al Basamento Rocoso

Los trabajos de Arce (1987) y Roux (2000) permiten conocer la profundidad del basamento rocoso en Lima. Estos autores utilizaron mediciones geofísicas de resistividad eléctrica para obtener resultados. Como se muestra en la figura 4.5, las profundidades al sustrato oscilan entre los 200 y 600 metros de profundidad.

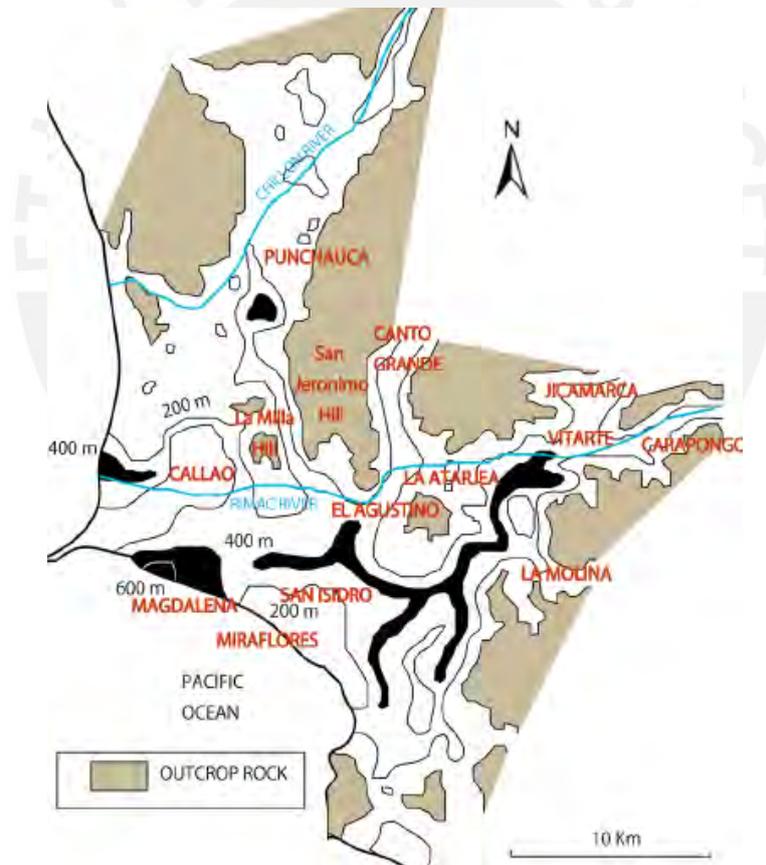


Figura 4.5. Profundidad del basamento rocoso de la Ciudad de Lima. (Fuente: Le Roux et al (2000)).

4.1.6. Microzonificación sísmica

En el año 2004, el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) realizó la microzonificación sísmica de Lima Metropolitana y Callao. El trabajo llamado “Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo de Sismo en 42 Distritos de Lima y Callao” fue fomentado por la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG) y es actualizado continuamente (CISMID, 2004; CISMID 2012; CISMID, 2016).

La microzonificación se basó en el estudio de las características dinámicas del suelo mediante la técnica del cociente espectral H/V utilizando registros de ruido ambiental. Se utilizó el periodo con el valor máximo en los sitios de registro para crear un mapa de distribución de periodos pico y un mapa de isoperiodos para Lima y Callao como lo muestra la figura 4.6.

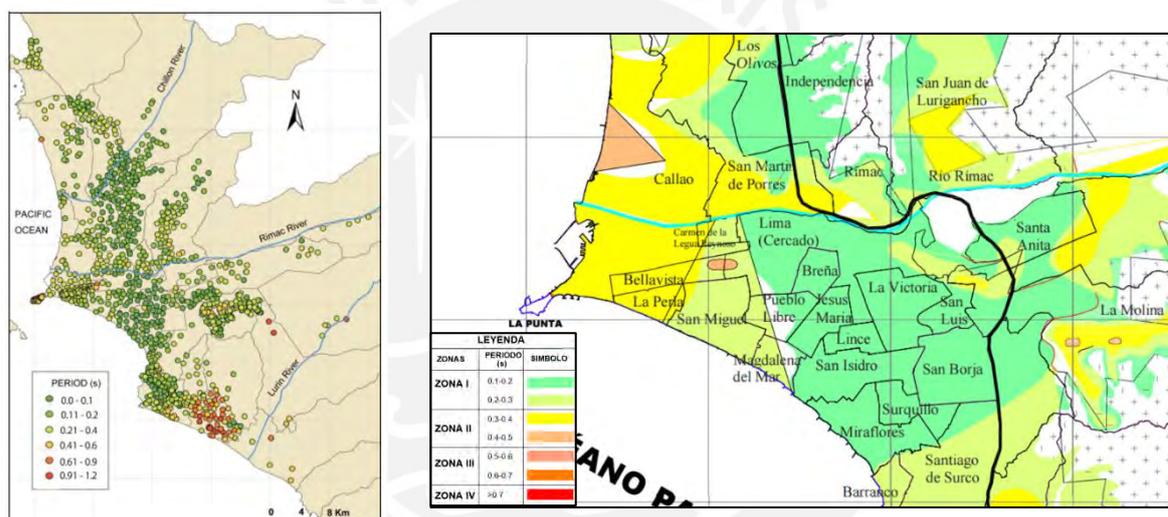


Figura 4.6. Mapa de la distribución de periodos pico (izquierda) y mapa de isoperiodos para Lima y Callao (Fuente: CISMID, 2004; CISMID, 2012)

Con la información obtenida de los resultados anteriores, CISMID propuso la microzonificación sísmica para Lima y Callao (Figura 4.7). Según Aguilar (2007), las características de cada zona son las siguientes:

- **Zona I:** Está formada por afloramientos de roca y depósitos densos de grava aluvial pertenecientes a los conos de deyección formados por el río Rímac y Chillón. El rango de periodos predominantes varía entre 0.1 y 0.3 segundos. Estos suelos clasifican como de tipo I según el código de diseño sísmico. Esta zona cubre un área extensa de la ciudad de Lima.

- **Zona II:** Está formada por estratos que varían entre 3 y 10 metros de depósitos densos de limo y arena que suprayacen sobre depósitos de grava coluvial y aluvial. El rango de periodos predominantes varía entre 0.3 y 0.5 segundos. Estos suelos clasifican como de tipo II según el código de diseño sísmico.
- **Zona III:** Está formada por depósitos sueltos y densos de arena y limo, en su mayoría de origen eólico que cubren la parte norte y sur del área metropolitana. El rango de periodos predominantes oscila entre 0.5 y 0.7 segundos. Estos suelos clasifican como de tipo III según el código de diseño sísmico.
- **Zona IV:** Está formada por depósitos densos de arena eólica suelta, arena marina saturada y suelos orgánicos. En esta zona fueron incluidos también los depósitos de grava densa y estratos de arcilla localizados en los distritos de La Punta y Callao que presentan grandes factores de amplificación. Los periodos predominantes son mayores que 0.7 segundos y clasifican como suelos tipo IV según el código de diseño sísmico.
- **Zona V:** Está formada por rellenos con profundidades de 5 a 15 metros que fueron usados como suelos de cimentación y donde serios problemas han sido reportados. En esta zona un estudio específico es requerido para evaluar su comportamiento dinámico, por lo tanto este suelo fue clasificado como de tipo V, el cual no es considerado en el código de diseño sísmico.

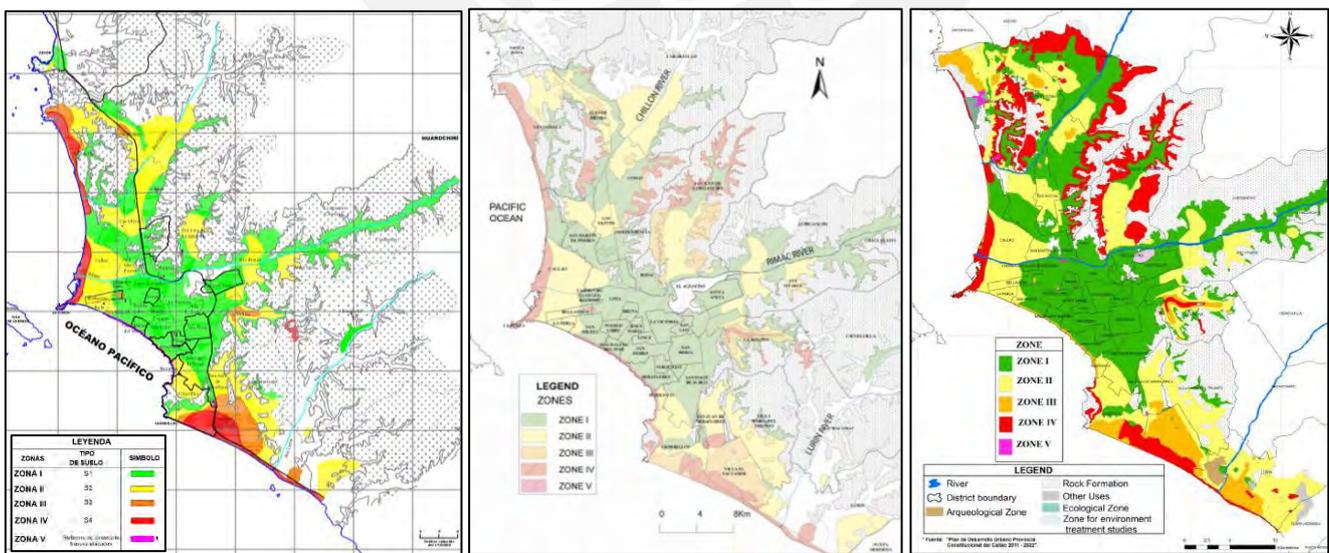


Figura 4.7. Mapas de microzonificación sísmica para Lima y Callao.
(Fuente: CISMID, 2004; CISMID, 2012; CISMID, 2016)

A pesar de que este estudio de microzonificación es el más completo realizado hasta el momento en la ciudad de Lima, tiene limitaciones tales como profundidades de excavación muy superficiales y la ausencia de métodos sísmicos para la estimación del perfil del suelo. Por lo tanto, los resultados deben de considerarse como preliminares (Calderón, 2012). Los trabajos realizados por Calderón (2012) y Quispe (2014) estiman perfiles de velocidad de onda S a mayores profundidades utilizando métodos geofísicos como el MASW, F-K, CCA y SPAC. Sin embargo, la cantidad de ensayos aún es escasa como para evaluar y complementar adecuadamente la microzonificación sísmica propuesta por CISMID.

Las FTEs definen las características dinámicas de los estratos de suelo hasta el basamento rocoso. En ese sentido, este trabajo propone utilizarlas para evaluar la dinámica del suelo en Lima y Callao, y mejorar así la microzonificación vigente.

4.2. Evaluación del comportamiento dinámico del suelo

4.2.1. Fuentes sísmicas

Para evaluar el comportamiento dinámico de los suelos en el área metropolitana se utilizaron sismos de distinto origen sismogénico a diferentes distancias focales de la cuenca sedimentaria de la ciudad de Lima (Figura 4.8). La tabla 4.2 muestra información detallada de estos sismos: fecha exacta, hora, magnitud, profundidad, coordenadas geográficas, aceleración pico del suelo (PGA), estación de registro y origen sismogénico.

Los sismos de mayor magnitud ocurridos cerca de la costa de Lima fueron registrados por la estación PQR, siendo estos los terremotos del 17 de Octubre de 1966 (8.1 Mw) y 03 de Octubre de 1974 (8.0 Mw), ambos de subducción. Además, el análisis considera el sismo, también de subducción, del 15 de Agosto de 2007 (7.9 Mw) registrado en la estación LIM001. Por otro lado, fueron tomados en cuenta los sismos intraplaca del 31 de Mayo de 1970 (6.6 mb), 04 de Enero de 1974 (6.1 mb), 29 de Abril de 1991 (5.7 Mw) y 24 de Agosto de 2011 (7.0 ML) registrados en la estación PQR y el sismo del 02 de Marzo de 2005 (5.7 Mw), en la estación LIM001. Finalmente, se consideró el sismo cortical del 28 de Agosto de 2015 (5.5 ML) registrado en la estación LIM001.

Tabla 4.2. Información de los terremotos analizados.

Año	Mes	Día	Hora	Magnitud	Prof. (km)	Latitud	Longitud	PGA (cm/s ²)	Estación	Origen
1966	Octubre	17	16:41	8.1 Mw	24	-10.7	-78.7	268.24	PQR	Subducción
1970	Mayo	31	15:23	6.6 mb	64	-9.36	-78.87	105.05	PQR	Intraplaca
1974	Octubre	03	09:21	8.0 Mw	13	-12.5	-77.98	194.21	PQR	Subducción
1974	Enero	05	03:33	6.1 mb	91.7	-12.39	-76.29	71.63	PQR	Intraplaca
1991	Abril	29	13:12	5.7 Mw	126	-11.26	-77.67	35.18	PQR	Intraplaca
2005	Marzo	02	08:48	5.7 ML	121	-11.88	-76.14	18.10	LIM001	Intraplaca
2007	Agosto	15	18:40	7.9 Mw	40	-13.77	-76.76	73.89	LIM001	Subducción
2011	Agosto	24	12:46	7.0 ML	149	-9.50	-76.00	5.75	PQR	Intraplaca
2015	Agosto	28	13:39	5.5 ML	30	-12.25	-76.21	6.90	LIM001	Cortical

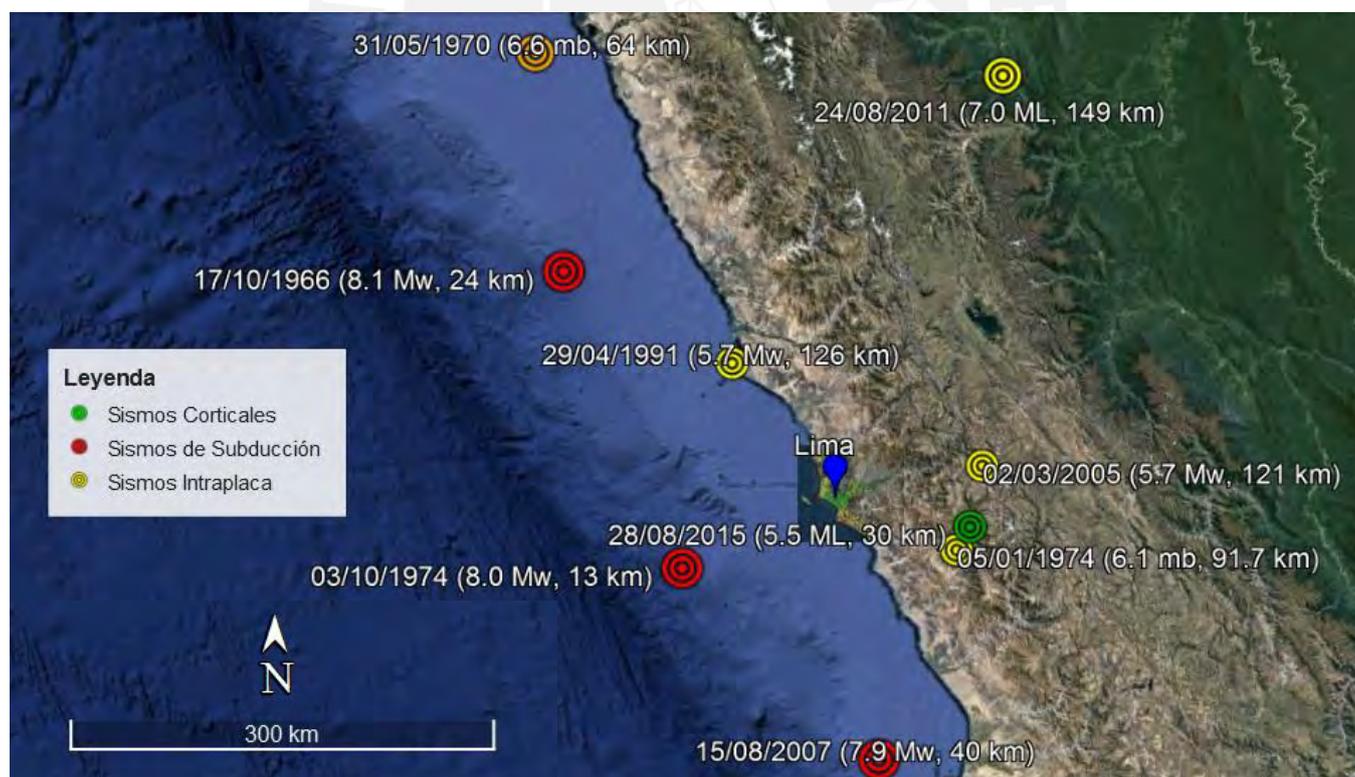
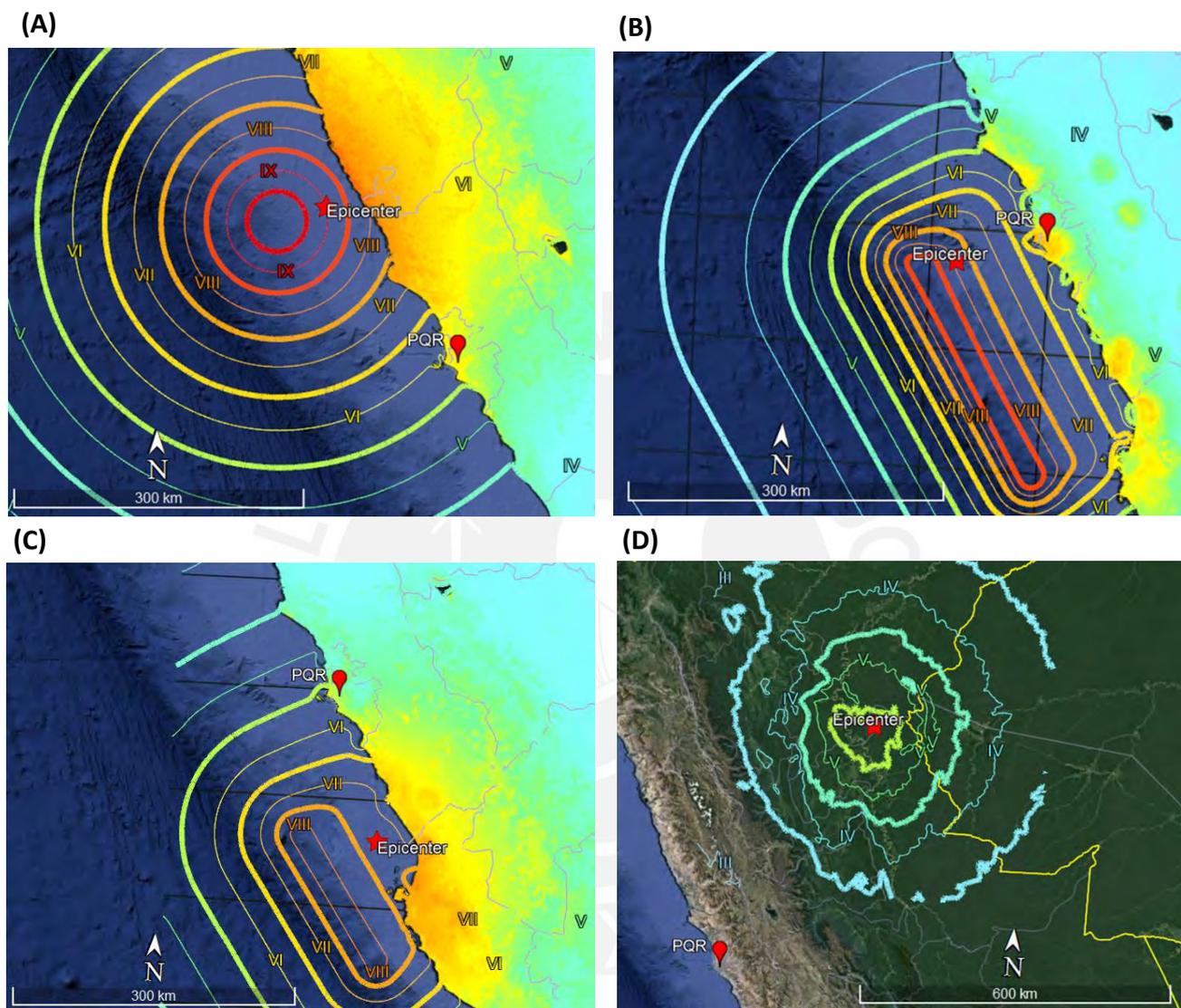


Figura 4.8. Epicentro y características de los sismos analizados (Fuente: Adaptado de Google Earth, 2018)

La figura 4.9 muestra el mapa de intensidades sísmicas elaborado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para cuatro de los sismos analizados en este trabajo. La escala de intensidades se divide de I a X según el movimiento y el daño potencial del sismo.



Instrumental Intensity	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Potential Shaking	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very Strong	Severe	Violent	Extreme
Potential Damage	None	None	None	Very Light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy

Figura 4.9. Mapas de intensidades para los sismos: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 03 de Octubre 1974 (C) 15 de Agosto 2007 (D) 24 Agosto 2011. (Fuente: USGS, 2018)

4.2.2. Estaciones de Referencia

Las estaciones acelerográficas PQR y LIM001 se utilizaron como estaciones de referencia para la deconvolución a roca de los registros sísmicos. La Figura 4.10 muestra las componentes este-oeste norte-sur de las FTEs en estas estaciones.

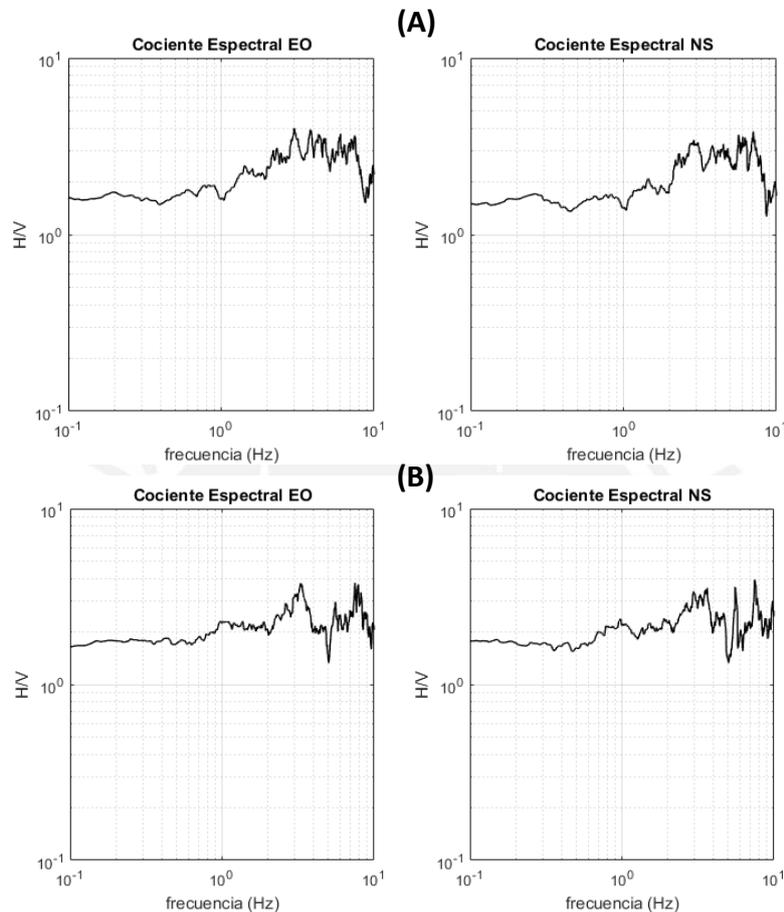


Figura 4.10. Funciones de Transferencia Empírica en las estaciones: (A) PQR (B) LIM001.

4.2.3. Ejecución del Procedimiento

Con la información recopilada y descrita en las secciones anteriores, se ejecutó el procedimiento mostrado en la Figura 1.1. Los sismos fueron deconvolucionados y convolucionados en el dominio de la frecuencia para los puntos de interés en los que se obtuvo la FTE con el método del Cociente Espectral H/V utilizando ruido o sismo. Luego, se calcularon espectros de respuesta con los acelerogramas sintéticos obtenidos para – finalmente- generar los escenarios sísmicos de PGA y distintos periodos estructurales.

Las figuras 4.11 y 4.12 presentan los registros sísmicos y acelerogramas sintéticos en roca para cada sismo en su componente de mayor aceleración. Se observan reducciones del PGA, disminuyendo –por ejemplo– de 268.24 cm/s^2 en superficie a 165.76 cm/s^2 en roca para el sismo de 1966. La reducción del PGA en las estaciones PQR y LIM001 demuestra que en estos lugares existe amplificación por efectos de sitio.

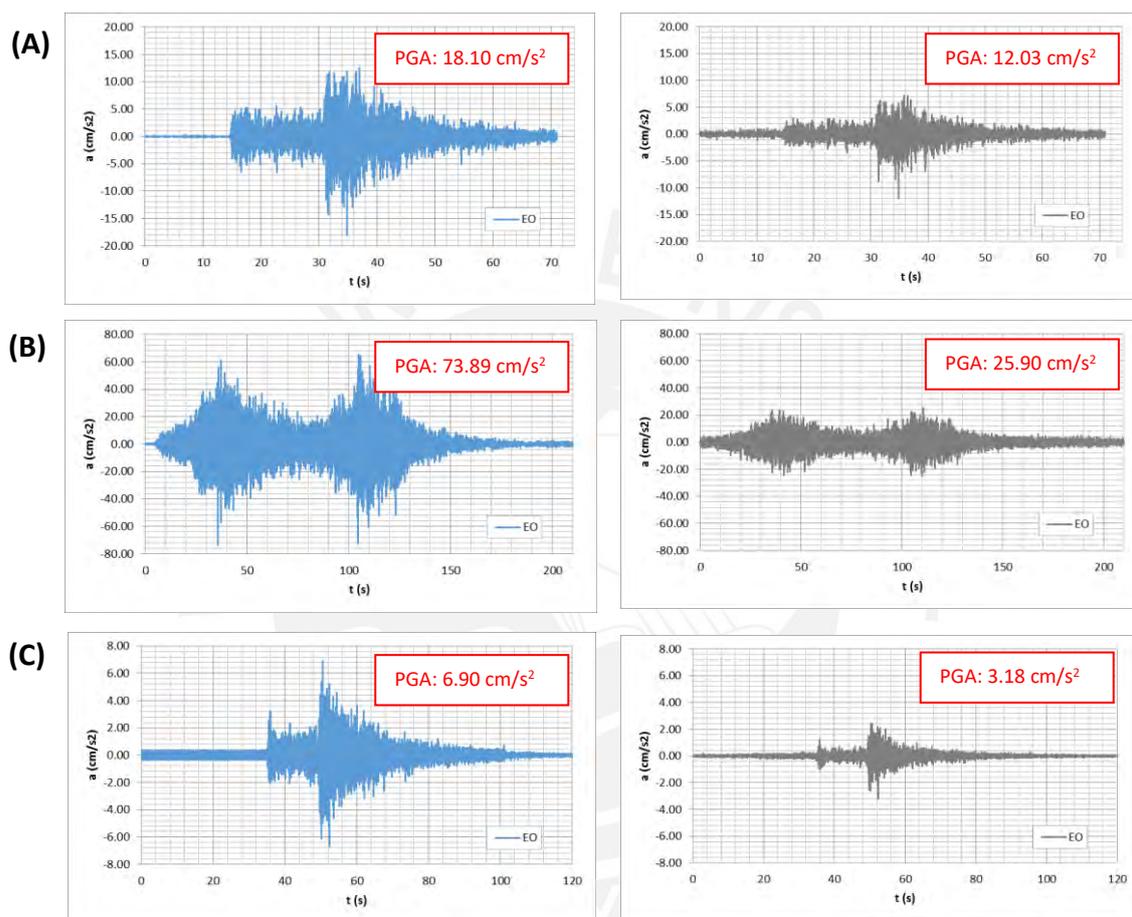


Figura 4.11. Registros sísmicos (izquierda) y deconvolucionados en roca (derecha) en LIM001: (A) 02 Marzo 2005 (B) 15 Agosto 2007 (C) 28 Agosto 2015.

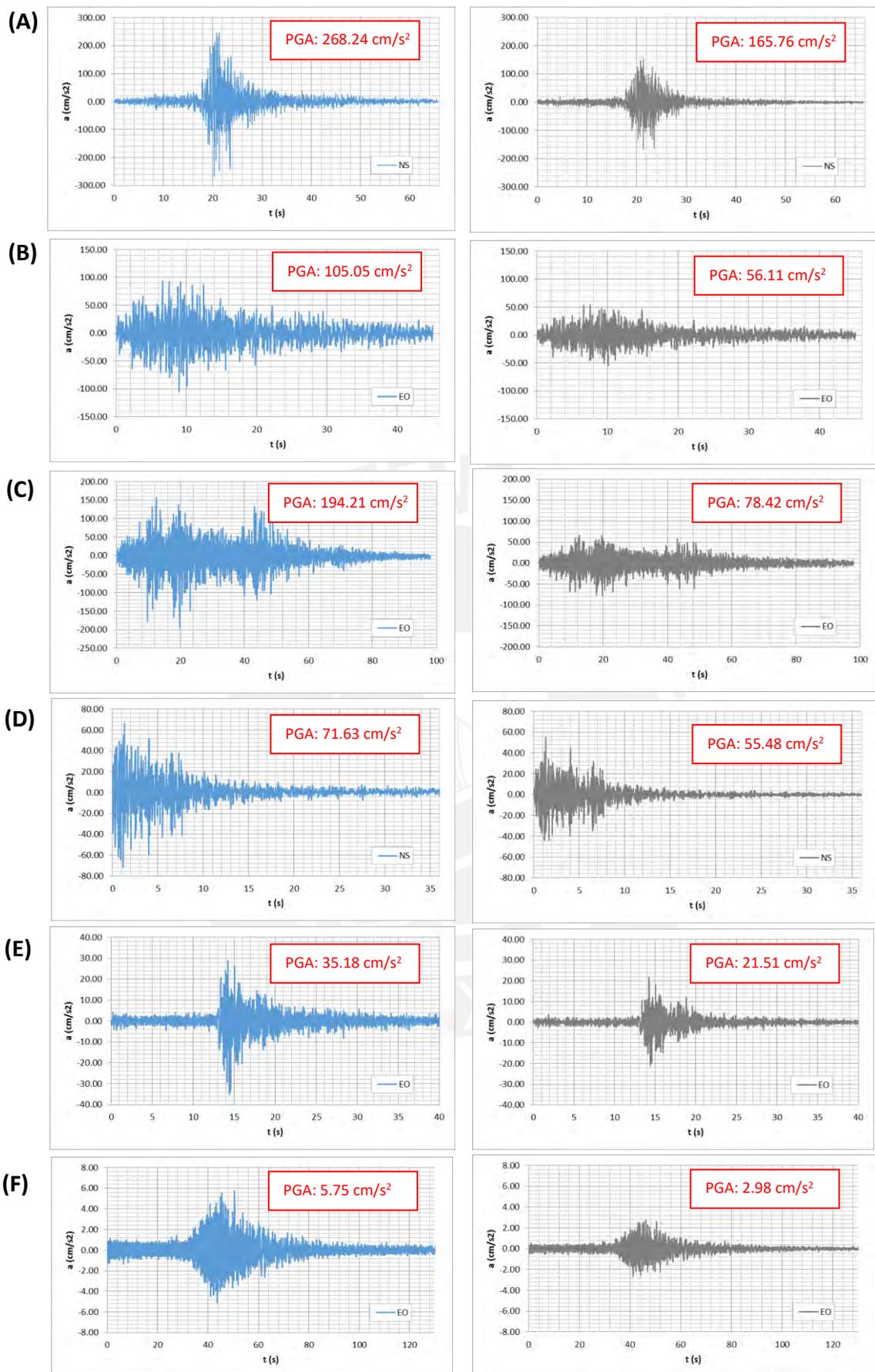


Figura 4.12. Registros sísmicos (Izquierda) y Acelerogramas deconvolucionados en roca (Derecha) en PQR: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 24 Agosto 2011.

La Figura 4.14 y 4.13 muestran los espectros de respuesta (este-oeste y norte-sur) de los registros sísmicos en las estaciones PQR y LIM001, respectivamente.

Según su magnitud y mecanismo de falla, los sismos analizados llegan al basamento rocoso de la cuenca sedimentaria de la ciudad con distinta energía y diferencias en el contenido de frecuencias. Debido a que los distintos tipos de suelo poseen una FTE definida e invariable en el tiempo, cada sismo puede excitar de forma diferente los suelos de Lima. Por lo tanto, la evaluación de la dinámica del suelo en una ciudad demanda la creación de escenarios de sísmicos para eventos de distinto origen sismogénico.

Los espectros de respuesta en PQR y LIM001 de los sismos evaluados en este trabajo muestran cómo varía el impacto del contenido de frecuencias y su energía en la amplitud de la aceleración de las estructuras. Algunos sismos – en comparación de otros- excitan de forma menos pronunciada los periodos cortos.

La figura 4.15 muestra los acelerogramas sintéticos en las estaciones SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001, LIM018 con el sismo de 1966. Además, se muestra el registro en la estación de referencia PQR (en rojo) y el acelerograma deconvolucionado en roca (en azul). Se acota el valor del PGA y se observa su variabilidad en los distintos lugares. Las estaciones CH2 y SJL2 presentan los máximos PGA con valores de 687.96 y 588.11 cm/s^2 , respectivamente. Por otro lado, los sitios con menor amplificación se dan en las estaciones NNA y PQR con 241.56 y 268.24 cm/s^2 . Según los mapas de las figuras 4.4 y 4.7, la estación SJL2 se encuentra situada en un suelo compuesto superficialmente de arenas y limos ($H < 10$ m), y clasificada como Zona II. Asimismo, la estación CH2 se encuentra sobre arenas eólicas y es clasificada sísmicamente como Zona IV. En contraste, la estación NNA está ubicada sobre roca y la estación PQR sobre grava aluvial, siendo clasificada como Zona I.

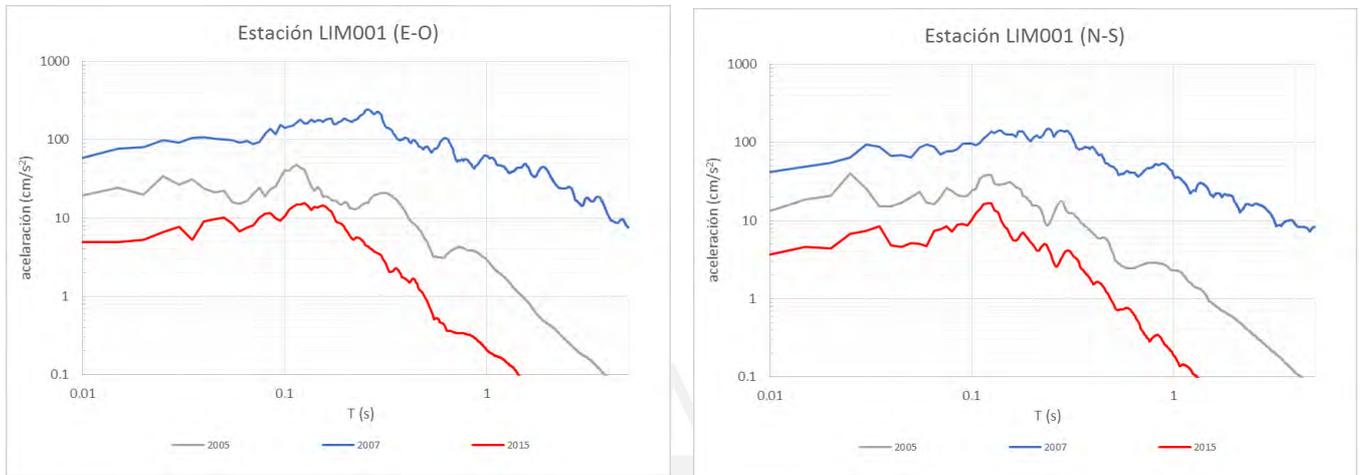


Figura 4.13. Espectros de respuesta de los registros sísmicos del 02 Marzo 2005, 15 Agosto 2007 y 28 Agosto 2015 en la estación LIM001.

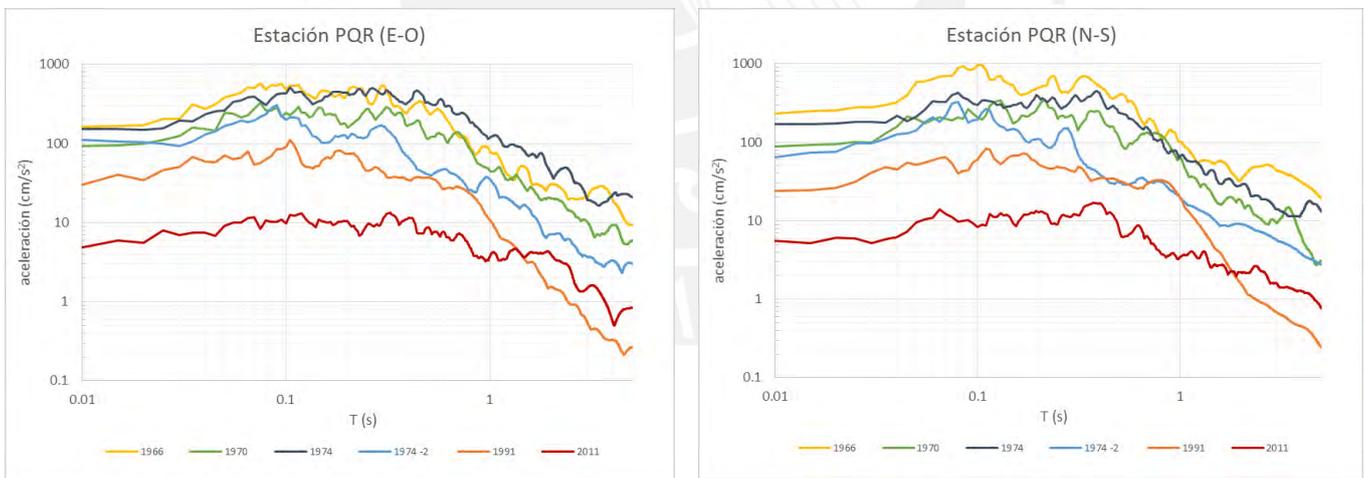


Figura 4.14. Espectros de respuesta de los registros sísmicos del 17 de Octubre 1966, 31 de Mayo 1970, 03 de Octubre 1974, 05 Enero 1974, 09 de Abril 1991 y 24 Agosto 2011 en la estación PQR.

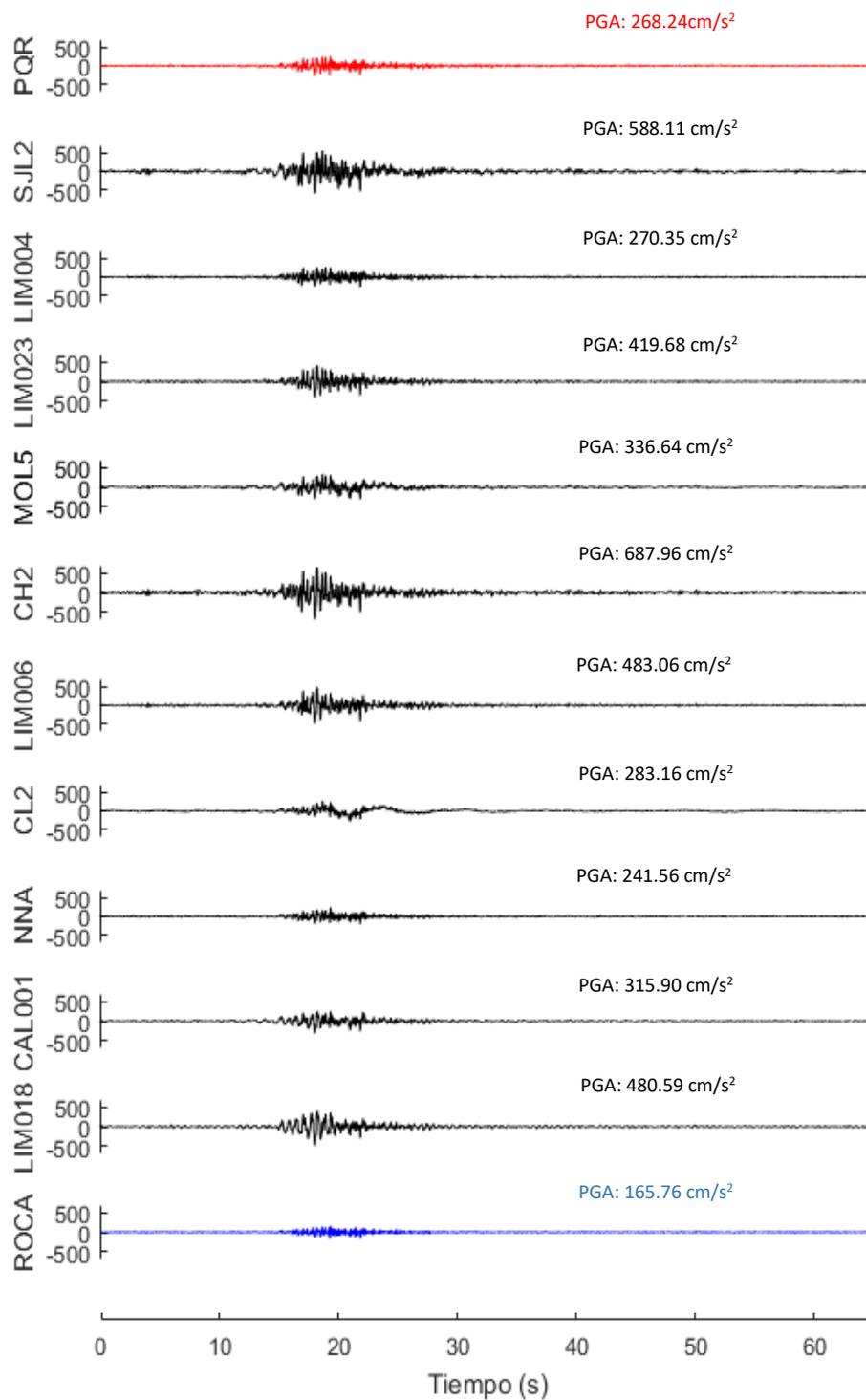


Figura 4.15. Acelerogramas sintéticos convolucionados en las estaciones SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001 y LIM018 para el sismo de 1966.

+

En la figura 4.16 se presentan las FTEs de las estaciones SJL2, CH2, NNA y PQR. Las dos primeras pertenecen a registros de ruido ambiental y ocasionan los mayores picos de aceleración con respecto a los demás sitios de análisis. Las dos últimas pertenecen a estaciones sísmicas y conducen a las menores aceleraciones pico. Como se aprecia, los valores de amplificación en la FTE de la estación NNA no superan el valor de 2. Esta sería la causa de su baja amplificación en comparación a las demás estaciones y un indicador de la utilidad de la FTE para estimar efectos de sitio, ya que la estación se encuentra sobre un afloramiento rocoso.

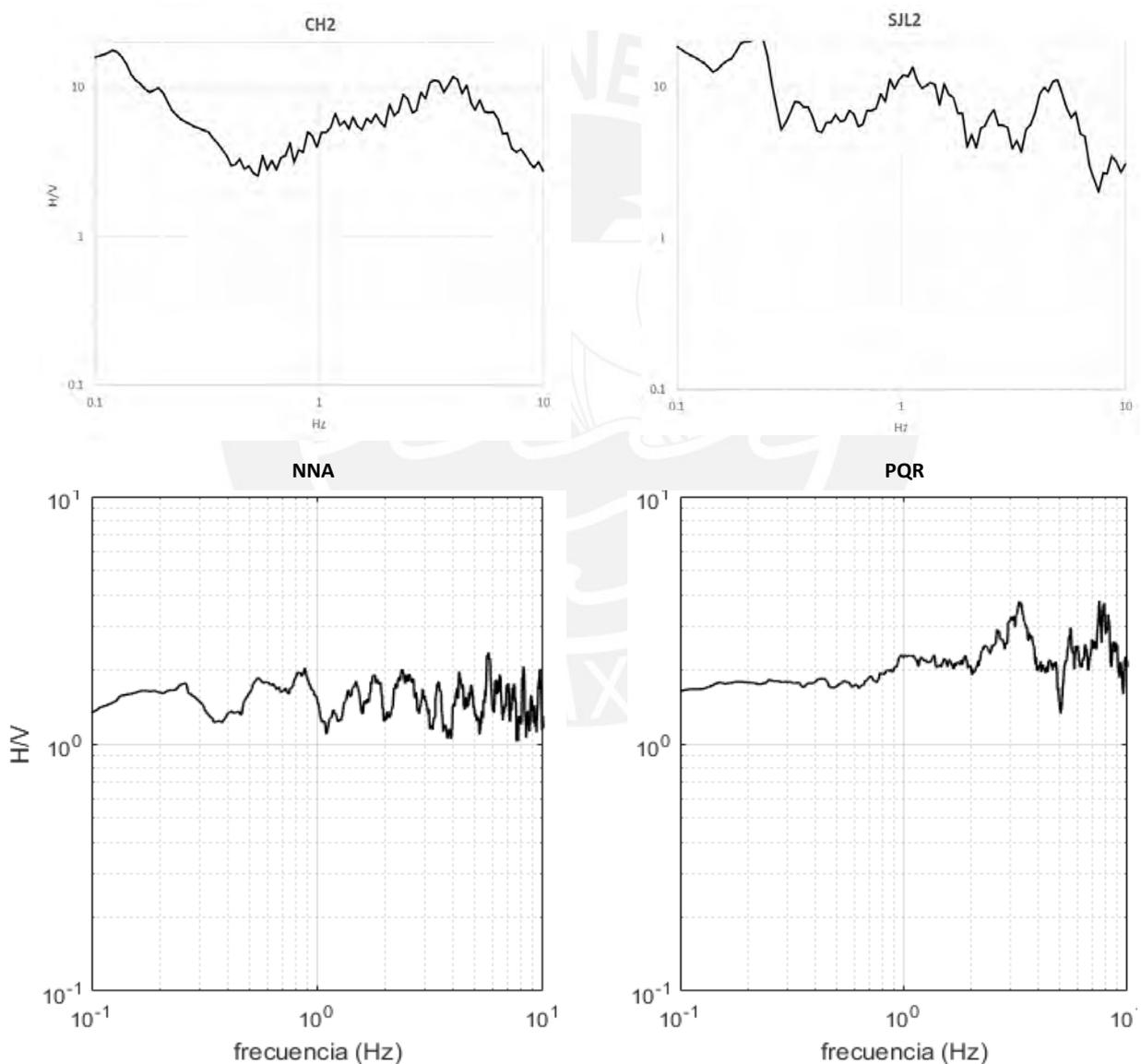


Figura 4.16. Funciones de Transferencia Empírica (FTE) en las estaciones con mayor PGA (CH2 y SJL2) y menor PGA (NNA y PQR).

Los espectros de respuesta para los sismos evaluados en las estaciones SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001, LIM018 se presentan en las figuras 4.17 y 4.18. La figura 4.18 agrupa los ER de los acelerogramas sintéticos generados a partir de la estación de referencia PQR, mientras que la figura 4.17 los generados a partir de la estación de referencia LIM001. En ambos casos, se presentan el espectro de respuesta del registro (color rojo) y del acelerograma deconvolucionado en roca (color azul) correspondiente a cada sismo evaluado. En todos los casos se observa el cambio en la amplitud de aceleraciones, debido al comportamiento dinámico del suelo en cada lugar y su diferencia con respecto a la estación de referencia y al sustrato rocoso.

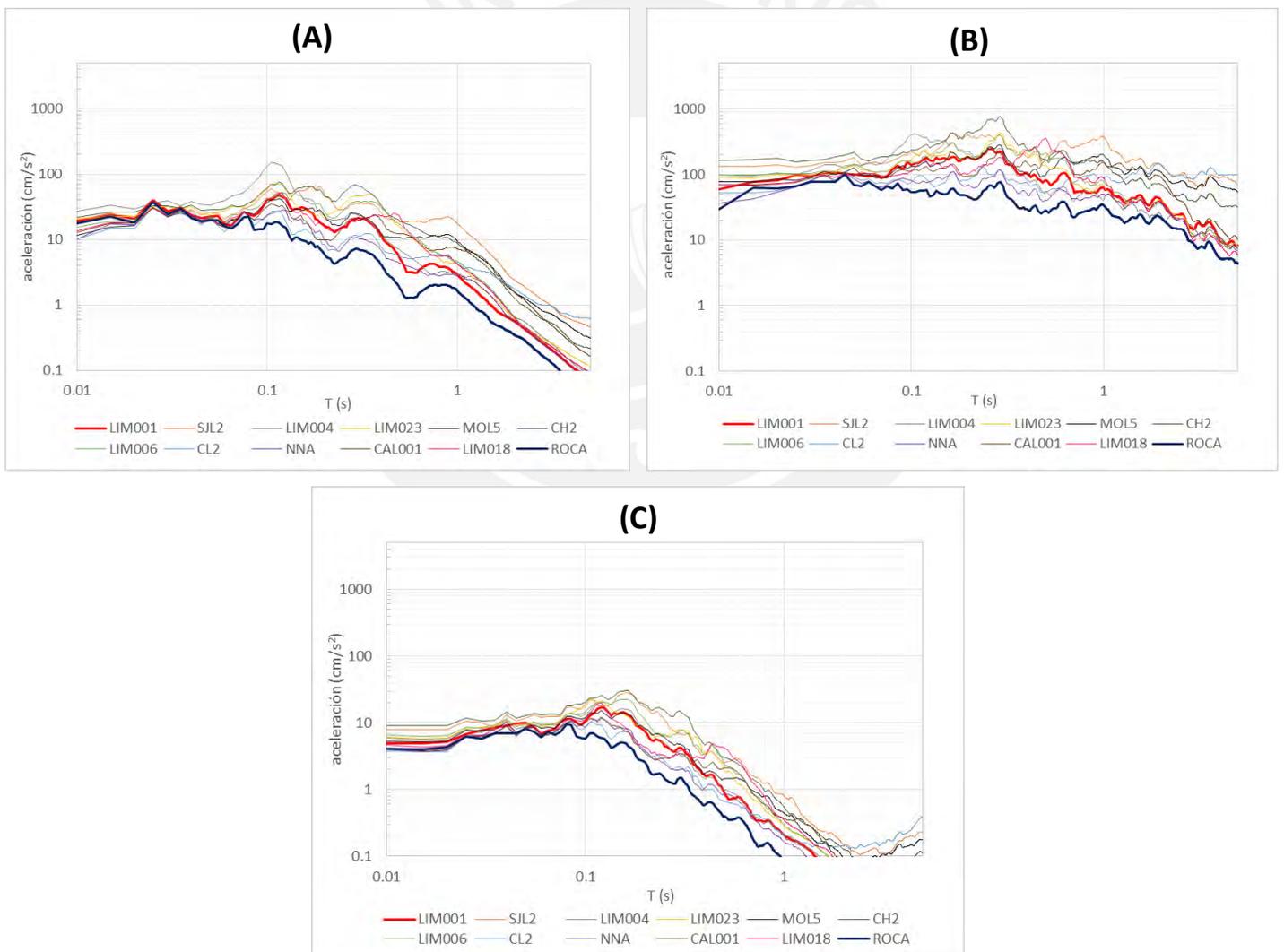


Figura 4.17. Espectros de respuesta en las estaciones LIM001, SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001, LIM018 y en ROCA de los sismos: (A) 02 Marzo 2005 (B) 15 Agosto 2007 (C) 28 Agosto 2015.

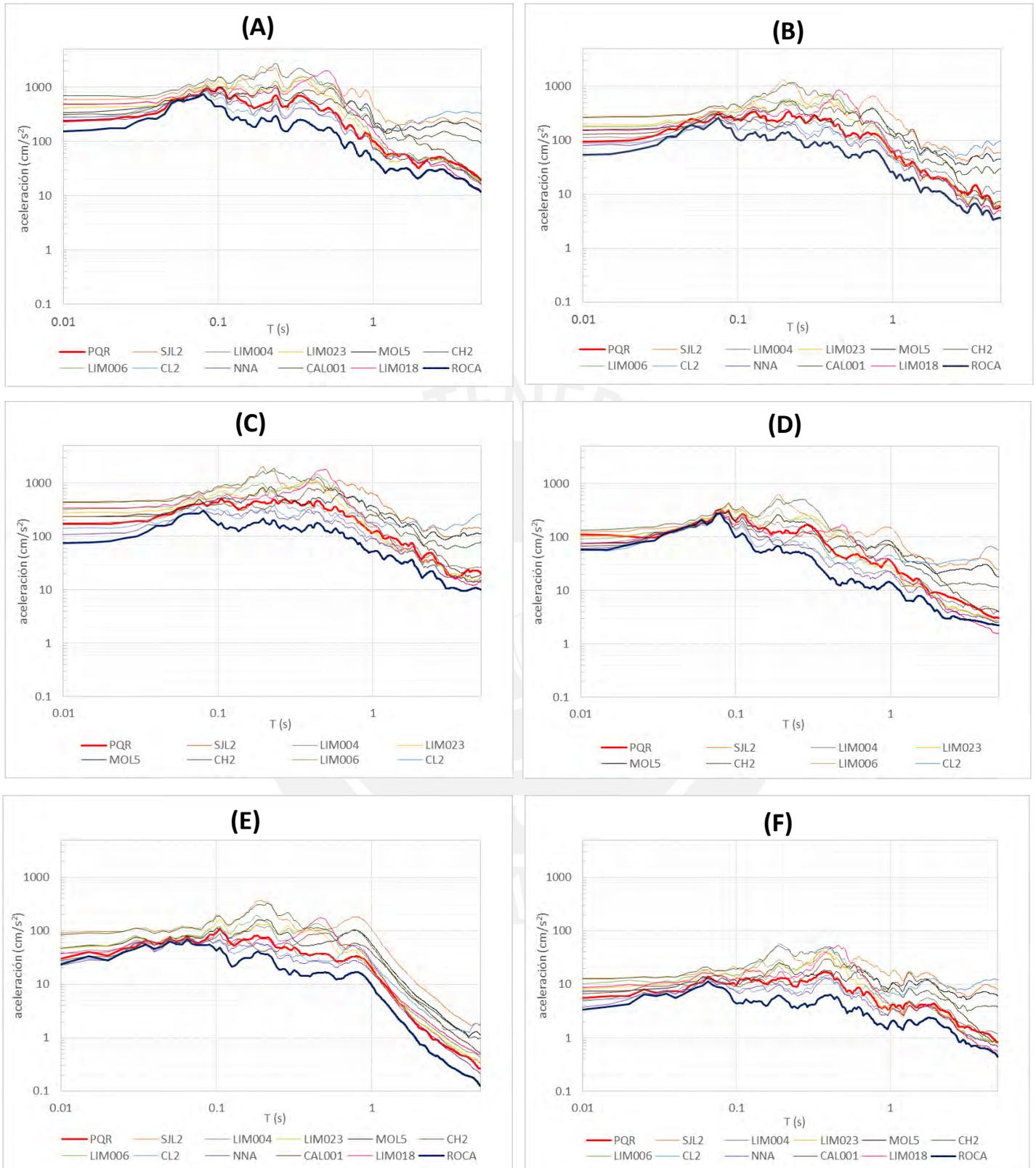


Figura 4.18. Espectros de respuesta en las estaciones PQR, SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001, LIM018 y en ROCA de los sismos: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 24 Agosto 2011.

4.2.4. Escenarios Sísmicos

Un escenario sísmico consiste en la distribución espacial de las aceleraciones provocadas por un sismo para cierto periodo estructural desde un punto de vista determinista (Martínez, 2014). La dinámica del suelo en la ciudad de Lima se evaluó utilizando estos escenarios para los registros sísmicos presentados en la tabla 4.2. Una vez obtenidos los ER en cada estación de interés (100 de ruido ambiental y 38 de sismo), las aceleraciones se agruparon de tal forma de obtener mapas de PGA y distintos periodos estructurales.

La figura 4.19 muestra el mapa de PGAs para los sismos evaluados en el área metropolitana de acuerdo a los valores de aceleración máxima del suelo en las estaciones de análisis y considerando una interpolación Kriging para sitios intermedios. De la misma manera, las figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 y 4.25 presentan los escenarios de pseudoaceleración para los periodos estructurales 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 segundos, respectivamente. Finalmente, en la figura 4.26 se aprecian los escenarios sísmicos para los periodos estructurales en los que se alcanzan las máximas pseudoaceleraciones en cada sismo evaluado.

Como se observa, los PGA máximos (Figura 4.19) se encuentran principalmente en tres zonas de la ciudad. Al este, próximo a las estaciones de San Juan de Lurigancho; al norte, en las estaciones de Puente Piedra, Santa Rosa y algunas de Ventanilla; y al sur, por las estaciones de registro del distrito de Chorrillos. Asimismo, PGAs de intensidad intermedia pueden observarse en las estaciones de los distritos de La Molina, San Martín de Porres y algunos lugares del Callao. Cabe mencionar que, si bien existen similitudes, los sismos no siempre excitan uniformemente las mismas zonas. Es decir, algunos sismos excitan con mayor intensidad unas zonas más que otras, debido a la energía y el contenido de frecuencias con el que llegan al sustrato rocoso y a las FTEs que caracterizan los sitios.

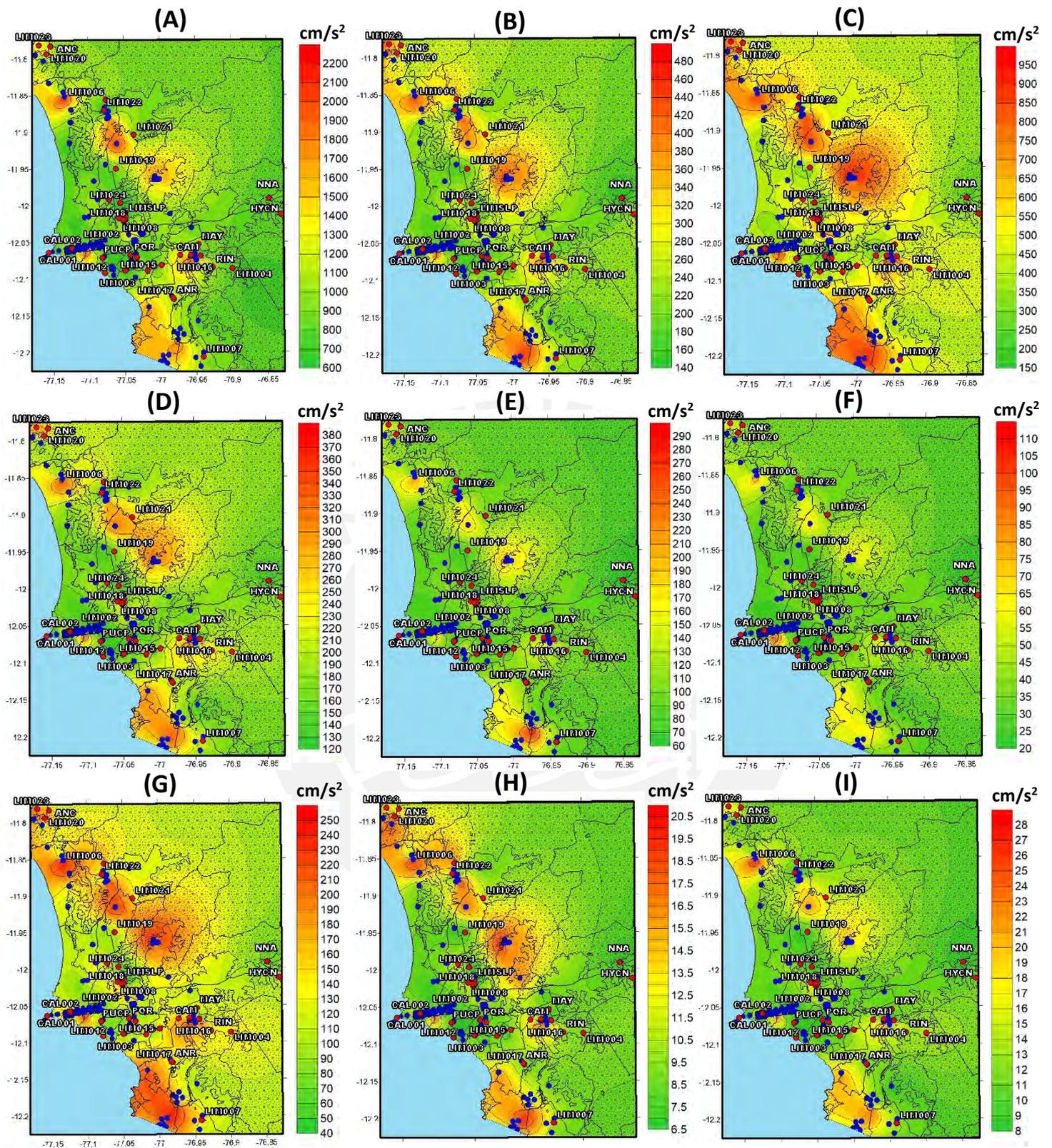


Figura 4.20. Escenarios sísmicos en la ciudad de Lima para estructuras con periodo $T=0.1$ s para los sismos: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

Los escenarios sísmicos para periodos estructurales de 0.1 segundos muestran que las aceleraciones pico siguen distribuyéndose de una manera muy similar en la ciudad para los sismos evaluados. Al este, las zonas de mayor intensidad se dan en los distritos de San Juan de Lurigancho y La Molina. Al norte, los lugares con mayor aceleración se desplazan a la zona norte de Ventanilla, y al distrito de Comas. Al sur, principalmente en los distritos de Chorrillos, Villa María del Triunfo y Barranco. Asimismo, se observan máximos en la zona céntrica del distrito de Bellavista. Para este periodo estructural, los sismos de subducción de 1974 y 2007 generan escenarios muy semejantes tanto en distribución y escala de intensidades. Por otro lado, existen las mismas semejanzas entre los sismos intraplaca de 1991 y 2005. Estos dos últimos sismos tienen la misma magnitud (5.7 Mw) y la fuente sísmica se encuentra casi a la misma distancia del área de estudio.

Para periodos estructurales de 0.2 segundos, los escenarios sísmicos muestran que los movimientos máximos se concentran en las mismas zonas de la ciudad, principalmente en San Juan de Lurigancho. Lo mismo se observa en los escenarios sísmicos para periodos estructurales de 0.4 s. Sin embargo, a partir de este valor aparecen intensidades intermedias en la zona oeste de la provincia de El Callao, próximas a Chucuito y La Punta, que se hacen más claras en los escenarios de $T=0.6$ s.

Los escenarios sísmicos para periodos estructurales mayores a 0.6 segundos mantienen las zonas de intensidad máxima mencionadas en los escenarios anteriores, a excepción de algunos distritos del norte como Santa Rosa y Ventanilla. Para periodos altos ($T=0.6, 0.8, 1$ s), los valores de aceleración en estos de lugares van declinando progresivamente hasta convertirse en zonas de baja intensidad.

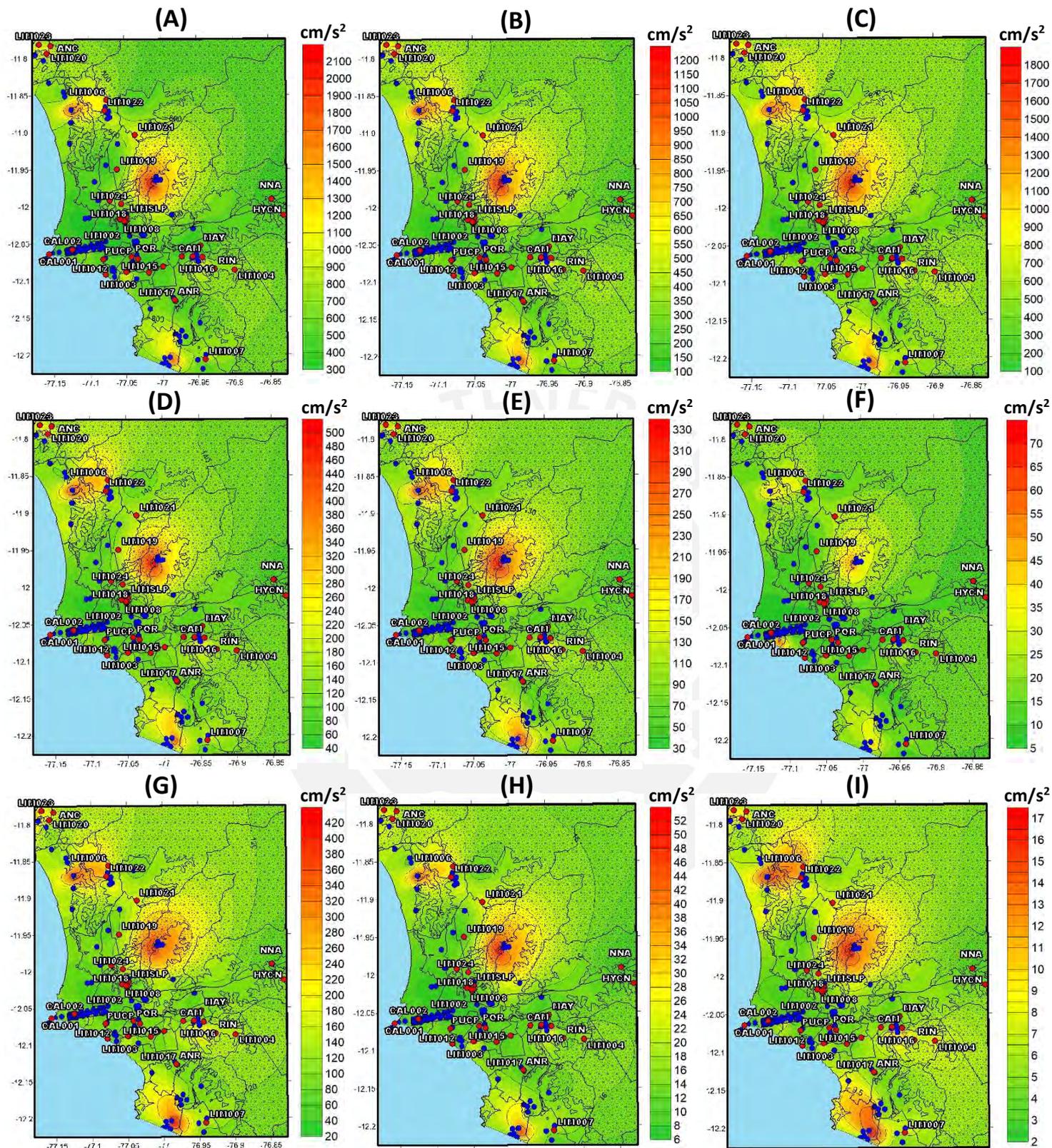


Figura 4.21. Escenarios sísmicos en la ciudad de Lima para estructuras con periodo $T=0.2$ s para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

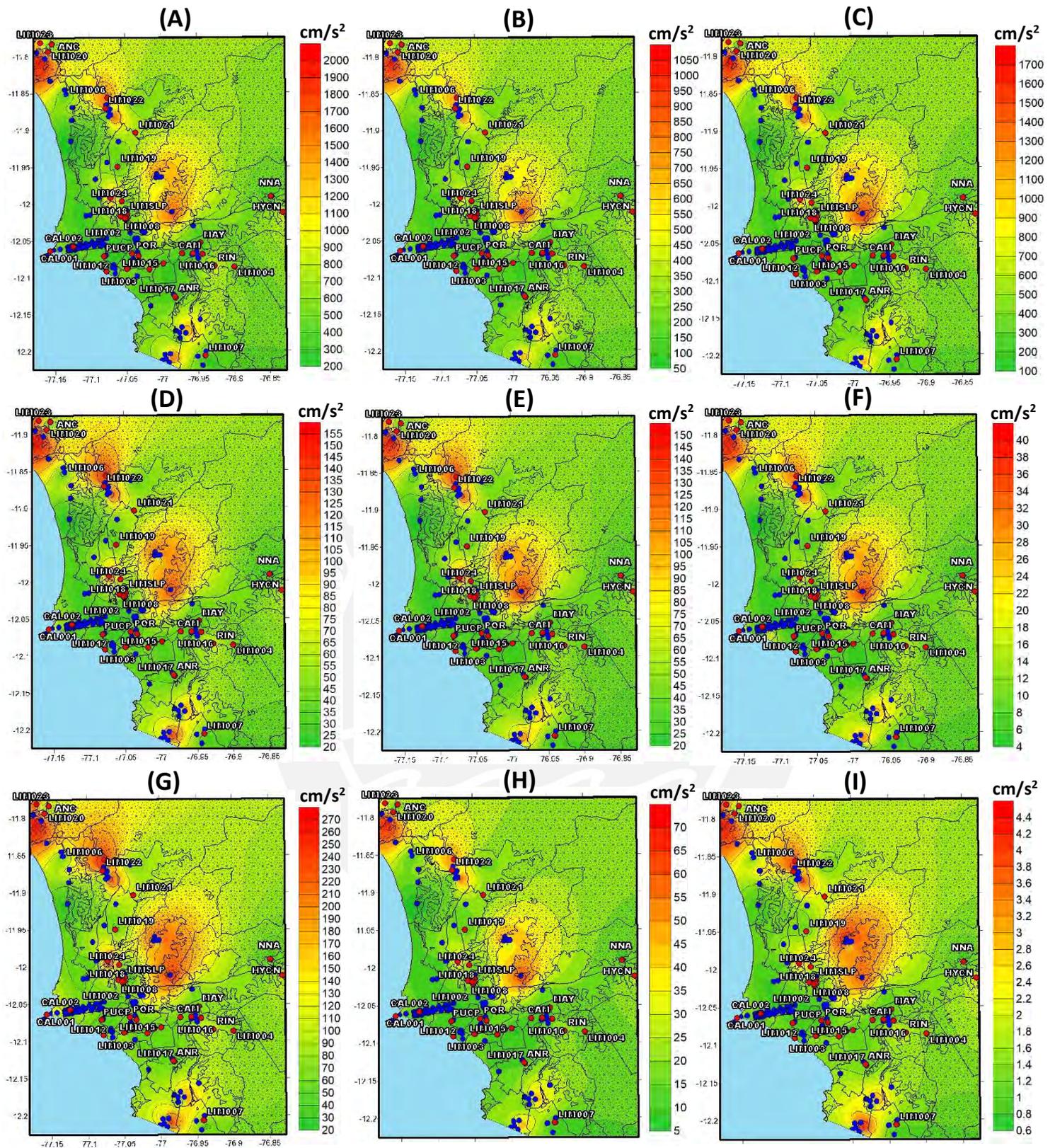


Figura 4.22. Escenarios sísmicos en la ciudad de Lima para estructuras con periodo $T=0.4$ s para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

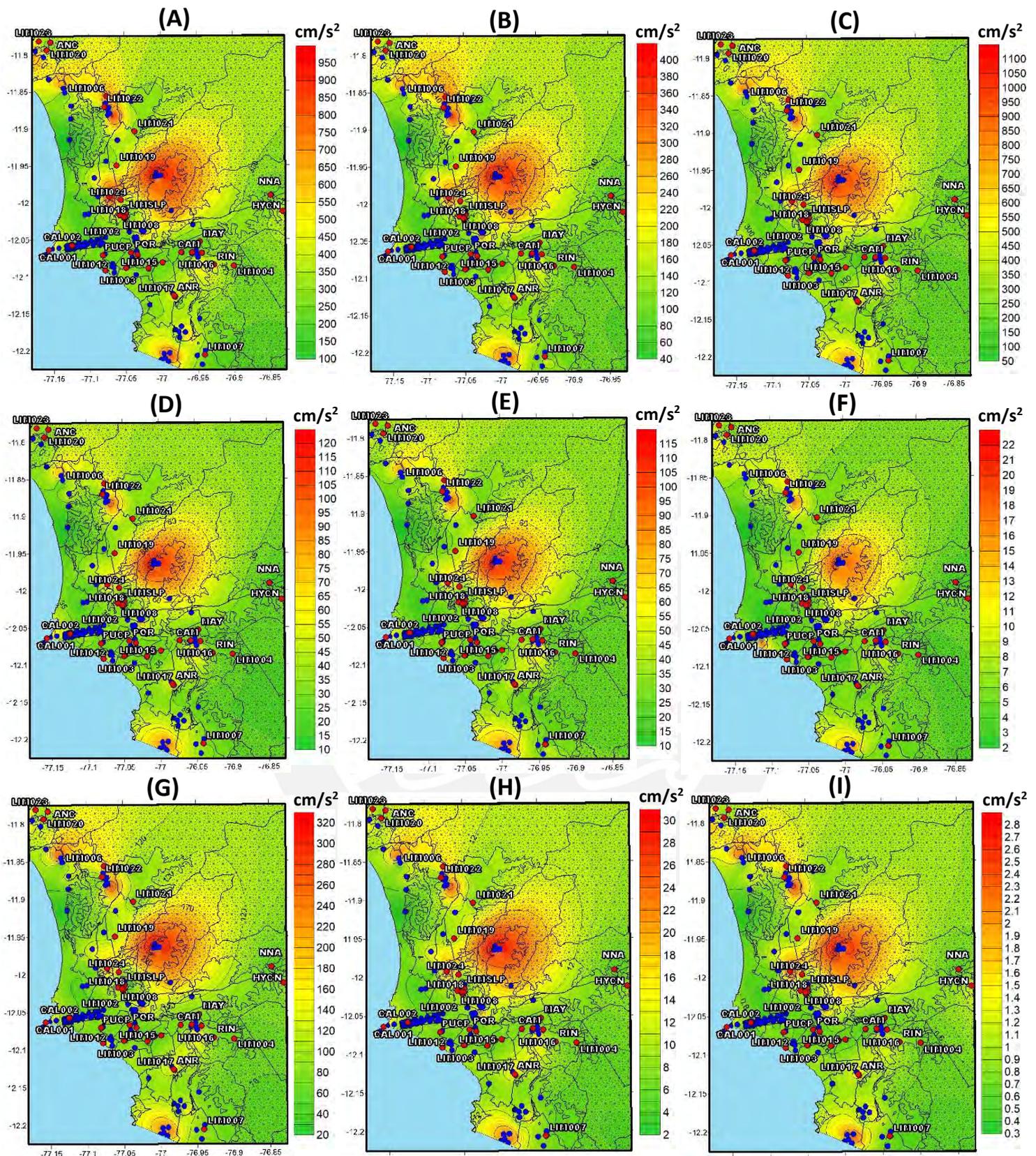


Figura 4.23. Escenarios sísmicos en la ciudad de Lima para estructuras con periodo $T=0.6$ s para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

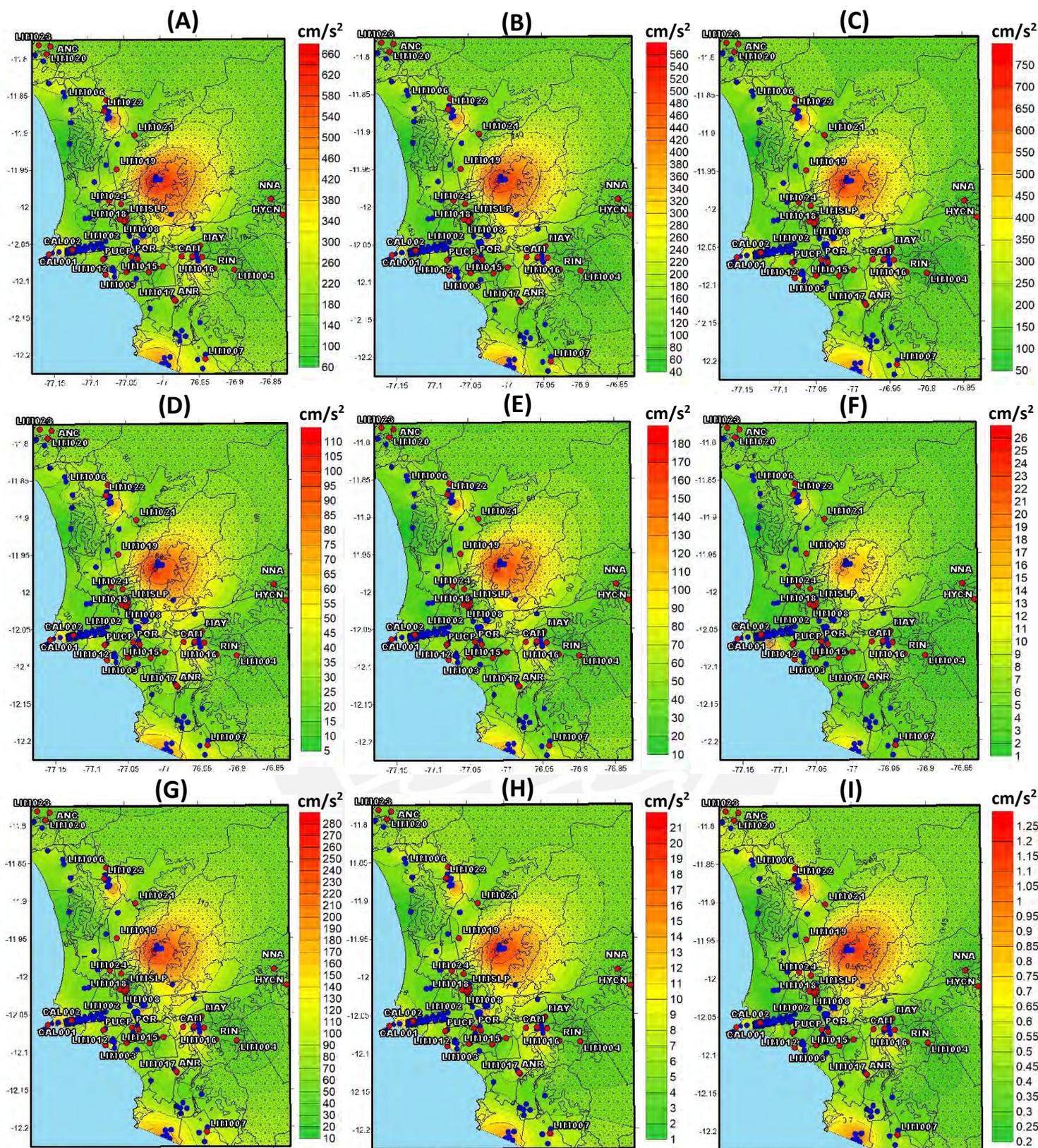


Figura 4.24. Escenarios sísmicos en la ciudad de Lima para estructuras con periodo $T=0.8$ s para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

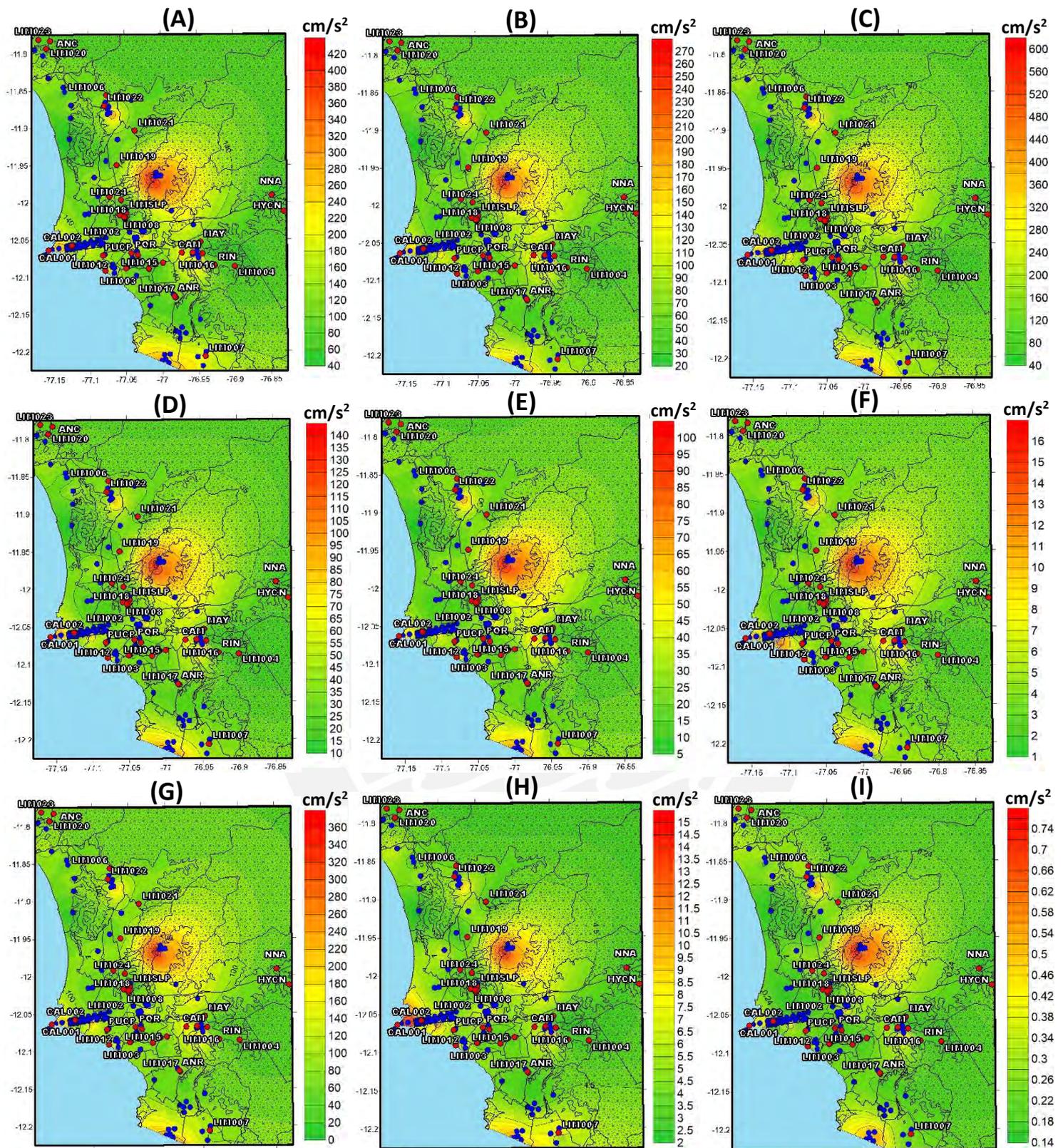


Figura 4.25. Escenarios sísmicos en la ciudad de Lima para estructuras con periodo $T=1.0$ s para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

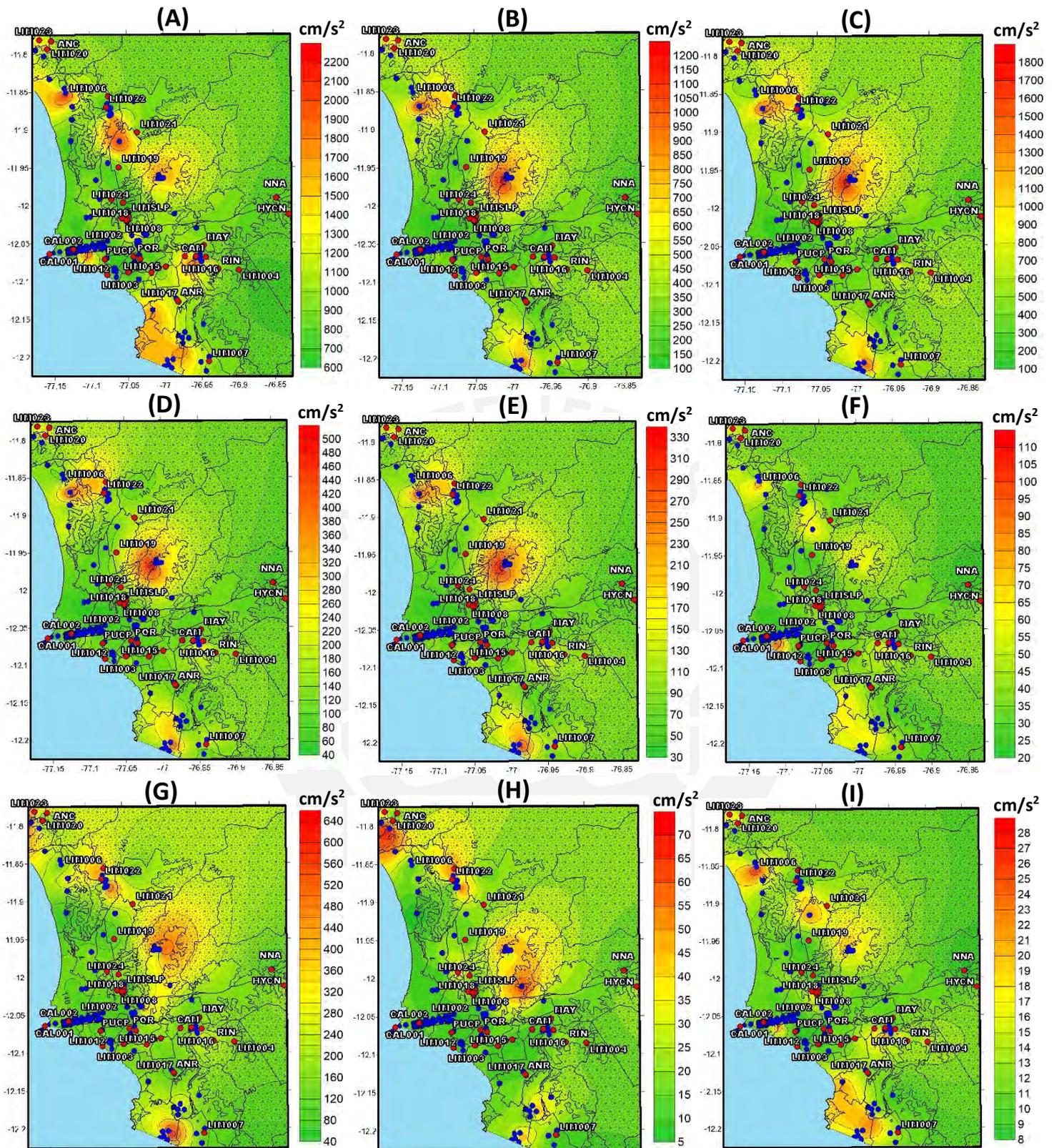


Figura 4.26. Escenarios sísmicos en la ciudad de Lima para el periodo estructural en que las aceleraciones máximas alcanzan su valor pico para los sismos de: (A) 1966: $T_{max}=0.1$ s (B) 1970: $T_{max}=0.2$ s (C) 10/1974: $T_{max}=0.2$ s (D) 01/1974: $T_{max}=0.2$ s (E) 1991: $T_{max}=0.2$ s (F) 2005: $T_{max}=0.1$ s (G) 2007: $T_{max}=0.3$ s (H) 2011: $T_{max}=0.4$ s (I) 2015: $T_{max}=0.1$ s.

Finalmente, la figura 4.26 muestra los escenarios sísmicos para el periodo estructural en el que las intensidades sísmicas alcanzan su máximo valor para cada uno de los sismos evaluados. En ese sentido, los sismos de 1966, 2005 y 2015 generan las máximas aceleraciones en estructuras de 0.1 segundos, los de 1970, 1974, 1974-2 y 1991 lo hacen en estructuras de 0.2 segundos y los eventos del 2007 y 2011 en periodos estructurales de 0.3 y 0.4, respectivamente.

4.3. Sismo de Arequipa del 14 de Enero de 2018

El 14 de Enero de 2018, un sismo de 6.8 ML con epicentro frente a las costas del norte de Arequipa fue registrado en 16 estaciones de la red acelerográfica de la ciudad de Lima. Debido a la cantidad de estaciones en las que fue registrado y por ser un evento reciente, este sismo se utilizó para validar la metodología de este trabajo y mostrar comparaciones entre valores registrados y simulados.

Se tomó la estación LIM014 como estación de referencia. La figura 4.27 muestra la FTE de LIM014 en sus dos componentes cardinales (E-O y N-S). La estación se encuentra sobre grava aluvial y zona I según la microzonificación sísmica vigente.

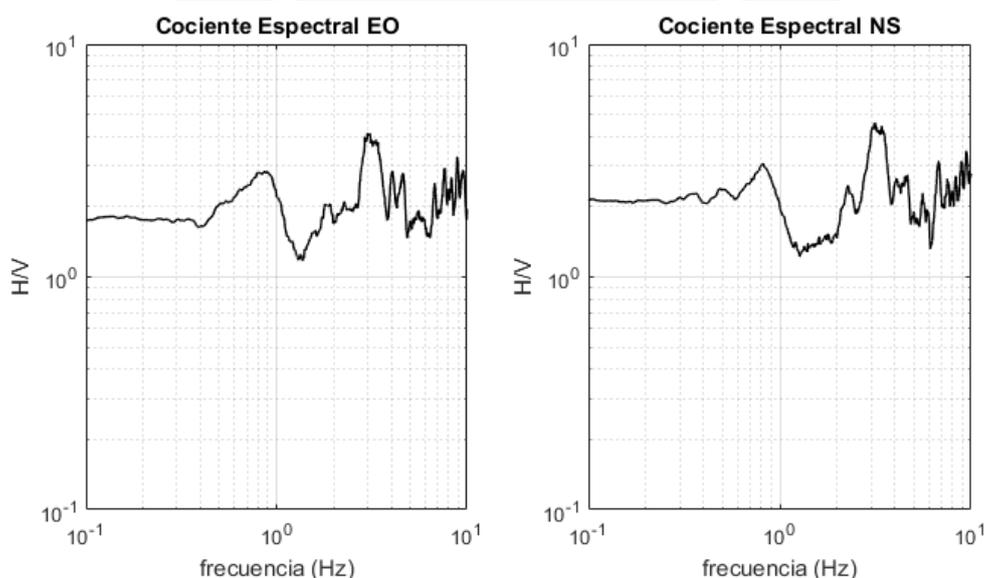


Figura 4.27. Función de Transferencia Empírica en la estación LIM014.

El registro sísmico en la estación LIM014 tiene un PGA de 2.91 cm/s². La Figura 4.28 muestra este registro y el acelerograma deconvolucionado en roca. Además, se presentan los espectros de amplitudes de Fourier respectivos. Puede observarse la influencia de la FTE en el espectro superficial con respecto al espectro en roca. Como se observó en la figura 4.27, la FTE en esta estación tiene dos picos predominantes en 0.8 y 3 Hz, precisamente las frecuencias que aparecen en el espectro del registro superficial y no en el espectro en roca. De esta manera, se aprecia la importancia del contenido de frecuencias con el que arriba un sismo a la cuenca sedimentaria de la ciudad. Los sismos se amplificarán más si las frecuencias predominantes con las que llegan a la roca son semejantes a las de la FTE. Es así como las características de las FTEs definen el comportamiento dinámico del suelo.

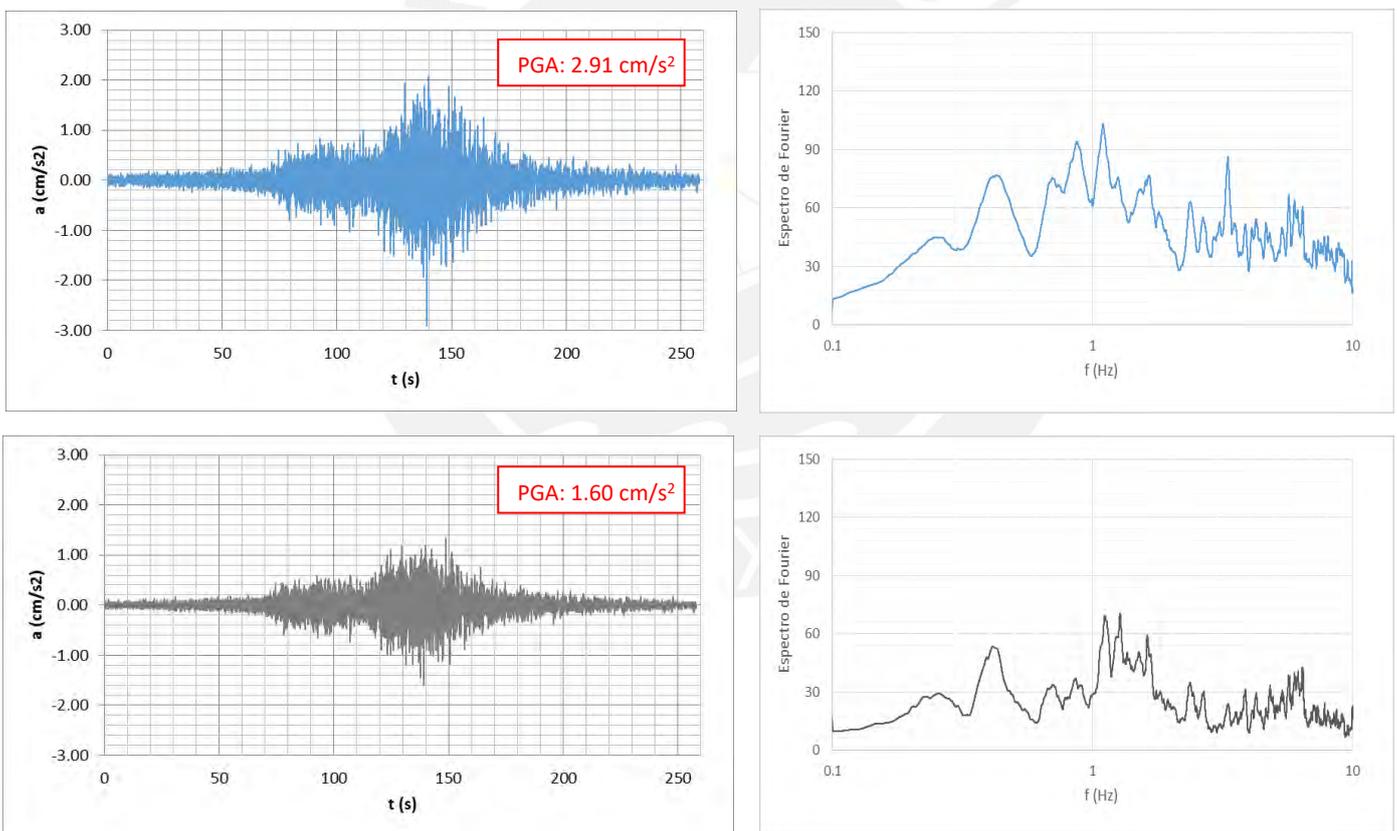


Figura 4.28. Registro sísmico (arriba) y acelerograma deconvolucionado en roca (abajo) del sismo del 14 de Enero de 2018 con sus respectivos espectros de Fourier en la estación LIM014.

Además de LIM014, los registros del sismo en las demás estaciones se deconvolucionaron para comparar sus espectros de amplitudes en roca. La figura 4.29 muestra los espectros de Fourier en roca deconvolucionados a partir de los registros en las estaciones LIM003, LIM012, LIM016 y LIM019. Se puede observar cómo los espectros se ajustan adecuadamente a un valor medio. La curva del espectro en roca de LIM014 (color rojo) representa para este caso ese valor medio, ya que corresponde a la estación que se tomó como referencia. En teoría, el espectro en roca debería ser único, debido a que la distancia entre estaciones es despreciable en comparación de la distancia al hipocentro. En ese sentido, los registros de dos estaciones que pertenecen a un área en la que se está evaluando el efecto del suelo poseen el mismo efecto de la fuente sísmica y del trayecto de ondas, por lo que el espectro en roca debe ser el mismo para ambas.

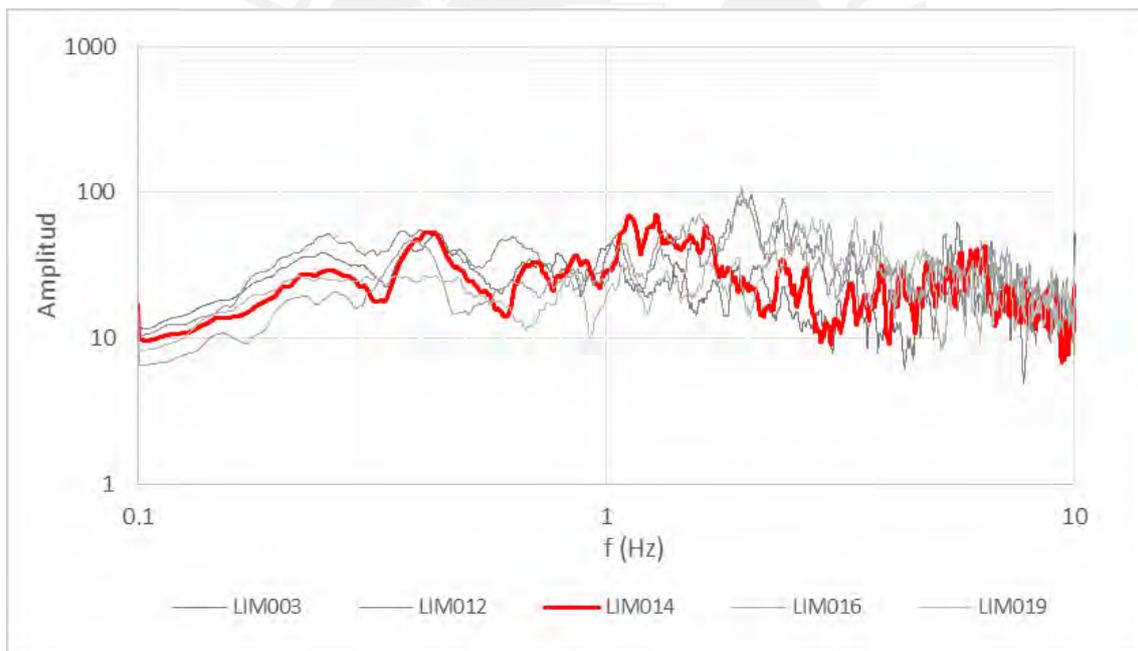


Figura 4.29. Espectros de amplitud deconvolucionados en roca del sismo del 14 de Enero de 2018 realizados con los registros de las estaciones acelerográficas LIM003, LIM012, LIM014, LIM016 y LIM019.

La figura 4.30 compara los registros sísmicos y los acelerogramas sintéticos obtenidos con la metodología usada en este trabajo en las estaciones LIM014, LIM003, LIM012, LIM016 y LIM019. Se observa una fuerte similitud de ambas señales en el dominio del tiempo con valores de PGA muy cercanos entre sí.

Finalmente, la figura 4.31 muestra una comparación entre los espectros de respuesta obtenidos con registros sísmicos y acelerogramas sintéticos en las estaciones LIM014, LIM003, LIM012 y LIM018. Los ER con los acelerogramas sintéticos son aceptables.

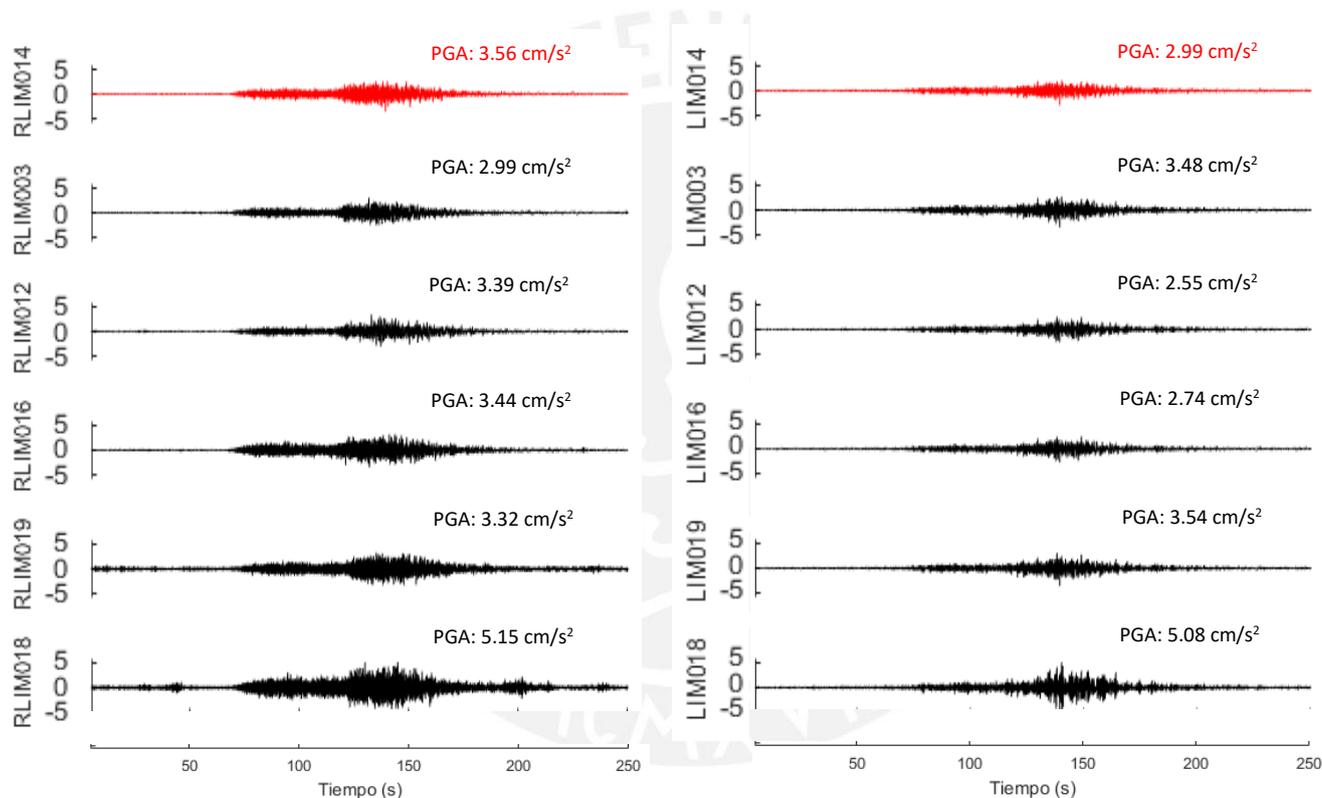


Figura 4.30. Comparación entre los registros sísmicos (izquierda) y los acelerogramas sintéticos (derecha) del sismo del 14 de Enero de 2018 en las estaciones LIM014, LIM003, LIM012, LIM016, LIM019 y LIM018.

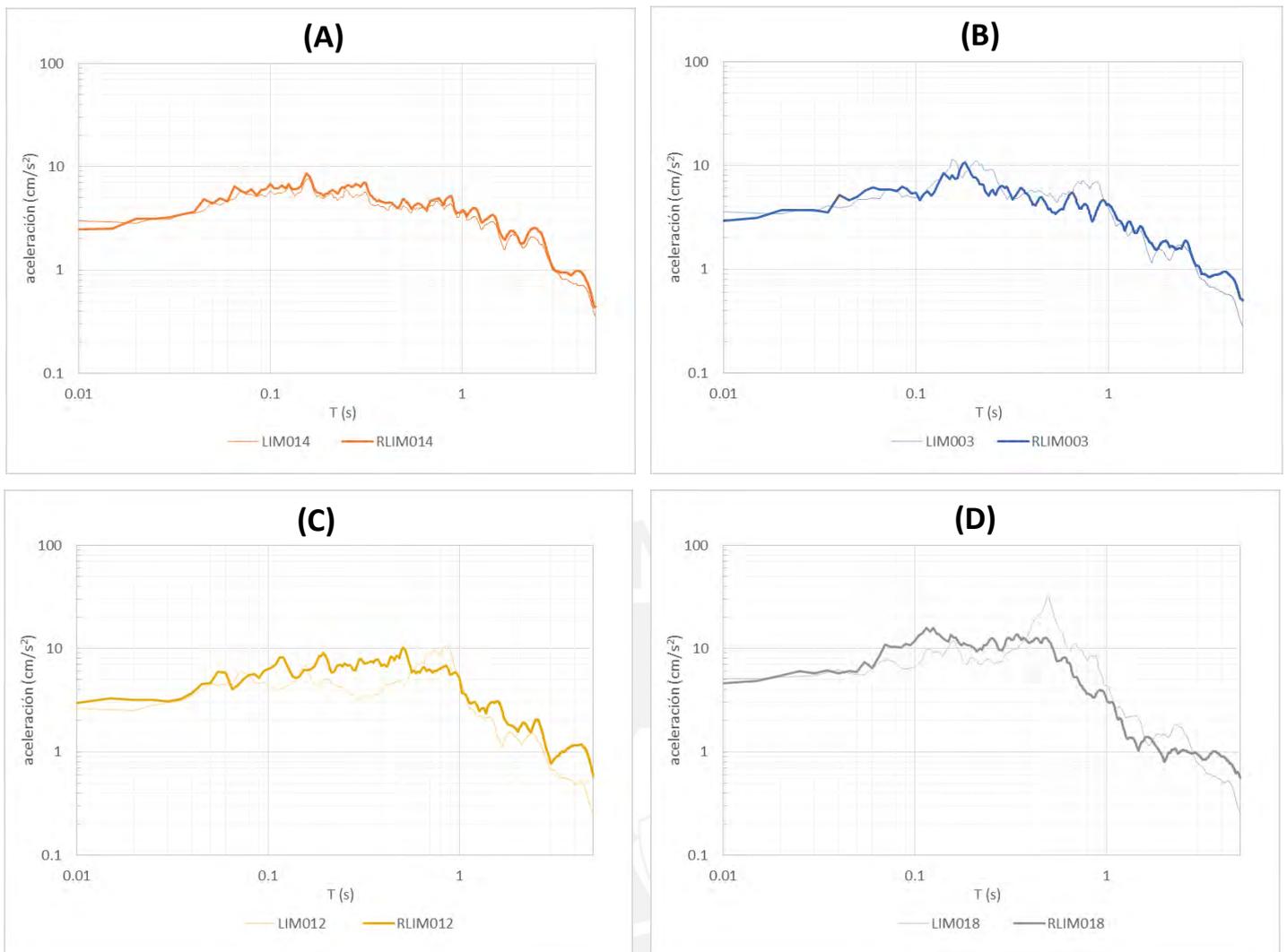


Figura 4.31. Comparación entre los espectros de respuesta de los registros sísmicos y acelerogramas sintéticos convolucionados con el sismo del 14 de Enero de 2018 en las estaciones: (A) LIM014 (B) LIM003 (C) LIM012 (D) LIM018.

4.4. Sismo de 8.8 Mw en la ciudad de Lima

4.4.1. Estudios Previos

Según estudios realizados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), se pronostica para Lima un sismo de magnitud 8.8 Mw frente a sus costas (Tavera, 2014). Como se observa en la figura 4.32, la energía que se acumula en las asperezas A4 y A3 no se ha liberado completamente desde el terremoto que destruyó la ciudad en el año 1746. Esta situación se complica si se toma en cuenta que la migración masiva ocurrida en los últimos años ha ido ocupando progresivamente las periferias de la ciudad donde abundan depósitos sueltos. Muchos de estos lugares no estaban ocupados en 1966 y

1974, por lo que no se tiene ningún reporte de daños. En ese sentido, la zona metropolitana se encuentra expuesta a un alto peligro sísmico.

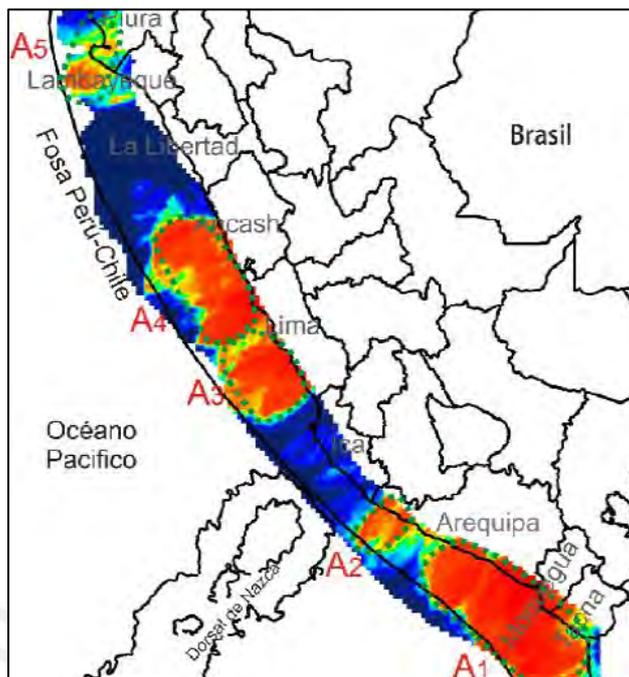


Figura 4.32. Asperezas (A3 y A4) ubicadas frente a la ciudad de Lima asociadas al sismo de 1746 que producirían un terremoto de 8.8 Mw (Fuente: Condori y Tavera, 2012).

Pulido et al (2012) modeló numéricamente las asperezas que producirían este sismo de 8.8 Mw y generó acelerogramas sintéticos con 9 posibles hipocentros mostrados en la Figura 4.33.A. Además, este estudio utilizó los perfiles de velocidad de onda S obtenidos en 8 sitios de Lima por Calderon et al (2012) para generar escenarios sísmicos de PGA

en superficie. El escenario más crítico (Figura 4.33.B) se dio para el hipocentro 3 que se ubica aproximadamente a una distancia epicentral de 140 km de la estación PQR.

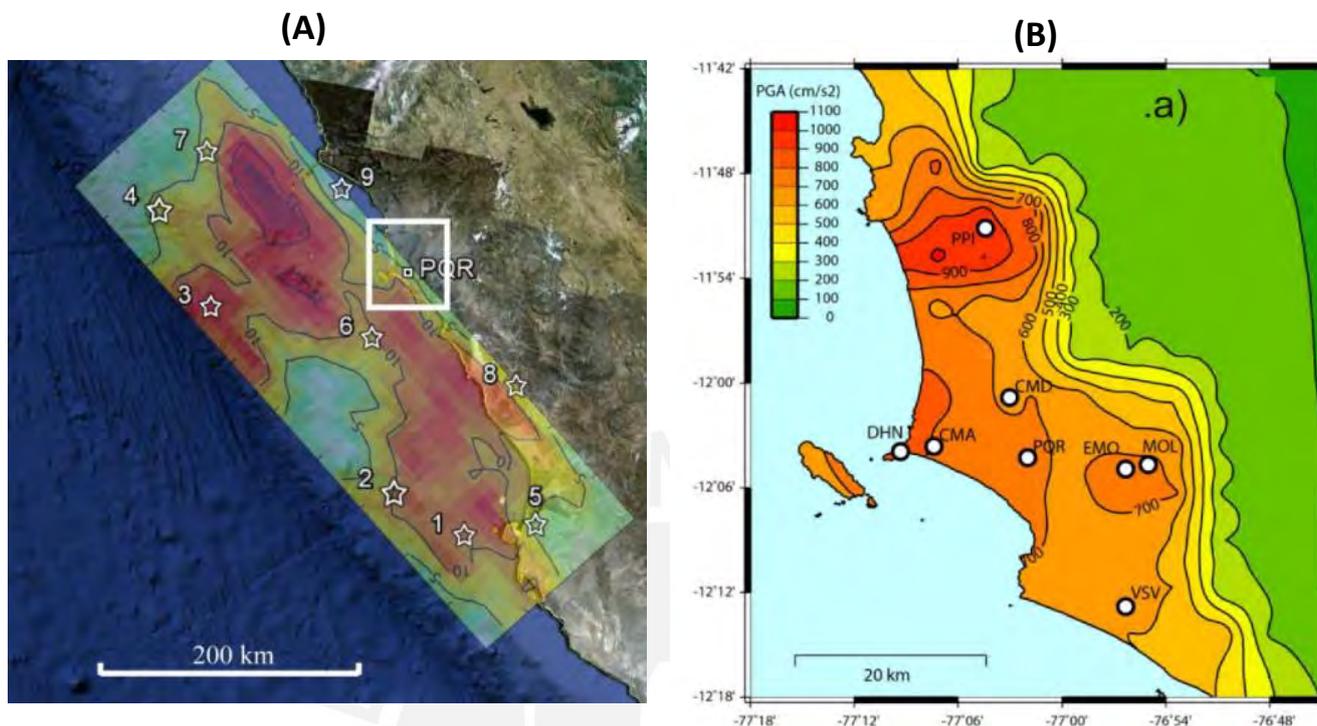


Figura 4.33. (A) Modelamiento numérico de la aspereza causante de un sismo de 8.8 Mw frente a las costas de Lima con 9 posibles epicentros (Pulido et al, 2012). (B) Escenario sísmico de PGA para el sismo de 8.8 Mw estimado con simulación numérica y convolucionado con los perfiles Vs obtenidos por Calderón (2012) en 8 sitios de Lima (Pulido et al, 2012).

4.4.2. Sismo de Maule (Chile, 2010)

El 27 de Febrero de 2010 a las 3:34 am (hora local), el territorio chileno fue víctima de uno de los terremotos más potentes de su historia reciente. El sismo de magnitud 8.8 Mw tuvo epicentro en el océano Pacífico a 115 km al noroeste de la ciudad de Concepción y a una profundidad de 35 km. Según Verdugo y González (2015), el área de ruptura tuvo aproximadamente una longitud de 550 km y un ancho de 170 km (Figura 4.34). Las estaciones de la red acelerográfica chilena registraron el sismo, entre ellas la estación ANGOL que registró el máximo PGA con 0.928 g.

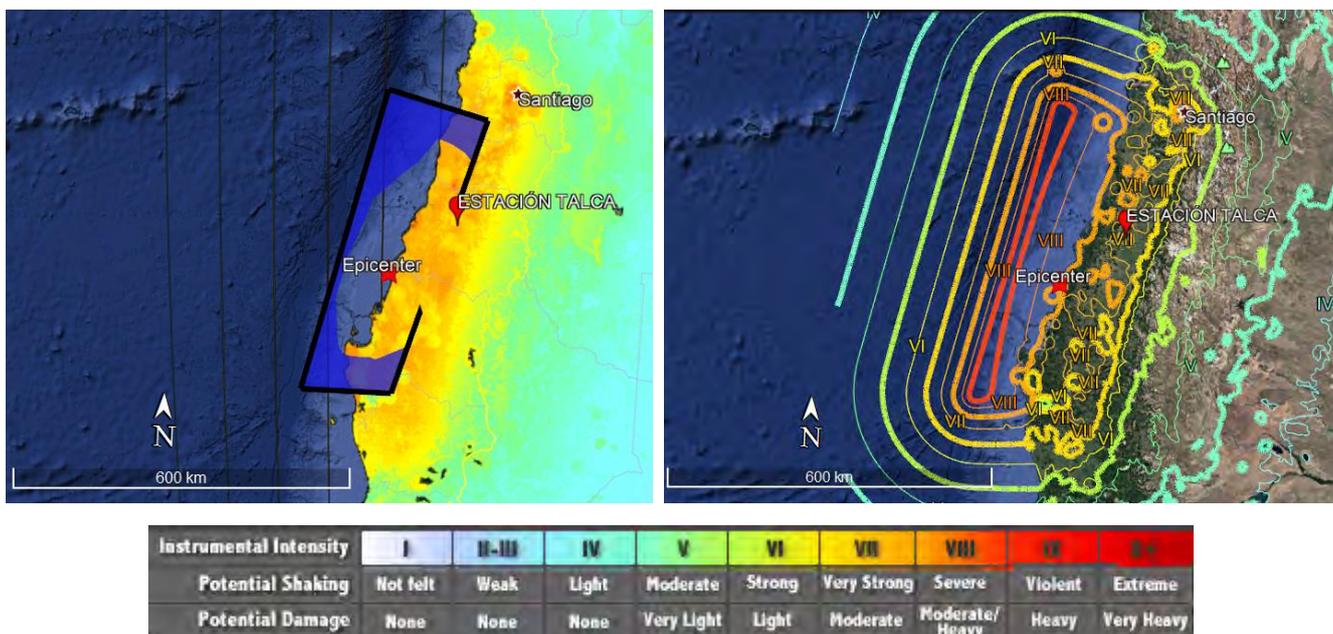


Figura 4.34. Mapa de intensidades para el sismo de 8.8 Mw (Maule-Chile, 2010)

Según Tavera (2014), las características sísmicas de este terremoto se asemejan a las del sismo pronosticado para Lima. Tavera menciona que el espectro sintético PSD que resulta de los modelamientos numéricos para el sismo de 8.8 Mw frente a las costas de Lima se ajusta muy bien al registrado en el terremoto de Maule–Chile 2010. Por lo tanto, una estación sísmica en Chile con las mismas características dinámicas de suelo (FTE) que una estación en Lima puede ayudar a generar escenarios sísmicos para un sismo de gran magnitud utilizando la metodología propuesta en este trabajo.

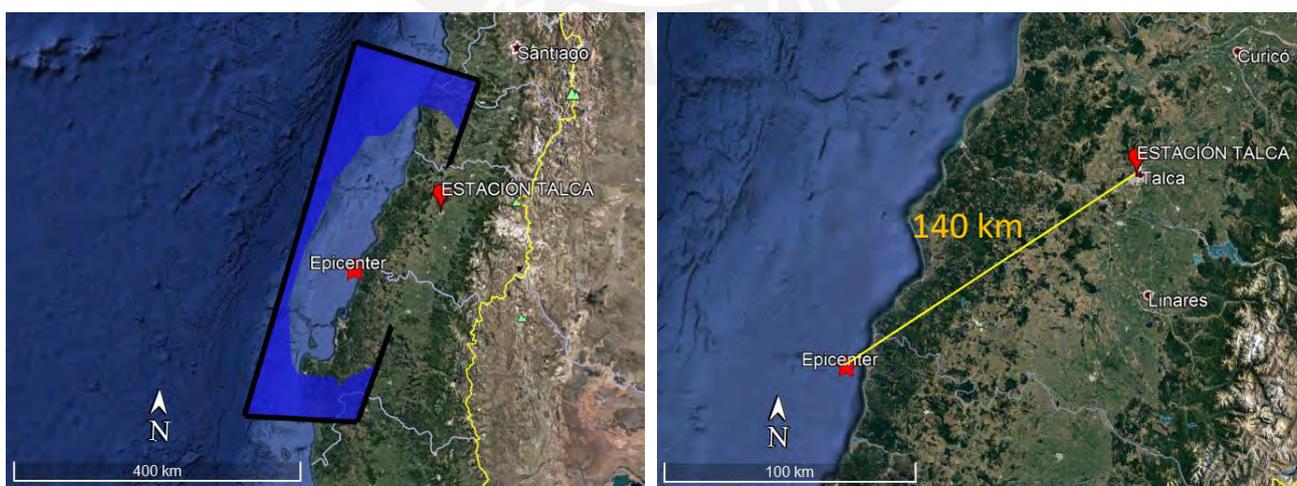


Figura 4.35. Superficie de falla (izquierda) y distancia del epicentro a la estación de registro TALCA (derecha) del sismo de Maule 2010.

La estación TALCA se ubica a 140 km del epicentro (Figura 4.35). Su perfil estratigráfico se compone principalmente por gravas de cantos rodados y rocas con estratos delgados de arcilla (Figura 4.36). Este tipo de suelo se asemeja a la grava aluvial sobre la que se encuentra asentada la estación sísmica PQR en la ciudad de Lima.

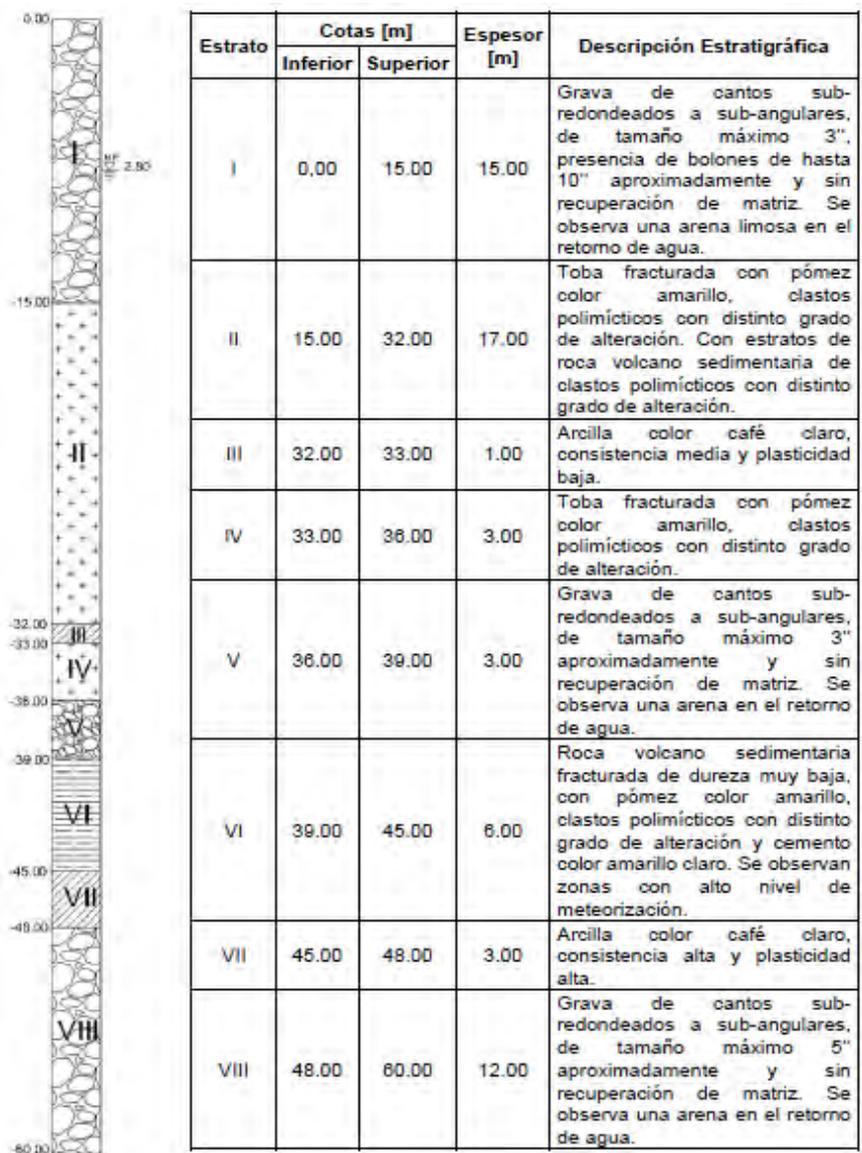
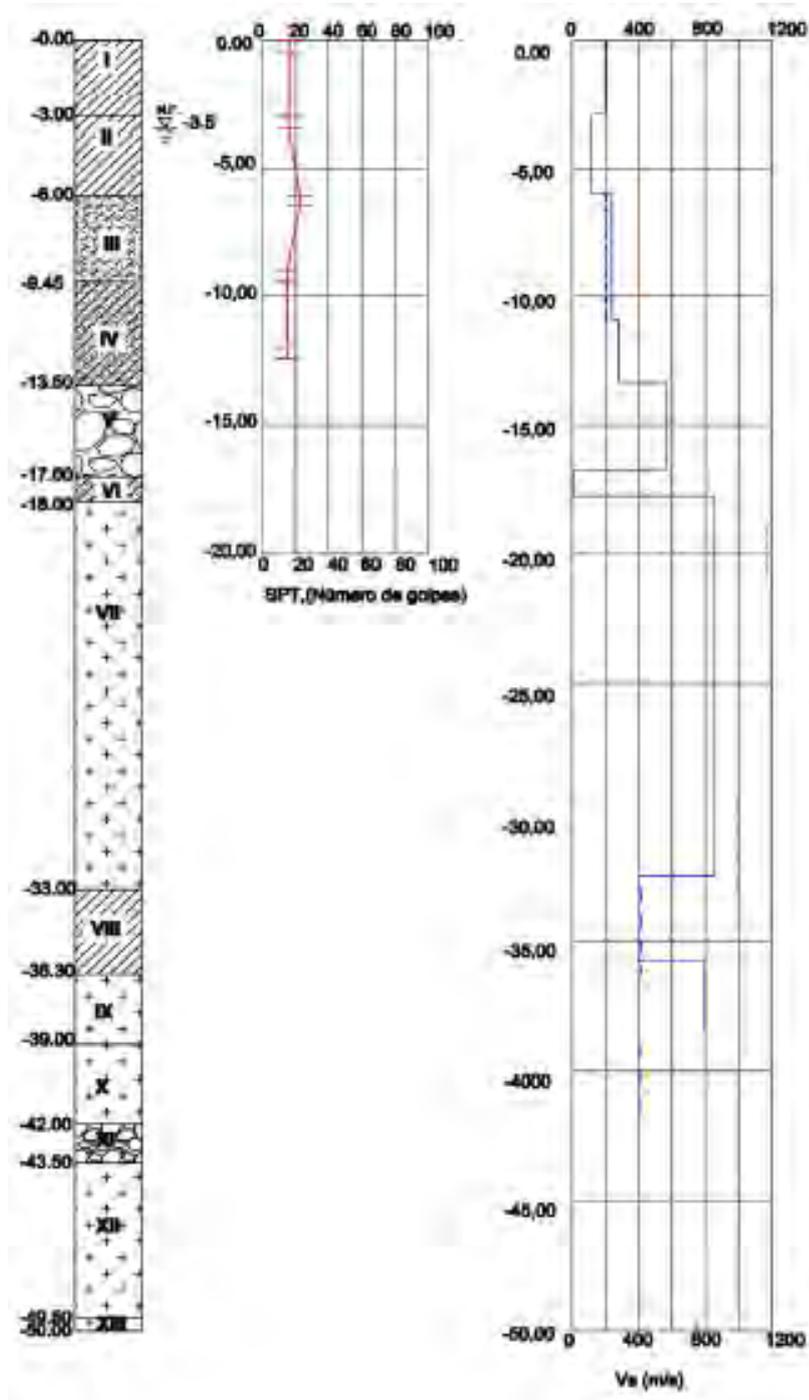


Figura 4.36. Modelo estratigráfico del sondaje en estación TALCA (RENADIC, 2010).

La figura 4.37 muestra los perfiles Vs en las estaciones TALCA y PQR, respectivamente. En TALCA, el perfil se define hasta los 40 metros, mientras que en PQR hasta los 100. A pesar de esto, se encuentran semejanzas entre ambos. Desde la superficie hasta los 5 metros de profundidad, la velocidad de onda S en PQR es aproximadamente 300 m/s, mientras que en TALCA es de 200 m/s, aunque en profundidad se extiende hasta los 13

metros. Luego, ambos perfiles presentan 5 metros con 600 m/s. Finalmente, en los dos lugares se alcanzan los 40 metros con aproximadamente 800 m/s.

TALCA



PQR

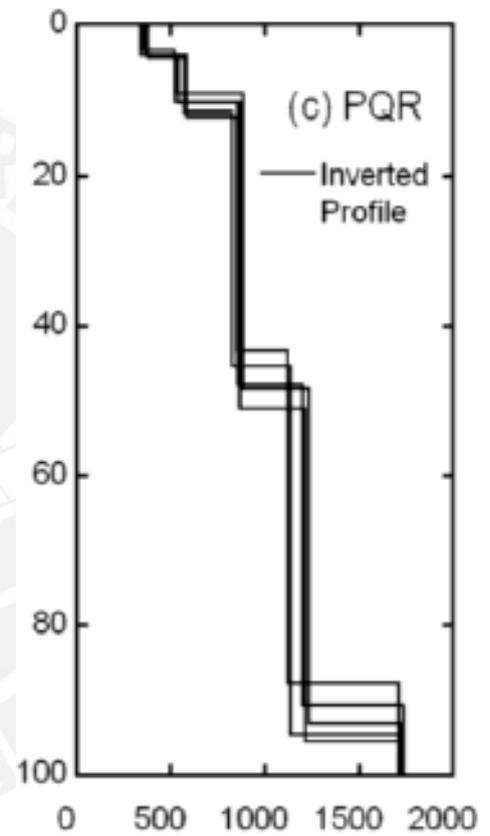


Figura 4.37. Perfil Vs en estación TALCA y PQR (RENADIC, 2010).

Una mayor semejanza en las características dinámicas entre TALCA y PQR se aprecia en sus FTEs. La figura 4.38 muestra las FTEs de TALCA y PQR, respectivamente. Se observa que los picos predominantes se ubican entre 3 y 10 Hz. Debe considerarse que en PQR la FTE se encuentra en escala logarítmica en ambos ejes, mientras que en TALCA, solo en el eje horizontal.

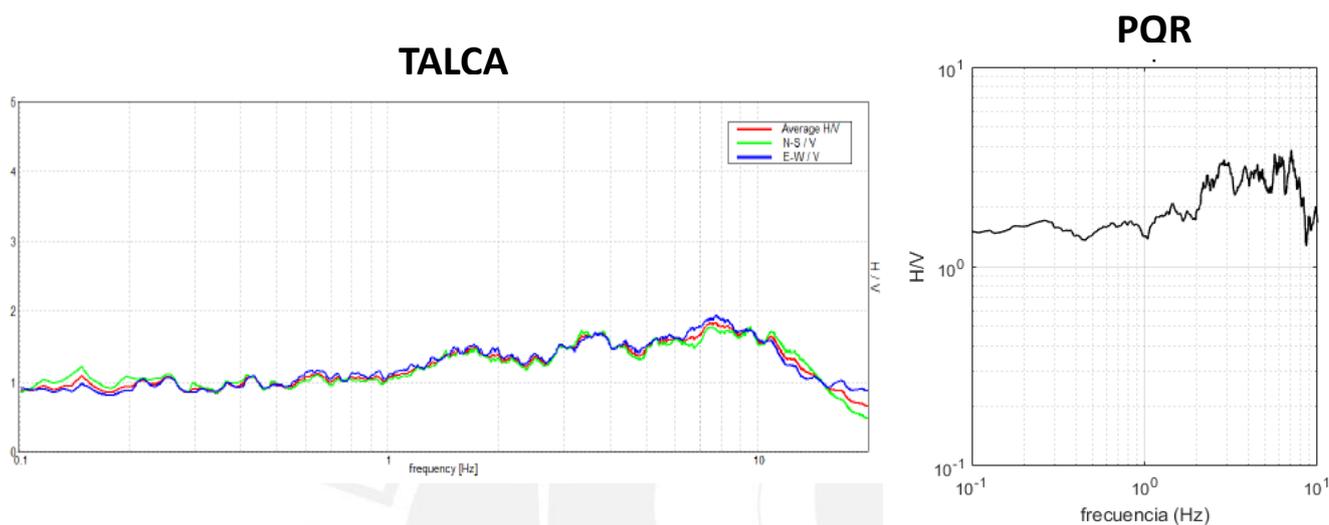


Figura 4.38. Función de Transferencia Empírica de estación TALCA (RENADIC, 2010) y PQR.

Por lo tanto, la estación TALCA es una estación análoga a la estación PQR y puede utilizarse para evaluar el comportamiento dinámico del suelo en Lima con el registro del sismo de 8.8 Mw (Maule, 2010). Esta señal se deconvolucionará a roca y se propagará en los suelos de Lima con el objetivo de proponer escenarios sísmicos para un terremoto de esta magnitud.

4.4.3. Ejecución del procedimiento

Los acelerogramas convolucionados en las estaciones SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001, LIM018 con el sismo de 8.8 Mw se muestran en la figura 4.39. Además, en la misma figura se presentan el registro en la estación TALCA (referencia PQR) en rojo y en color azul el acelerograma deconvolucionado en roca. Se aprecian los valores de PGA de cada señal y se observa su cambio en las distintas estaciones. CH2 y SJL2 presentan las aceleraciones máximas con valores de 1421.51 y

1403.31 cm/s², respectivamente. Por otro lado, los sitios con menor amplificación se dan en las estaciones NNA y CL2 con 270.39 y 372.58 cm/s². El valor de PGA en estación TALCA (PQR) es 415.75 cm/s² y en roca 172.17 cm/s². Según los mapas de las Figuras 4.5 y 4.7, la estación CH2 se encuentra situada en un suelo compuesto superficialmente de arenas y limos (H<10 m), y clasificada como Zona II. Asimismo, la estación SJL2 se encuentra sobre arenas eólicas y es clasificada sísmicamente como Zona IV. En contraste, la estación NNA está ubicada sobre roca y la estación PQR sobre grava aluvial, siendo clasificada como Zona I.

Es importante señalar que según la microzonificación vigente la estación PQR se encuentra sobre suelo rígido S1. Según la norma de diseño sismorresistente (2016), el valor de la aceleración de diseño en suelo rígido (Z) en la ciudad de Lima es 0.45 g, es decir, 441.45 cm/s², valor muy cercano en este caso al de PQR (415.75 cm/s²). Por lo tanto, los resultados presentados a continuación ayudarían a mejorar los valores propuestos por la norma sísmica vigente para los distintos tipos de suelo en Lima.

La figura 4.40 presenta los espectros de respuesta en las estaciones SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001, LIM018 para el sismo evaluado. Además, se presentan el espectro de respuesta del registro (color rojo) y del acelerograma deconvolucionado en roca (color azul). Se observa el cambio en la amplitud de las aceleraciones, debido al comportamiento dinámico del suelo en cada lugar y la diferencia con respecto a los valores en la estación de referencia y el sustrato rocoso.

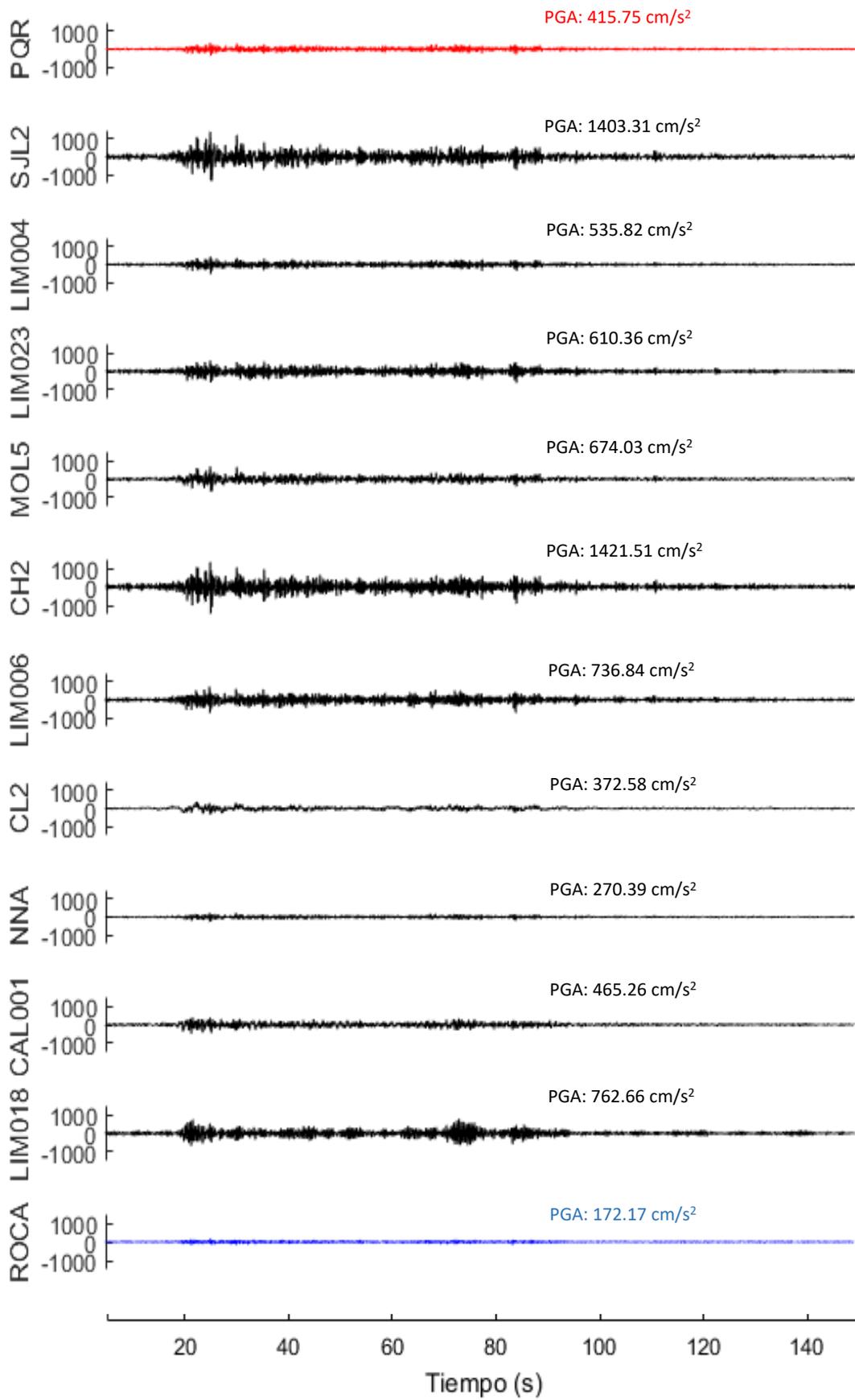


Figura 4.39. Acelerogramas sintéticos convolucionados en las estaciones SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001 y LIM018 para un sismo de 8.8 Mw (Maule-Chile, 2010)

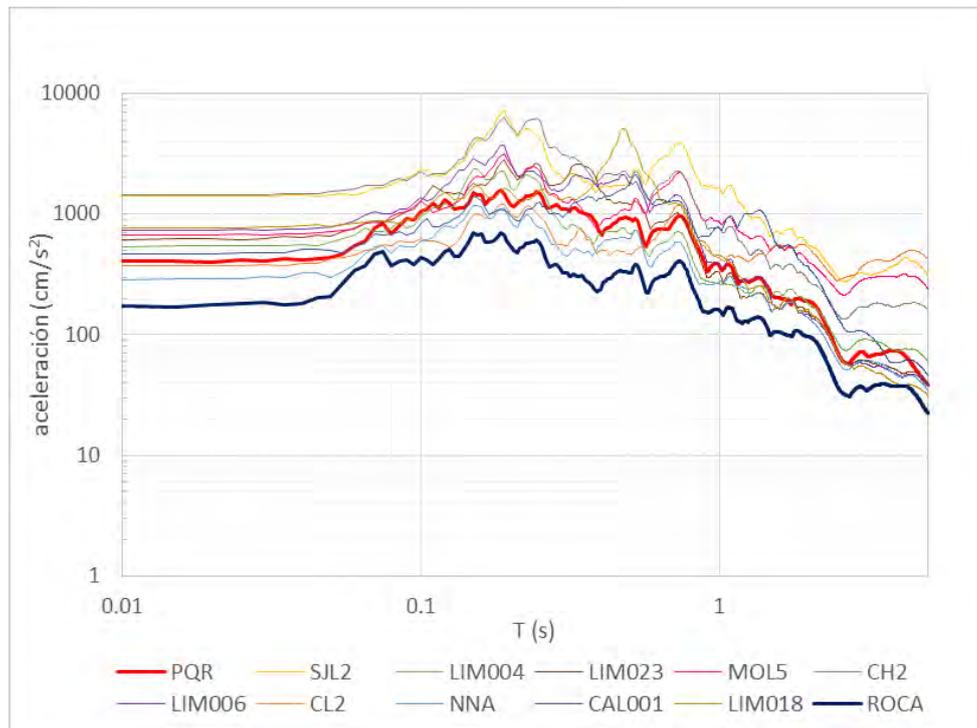


Figura 4.40. Espectros de respuesta en las estaciones PQR, SJL2, LIM004, LIM023, MOL5, CH2, LIM006, CL2, NNA, CAL001, LIM018 en el sismo de Maule 2010 (8.8 Mw).

4.4.4. Escenarios sísmicos

El comportamiento dinámico del suelo en la ciudad de Lima se evaluó utilizando escenarios sísmicos con el sismo chileno de 8.8 Mw. Con los ER calculados en cada estación de interés (100 de ruido ambiental y 38 de sismo) con la metodología de la figura 1.1 y la ayuda del programar SURFER, las pseudoaceleraciones se agruparon de tal forma de obtener mapas de PGA y de distintos periodos estructurales.

La figura 4.41 muestra los mapas de intensidad sísmica para PGAs y estructuras de periodo estructural de 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 segundos en la ciudad de Lima. Se utilizó una interpolación Kriging para los valores de aceleración entre estaciones.

En el mapa de PGAs (Figura 4.41.A), los valores máximos se concentran principalmente en tres zonas de la ciudad. Al este, próximo a las estaciones de San Juan de Lurigancho con valores de 1350 cm/s^2 ; al norte, en Puente Piedra y Ventanilla con aceleraciones de 1100 cm/s^2 ; y al sur, cerca de las estaciones de registro de Chorrillos con valores de 1300 cm/s^2 . Asimismo, PGAs con valores de aceleración intermedia de 750 cm/s^2 pueden observarse en La Molina y San Martín de Porres.

Para periodos estructurales de 0.1 segundos, el escenario sísmico muestran que las aceleraciones pico siguen concentrándose en los mismos distritos de la ciudad. Al este, las zonas de mayor intensidad se dan en los distritos de San Juan de Lurigancho (2200 cm/s²) y La Molina (1500 cm/s²). Al norte, en Ventanilla (2000 cm/s²) y Comas (1600 cm/s²), y Puente Piedra con 1300 cm/s². Al sur, principalmente en los distritos de Chorrillos y Villa María del Triunfo con 2100 cm/s² y Barranco (1300 cm/s²). Además, se observan máximos en la zona céntrica del distrito de Bellavista con aceleraciones entre 1300 y 1400 cm/s².

El escenario sísmico para T= 0.2 segundos muestra las máximas aceleraciones esperadas con respecto a los otros periodos estructurales, en ese sentido estas edificaciones serían las que se sometan a las mayores intensidades para un sismo de esta naturaleza. Los movimientos pico se presentan en los distritos de San Juan de Lurigancho, Ventanilla, Chorrillos con aceleraciones entre 4000 y 5000 cm/s². Se observan además intensidades alrededor de 3000 cm/s² en los distritos de La Molina y Puente Piedra.

La misma distribución de aceleraciones se observa para el escenario con T=0.3 s, pero con picos entre 2000 y 2800 cm/s². Para periodos estructurales de 0.4 s, las aceleraciones máximas aparecen en el distrito de Santa Rosa, Ventanilla (al norte), Puente Piedra, San Martín de Porres, San Juan de Lurigancho (norte y sur del distrito), Chorrillos y Villa María del Triunfo. El rango de valores de aceleración se encuentra entre 1800 y 2300 cm/s².

Para periodos estructurales de 0.5 segundos, el distrito de San Martín de Porres muestra las mayores aceleraciones con 3600 cm/s². Para periodos altos (T=0.6, 0.8, 1 s), los picos de aceleración regresan a los distritos de San Juan de Lurigancho, Chorrillos y Puente Piedra. Para T=0.6 s, también se observan valores máximos en San Martín de Porres, La Molina y Ventanilla con aceleraciones alrededor de 2000 cm/s², y valores intermedios de 1200 cm/s² en el Rímac y al oeste del Callao (La Punta). Para T=0.8 s, valores de intensidad media (1200 cm/s²) se observan en La Molina, el Rímac y La Punta y, finalmente, para T= 1 s aceleraciones de 800 cms/s² se encuentran en La Molina, La Punta, Bellavista y el Rímac.

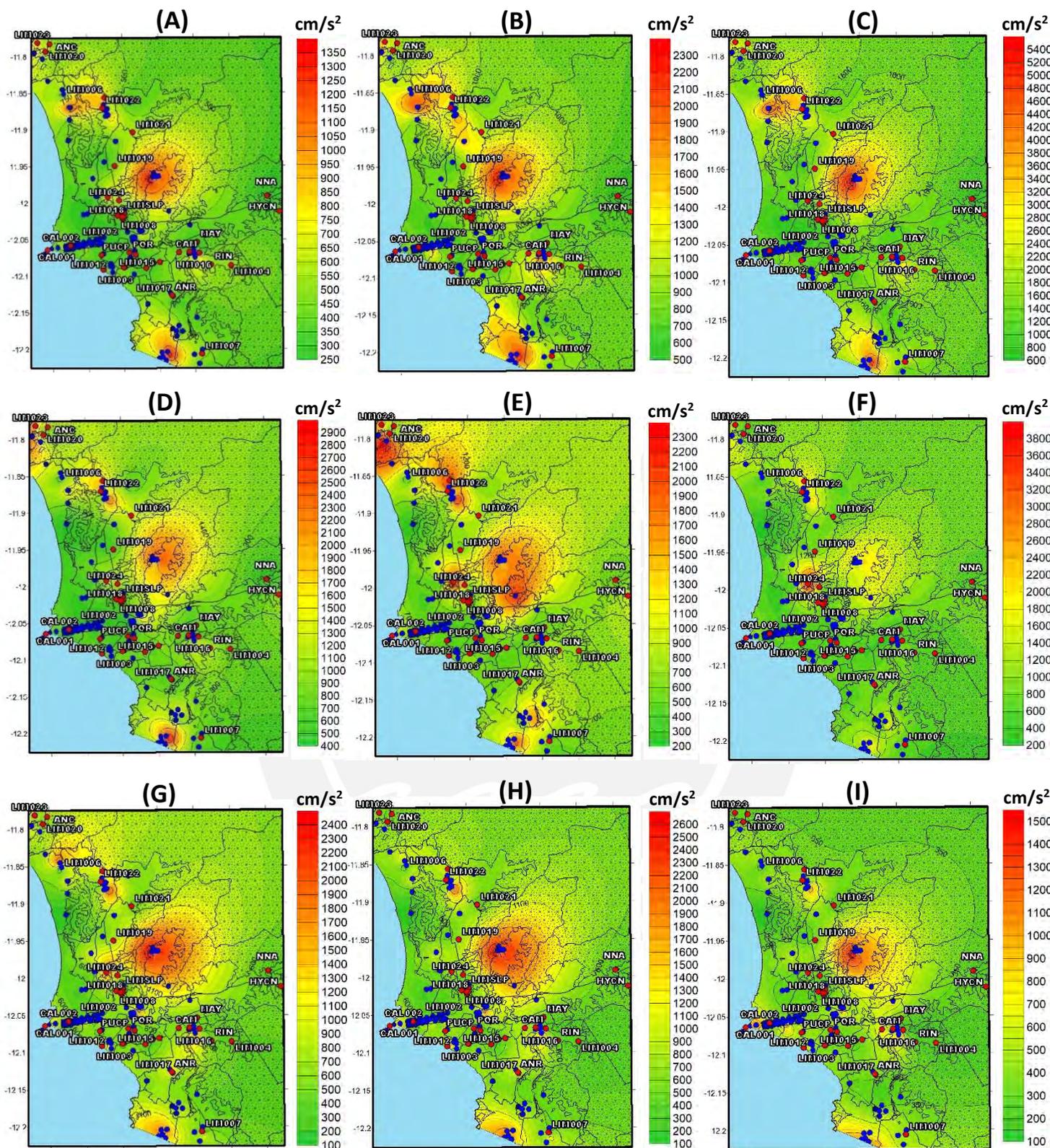


Figura 4.41. Escenario sísmico en la ciudad de Lima con el sismo Maule – Chile 2010 (8.8 Mw) para los periodos estructurales: (A) aceleración máxima del suelo (PGA) (B) 0.1 segundos (C) 0.2 segundos (D) 0.3 segundos (E) 0.4 segundos (F) 0.5 segundos (G) 0.6 segundos (H) 0.8 segundos (I) 1.0 segundos.

Como se mencionó en párrafos anteriores, el escenario más crítico encontrado por Pulido et al (2012) al modelar el sismo de 8.8 Mw para Lima convolucionándolo en los 8 perfiles de velocidad de onda S de Calderon et al (2012) se muestra en la Figura 4.42.A. Como puede observarse, los PGA máximos se alcanzan al norte de la ciudad con valores cercanos a 1100 cm/s^2 en el distrito de Puente Piedra. Por otro lado, la figura 4.42.B muestra el escenario sísmico para PGAs creado con FTEs y la metodología propuesta en este trabajo con el sismo chileno de 8.8 Mw. En este caso, se utilizan solo las 38 estaciones sísmicas de Lima y Callao. Se aprecia que los valores de PGA máximos se encuentran también al norte de la ciudad, en los distritos de Puente Piedra y San Martín de Porres con valores próximos a 780 cm/s^2 .

La compatibilidad de los escenarios PGA entre estas dos metodologías valida la información de los resultados obtenidos y hace satisfactoria la utilización de la FTE como parámetro para definir el comportamiento dinámico del suelo. En ese sentido, el mayor número de estaciones de análisis presentado en este trabajo (Figura 4.43) estarían dándole mayor resolución a la lectura de los efectos del suelo en el área metropolitana de Lima y Callao.

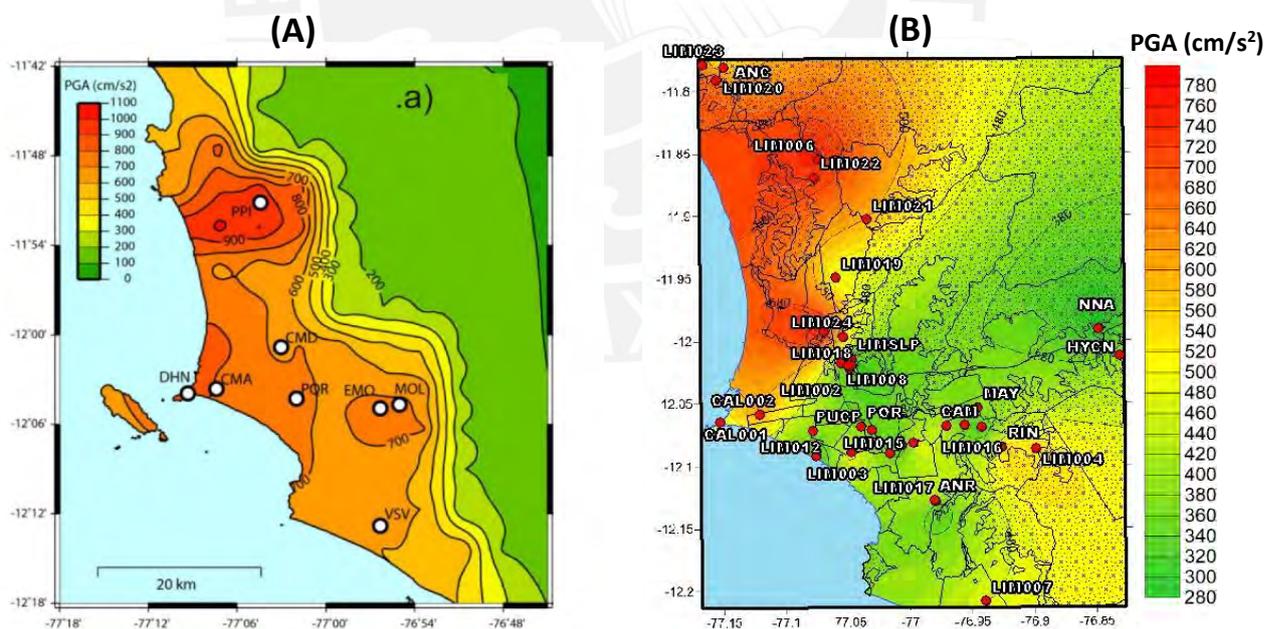


Figura 4.42. (A) Valores de aceleración máxima del suelo (PGA) en la ciudad de Lima para un sismo de 8.8 Mw obtenido mediante simulación numérica a partir de los perfiles estratigráficos conseguido con ensayos geofísicos en las estaciones PPI (LIM006), CMA (CAL002), MOL (LIM010), VSV (LIM007), PQR (PQR) (Pulido et al, 2012). (B) Valores de aceleración máxima del suelo (PGA) en la ciudad de Lima para un sismo de 8.8 Mw (Maule-Chile, 2010) reproducido en las estaciones sísmicas de la ciudad de Lima mediante el método del Cociente Espectral H/V.

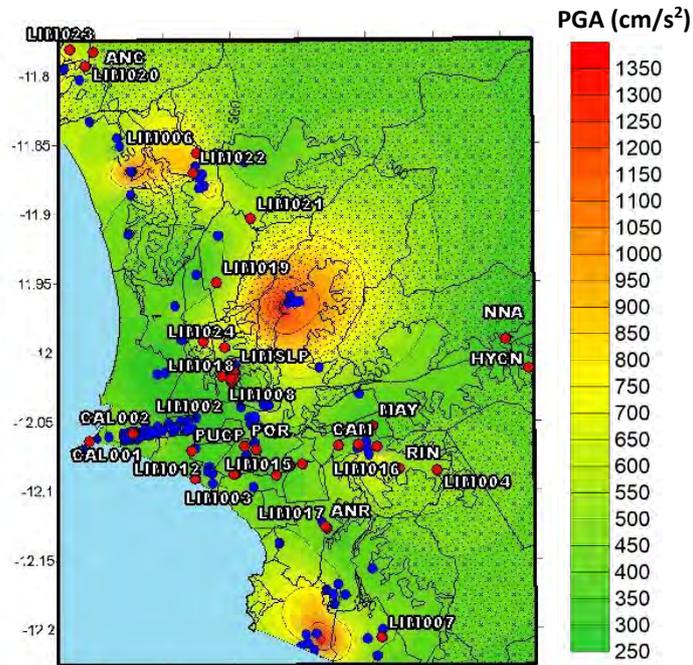
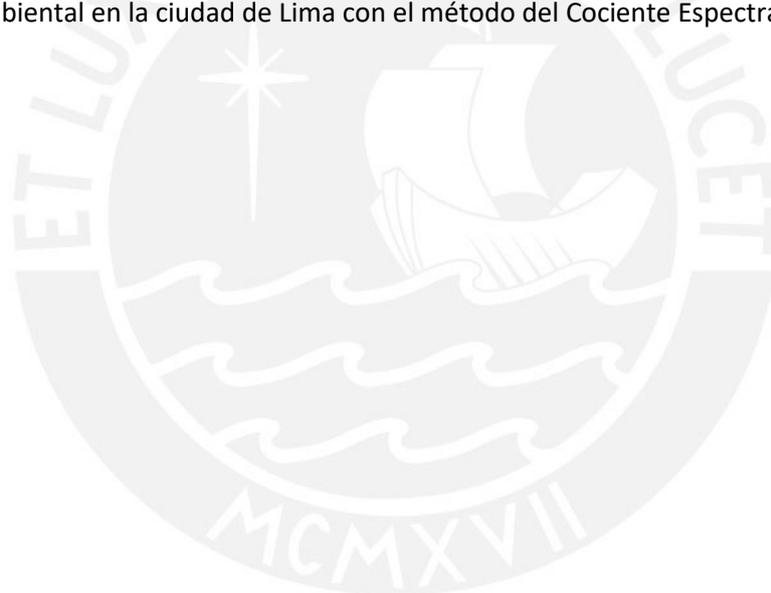


Figura 4.43. Valores de aceleración máxima del suelo (PGA) en la ciudad de Lima para un sismo de 8.8 Mw (Maule-Chile, 2010) reproducido en estaciones sísmicas y de ruido ambiental en la ciudad de Lima con el método del Cociente Espectral H/V.



5. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL DISTRITO DE BELLAVISTA

5.1. Antecedentes

5.1.1. Ubicación

El distrito de Bellavista se encuentra ubicado en la provincia constitucional del Callao. El distrito tiene una superficie rectangular de 4.56 km² con una población aproximada de 75 200 habitantes. Como se observa en la Figura 5.1, limita al sur con los distritos de La Perla (Callao) y San Miguel (Lima); al norte y oeste, con el distrito del Callao y al este con el Cercado de Lima.



Figura 5.1. Ubicación del distrito de Bellavista (Fuente: Google Earth, 2018).

5.1.2. Hidrología

La presencia de ríos cercanos al área de estudio hace de suma importancia la recopilación de información sobre la hidrología de la zona. La erosión y el transporte de sedimentos ocasionados por ríos cercanos influyen en las propiedades físicas, mecánicas y dinámicas del suelo. En ese sentido, la información hidrológica ayuda a realizar una correcta y más completa interpretación de los resultados en una microzonificación sísmica.

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca del río Rímac (Figura 5.2), la cual está dividida en nueve unidades hidrográficas. El distrito de Bellavista se encuentra dentro de la unidad hidrográfica “Bajo Rímac” que tiene una superficie de 441.03 km² según Autoridad Nacional del Agua (2010).

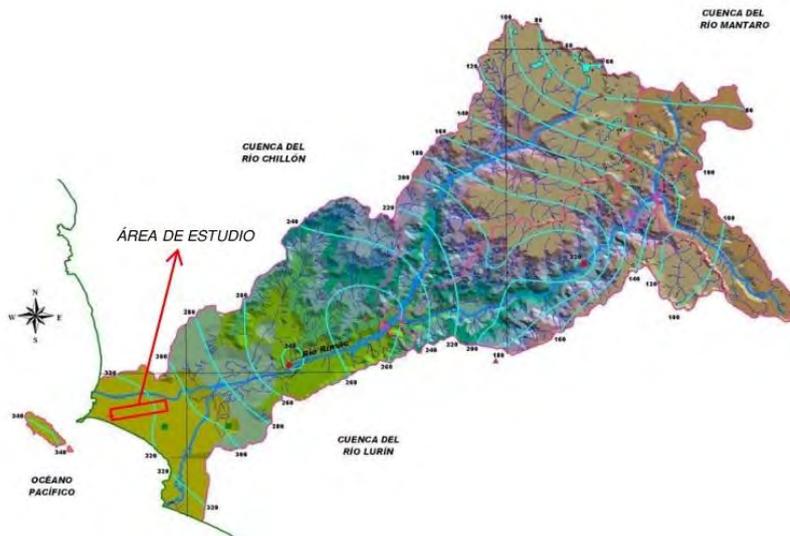


Figura 5.2. Cuenca del río Rímac (SENAHMI, 2013)

La figura 5.3 muestra el paso de un antiguo canal (flechas azules) en el área de estudio. Este antiguo canal podría haber tenido impacto en los suelos presentes en el distrito.



Figura 5.3. Curvas topográficas de la Ciudad de Lima (Aguilar y Alva, 2007.)

5.1.3. Paleovalles

En la Figura 5.4 se observa la existencia de un paleovalle en la zona este-sur del distrito (línea azul). Este hecho podría explicar los distintos estratos de suelo ubicados entre la zona este y oeste de Bellavista (Ver Figura 5.5). Es decir, el antiguo curso del agua (paleovalle) podría haber tenido influencia en los suelos presentes en el área, así como en sus espesores.

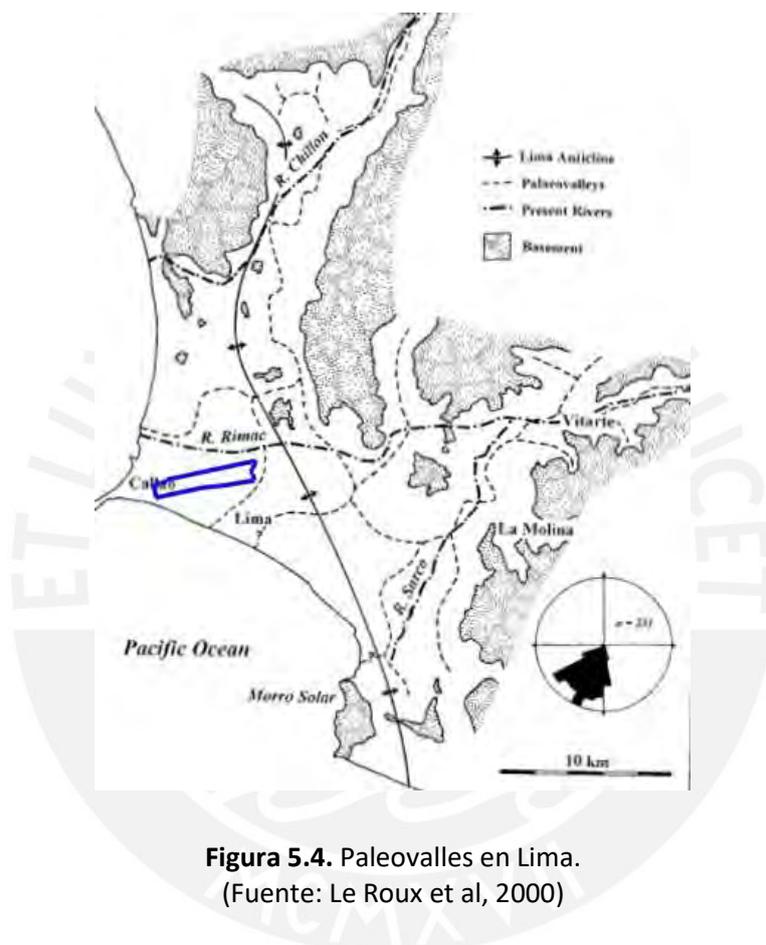


Figura 5.4. Paleovalles en Lima.
(Fuente: Le Roux et al, 2000)

5.1.4. Geotecnia y Geomorfología

Según el mapa de suelos de Lima, Bellavista se encuentra sobre tres tipos de suelo (Figura 5.5). De este a oeste, el distrito se compone de grava aluvial, arenas y limos con profundidades menores a los 10 metros, y, finalmente, arcillas y suelos orgánicos.

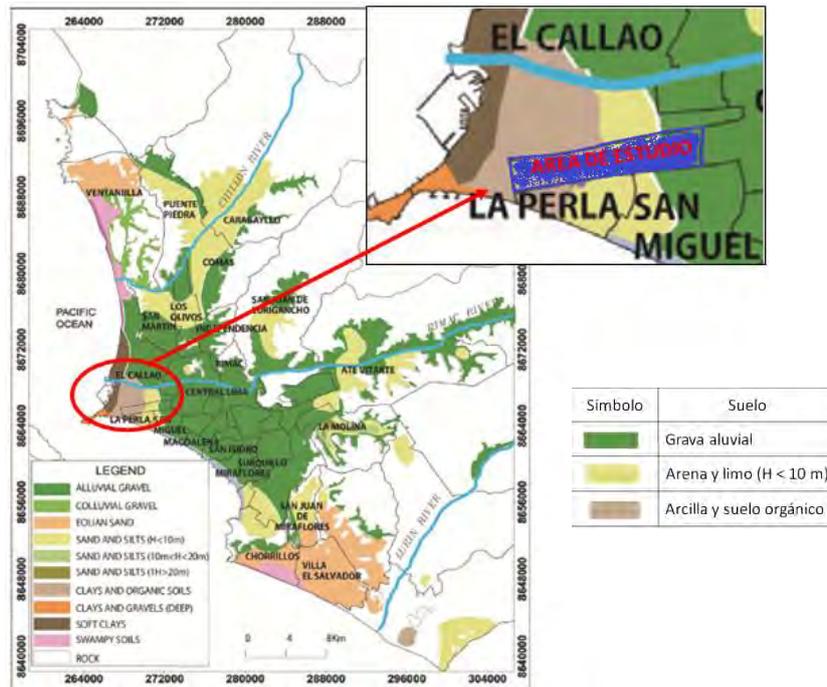


Figura 5.5. Distribución Geotécnica de suelos en Lima.
(Fuente: Calderón (2012)).

Tomando como referencia un estudio de suelos en la zona del actual centro comercial Mall Aventura Plaza Bellavista, ubicado al noreste del distrito, se aprecia una estratigrafía que corresponde con el mapa de suelos presentado en la figura 5.5. Se observa que la grava arenosa está presente en toda la zona, superficialmente en algunos lugares y subyaciendo los estratos de arcilla y arena en otros. La figura 5.6 presenta la estratigrafía de una calicata de 9 metros de profundidad, donde se encuentran 3 metros de arcilla arenosa, seguidos de 2 metros de arena limosa y finalmente 4 metros de grava arenosa.

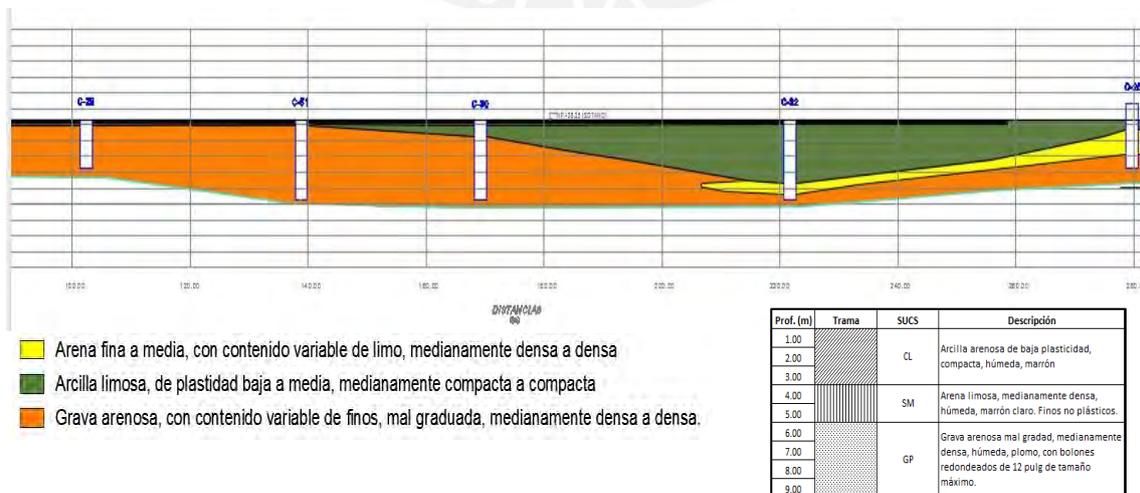


Figura 5.6. Estratigrafía en la zona del C.C. Mall Aventura Plaza Bellavista.

Según la Figura 5.7, la geomorfología en el área de estudio está compuesta de hasta seis niveles de terrazas aluviales. La Figura 5.8 muestra una vista 3D del distrito en donde pueden apreciarse los niveles y las pendientes en la zona.

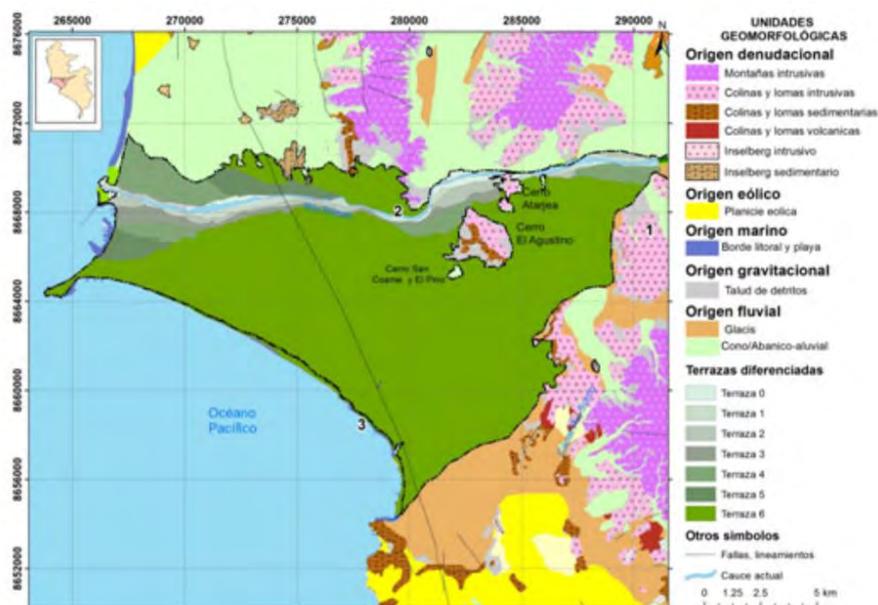


Figura 5.7. Unidades Geomorfológicas cercanas al área de estudio. (Fuente: Villacorta et al (2012))

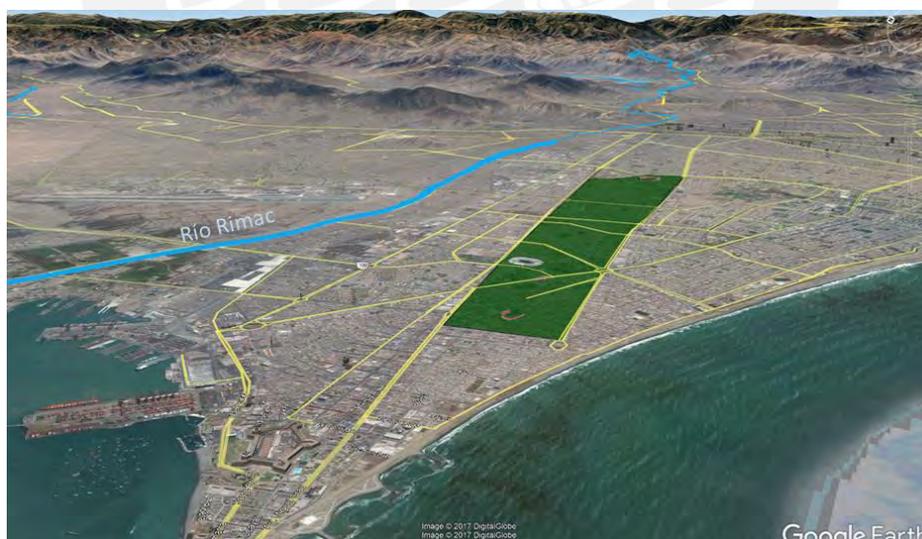


Figura 5.8. Perspectiva en digital de las pendientes de las zonas cercanas al área de estudio. (Fuente: Google Earth 2018).

5.1.5. Mediciones de ruido ambiental

El mapa de isoperiodos de Lima y Callao propuesto por CISMID (2004, 2012) establece para Bellavista que los periodos fundamentales entre 0.2-0.4 segundos abarcan la mayor parte del distrito (Figura 5.9). Sin embargo, se encuentran valores entre 0.1-0.2 segundos y 0.6-0.9 segundos hacia el extremo este.



Figura 5.9. Mapa de Isoperiodos obtenidos a través de la microzonificación realizadas por CISMID (2004, 2012)

5.1.6. Microzonificación del distrito de Bellavista

De acuerdo con los trabajos de microzonificación realizados por CISMID (2016), el distrito se divide en tres zonas (I, II y III) (Figura 5.10).



Figura 5.10. Microzonificación del Distrito de Bellavista (Fuente: CISMID, 2016).

5.2. Evaluación del compartimiento dinámico del suelo en Bellavista

5.2.1. Trabajo de Campo

Se llevó a cabo un trabajo de campo el día 10 de Agosto del 2017 que consistió en el registro de ruido ambiental en 27 puntos del distrito de Bellavista según se detalla en la Figura 5.11. Se utilizaron dos sismómetros de banda ancha para dos cuadrillas conformadas por 11 y 12 personas, respectivamente. Las estaciones de registro se ubicaron lejos de avenidas principales para evitar perturbaciones en los registros.



Figura 5.11. Distribución de Puntos de medición en el Distrito de Bellavista

La Tabla 5.1 muestra la ficha técnica utilizada en el levantamiento de la información. Las cuadrillas se distribuyeron adecuadamente el trabajo para lograr que la información recolectada sea lo más precisa posible.

5.2.2. Funciones de Transferencia Empírica (FTE)

Las FTEs de los 27 puntos de registro se obtuvieron con la técnica del Cociente Espectral H/V utilizando el programa GEOPSY. Los parámetros de procesamiento usados en las señales de ruido ambiental se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.1. Ficha Técnica utilizada en el trabajo de campo

Punto:	P-15	Fecha:	10/08/17
Hora inicio:	9:08	Hora fin:	9:29
Longitud:	-77.133118	Latitud:	-12.067033
Referencia:	Intersección de Jr. Vigil y Jr. Atahualpa		



Tabla 5.2. Parámetros de procesamiento de los registros de ruido ambiental en Geopsy.

Parámetro	Valor
Longitud de ventanas	40.96 s
Overlap	50%
Filtro	Butterworth 4 polos
Rango de frecuencias	0.1-10 Hz
Ancho de espesor del taper coseno	5%
Suavizado	No smoothing

Tabla 5.3. Estaciones de registro de ruido ambiental.

Código	Latitud	Longitud	Hora Local	Zonificación
P-01	-12.062	-77.134	10:44	II
P-02	-12.064	-77.132	11:08	II
P-03	-12.061	-77.129	11:37	II
P-04	-12.063	-77.127	12:06	II
P-05	-12.061	-77.127	12:33	II
P-06	-12.059	-77.118	13:02	II
P-07	-12.059	-77.115	13:31	II
P-08	-12.062	-77.113	15:16	II
P-09	-12.057	-77.108	15:41	II
P-10	-12.055	-77.099	16:06	I
P-11	-12.058	-77.094	16:36	I
P-12	-12.054	-77.090	17:03	I
P-13	-12.054	-77.085	17:31	I
P-14	-12.051	-77.078	18:00	I
P-15	-12.067	-77.133	09:20	II
P-16	-12.066	-77.129	09:53	II
P-17	-12.066	-77.124	10:21	II
P-18	-12.062	-77.122	10:54	II
P-19	-12.064	-77.118	11:22	II
P-20	-12.064	-77.114	11:55	II
P-21	-12.059	-77.116	12:29	II
P-22	-12.062	-77.108	13:00	II
P-23	-12.059	-77.104	13:31	II
P-24	-12.061	-77.096	14:06	I
P-25	-12.061	-77.086	16:45	I
P-26	-12.059	-77.085	16:15	I
P-27	-12.059	-77.081	15:40	I

La tabla 5.3 muestra las coordenadas geográficas, hora de registro y zona según la microzonificación actual (Figura 5.10) de los 27 puntos levantados en el distrito de Bellavista. Como se observa en la figura 5.12, las FTEs presentan una tendencia gráfica con picos predominantes en bajas, alrededor de 1 Hz, y altas frecuencias, 8 Hz aproximadamente. Si se toma en cuenta la geotecnia del distrito (Figura 5.5), estos picos pueden interpretarse y asignarse a la presencia de suelo superficial (arcilla o arenas) y del conglomerado (grava aluvial).

Las curvas presentan el efecto de oleaje oceánico en el intervalo de frecuencias 0.1 - 0.5 Hz, por ello este rango de valores aparece achurado y no se toma en cuenta en el análisis de resultados. Por otro lado, las zonas propuestas por la microzonificación vigente

(CISMID , 2016) no manifiestan precisamente FTEs con las mismas formas espectrales ni las frecuencias dominantes enunciadas (Figura 5.13).

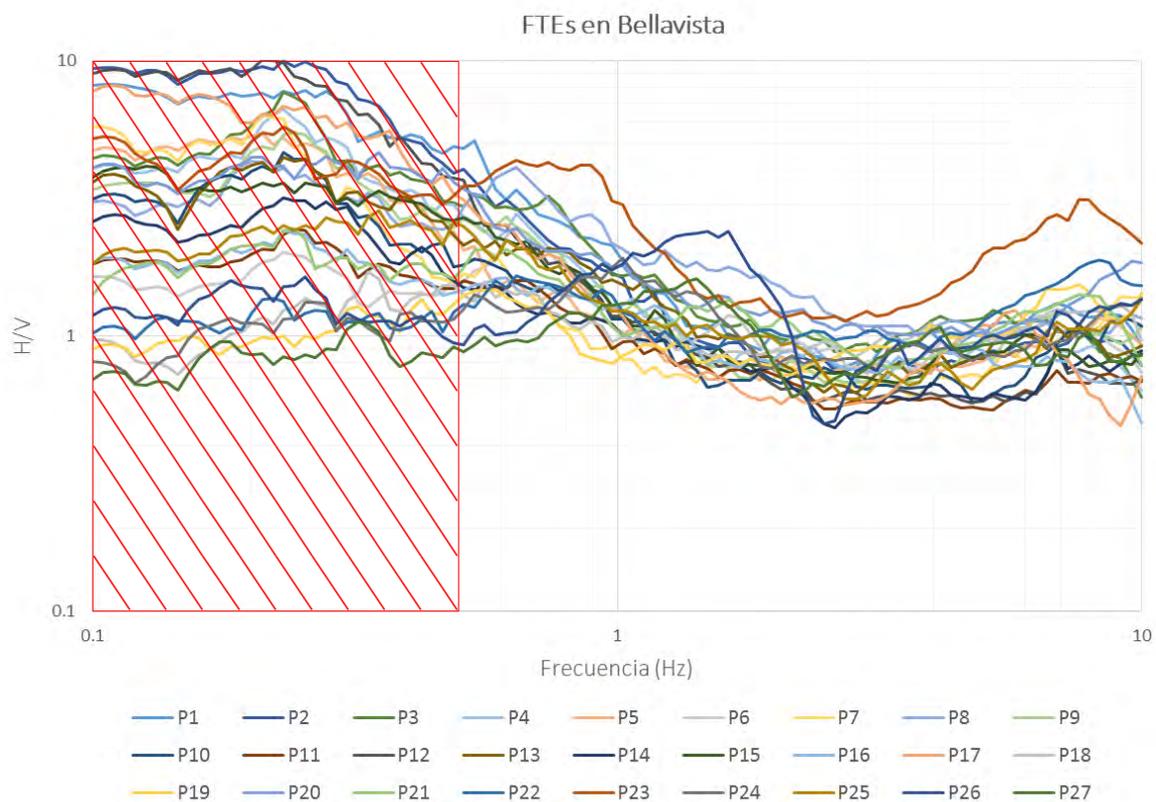


Figura 5.12. Funciones de Transferencia Empírica con ruido ambiental en Bellavista.

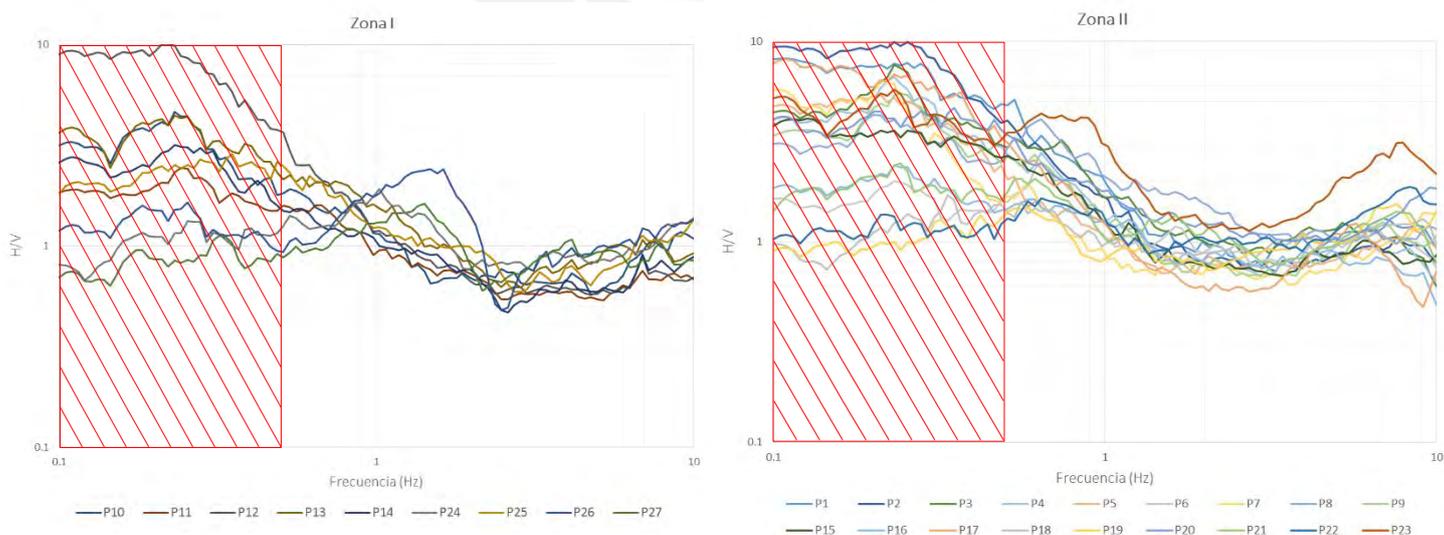


Figura 5.13. FTEs en Bellavista clasificadas según la microzonificación sísmica propuesta por CISMID (2016).

5.2.3. Familias Espectrales

Las FTEs del distrito de Bellavista se agruparon según los rasgos predominantes de su forma espectral, es decir se formaron familias espectrales. Las familias espectrales describen el comportamiento dinámico de los suelos con el fin de definir un número razonable de microzonas independientemente de la geotecnia del lugar (Angulo, 2013). En ese sentido, Bellavista se clasificó en 4 zonas:

- **Zona I:** Suelo firme sin amplificación significativa por efectos de sitio. Presenta amplitudes constantes alrededor de 1 en altas frecuencias (5-10Hz) asociadas a lugares sin presencia de suelos superficiales o a muy poca profundidad.
- **Zona II:** Zona de transición donde se observan mayores amplitudes en altas frecuencias (5-10 Hz) asociadas a la presencia de suelos superficiales.
- **Zona III:** Zona de mayor peligrosidad donde se observan periodos predominantes entre 0.7 y 2 Hz asociados al conglomerado más profundo.
- **Zona IV:** Zona anómala donde se observan amplitudes significativas en altas (5-10 Hz) y bajas frecuencias (0.7-2 Hz), asociadas a los suelos superficiales y al conglomerado, respectivamente.

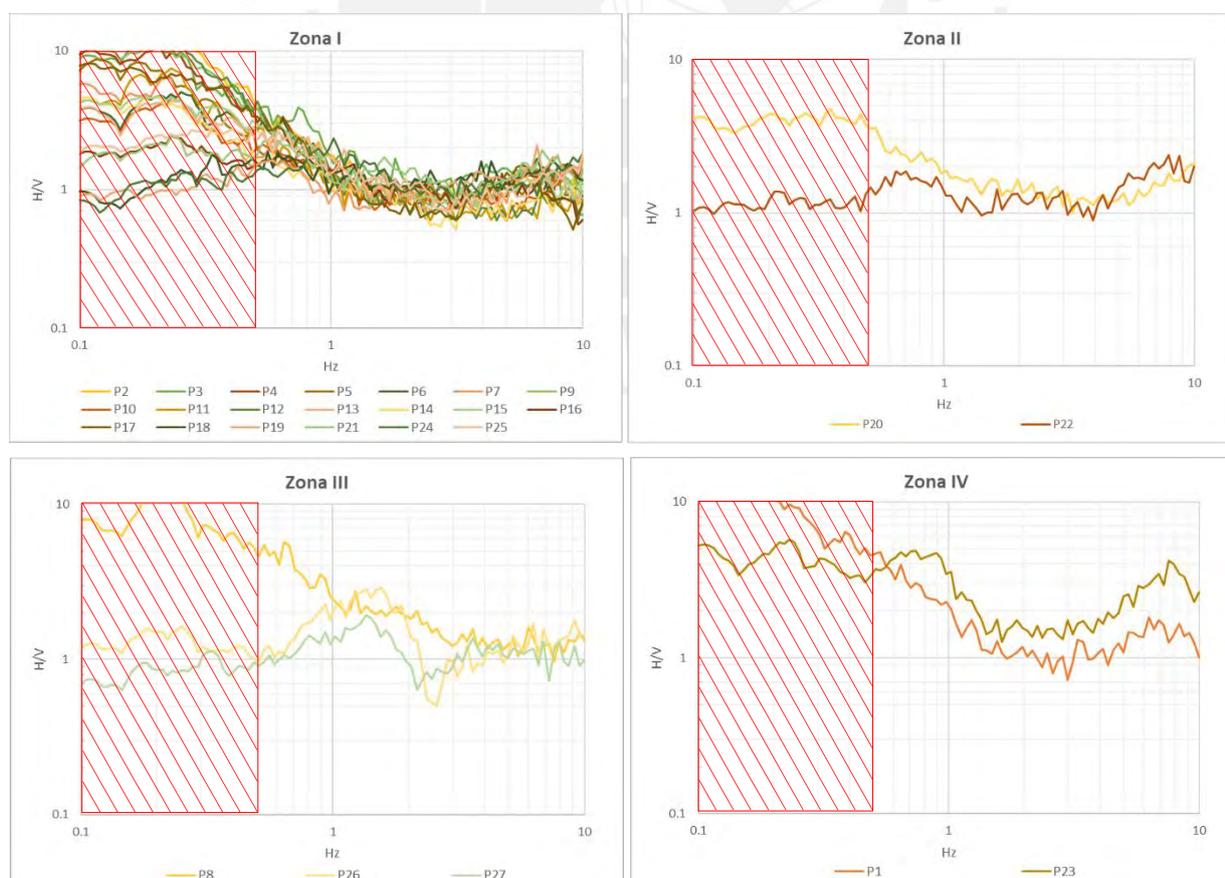


Figura 5.14. Familias espectrales en el distrito de Bellavista.

Las FTEs se ajustaron a modelos estratigráficos generados a partir del obtenido por Calderon et al (2012) en la estación CAL002. La figura 5.15 muestra un ajuste satisfactorio en forma espectral entre la FTE y FTT en la estación P-15. La figura 5.16 presenta el perfil estratigráfico típico del distrito de Bellavista acotándose intervalos de velocidad de onda S y profundidades promedio de los estratos de acuerdo a los 27 puntos analizados en este trabajo.

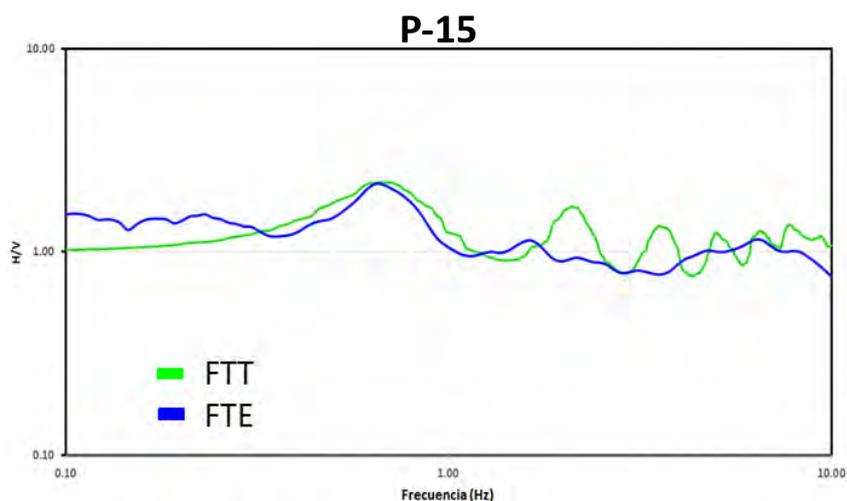


Figura 5.15. Comparación de FTE y FTT en estación P-15 del distrito de Bellavista.

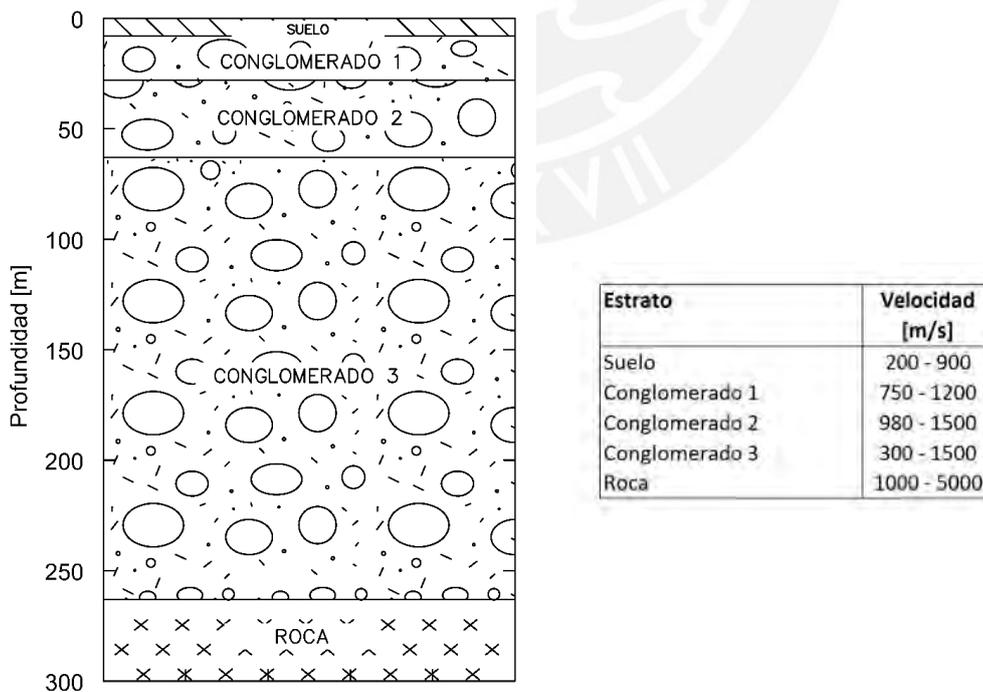


Figura 5.16. Modelo estratigráfico en el distrito de Bellavista.

5.2.4. Mapa de Isoperiodos

La Figura 5.17 muestra el mapa de isoperiodos para el suelo superficial, es decir tomando en cuenta los picos de alta frecuencia en las FTEs. En la zona de estudio, estos valores se encuentran entre 0.1 y 0.15 segundos a excepción de algunos puntos ubicados al oeste del distrito donde se hallan valores alrededor de 0.2 segundos (P3, P4, P16 y P17). La Figura 5.18 muestra el mapa de isoperiodos para el conglomerado. Los valores más altos se encuentran entre 2 y 2.5 segundos en los puntos P5, P10, P14, P17, P19 y P25.

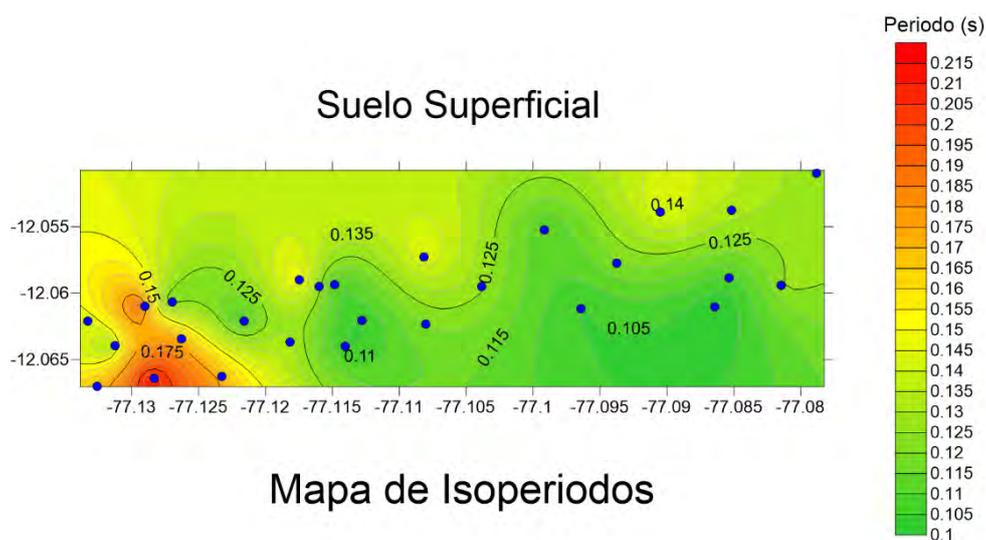


Figura 5.17. Mapa de isoperiodos del suelo superficial

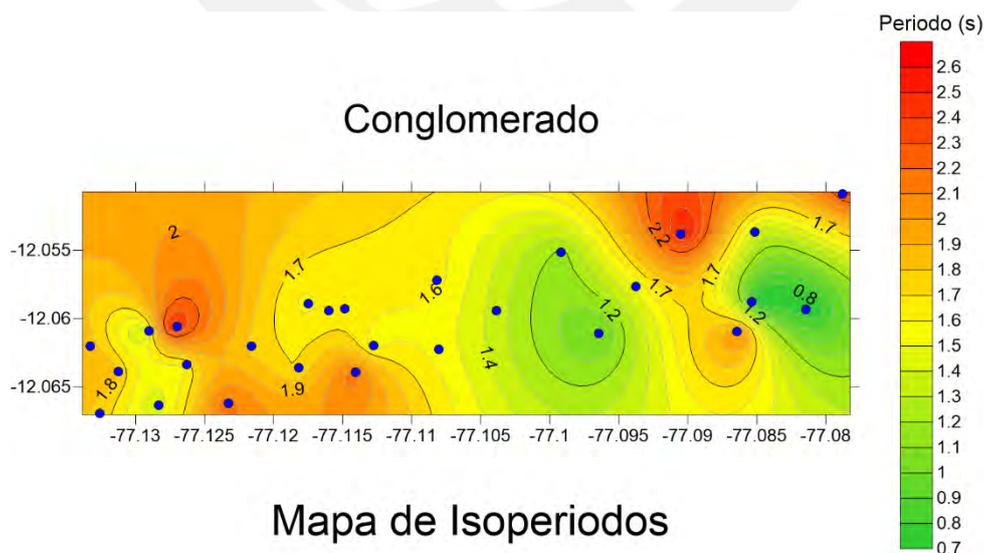


Figura 5.18. Mapa de isoperiodos del Conglomerado

5.2.5. Mapa de isoamplificaciones

La Figura 5.19 muestra el mapa de isoamplificaciones del suelo superficial. Sus valores máximos (entre 2.5 y 3 veces) se encuentran alrededor de P23. La Figura 5.20 muestra el mapa de isoamplificaciones del conglomerado. Los valores máximos están entre 4 y 5 veces próximos a los puntos P1, P8, P12, P20 y P23.

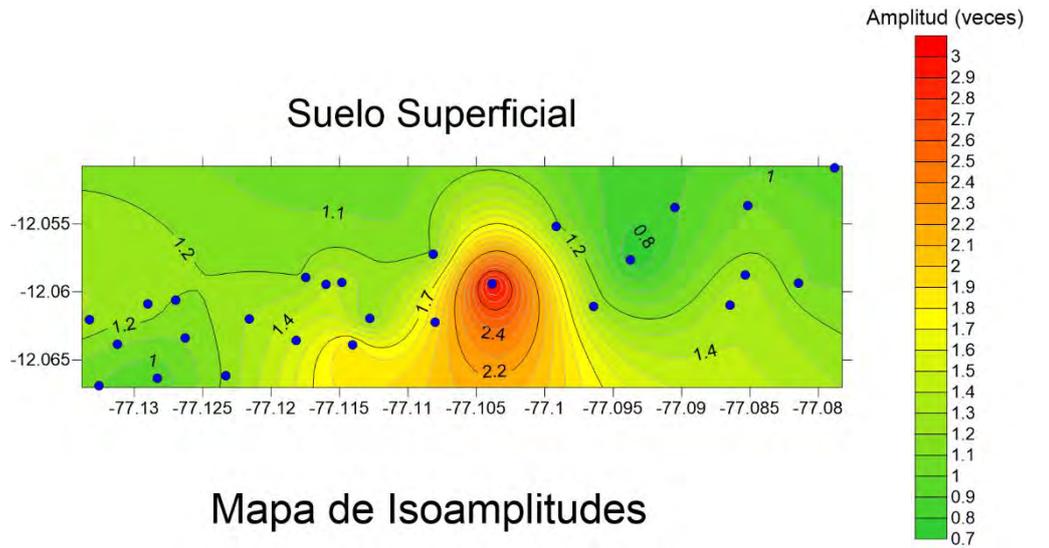


Figura 5.19. Mapa de isoamplificaciones del suelo superficial.

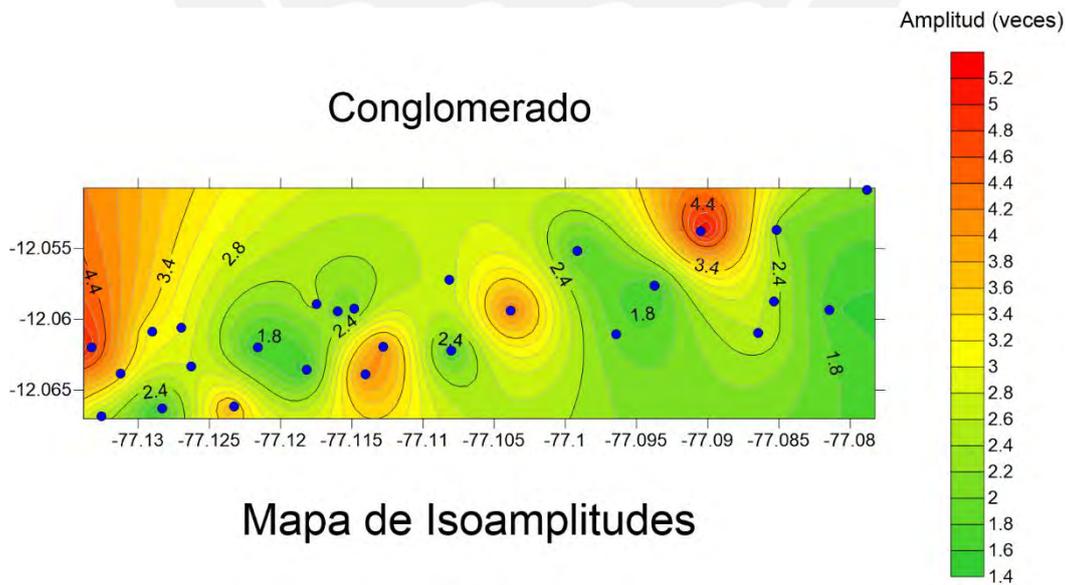


Figura 5.20. Mapa de isoamplificaciones del conglomerado.

5.2.6. Ejecución del procedimiento

Los sismos utilizados para evaluar el comportamiento dinámico del suelo en Bellavista son los mismos que se usaron para Lima y Callao (Tabla 4.2). En ese sentido, las estaciones de referencia también fueron PQR y LIM001.

La figura 5.21 muestra los acelerogramas sintéticos en las estaciones P1, P8, P12, P14, P16, P20, P21, P22, P23 y P26 con el sismo de 1966. Asimismo, la imagen muestra el registro sísmico en la estación de referencia PQR (en rojo) y el acelerograma deconvolucionado en roca (en azul). Los acelerogramas presentan el valor PGA en cada estación apreciándose su cambio en los distintos puntos de registro. La estación P23 presenta la aceleración pico máxima con 582.49 cm/s^2 . Por otro lado, el sitio con menor amplificación se da en la estación P14 con una aceleración de 243.71 cm/s^2 . Según el mapa de suelos, la estación P23 se encuentra situada en un suelo compuesto superficialmente de arenas y limos ($H < 10 \text{ m}$), y es clasificado como Zona II. En contraste, la estación P14 se encuentra sobre grava aluvial y es clasificada sísmicamente como Zona I.

Los espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos calculados en las estaciones P1, P8, P12, P14, P16, P20, P21, P22, P23 y P26 para los sismos evaluados se presentan en las Figuras 5.20 y 5.21. La Figura 5.22 agrupa los ER de los sismos con estación de referencia PQR y la figura 5.23, los ER de sismos con estación LIM001. En todos los casos, se presenta el ER del registro sísmico (color rojo) y del acelerograma deconvolucionado en roca (color azul). En los gráficos se observa la modificación de la amplitud de aceleraciones, debido al comportamiento dinámico del suelo y su diferencia con respecto a la estación de referencia y al sustrato rocoso.

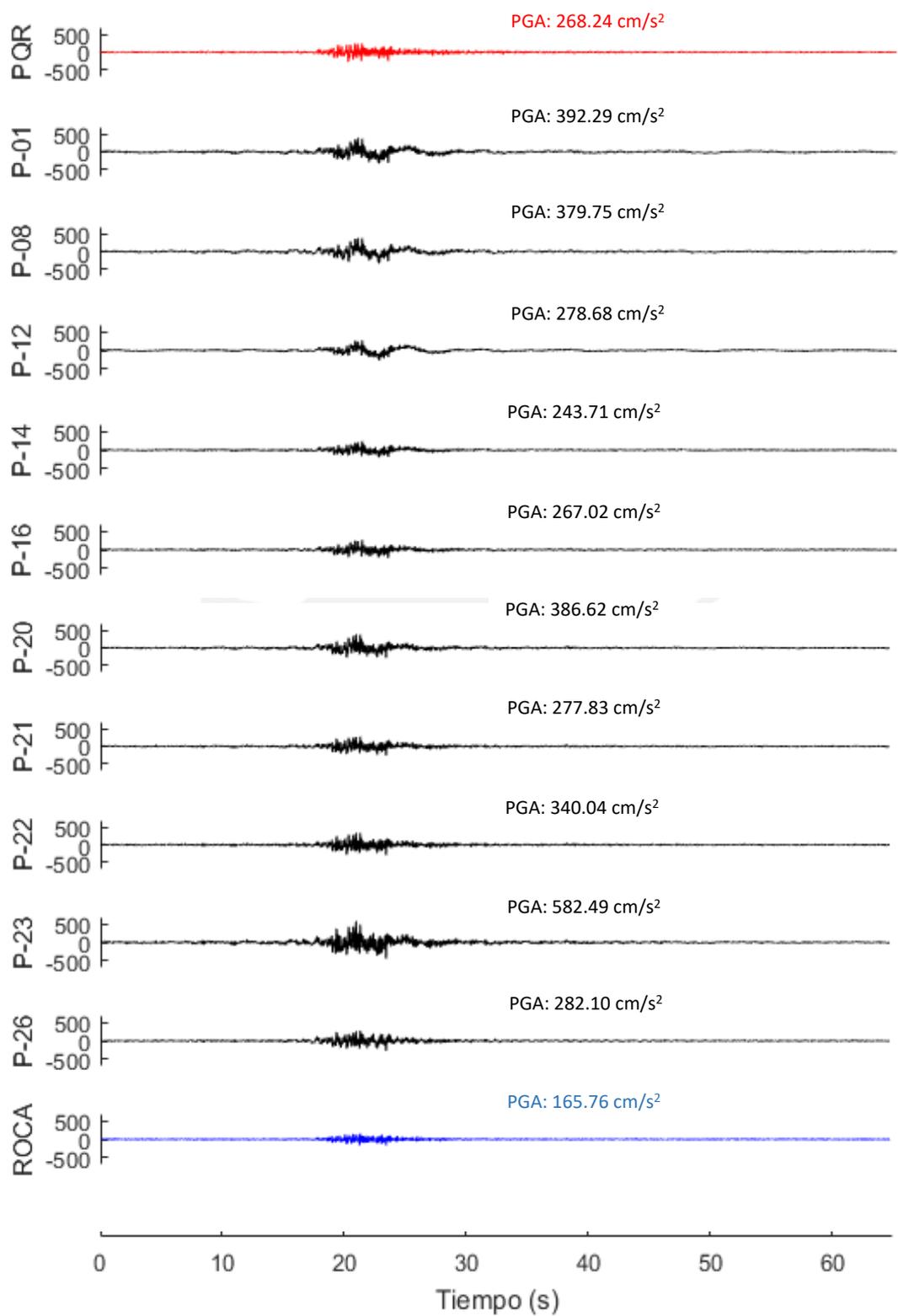


Figura 5.21. Acelerogramas sintéticos convolucionados en los puntos de registro de ruido ambiental P01, P08, P12, P14, P16, P20, P21, P22, P23 y P26 para el sismo de 1966.

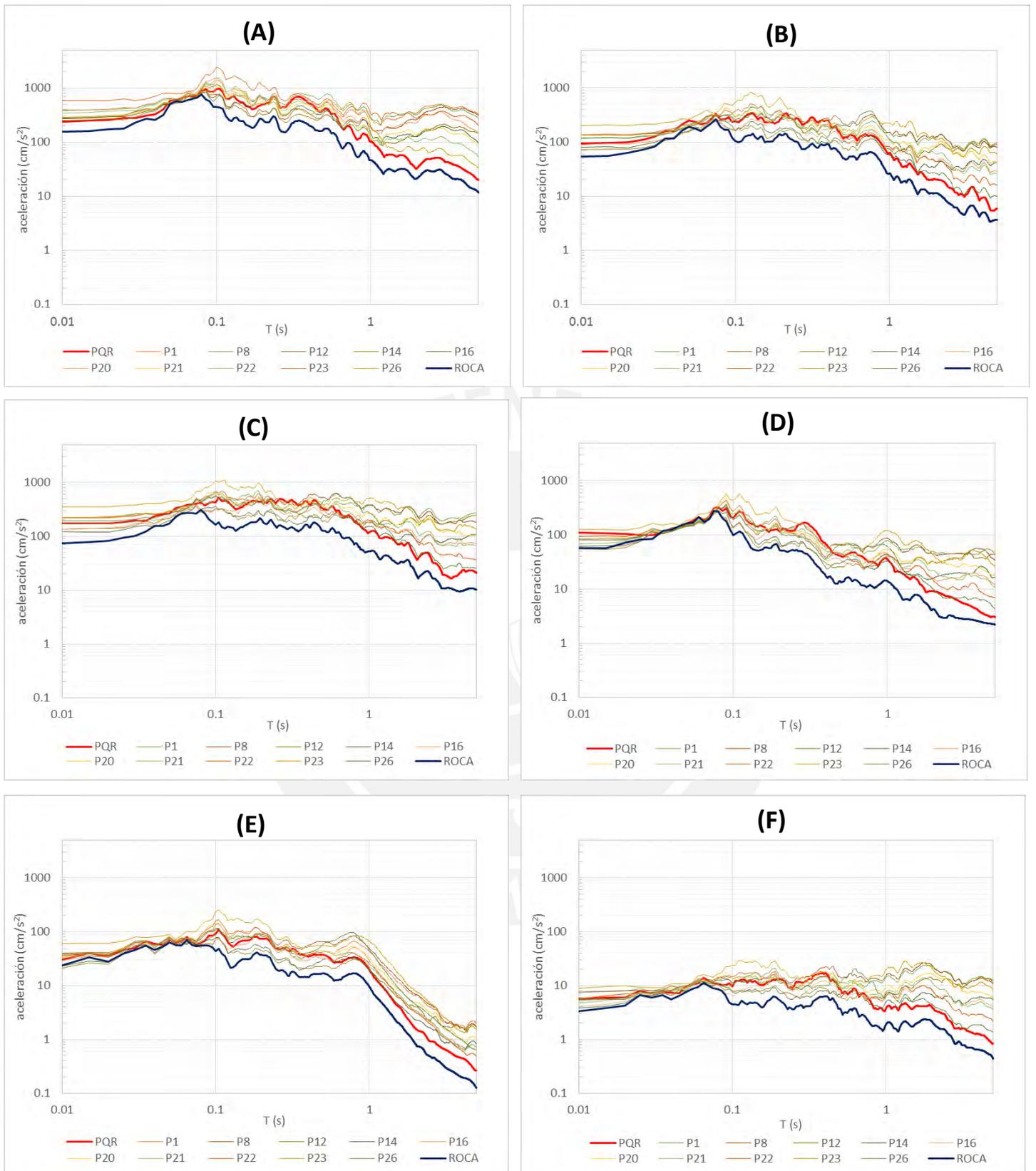


Figura 5.22. Espectros de respuesta en las estaciones PQR, P01, P08, P12, P14, P16, P20, P21, P22, P23, P26 y en ROCA de los sismos: (A) 17 de Octubre 1966 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 24 Agosto 2011.

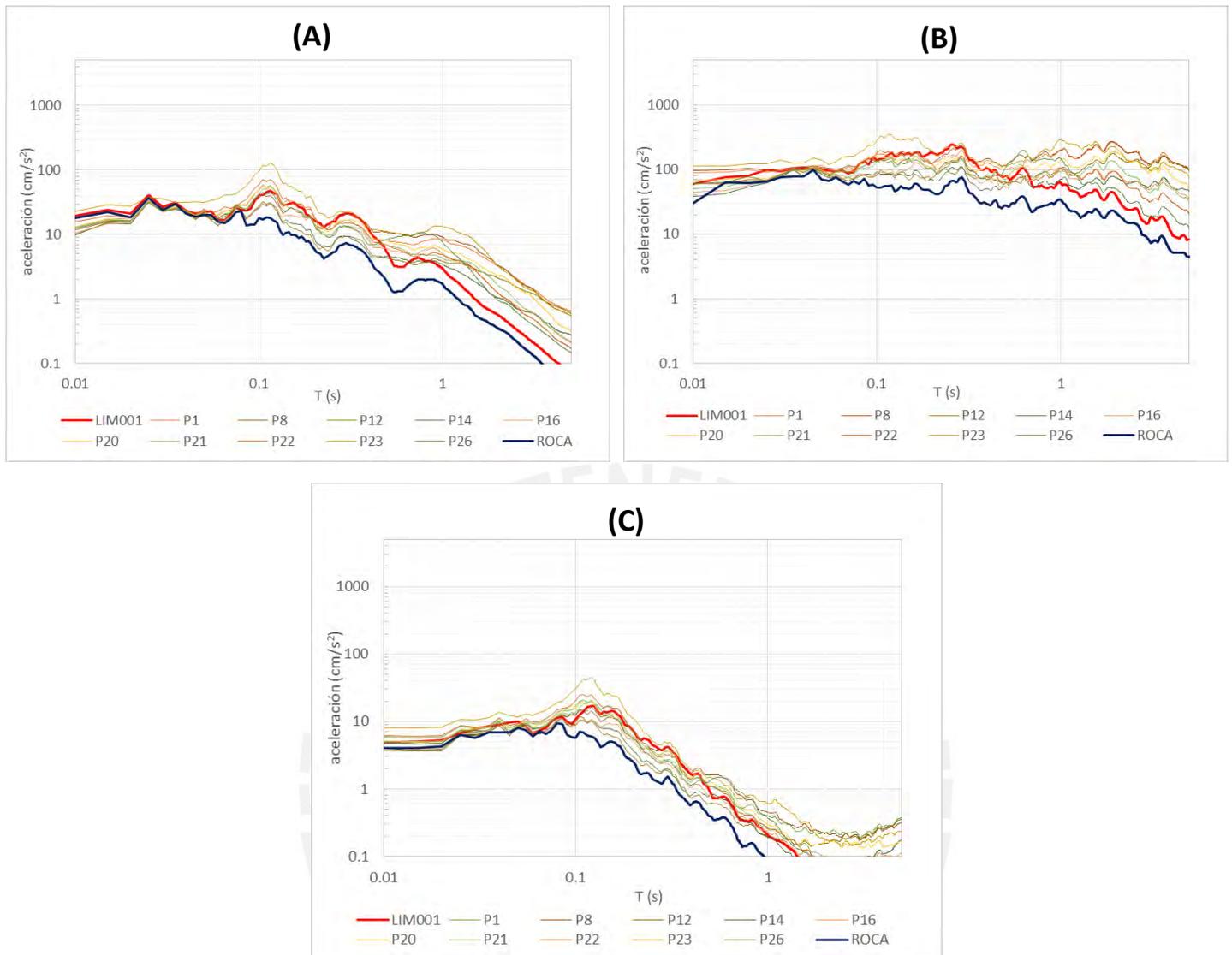


Figura 5.23. Espectros de respuesta en las estaciones LIM001, P01, P08, P12, P14, P16, P20, P21, P22, P23, P26 y en ROCA de los sismos: (A) 02 Marzo 2005 (B) 15 Agosto 2007 (C) 28 Agosto 2015.

5.2.7. Escenarios sísmicos

Se evaluó la dinámica del suelo en el distrito de Bellavista utilizando escenarios sísmicos con los registros presentados en la tabla 4.2. Los escenarios se generaron a partir de la metodología mostrada en la figura 1.1. Una vez obtenidos los ER en las 27 estaciones de registro de ruido ambiental, el programar SURFER se utilizó para agrupar la información y obtener mapas de PGAs y de distintos periodos estructurales para el distrito.

La figura 5.24 muestra el mapa de PGAs para los sismos evaluados en el distrito de Bellavista según los resultados de los puntos analizados y considerando una interpolación Kriging para los sitios intermedios. De la misma manera, las figuras 5.25, 5.26 y 5.27 presentan los escenarios de pseudoaceleración para periodos estructurales de 0.1, 0.4 y 0.8 segundos, respectivamente. Finalmente, en la figura 5.28 se aprecian los escenarios sísmicos para los periodos estructurales en los que se alcanzan pseudoaceleraciones máximas en los sismos analizados.

Como se observa, los PGA máximos (Figura 5.24) se encuentran principalmente en P23. También se aprecian máximos en P20 y P8 para los sismos de 2005 y 2007, respectivamente. Estas estaciones se encuentran en el centro del distrito que yace sobre estratos superficiales de arena y limo ($H < 10$ m). Tomando en cuenta los mapas de isoamplificaciones (Figuras 5.19 y 5.20), puede observarse que los valores de PGA se encuentran controlados por los suelos superficiales; en el caso de P23, por las arenas limosas. Para los sismos de 2007 y 2011, se observan valores máximos de PGA al oeste del distrito: En las estaciones P1 y P2 ubicadas sobre arcillas y depósitos orgánicos.

Para estructuras con periodos estructurales de 0.1 segundos (Figura 5.25), los escenarios sísmicos muestran que las máximas aceleraciones también se concentran alrededor de P23, a excepción del sismo intraplaca del año 2005 que las presenta en P20. Lo mismo sucede para periodos estructurales de 0.4 segundos (Figura 5.26), aunque se observan también intensidades máximas en P8 y aceleraciones intermedias al oeste del distrito. En periodos de 0.8 segundos (Figura 5.27), los escenarios muestran 4 zonas de máxima aceleración: P1, P8, P23 y P26. El sismo del año 2015, sin embargo, no las presenta en P8. Además, una excepción es el sismo intraplaca del año 2005 que solo presenta máximos en P20.

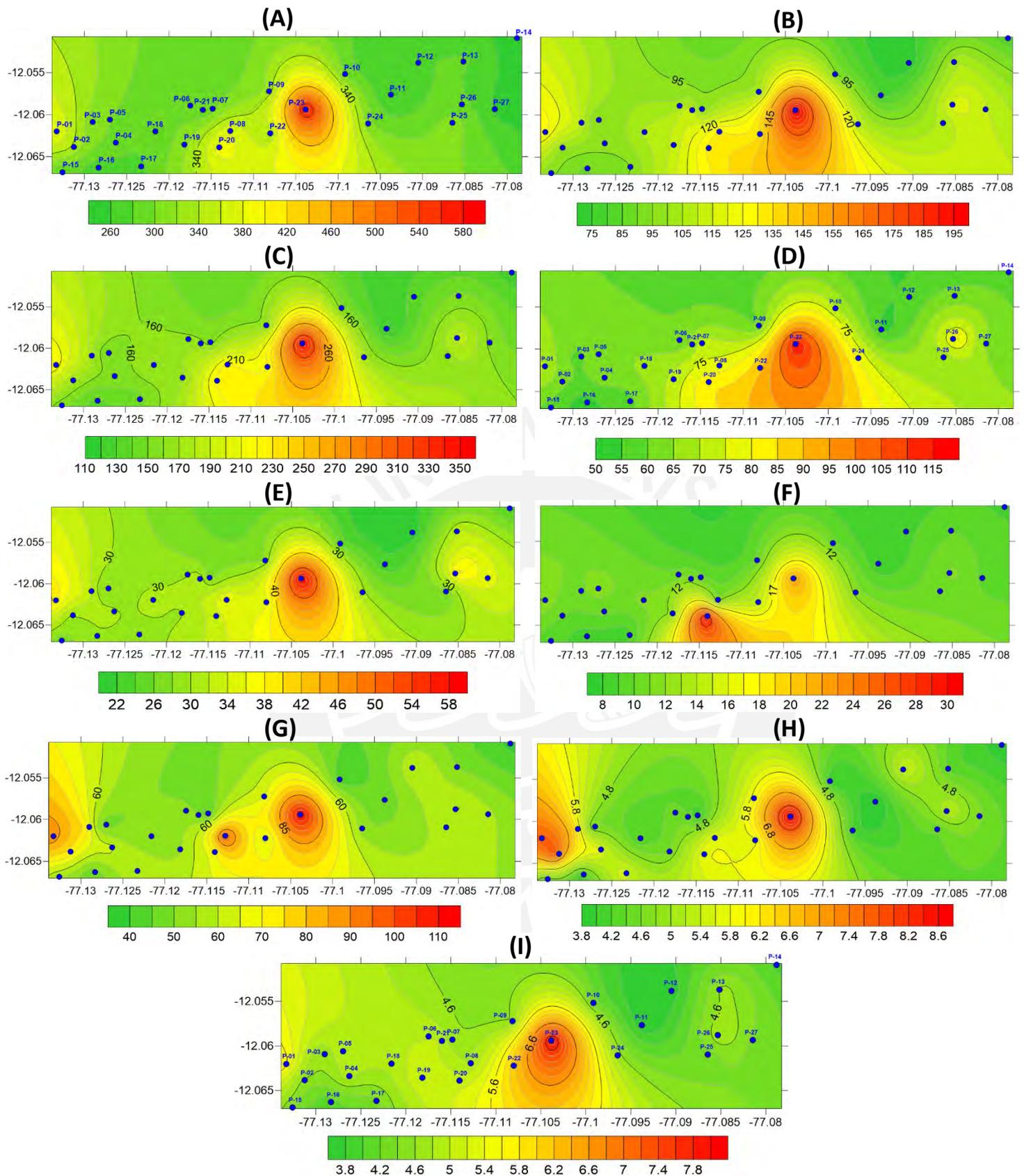


Figura 5.24. Escenarios sísmicos en el distrito de Bellavista para las aceleraciones máximas del suelo (PGA) con los sismos de: (A) 17 de Octubre 1966 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

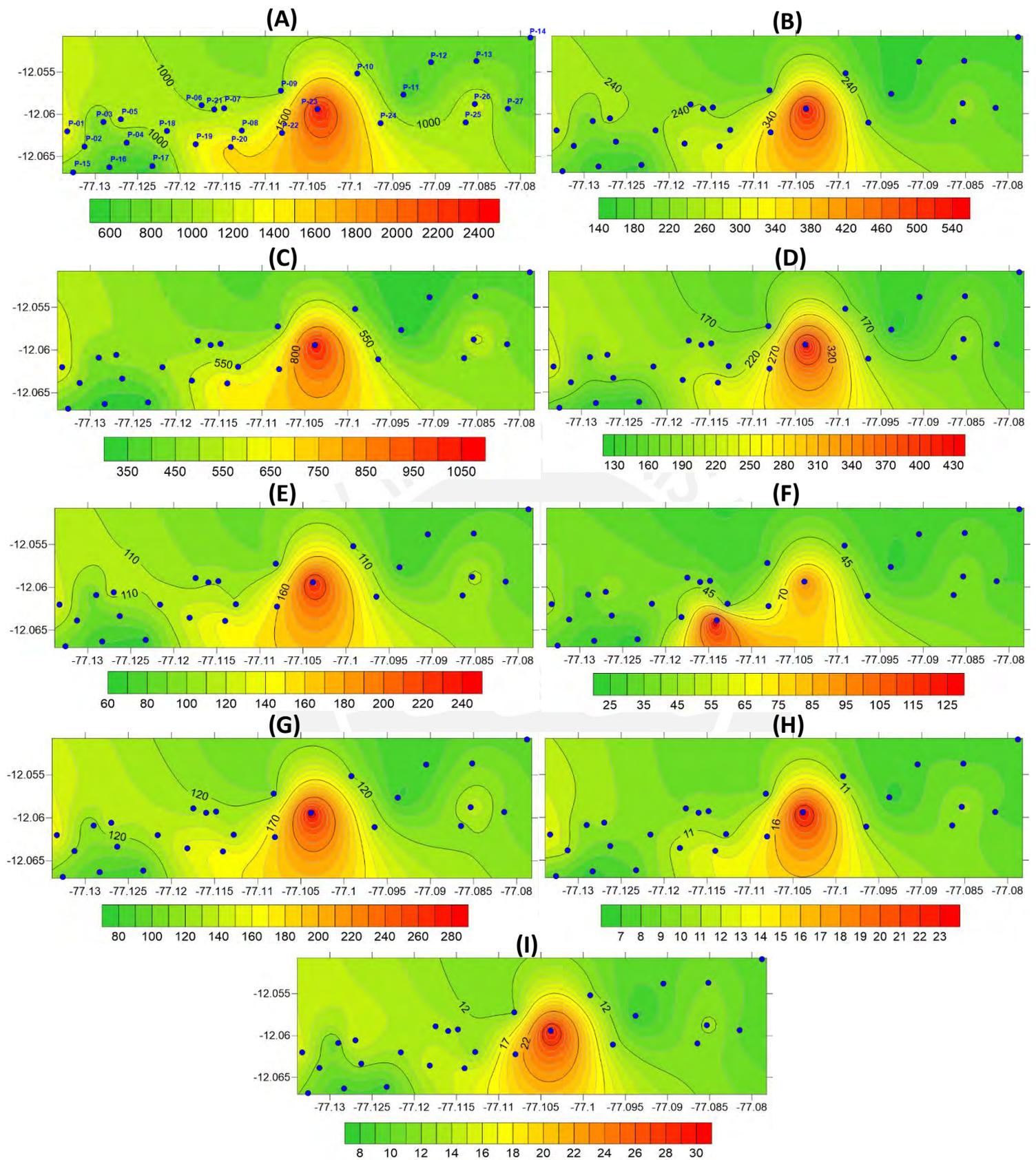


Figura 5.25. Escenarios sísmicos en el distrito de Bellavista para estructuras con periodo $T=0.1$ s para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

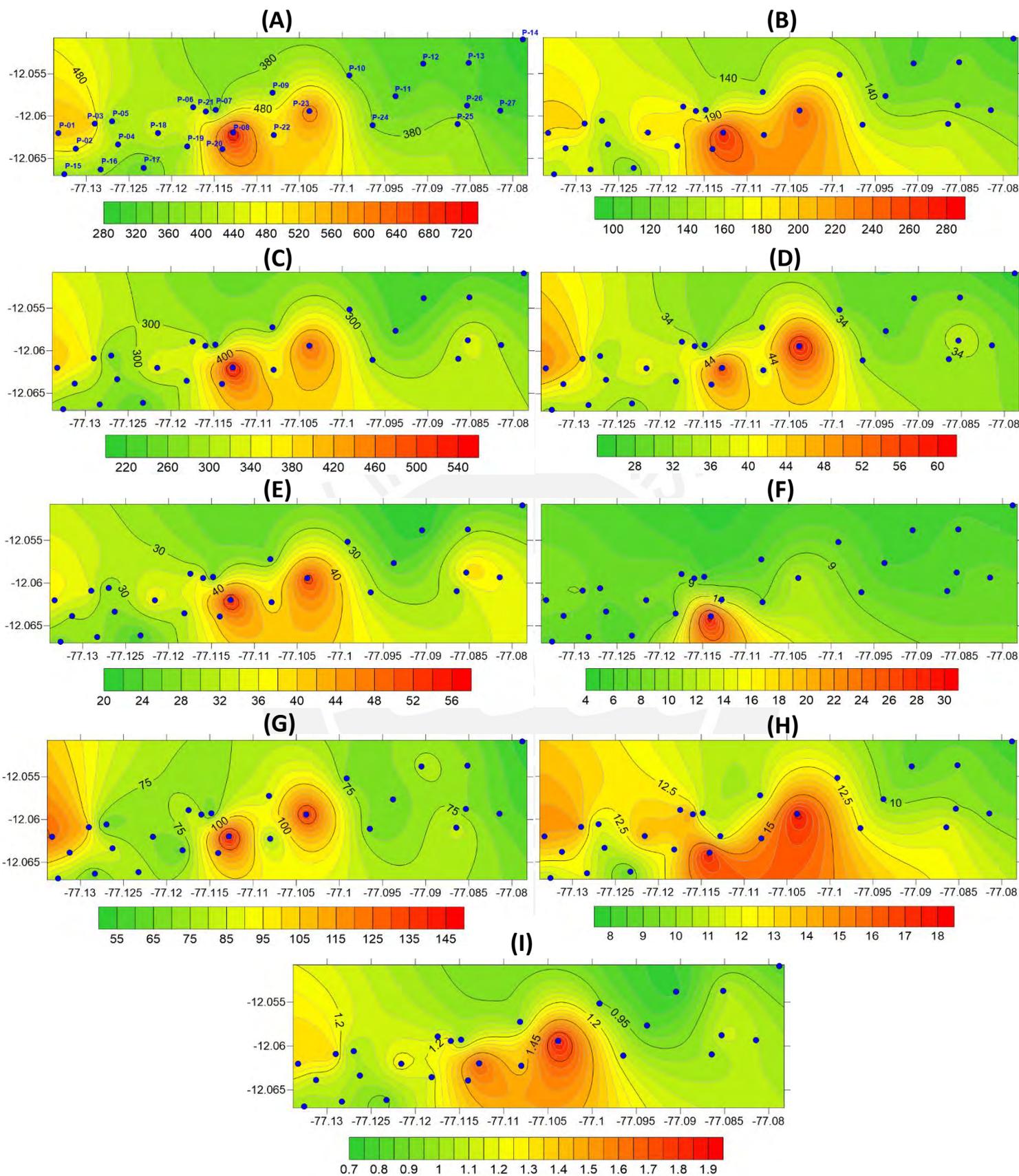


Figura 5.26. Escenarios sísmicos en el distrito de Bellavista para estructuras con periodo $T=0.4$ s para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

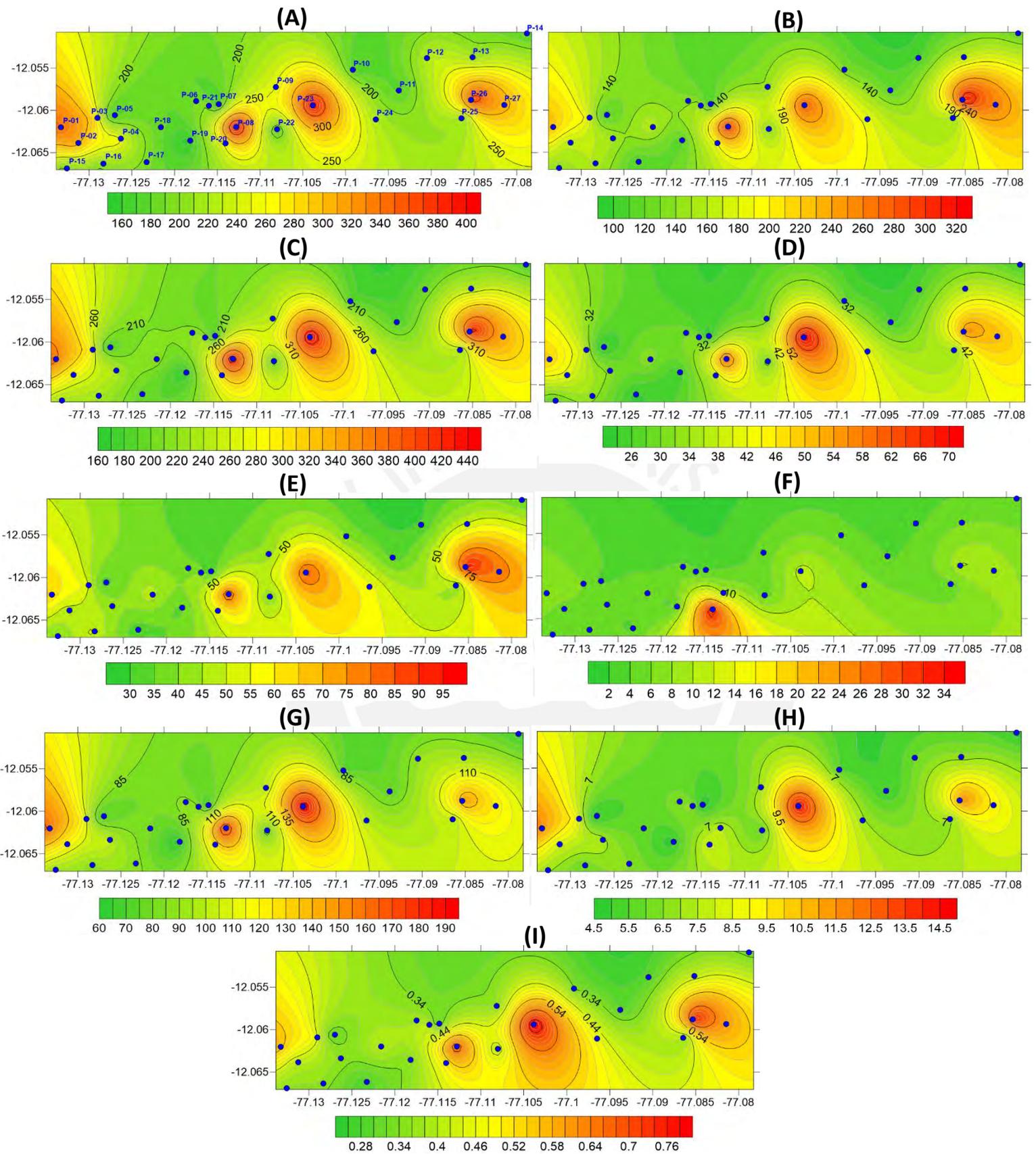


Figura 5.27. Escenarios sísmicos en el distrito de Bellavista para estructuras con periodo $T=0.8$ s para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

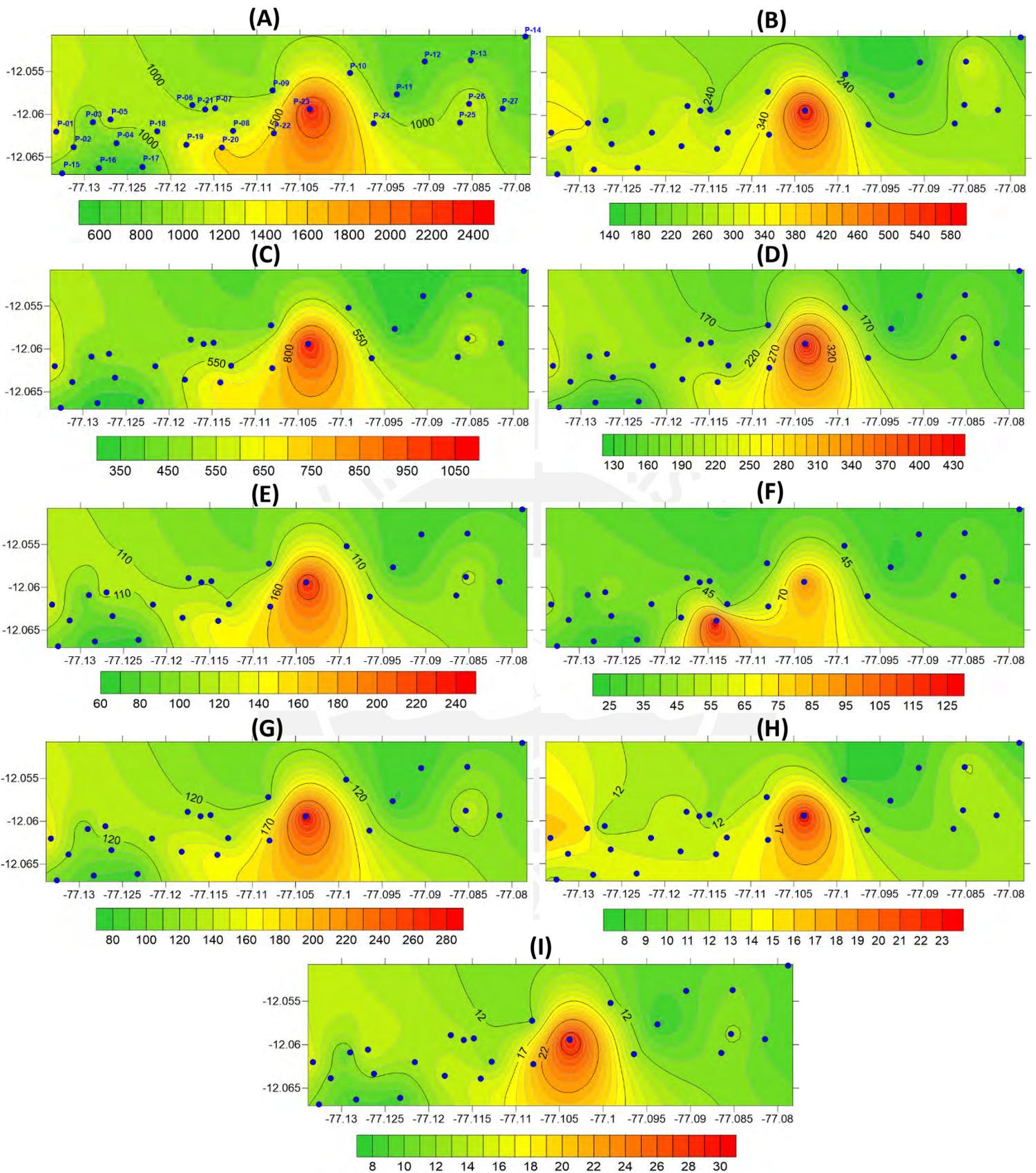


Figura 5.28. Escenarios sísmicos en el distrito de Bellavista para el periodo estructural en que las aceleraciones máximas alcanzan su valor pico para los sismos de: (A) 17 de Octubre 1996 (B) 31 de Mayo 1970 (C) 03 de Octubre 1974 (D) 05 Enero 1974 (E) 09 de Abril 1991 (F) 02 Marzo 2005 (G) 15 Agosto 2007 (H) 24 Agosto 2011 (I) 28 Agosto 2015.

La figura 5.28 muestra los escenarios sísmicos para el periodo estructural en el que las intensidades sísmicas alcanzan su máximo valor en cada uno de los sismos evaluados. En ese sentido, los sismos de 1966, 1974, 1974-2, 1991, 2005, 2007 y 2015 generan las aceleraciones máximas en estructuras de 0.1 segundo, los de 1970 y 2011 lo hacen en estructuras de 0.2 segundos. Finalmente, se observa que los valores pico en estos escenarios de máxima aceleración se presentan en P23 y valores intermedios en P22 y P20.

A continuación, se presenta el mapa de microzonificación sísmica propuesto para el distrito de Bellavista según los resultados obtenidos con la metodología presentada en este trabajo (Figura 5.29).

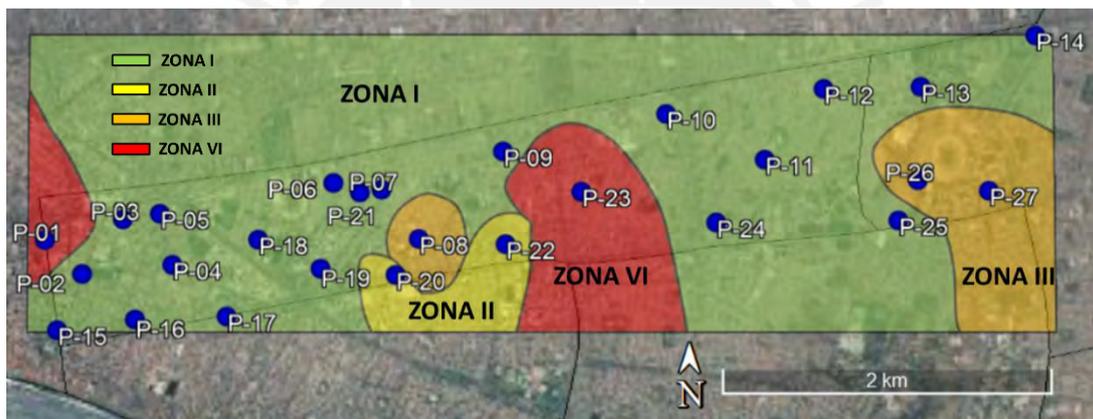


Figura 5.29. Mapa de microzonificación sísmica propuesto para el distrito de Bellavista.

6. HALLAZGOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Hallazgos

Las FTEs en las estaciones de referencia PQR y LIM001 (figuras 4.10) demuestran que existe amplificación por efectos de sitio en las gravas aluviales o conglomerado de Lima. Los acelerogramas deconvolucionados a roca presentan reducciones de PGA en ambas estaciones. Por ejemplo, el sismo de 1966 registrado en PQR con un PGA de 268.24 cm/s² se redujo a un valor de 165.76 cm/s² en roca. Asimismo, el sismo de 2007 registrado en LIM001 con PGA de 73.89 cm/s² disminuyó en roca a 25.90 cm/s².

Los espectros de respuesta en las estaciones PQR y LIM001 (Figuras 4.13 y 4.14) evidencian que los sismos según su origen sismogénico (mecanismo de falla), magnitud y distancia epicentral arriban al sustrato rocoso de la cuenca sedimentaria de Lima con distintos contenidos en frecuencia.

La estación NNA, ubicada sobre un afloramiento rocoso en el distrito de Ñaña, no presenta amplificaciones significativas por efectos del comportamiento dinámico del suelo. La FTE muestra que los valores de amplitud no superan 2 en el rango de frecuencias 1 – 10 Hz (figura 4.16). Asimismo, los escenarios sísmicos con los 10 sismos evaluados (incluyendo Chile 8.8 Mw) muestran que los valores de PGA en NNA son los menores entre las 138 estaciones analizadas.

Finalmente, las zonas de mayor intensidad en la ciudad de Lima por efectos del comportamiento dinámico del suelo no cambian significativamente de ubicación independientemente del origen sismogénico, magnitud y distancia hipocentral de los sismos.

6.2. Conclusiones

Se generaron acelerogramas sintéticos en 38 estaciones sísmicas y 100 estaciones de ruido ambiental en Lima y Callao utilizando la teoría de vibraciones casuales (Reinoso et al, 1990; Ordaz y Reinoso, 1987). Para ello, se utilizaron 9 sismos de distinto origen

sismogénico, distancia hipocentral y magnitud registrados en las estaciones PQR y LIM001, además del sismo de 8.8 Mw (Maule-Chile, 2010). La deconvolución del efecto de sitio en las estaciones de registro o referencia (PQR y LIM001) y su propagación en los 138 sitios se realizó en el dominio de las frecuencias utilizando Funciones de Transferencia Empírica (FTE) con el método del Cociente Espectral H/V. Además, se calcularon espectros de respuesta y se generaron escenarios sísmicos para PGA y diferentes periodos estructurales. En consecuencia, los acelerogramas sintéticos y espectros de respuesta demuestran que los suelos en distintas zonas del área metropolitana de Lima y Callao no muestran las mismas aceleraciones ni frecuencias dominantes.

Además, se comprobó que las FTEs obtenidas en este trabajo (Figuras 3.3, 3.9 y 5.14) no corresponden con las características espectrales enunciadas en la zonificación propuesta por la microzonificación vigente (CISMID, 2016). En ese sentido, es necesario reagrupar estas FTEs con base en familias espectrales para generar nuevas zonas y proponer otra microzonificación sísmica para la ciudad.

Por otro lado, NNA puede ser considerada como estación libre de efectos de sitio. En ese sentido, puede tomarse como estación de referencia en estudios de estimación de amplificación de suelos con el método SSR (Borcherdt, 1970).

Se comprobó que las FTEs definen adecuadamente el comportamiento dinámico del suelo en la ciudad de Lima. Se demostró que las funciones de transferencia teórica (FTT), que representan de manera numérica el perfil estratigráfico del suelo hasta el basamento rocoso, se ajustan satisfactoriamente a las FTEs observadas en este trabajo (Figuras 3.10, 3.11 y 5.15). Además, la forma espectral de la FTE obtenida en NNA corresponde con una estación sin efectos de sitio, es decir, presenta valores de amplitud menores a 2 en el rango de frecuencias de 0.1 a 10 Hz (Lermo y Chávez García, 1994). Finalmente, la compatibilidad entre los escenarios sísmicos PGA de Pulido et al (2012) y el generado en este estudio para un sismo de 8.8 Mw (Figura 4.42) reafirma la validez de la FTE como parámetro para representar el comportamiento dinámico del suelo.

Los escenarios sísmicos (Figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 y 4.26) demuestran que los lugares de mayor intensidad no varían sustancialmente según el origen de los sismos

(fuente sismogénica, mecanismo de falla, magnitud o distancia epicentral) y, más bien, se concentran en zonas específicas. Los distritos más críticos son San Juan de Lurigancho, Chorrillos, Puente Piedra y Ventanilla, muchos de los cuales no estaban ocupados entre los años 1966 y 1974 (figura 6.1). Además, se observan amplificaciones significativas en el distrito de La Molina y al oeste de la provincia de El Callao para periodos estructurales bajos y altos, respectivamente.

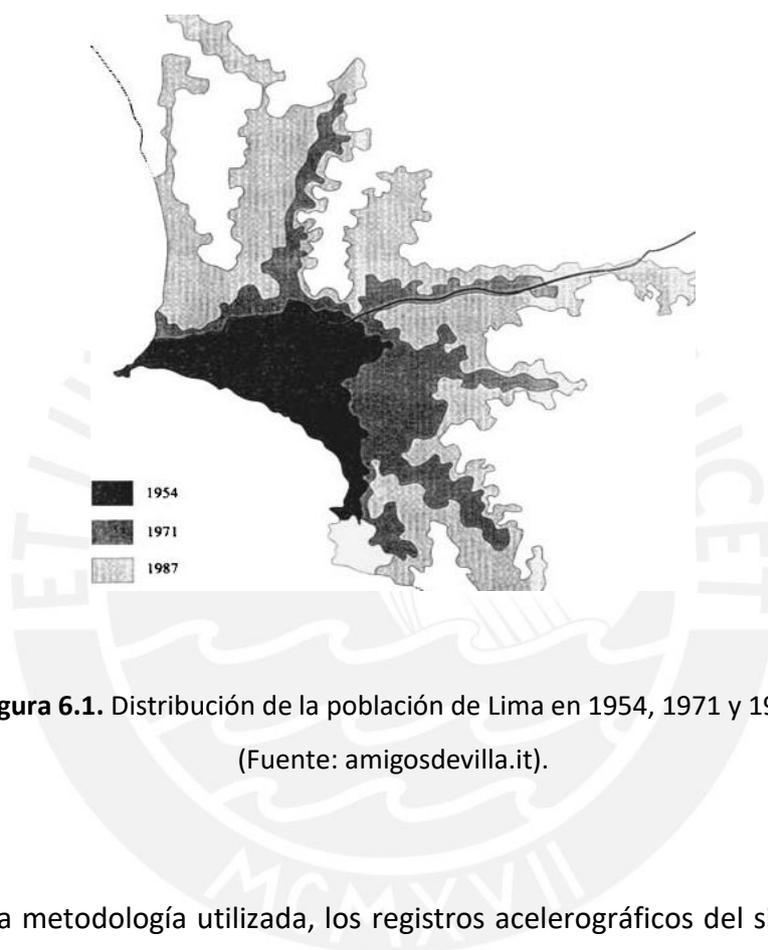


Figura 6.1. Distribución de la población de Lima en 1954, 1971 y 1987
(Fuente: amigosdevilla.it).

Para validar la metodología utilizada, los registros acelerográficos del sismo del 14 de enero de 2018 (Arequipa; 6.8 ML) se deconvolucionaron a roca para comparar sus espectros de amplitudes. Además, se compararon los ER obtenidos con acelerogramas sintéticos y registros sísmicos en cada estación. Se observó que tanto los espectros de Fourier en roca y los espectros de respuesta se ajustaron satisfactoriamente. Por lo tanto, se confirmó que la metodología evalúa adecuadamente el comportamiento dinámico del suelo (utilizando las FTEs) y considera el mismo efecto de la fuente y trayectoria de las ondas sísmicas.

Las características dinámicas del suelo en las estaciones TALCA y PQR son semejantes como lo mostraron sus respectivas FTEs y perfiles Vs (figuras 4.37 y 4.38). Por ello, se

utilizó el registro de TALCA del sismo de 8.8 Mw (Maule – Chile, 2010) para generar escenarios sísmicos en la ciudad de Lima, en donde se pronostica un terremoto de igual magnitud. Se observó que las zonas de mayor amplificación se concentran en los mismos distritos que en los escenarios presentados anteriormente.

Las FTEs obtenidas en el distrito de Bellavista muestran la presencia de dos estratos de suelo, principalmente. La grava aluvial o conglomerado que vibra con frecuencias dominantes entre 0.6 Hz y 1.4 Hz, y el suelo superficial (arenas o arcillas) que lo hace con frecuencias entre los 8 y 10 Hz. Esta conclusión se confirmó observando el mapa de suelos y sondeos geotécnicos realizados en el distrito donde se observa que la grava arenosa está presente en toda la zona, superficialmente en algunos lugares y subyaciendo los estratos de arcilla y arena en otros. Asimismo, el ajuste de las FTTs a las FTEs (Figura 5.15) utilizando modelos estratigráficos de velocidad de onda S confirmó nuevamente la presencia de estos dos estratos (Figura 5.16).

Las FTEs del distrito se agruparon en familias espectrales. En ese sentido, Bellavista se clasificó en 4 zonas:

- **Zona I:** Suelo firme sin amplificación significativa por efectos de sitio. Presenta amplitudes constantes alrededor de 1 en altas frecuencias (5-10Hz) asociadas a lugares sin presencia de suelos superficiales o a muy poca profundidad.
- **Zona II:** Zona de transición donde se observan mayores amplitudes en altas frecuencias (5-10 Hz) asociadas a la presencia de suelos superficiales.
- **Zona III:** Zona de mayor peligrosidad donde se observan periodos predominantes entre 0.7 y 2 Hz asociados al conglomerado más profundo.
- **Zona IV:** Zona anómala donde se observan amplitudes significativas en altas (5-10 Hz) y bajas frecuencias (0.7-2 Hz), asociadas a los suelos superficiales y al conglomerado, respectivamente.

6.3. Recomendaciones

Se recomienda rehacer la microzonificación sísmica de la ciudad en función a FTEs agrupadas con base en familias espectrales. De esta manera, se tendrán nuevas zonas sísmicas que representen mejor la dinámica del suelo en Lima y Callao.

Los valores de PGA en NNA -estación sin efectos de sitio- son mayores a los deconvolucionados en roca. Un ejemplo se observa en el sismo de 1974, donde el PGA en NNA es 100.9 cm/s² y en roca, 78.42 cm/s². Las razones por las que existen estas diferencias demandan mayor investigación. Algunas hipótesis podrían ser los posibles efectos topográficos que causarían su ubicación en altura (cerro rocoso) o el hecho de que la FTE no tenga amplitudes exactamente iguales a 1.

Las mayores amplificaciones se concentran en las mismas zonas de la ciudad independientemente de la fuente, magnitud o distancia hipocentral del sismo. Debido a que los efectos del suelo se definen por FTE únicas e invariantes en el tiempo, se sugiere profundizar la investigación en las leyes de atenuación de las ondas que arriban a la cuenca sedimentaria de Lima.

Finalmente, un mayor número de estaciones de análisis le darían mayor resolución a la lectura de los efectos del suelo en el área metropolitana de Lima y Callao. Por ello, se recomiendan más trabajos de medición de ruido ambiental en lugares que superaron el alcance de este trabajo.

REFERENCIAS

Alfaro, A., Navarro, M., Sánchez, J., & Pujades, L. G. (1999). Microzonificación Sísmica de Barcelona utilizando el Método de Nakamura. Ventajas y Limitaciones. In Proc. Primer Congreso Nacional de Ing. Sísmica (Vol. 1, pp. 273-278).

Alva, J., Huamán, C., & Ohtsuki (1994). Respuesta dinámica de los suelos de los distritos de La Punta – Callao en Lima, Perú. XIII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Nueva Delhi, India, 1994.

Alva, j., & Castilo, J. (1993). Peligro Sísmico en el Perú. (Seismic Hazard in Perú). En 7th National Congress of Soils Mechanics and Foundations Engineering. Lima, Perú. 1993.

Aguilar Z. y Alva J. (2007). Microzonificación Sísmica de Lima. In presentación en la Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, CISMID, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Angulo, J. (2014) Microzonificación y Escenarios sísmicos para la ciudad de Apizaco, Tlaxcala (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. México.

- Arce, J. (1984). Estructura geoelectrica del subsuelo Rimac. Chillón. Sociedad Geológica del Perú, Jubilar, LX Aniversario, pp. 1-13.
- Autoridad Nacional del Agua (2010). Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac.
- Boore, D. M. (2004). Estimating $V_s(30)$ (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m). *Bulletin of the seismological society of America*, 94(2), 591-597.
- Bolaños, A., & Monroy, O. (2004). Espectros de peligro sísmico uniforme. Repositorio Digital de Tesis PUCP, Lima.
- Borcherdt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America* 60(1), 29-61.
- Calderón, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., Aguilar, Z., & Lazares, F. (2012) Study of soil amplification based on microtremor and seismic records in Lima Peru. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 12(2), 2_1-2_20.
- Calderón, D.; Lazares, F; Aguilar, Z; Sekiguchi, T, & Nakai, S. (2011). Estimation of Deep Soil Profiles in Lima Peru. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol.5, No.7, pp. 618-627.
- Casaverde, L., & Vargas, J. (1980). Zonificación Sísmica del Perú, II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente. OEA y PUCP, Lima, Perú.
- Condori, C., Tavera, H. (2012). Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú a partir de la variación del parámetro "b". *Bol. Soc. Geol. Perú* 106: 23-36.
- Cuadra, P. (2007). Aplicación de técnicas de vibraciones ambientales: análisis de microtremores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio. Proyecto de Grado, Universidad Simón Bolívar.
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Perú: www.sig.cismid-uni.org/redacis. [2018].
- CISMID (2004). Microzonificación Sísmica de Lima [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis32_p.pdf.
- CISMID (2012). Actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad de Lima. The international symposium for CISMID 25th Aniversary. Paper n° ts-6-1.
- CISMID (2016). Development of a Seismic Microzoning Map for Lima City and Callao, Perú. *Journal of Disaster Research* Vol, 9(6), 939.
- Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y proyectos*, (16), 6-30.
- DeMets C., Gordon R., Aarhus A., Stein S., (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International* 101 Pag. 425-278
- Dorbath, L., Cisternas, A., & Dorbath, C. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(3), 551-576.
- Geopsy (2017) Recuperado de www.geopsy.org

Google Earth (2018) Recuperado de www.earth.google.com

Google Maps (2018) Recuperado de www.maps.google.com

Haskell N. A., 1962, Radiation patterns of surface waves from point source in multi-layered medium, *Bulletin of Sismological Society of America* , N°54, pp. 377-393.

Instituto Geofísico del Perú (IGP), Perú. Página web: www.igp.gob.pe

Langston, C.A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *Journal Geophysical Research* 84 (B9), 4749-4762.

Le Roux, J., C. Tavares Correa & F. Alayza (2000). Sedimentology of the Rímac-Chillón alluvial fan at Lima, Peru, as related to Plio-Pleistocene sea-level changes, glacial cycles and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 499-510.

Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the seismological society of America*, 83(5), 1574-1594.

Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1994). Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation? *Bulletin of the seismological society of America*, 84(5), 1350-1364.

Limaymanta-Mendoza, M. (2009). Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtremores para la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico: aplicación en las ciudades de Veracruz-Boca del Río, Oaxaca y Acapulco. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Martínez A. y Porturas F. (1975). Planos Geotécnicos para Lima - Perú. Análisis y Visión - Ingeniería Sísmica. Reunión Andina y Seguridad Sísmica .U.P.C.-C.I.D.A., publicación L.g.g.a N° 54 y 66.

Martínez, F. L., Soto, J. M., de la Blanca, G. A., Romero, M. J. R., & García, J. M. G. (1994). Respuesta sísmica de la provincia de Almería. In *El estudio de los terremotos en Almería* (pp. 219-232). Instituto de Estudios Almerienses.

Martínez, J. (2014) Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtremores para fines de mapas sísmicos de intensidad. (Tesis de Maestría) Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Montecillo T. R., 1996, Estimación empírica de efectos de sitio en el Distrito Federal, Tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico, Universidad Nacional Autónoma de México.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 30-I, 25 – 33.

Newmark, N. M. (1959). A method of computation for structural dynamics. *Journal of the engineering mechanics division*, 85(3), 67-94.

Nogoshi, M. & Igarashi T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) (in Japanese with english abstract). *J. of seism. Soc. of Japan*, 24, 26-40.

- Norma Técnica, E. 030 “Diseño Sismorresistente” del RNE. Decreto supremo n003-2016-vivienda. Perú. DS-003-2016.Vivienda peruana.
- Ordaz, M., & Reinoso, E. (1987). Uso de la teoría de vibraciones aleatorias para la determinación de espectros de diseño del Reglamento para las construcciones del DF. In *Proc. VII natl. Conf. Earthquake eng.*
- Palacios, O., Caldas, J., & Vela, C. (1992). Geología de los Cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica. Seria A: Carta Geológica Nacional. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Boletín, 43.
- Pulido, N., Tavera, H., Aguilar, Z., Calderón, D. (2012). Mega-earthquakes ruptures scenarios and strong motion simulations for Lima, Perú. International Symposium CISMID, TS-6-2. Lima, Perú.
- Qadri, S. T., Nawaz, B., Sajjad, S. H., & Sheikh, R. A. (2015). Ambient noise H/V spectral ratio in site effects estimation in Fateh jang area, Pakistan. *Earthquake Science*, 28(1), 87-95.
- Quispe, S., Chimoto, K., Yamanaka, H., Tavera, H., Lazares, F., & Aguilar, Z. (2014). Estimation of S-Wave Velocity Profiles at Lima City, Peru Using Microtremor Arrays. *Journal of Disaster Research*, 9(6), 931-938.
- Reinoso, E., Ordaz, M., & Sanchez-Sesma, F.J. (1990). A note on the fast computation of response spectra estimates. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19 (7), 971-976.
- Reinoso, E., and Ordaz, M. (1999). Spectral ratios for Mexico City from free-field recordings. *Earthquake Spectra* 15, 273–295.
- Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC), Chile: www.terremotosuchile.cl [2010].
- Repetto, P., Arango, I. y Seed, H.B. (1980). Influence of site characteristics on building damage during the October 3, 1974 Lima Earthquake: Earthquake Engineering Research Center University of California-Berkeley, Repert UCB/EERC-80/41, Berkeley, CA, 77 p.
- Ríos León, J. (2016) Mediciones de vibración ambiental para la caracterización de efectos de sitio – Aplicación campus PUCP. (Tesis de Licenciatura) Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Civil. Perú.
- Rodríguez Gómez, D. (2015). Caracterización sísmica de un emplazamiento (Doctoral dissertation, Caminos).
- San Bartolomé Ramos, Ángel Francisco (1979). *Apuntes sobre ingeniería sísmica: Dinámica de suelos*. PUCP.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología -SENAHMI (2013). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Rímac- Isolíneas de Velocidad Media del Viento- Mes de Febrero.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú 1513–1974, República de Perú Sector Energía y Minas, Instituto de Geología y Minería. Boletín, (3).
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., & Ishizawa, O. (2014). Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú. 2014.

Tavera, H. (2014). Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8 Mw. [Video]. Recuperado de: www.youtube.com/watch?v=YUk4RqEJYLI&t=2s.

Trigo, T. (2007). Influencia de la amplificación local de las ondas sísmicas y la interacción suelo-fundación en el puente Marga-Marga. (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Chile.

U.S. Geological Survey (USGS), USA: www.usgs.gov [2018].

Vasquez, R., González, J. A., & Mijares, H. (2005) Propuesta de microzonificación sísmica de la ciudad de Zamora Michoacán. XV CNIS México 2005. Artículo III-02.

Verdugo, R. & González, J. (2015). Liquefaction-induced ground damages during the 2010 Chile earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 280-295.

Villacorta, S., De Torres, T., R Pérez-Puig, C., Llorente, M., & Ayala, L. (2015). Estudio preliminar de la evolución geomorfológica del abanico aluvial de Lima (Perú) e implicancias en el análisis de amenazas asociadas al cambio climático. *Serie correlación geológica*, 31(2), 0-0.

Yamanazaki, F., Zavala, C., Nakai, S., Koshimura, S., Saito, T, Midorikawa, S., Aguilar, Z., Estrada, M., & Bisbal, A. (2013). SATREPS Project on enhancement of earthquake and tsunami disaster mitigation technology in Peru. *Journal of Disaster Research*, 8(2), 224-234.

Yamazaki, F., & Ansary, M. A. (1997). Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 26(7), 671-689.

