



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091

## CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS SUELOS EN EL AREA URBANA DE MOQUEGUA

Wilfredo Sulla<sup>1</sup>, Isabel Bernal<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad de Ingeniería Sísmica, Instituto Geofísico del Perú

([wsulla@igp.gob.pe](mailto:wsulla@igp.gob.pe); [ybernal@igp.gob.pe](mailto:ybernal@igp.gob.pe))

### RESUMEN

El estudio hace uso de datos de vibración ambiental, MASW y Tomografía Eléctrica para determinar la amplificación, el periodo, la velocidad de ondas de corte y resistividad de los suelos bajo el área urbana de Moquegua, a fin de evaluar su comportamiento dinámico. Los resultados sugieren la existencia de dos (2) zona sísmica: suelos Tipo S1 (rígidos) que responden a 0.1 y 0.4 segundos y S4 (excepcionales blandos) que responden a 0.6 y 1.0 segundos. Asimismo, los C.P. San Francisco y San Antonio (zona de expansión), se encuentran influenciado por un segundo rango de periodos que varían entre 0.6 y 1.0 segundos con amplificaciones moderadas a altas de hasta 4 veces. Además de presentar topografía irregular con pendientes moderadas a altas, estos resultados evidencian la complejidad en su respuesta dinámica frente a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

Palabras claves: Zonificación Sísmica, periodo, velocidad Vs, evento sísmico.

### ABSTRACT

The study makes use of environmental vibration, MASW and electrical tomography data to determine the amplification, period, shear wave velocity and soil resistivity under the urban area of Moquegua, in order to evaluate its dynamic behavior. The results suggest the existence of two (2) seismic zones: Type S1 soils (rigid) that respond to 0.1 and 0.4 seconds and S4 (exceptional soft) that

respond to 0.6 and 1.0 seconds. Also, the C.P. San Francisco and San Antonio (expansion zone), are influenced by a second range of periods that vary between 0.6 and 1.0 seconds with moderate amplifications to highs of up to 4 times. In addition to presenting irregular topography with moderate to high slopes, these results show the complexity of its dynamic response to the occurrence of earthquake.

Keywords: Seismic zonation, period, velocity Vs, seismic event.

### INTRODUCCIÓN

El área urbana de Moquegua se encuentra ubicada al sur occidental del país, en el departamento del mismo nombre y se encuentra conformado por: El Cercado de Moquegua y los centros poblados (C.P.) San Antonio, San Francisco y Chen Chen (Figura 1). Históricamente, ha sido sacudida por movimientos sísmicos como el de 1604, 1687, 1715, 1784, 1868 y 1877. En el caso del terremoto del 23 de junio 2001 ( $M_w=8.2$ ), en Moquegua produjo daños estructurales que fueron asociados a los suelos sobre el cual se encuentra. La caracterización física y dinámica de los suelos, permiten conocer las condiciones locales de sitio los cuales son responsables de los daños que se producen en edificaciones durante la ocurrencia de sismos (Tavera, 2012). Por ello, el objetivo de este estudio es conocer las características físicas y dinámica de los suelos de Moquegua, a partir de la aplicación de métodos geofísicos

De acuerdo a la geología local, la zona de El Cercado y el C.P. Chen Chen, se encuentra asentado sobre depósitos aluviales y fluviales. En el caso de la zona de expansión del C.P. Chen Chen ubicado en el flanco este del cerro Cruz del Siglo, se encuentran asentados sobre conglomerados intercalados con niveles de tobas que corresponde a la Formación Moquegua Superior. En el caso de los C.P. San Francisco y San Antonio se encuentran asentados sobre areniscas y arcosas con niveles de lodolitas así como capas de yeso. Este último cor-

responde a la Formación Sotillo que también afloran en algunos sectores de El Cercado, Figura 1.

## METODOLOGÍA

- **Mediciones de Vibración Ambiental H/V:** El periodo es determinado a través del análisis de la relación espectral entre las componentes horizontal y vertical del registro de ruido ambiental. En el área de estudio se realizaron 274 mediciones de vibración ambiental, Figura 1.

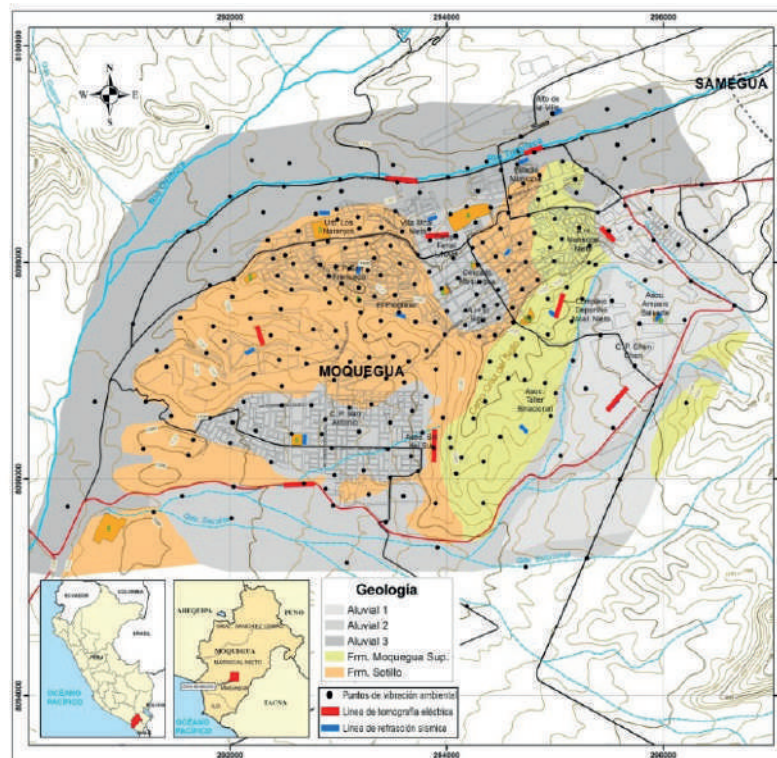


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio y la ubicación de los ensayos de H/V, MASW y Tomografía Eléctrica.

- **Mediciones de ensayos sísmicos MASW:** La velocidad de propagación de las ondas de Corte Vs en el subsuelo es obtenido mediante el análisis de la dispersión de ondas Superficiales (ondas Rayleigh), generado por una fuente de energía impulsiva registrado por arreglos lineales de estaciones sísmicas. En el área de estudio, se ha realizado 14 arreglos sísmicos (Figura 1).

- **Mediciones de ensayos eléctrico ERT:** Permite determinar el grado de saturación del suelo, a partir de la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. En el área de estudio, se ha realizado 09 mediciones con el ensayo ERT (Figura 1).

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

La distribución espacial de los puntos de vibración ambiental H/V permitió obtener los periodos dominantes en el área urbana de Moquegua, los cuales fueron separados en dos grupos, tal como muestra la Figura 2. Dentro del primer grupo, los periodos con rango de 0.1 y 0.2 segundos se distribuyen de manera casi uniforme sobre toda el área urbana de Moquegua, de forma sectorizada los periodos de 0.2 y 0.3 segundos se distribuyen en El Cercado (Campo Ferial UNAM y Plaza de Armas) y de hasta 0.4 segundos en el C.P. San Francisco (terminal terrestre de Moquegua). El segundo grupo los periodos de 0.6 a 1.0 segundos se distribuyen

en el C.P. San Francisco y la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio. Asimismo, al noroeste del Cercado de Moquegua (Estadio Municipal) presenta sensibilidad a periodos de 0.7 a 1.0 segundos.

El análisis de amplificación sísmica es de gran valor puesto que es, el efecto de sitio de mayor importancia durante la ocurrencia de un evento sísmico. Se ha diferenciado con colores y tamaño las amplificaciones mayores a 3 veces, Figura 2 (izq),

de ahí que las mayores amplificaciones se presentan en la zona de expansión del C.P. San Antonio, en los flancos del Cerro Cruz del Siglo, en el C.P. San Francisco y próximos al río Tumilaca. La ciudad de Moquegua al presentar una geomorfología variada, la topografía de mayor pendiente aporta de forma significativa el sacudimiento del suelo, siendo en estos lugares donde se producirían los mayores daños ante la ocurrencia de eventos sísmicos.

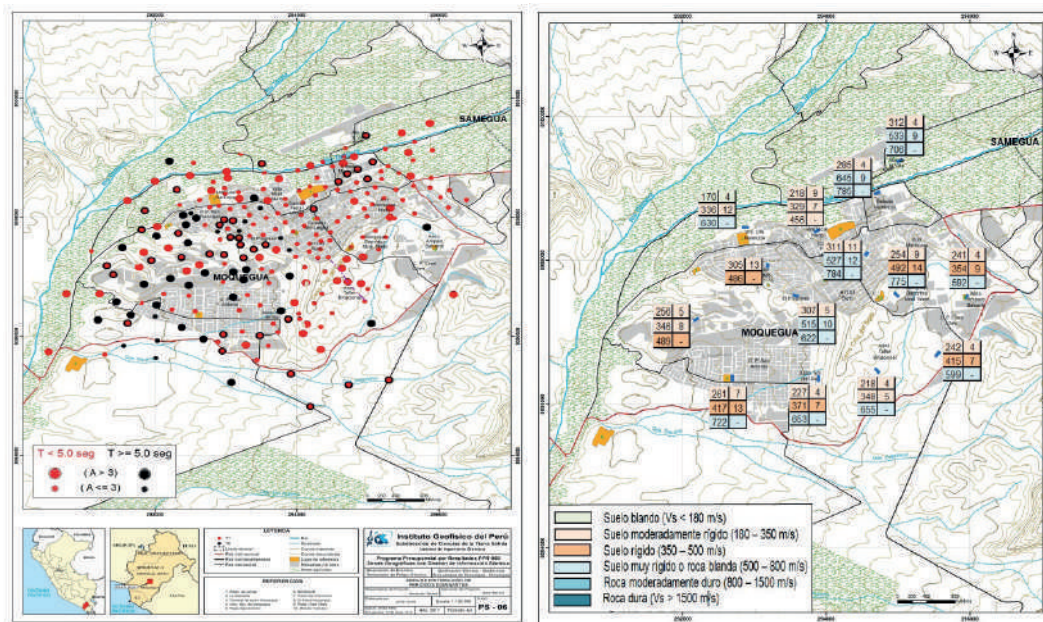


Figura 2. Distribución de periodos predominantes y amplificaciones relativas obtenidas para el área urbana de Moquegua (izquierda) y velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ), obtenidas mediante el método MASW (derecha).

El ensayo de MASW, ha permitido obtener perfiles de la variación de la velocidad de ondas de corte  $V_s$  en profundidad. En el Cercado de Moquegua y en los C.P. San Francisco, San Antonio y Chen Chen presenta suelos moderadamente rígidos en superficie con espesores que varían de 4 a 16 metros, siendo los menores espesores próximos al estadio Municipal que conforme se dirige al suroeste (Plaza de Armas) aumenta el espesor, siendo los máximos espesores en el Campo Ferial UNAM, Villa Militar Mcal Nieto, en el C.P. San Francisco y en las zonas de expansión del C.P. San Antonio y del C.P. Chen Chen. Por debajo presenta suelos rígidos a muy rígidos en casi toda el área urbana de Moquegua, particularmente, se presenta suelos rígidos a mayor profundidad en los sectores próximos a la Villa Militar Mcal Nieto, Figura

2(der).

A partir del ensayo de ERT, se ha identificado suelos con contenido de humedad en los sectores próximos al río Tumilaca, principalmente al noroeste del área urbana de Moquegua (terminal terrestre, Villa Mcal Nieto), asimismo, al sur del C.P. San Antonio próximo a la quebrada Estacional.

### Zonificación Sísmica

Para el área urbana de Moquegua, las características físicas y dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a las consideraciones indicadas en la Norma de Construcción Sismorresistente E-030, la existencia de suelos de Tipo S1 y S4. Según la Figura 3, para el área urbana de la ciudad de Moquegua, se propone la siguiente

### Zonificación Sísmica:

- **ZONA I:** Conformada por suelos más consolidados de la ciudad, constituidos por estratos de grava aluvial desde el nivel superficial. Esta zona comprende gran parte del área céntrica de Moquegua (Plaza de Armas, A.H. El Siglo, A.H. Mariscal Nieto), hacia el sur el área urbana central del C.P. San Antonio y hacia el este parte del C.P. Chen Chen. La línea negra punteada ubicada entre el campo ferial UNAM y la villa Mcal. Nieto (El Cercado), indica que los suelos se encuentran constituidos por depósitos de arenas con limos y arcillas.

- **ZONA IV:** Esta zona corresponde a suelos cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales, por lo que su comportamiento comprende a suelos Tipo S4; sin embargo para realizar una mejor zonificación, se ha visto por conveniente

subdividir a fin de considerar dos subzonas con características específicas. El primero (Zona IVa), constituida por depósitos fluviales y aluviales con alto contenido de humedad y en algunos sectores cubiertos por limos (áreas de cultivo), se encuentran emplazados próximo al río Tumulaca (Figura 4). Asimismo, puede generarse procesos geodinámicos externos como inundaciones, procesos de licuación y mayores sacudimientos del suelo durante la ocurrencia de un evento sísmico. El segundo (Zona IVb), corresponde a zonas de topografía irregular, donde puede generarse caída de rocas y producirse flujo de detritos. Abarca el área urbana del C.P. San Francisco y la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio, donde los suelos que cubren este sector; además de presentar una topografía accidentada, responden en dos rangos de periodo de vibración, con amplificaciones relativamente altas de hasta 3 veces

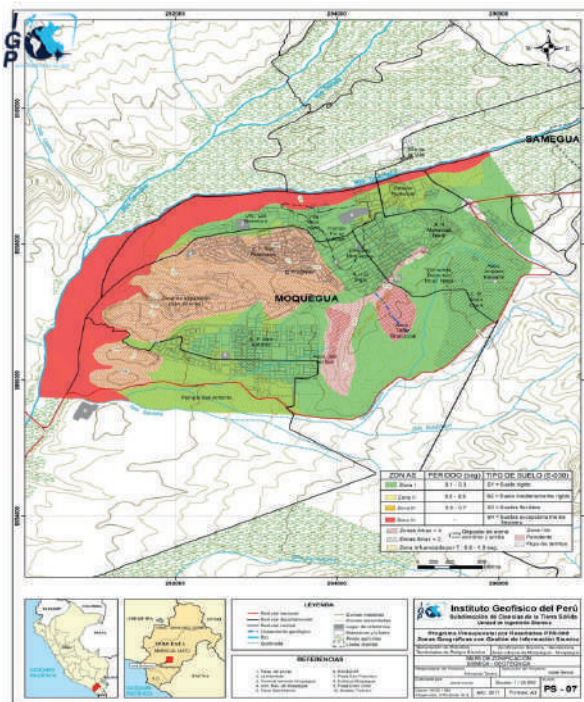


Figura 4. Mapa de zonificación sísmica del área urbana de Moquegua.

## CONCLUSIONES

En el área urbana de Moquegua, se identifican dos rangos de periodos; el primer rango de 0.1 y 0.2 segundos, se distribuyen de manera casi uniforme sobre toda la ciudad de Moquegua. Sin embargo, algunas zonas también presentan sensibilidad a un segundo rango de periodos de 0.6 a 1.0 segundos y están distribuidos en el C.P. San Francisco y la zona de expansión urbana del C.P. San Antonio. Las mayores amplificaciones en ambos grupos se presentan en la zona de expansión del C.P. San Antonio, en el flanco este del cerro Cruz del Siglo y en sectores puntuales en el C.P. San Francisco y próximo al río Tumulaca.

Asimismo, el Cercado de Moquegua y en los C.P. San Francisco, San Antonio y Chen Chen presenta suelos moderadamente rígidos en superficie, siendo los máximos espesores en el Campo Ferial UNAM, Villa Militar Mcal Nieto, en el C.P. San Francisco y en las zonas de expansión del C.P. San Antonio y del C.P. Chen Chen. Por debajo presenta suelos rígidos a muy rígidos en profundidad.

Los resultados obtenidos para el área urbana de la ciudad de Moquegua a partir de sus características físicas y dinámicas del suelo, han permitido identificar, de acuerdo a las consideraciones indicadas en la Norma de Construcción Sismorresistente E-030, la existencia de suelos de Tipo S1 y S4.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bard, P-Y y SESAME (2001) The SESAME project: an overview and main results. 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 16, 2004 Paper No. 2207.
- Bellido, E. (1979) Geología del cuadrángulo de Moquegua. IN-GEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 15, 78 p.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26 (1), 60–64.
- Tavera, H., Fernández, E. y Bernal, I. (2006) The southern region of Peru earthquake of June 23rd, 2001. *Journal of Seismology* (2006) DOI: 10.1007/s10950-006-9014-2.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: *Geophysics*, 64, 691–700.
- Zenteno, E., Rubio, R., Guevara, E. y Fernández, F. (2004) Estudio Hidrológico del Valle de Moquegua –Ilo. Instituto Nacional de Recursos Naturales.