

# CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS DE LA CIUDAD DE ICA ANTE PROCESOS SÍSMICOS

Isabel Bernal, Hernando Tavera, Lucy Arredondo, Rider Navarro, Henry Salas, Bertrand Guillier

Instituto Geofísico Del Perú - E-mail: isabel.bernal@igp.gob.pe

## RESUMEN

En este estudio, se caracteriza la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica a partir de la evaluación de las condiciones geo-ambientales y la aproximación de los efectos de sitio. Utilizando registros de vibración ambiental de 160 puntos y evaluados con la técnica de análisis espectral H/V. Los resultados obtenidos, muestran el predominio de dos rangos de frecuencia: Fo (0.3-0.45Hz) y F1 (1.0-3.0Hz). El primero, de bajas frecuencias, se debe a la presencia de depósitos profundos y el segundo, se encuentra asociado con depósitos superficiales blandos y de menor espesor. Las velocidades de onda de corte, Vs, registradas entre 180 m/s y 300 m/s para frecuencias de 1.8 Hz (0.5 segundos), sugieren que la capa superficial presenta espesores que fluctúan entre 20 y 35 metros. El análisis frecuencial muestra diferencias en las características del subsuelo entre el sector norte y sur de la ciudad, sugiriendo que en el sector norte, la mayor cantidad de energía es irradiada en dirección N-S con una frecuencia de 0.4 Hz. y en menor cantidad en dirección E-O, con una frecuencia de 1.8 Hz. Estos resultados evidencian que, en la ciudad de Ica, se observa un complejo comportamiento dinámico del suelo que se traduciría en una transmisión de la energía impartida con una dirección cuasi-predominante.

## INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de eventos naturales (sismos, huaycos e inundaciones) genera un impacto ambiental, que dependiendo de la vulnerabilidad de la zona involucrada, puede afectar directamente el hábitat del hombre. En los últimos 70 años, la ciudad de Ica a sido afectada por los sismos de 1942 (8.2 Mw), 1996 (7.7 Mw) y 2007 (8.0 Mw), evidenciando el alto potencial sísmico de la región (Silgado, 1978; Bernal, 2002; Tavera, 2007), así como su alta vulnerabilidad. Los daños personales y materiales, se deben principalmente a la antigüedad y/o mal diseño de las viviendas, desconocimiento de las características dinámicas de sus suelos e inadecuada planificación urbanística de la gran densidad poblacional (INEI, 2012: 130,006 habitantes) que se concentra en esta ciudad.

Considerando que la intensidad de las sacudidas sísmicas y las características dinámicas del suelo varían considerablemente a distancias muy cortas y áreas pequeñas, se infiere que el factor esencial a considerar para la evaluación del daño en las edificaciones son las condiciones locales del suelo; es decir, efectos de sitio (Muria et. al., 1993; Bernal, 2006).

La ciudad de Ica se ubica en el extremo derecho del río Ica, sobre suelos predominantemente arenosos; asimismo, el desarrollo y expansión urbana se viene realizando en forma desordenada. Estructuralmente, el desarrollo vertical, se ha dado en el cercado de la ciudad y viene contribuyendo con la tugurización; el desarrollo horizontal, esta presente en la periferia de la misma sin control alguno. Desde este punto de vista, es necesario conocer el comportamiento dinámico de los suelos a fin de tipificarlos y proponer la zonificación sísmica-geotécnica de la ciudad, siendo esta información, una herramienta básica para las autoridades y pobladores que les permitirá la planificación y ordenamiento de su territorio. Asimismo, esta información será de utilidad para el diseño de estructuras sismo-resistente y de estrategias de intervención integral orientadas a la solución de problemáticas sociales.

En el ámbito nacional, para la ciudad de Ica se han realizado múltiples estudios de zonificación de suelos desde un punto de vista geotécnico, hidrológico, geológico (Mitma, 2001); Proyecto Sostenible de INDECI (PNUD PER/02/051, 2007), dejando de lado los estudios geofísicos que permiten conocer los parámetros dinámicos de los suelos con mayor precisión y a mayor profundidad. Estos estudios sirven como insumo para otros de mayor alcance.

En este estudio, se caracteriza el comportamiento dinámico de los suelos de ciudad de Ica, a partir de la evaluación de las condiciones geo-ambientales y su influencia, por medio, de una aproximación de los efectos de sitio utilizando registros de vibración ambiental y técnicas de análisis espectral (H/V,

SPAC, F-K, MASW). Asimismo, se utilizaron métodos geofísicos de refracción sísmica y resistividad. Los resultados obtenidos son correlacionados con las variables geo-ambientales (geología, hidrología, geomorfología, geotecnia) para obtener el mapa de zonificación sísmica-geotécnica, actualizado y óptimo para la ciudad de Ica.

## DATOS SÍSMICOS

Este estudio considera, la toma de registros de vibración ambiental de manera puntual en 360 puntos distribuidos de manera homogénea sobre el área de estudio. Para el registro se utiliza un equipo sísmico compuesto por dos registradores tipo CitySharp y sensores tipo Lennartz de tres componentes de registro N, NS y EO.

## METODOLOGÍA

Para la evaluación del comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica, se ha considerado el método propuesto por Nakamura (1989) y la siguiente metodología:

1.-El procesamiento de la información tomada a partir de los 62 puntos de observación (Figura 1). De manera resumida para aplicar la técnica H/V, se consideran los siguientes pasos:

- a. *Los registros de vibración ambiental fueron tratados por ventanas de 20 segundos de señal, seleccionados de forma aleatoria, sin la presencia de ruidos transitorios. Al momento de procesar dicha información no se utilizó ningún tipo de filtro.*
- b. *Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.*
- c. *Los espectros horizontales de la señal se dividieron por el espectro vertical para obtener la relación H/V. Luego se promediaron considerando su respectiva desviación estándar (Figura 3). Finalmente, se identifica la frecuencia predominante, considerando como condición, presentar una amplificación máxima relativa mayor a 2 veces.*

2.- Para definir la frecuencia predominante se consideraron tres criterios (Lermo y Chávez-García - 1994 a,b; Lachet y Bard, 1994; Bernal 2006): primero, debe estar presente en un rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 30 Hz; segundo, debe presentar amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de "1" como punto de referencia) y por último, se considera el pico/rango de frecuencias más representativas para cada punto de medida.

Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

## DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Del análisis frecuencial, y siguiendo la metodología antes indicada en la zona de estudio, predominan dos rangos de frecuencia  $F_0$  (0.3-0.45Hz) y  $F_1$  (1.0-3.0Hz) que caracterizan el comportamiento dinámico de los suelos. Las bajas frecuencias o periodos largos ( $F_0$ ) se deben a la presencia de depósitos profundos; mientras que las frecuencias altas o periodos cortos ( $F_1$ ), están asociadas con depósitos superficiales blandos y de menor espesor (Bernal, 2006). Sin embargo, existe la posibilidad que las bajas frecuencias sean debidas a un modo superior de vibración asociados a efectos de resonancia en la cuenca de Ica, definida por una compleja geomorfología presente en la zona de estudio, tal como fue evidenciado por Bonnefoy-Claudet., et al. (2004a), Cornou, et. al (2004) y Toten et al. (2004), quienes a partir de simulaciones teóricas sostienen que el campo de ondas a frecuencias de 0.25 a 0.5 Hz es dominado por el efecto asociado a la geomorfología de la cuenca (resonancias 2D). Por otro lado, Fah et. al. (2001) indican que la geometría del valle evidencia una respuesta dinámica que es diferente en la interfase roca-suelo superficial o profunda. Para el primer caso, el campo de ondas es dominado por una propagación lateral de las ondas superficiales generadas en el eje del valle, lo cual puede causar resonancia local. En el segundo caso, la interferencia de estas ondas superficiales con la propagación vertical puede generar un patrón de resonancia 2D. Este mismo escenario se presenta en la ciudad de Ica.

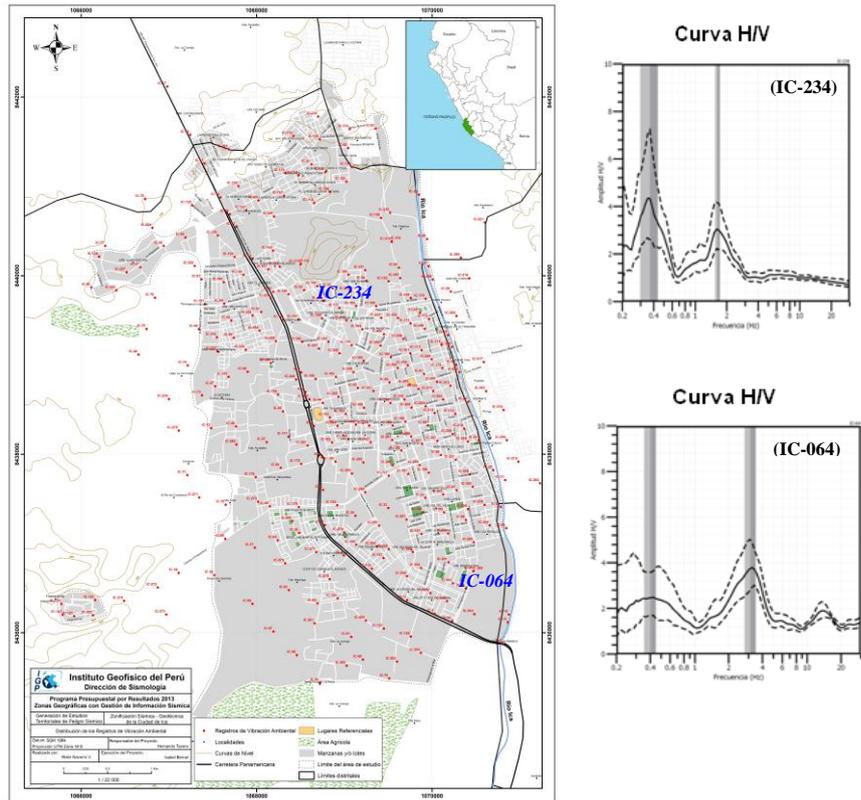
Asimismo, en la Figura 1 se presentan ejemplos de razones espectrales característicos de la zona. La forma de la curva y las amplificaciones máximas relativas para las frecuencias dominantes, evidencian que las características dinámicas del subsuelo, entre el sector norte y sur de la ciudad, difieren. En el sector norte, la mayor cantidad de energía es irradiada en dirección N-S con una frecuencia de 0.4 Hz y en menor cantidad en dirección E-O con una frecuencia de 1.8 Hz. Estos resultados evidencian que

existe una transmisión cuasi-direccional de la energía impartida, debido probablemente a la compleja geomorfología de la cuenca de Ica. En la cuenca de Ica existen dos capas. La de mayor potencia y más profunda, presenta principalmente periodos de 2.5 segundos (0.4 Hz), sobre la cual sobresale una capa mas superficial de menor potencia pero inestable, representada por periodos que fluctúan entre 0.3 (3.0Hz) y 1.0 segundos (1.0Hz). Entre ambas capas, existe una de menor potencia que sirve de interfase y cuya influencia en la respuesta del suelo es mínima.

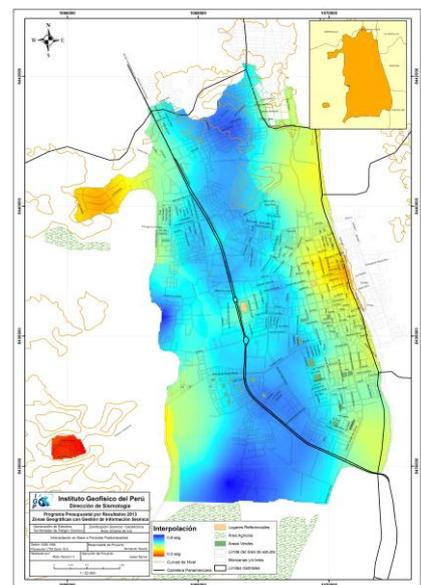
El periodo dominante de la zona esta relacionada con las condiciones físico-dinámicas del suelo a través de la relación  $T_0=4H/V_s$ , donde  $T_0$  es el periodo dominante, H el espesor del estrato y  $V_s$  es la velocidad de onda de corte. Asumiendo, una velocidad de 180 m/s y 300 m/s para  $V_s$  y periodos de 0.5 segundos, se estima para la capa superficial, espesores que fluctúen entre 20 y 35 metros. Al considerar periodos de 2.5 segundos, se estima espesores de 100 y 180 metros para la capa que subyace a la capa superficial.

Finalmente, en la Figura 2 se presenta el mapa de isoperiodos para la ciudad de Ica, estando los de mayor valor distribuidos hacia el extremo Oeste de la ciudad de forma casi paralela a la Panamericana Sur y con mayor concentración hacia los extremos norte y sur de dicha zona. Los valores intermedios se distribuyen alrededor del río Ica y sobre un área de menor dimensión ubicada al NO de la ciudad. Los periodos de 0.3-1.0 segundos están asociados con el espesor de la primera capa, evidenciando que hacia el extremo oeste de la ciudad, la capa superficial tiene mayor potencia, siendo coherente con el dominio de las capas arenosas poco consolidadas existentes en dicha zona.

**Figura 2.** Mapa con la interpolación de los periodos dominantes asociados a la capa más superficial. (Periodos menores a 1.0 segundo).



**Figura 1:** En el extremo izquierdo se presenta la distribución espacial de los puntos donde se tomaron datos. En el extremo derecho, se presenta ejemplos de curvas de razones espectrales H/V para los puntos IC-064 y IC-234, donde las líneas gruesas representa el promedio de las curvas H/V y en discontinuas su desviación estándar.



## CONCLUSIONES

En esta primera etapa del estudio se llega a las siguientes conclusiones:

- En la zona de estudio predominan dos rangos de frecuencia  $F_0$  (0.3-0.45Hz) y  $F_1$  (1.0-3.0Hz). El primero considera bajas frecuencias debidas a la presencia de depósitos profundos y la segunda, a frecuencias altas debidas a depósitos superficiales blandos y de menor espesor. Se estima para la capa superficial, espesores que fluctúen entre 20 y 35 metros.
- El análisis frecuencial muestra diferencias en las características sísmicas-dinámicas del subsuelo entre el sector norte y sur de la ciudad, sugiriendo que en el sector norte, la mayor cantidad de energía se irradiada en dirección N-S con una frecuencia de 0.4 Hz y en menor cantidad en dirección E-O con una frecuencia de 1.8 Hz con una orientación E-O a diferencia de lo observado en el sector sur. Estos resultados indirectamente evidencian que existiría una dirección cuasi-predominante en la transmisión de la energía impartida, debido probablemente a la geomorfología de la cuenca de Ica.
- En la zona de estudio se evidencia la presencia de suelos con una gran porosidad, y en algunos casos saturados de agua, los que pueden interactuar con las ondas sísmicas para generar un efecto de licuefacción. Estos dos efectos puede ser el origen para el diferente comportamiento dinámico entre los sectores norte y sur de la ciudad de Ica.

## REFERENCIAS

1. Bernal I. (2002). Aproximación a un modelo detallado de la sismicidad en el Perú. Características y evaluación de la energía sísmica liberada. UNSA, Tesis. 200pp.
2. Bernal, I. (2006). Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, MEXICO. Tesis, UNAM. 130pp
3. Bonnefoy-Claudet S., C. Cornou, J. Kristek, M. Ohrenberger, M. Wathelet, P.-Y. Bard, P. Moczo, D. Faeh and F. Cotton (2004a). Simulation of Seismic Ambient Noise: I. Results of H/V and Array Techniques on Canonical Models, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1 – 6 Aug. 2004, Vancouver, Canada, paper No 1120.
4. Cornou C., J. Kristek, M. Ohrenberger, G. Di Giulio, E. Schissele, B. Guillier, S. Bonnefoy-Claudet, M. Wathelet, D. Faeh, P.-Y. Bard and P. Moczo (2004a). Simulation of Seismic Ambient Vibrations – II H/V and Array Techniques for Real Sites. 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1 – 6 August 2004, Vancouver, Canada, paper No 1130.
5. Fah, D., F. Kind and D. Giardini (2001). A theoretical investigation of average H/V ratios, *Geophys. J. Int.* 145, 535–549.
6. INDECI, PNUD PER/02/051 ( 2007). Instituto Nacional de Defensa Civil.
7. Lermo, J. and F.J. Chávez-García (1994a), “Are microtremors useful in site response evaluation?”, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
8. Lermo, J. and F.J. Chávez-García (1994b), “Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records”, *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423 pp.
9. Lachet, C. and P. Y. Bard (1994), “Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura’s technique”, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397 pp.
10. Mitma G. (2001), “Microzonificación de la Ciudad de Ica frente a Sismos e Inundaciones”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
11. Muria, D y A. González (1993), “Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México”, 6tas jornadas Chilenas de sismología e ingeniería antisísmica, Santiago, Chile, 1, pp.585-594.
12. Nakamura Y., (1989). “A Method for Dynamic Characteristic Estimation of surface Using Microtremor on the Ground Surface”. *QR of R. T. R.*, 30-1.
13. Silgado (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Boletín N° 3, serie C. Geodinámico e Ingeniería Geológica INGEOMIN, 129 p.
14. Tavera (2007). El terremoto de Pisco del 2007. Informe Técnico IGP.