

# EL TERREMOTO DE PISCO (2007) Y APORTES EN LOS ESTUDIOS DE RIESGO SÍSMICO Y VULNERABILIDAD A ESCALA REGIONAL Y LOCAL

Isabel Bernal (1), Marc Wathelet (2), Beltran Guillier (3) y Hernando Tavera (1)  
Email: isabel.bernal@igp.gob.pe

(1) Instituto Geofísico del Perú  
(2) Institut des Sciences de la Terre, Grenoble, France

## Introducción

El 15 de agosto de 2007 ocurrió un sismo de 7.9Mw, que afectó al departamento de Ica con intensidades del orden de VII - VIII (MM) concentrándose los daños en las ciudades de Pisco, Chincha e Ica. En la ciudad de Ica, capital de este departamento, los daños se concentran en las estructuras de la zona céntrica de esta ciudad localizada a 100km al SE del epicentro de este sismo. Dicha ciudad se ubica dentro de la cuenca del río Ica y por ende se asienta sobre depósitos aluviales, fluviales y eólicos, presentando una geomorfología relativamente irregular, factor importante que explicaría los daños observados después de la ocurrencia del sismo. La evaluación de los efectos de sitio asociados a las condiciones geológicas y geotécnicas del subsuelo representan una parte muy importante de los estudios de riesgo sísmico, debido a que por medio de ellos se evidenciaron modificaciones significativas que pueden sufrir las ondas sísmicas al propagarse por las distintas capas de suelo que yacen sobre el basamento, hasta llegar a la superficie. En términos generales, las capas de espesor considerable de suelo blando (depósitos no consolidados) tienden a amplificar selectivamente ciertas frecuencias de las ondas sísmicas y a de-amplificar otras. Se suelen producir también aumentos en la duración del movimiento y en el valor pico de aceleración.

La ciudad de Ica se encuentra situada en el estrecho valle que forma el río de Ica, entre el gran tablazo de Ica y las laderas occidentales de la cordillera de los Andes. Esta ciudad se encuentra sobre depósitos eólicos, aluviales y fluvio-aluviales (INGEMMET, 2006). Los depósitos aluviales predominan a lo largo del cauce del Río Ica, y formados por la sedimentación del río conformados por materiales de naturaleza arenosa y limosa con arcilla. Sobre estos suelos yace la ciudad de Ica (Figura 1). Según los estudios de geotecnia, la ciudad de Ica está delimitada por tres zonas (Mitma G. 2001): La primera zona, con suelos ML y carga permisible de 1.5-2.0kg/cm<sup>2</sup>, NF>20m con períodos de vibración de 0.3-0.4s. La segunda zona con suelos SM y carga permisible de 1.0-1.5kg/cm<sup>2</sup>, NF>18m con períodos de vibración de 0.2-0.3s y finalmente, la tercera zona con suelos SP y capacidad permisible de 0.5-1.0kg/cm<sup>2</sup>, NF>15m con períodos de vibración de 0.4-0.5s. El canal antiguo del río de Ica justifica la transición entre la primera y tercera zona (ver, Figura1).

El objetivo de este trabajo es de conocer las características del sub-suelo de la ciudad de Ica por medio de perfiles de velocidad, utilizando registros de vibración ambiental y arreglos de estaciones sísmicas. En este estudio, se hace uso de Ondas Rayleigh (componente vertical) debido a sus propiedades dispersivas mostrando variaciones de la velocidad de fase según su frecuencia.

## Data y Metodología

Los arreglos de estaciones sísmicas se realizaron en el extremo sur de la ciudad de Ica, sobre el campo ferial. La data fue tomada en dos períodos: en Noviembre-2009 se configuraron arreglos circulares de 10, 30, 100 y 400 metros de radio obteniendo registros de vibración ambiental de 1 y 5 horas y en Enero-Marzo-2010, se configuró un arreglo de 1 km de radio registrando sismos de pequeña magnitud (ML<4.0). La disposición de los sensores fue circular consistente de 10 estaciones. El equipo utilizado para la toma de datos consistió en sismómetros de tres componentes

ortogonales (vertical, norte-sur, este-oeste) marca Lennarzt, con rango dinámico de 140Db y registradores modelo City Shark II cuya sensibilidad permitió registrar señales dentro de una banda de frecuencias de 0.2 y 40 Hz en un rango de ganancia de 1024 dB. El tiempo y localización de registro de cada punto fue controlado por un GPS.

Existen numerosos métodos para evaluar los efectos de sitio y determinar los perfiles de velocidad (Aki, 1957; Capon, 1969; Nakamura, 1989; Wathelet, 2005; Roca et al., 2006) y de ellos, en este estudio se aplica el de razones espectrales H/V y arreglos de estaciones sísmicas (Figura 2).

Para obtener las curvas de dispersión se hace uso de métodos SPAC (spacial autocorrelation) y FK (frequency-wavenumber). El método SPAC consiste en una auto-correlación espacial y se asume que la distribución de fuentes del ruido es aleatoria, tanto en el tiempo como en el espacio. En el caso de una onda dispersiva, se ha demostrado que las razones de auto-correlación son función de la velocidad de fase y apertura del arreglo (Aki, 1957). El método FK consiste en el análisis del número de ondas vs la frecuencia (FK), el cual asume que las ondas planas atraviesan el arreglo que se ubica en la superficie del suelo. Estas ondas se propagan a una frecuencia  $f$ , con una dirección de propagación y una velocidad conocida (o los números de onda equivalentes  $k_x$  y  $k_y$  a lo largo de los ejes horizontales X y Y). Los tiempos de arribo son calculados en todos los sensores según su ubicación y las fases de los registros son combinadas según los tiempos de retardo (Capon, 1969). La respuesta del arreglo es calculada sumando las señales transformadas al dominio de la frecuencia. Si las ondas viajan con velocidad y dirección específicas, todas las contribuciones se acumulan constructivamente, resultando un arreglo de gran salida o respuesta. La localización de esta máxima salida en el plano  $K_x$  y  $K_y$  (conocida como Beam power), provee la estimación de la velocidad y del azimut de las ondas que viajan a través del arreglo. Ambos métodos, permiten obtener curvas espectrales características de la propagación de ondas, llamadas también curvas de dispersión.

La inversión de las curvas de dispersión, se realiza mediante el algoritmo del Neighbourhood, el cual hace uso de la descomposición de celdas de Voronoi de los parámetros espaciales, basadas en una aproximación de la función "misfit" la cual es refinada progresivamente durante el proceso de inversión (Wathelet, 2005). Asimismo, los resultados obtenidos son validados con el análisis de la Elipticidad en cada frecuencia definida como la razón entre los desplazamientos horizontales y verticales de las eigen-funciones en la superficie libre o en sitios donde se presenta un mayor contraste de velocidad entre los sedimentos y la roca. Cabe indicar que la elipticidad del modo fundamental de las ondas Rayleigh tiene la ventaja de definir con mayor precisión la profundidad de la capa sedimentaria.

## Resultados

Para el tratamiento de la data, se utilizó el software Geopsy y en promedio hasta 15 ventanas de señal de 25 y 60 segundos de señal para los arreglos pequeños y largos respectivamente. Para la presentación de los resultados se utilizó el suavizado de Konno y Ohmachi (40), el mismo que usa una banda ancha constante a escala logarítmica. Siguiendo la metodología y tratamiento de la señal se llega a los siguientes resultados:

1. Con la técnica H/V, fue posible identificar la presencia de dos picos predominantes a muy bajas frecuencias, 0.4 y 1.6 Hz con amplificaciones máximas relativas de 5 y 3 veces respectivamente. Para el registro de sismos, las frecuencias son las mismas con ligera diferencia en su amplificación máxima relativa. Estas razones son el reflejo de las condiciones locales del sub-suelo conformadas posiblemente por capas sedimentarias de gran espesor y gran contraste de impedancia entre las capas de suelo sucesivas respecto al basamento.

- 2.- En la Figura 2, se muestra las curvas de dispersión obtenidas en el Campo Ferial de Ica aplicando

los métodos FK y SPAC, ambos métodos generan soluciones, que van desde el mayor error (fuera de las curvas de resolución que delimitan la zona de aliasing y la zona de baja energía, definidas de acuerdo al tamaño y distribución de las estaciones) hasta la mejor resolución. Para el arreglo de 10 metros se observa coincidencias entre las soluciones aportadas por los métodos FK y SPAC en el rango de frecuencias de 8 y 15 Hz. Este arreglo permitió obtener información sobre las capas más someras. En el arreglo de 30 metros, se observa aún mayor coincidencia entre ambos métodos en el rango de frecuencias de 4 y 10 Hz aproximadamente. Este resultado indica una muy buena definición de la  $V_s$  (velocidad de corte) correspondiente a las primeras capas.

En caso del arreglo de 100 metros, no es tan clara la coincidencia entre los dos métodos. En este caso, FK produce una curva más definida que SPAC, para un rango mayor de frecuencias, entre 2 y 8 Hz. La curva de dispersión por debajo de 2Hz es casi horizontal, por lo que no queda claro el fenómeno de dispersión, lo que hace pensar que el medio se comporta como homogéneo (no estratificado en capas distintas). Se evidencia además gran efecto de aliasing en ambos métodos. En el caso de SPAC produce una curva poco definida entre 0.6-3 Hz, cuya solución no resulta del todo confiable ya que muestra una forma irregular por lo que para este caso sólo se considera los resultados obtenidos a partir de la técnica FK. Para el arreglo de 400 metros, muestra una clara coincidencia en las curvas de dispersión obtenidas con ambos métodos, para un rango de frecuencias de 0.6 a 1 Hz. Este arreglo permite tener más información sobre capas profundas ya que la curva de dispersión cubre frecuencias más bajas que el resto.

De todas las curvas de dispersión obtenidas para los diferentes arreglos y con las diferentes metodologías se ha realizado el promedio con su respectiva desviación estándar, a fin de contar para el campo ferial con una única curva de dispersión y realizar su posterior inversión. En la Figura 3, se muestra los perfiles de velocidad obtenidos con las diversas soluciones, todas seleccionadas en base a la comparación del misfit y/o mínimo error obtenido para cada modelo. La curva de dispersión obtenida para Ica (Campo Ferial) por su complejidad, a la hora de su inversión y análisis, se consideró necesario tener en cuenta un modo fundamental y dos modos superiores. En este caso, misfit se redujo a 0.1, mejorando considerablemente la solución. Al final se evalúan los resultados obtenidos de manera iterativa con cada inversión validada y la evaluación de la elipticidad que generan estos modelos de velocidad, tal como se observa en la Figura 3. El perfil de velocidad obtenido, permitió identificar la presencia de tres estratos bien definidos con espesores son de 18, 4 y 17 metros y velocidades que fluctúan entre 150-600m/seg. Asimismo, se evidencia la existencia de una zona de gran contraste de velocidad ubicada a una profundidad de 400 metros, observándose un salto de la velocidad que va desde 650m/seg a 2800m/seg.

## **Bibliografía**

Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo, 35, 415-457.

Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proceedings of the IEEE, 57(8), 1408-1418.

INGEMMET (2006). Instituto Geológico minero y metalúrgico.

INDECI (2007). *Movimiento Sísmico Afecta Severamente Departamentos de ICA y Sur de Lima*, Informe de Emergencia N° 286, 17/08/2007, Instituto Nacional de Defensa Civil, Lima, Perú.

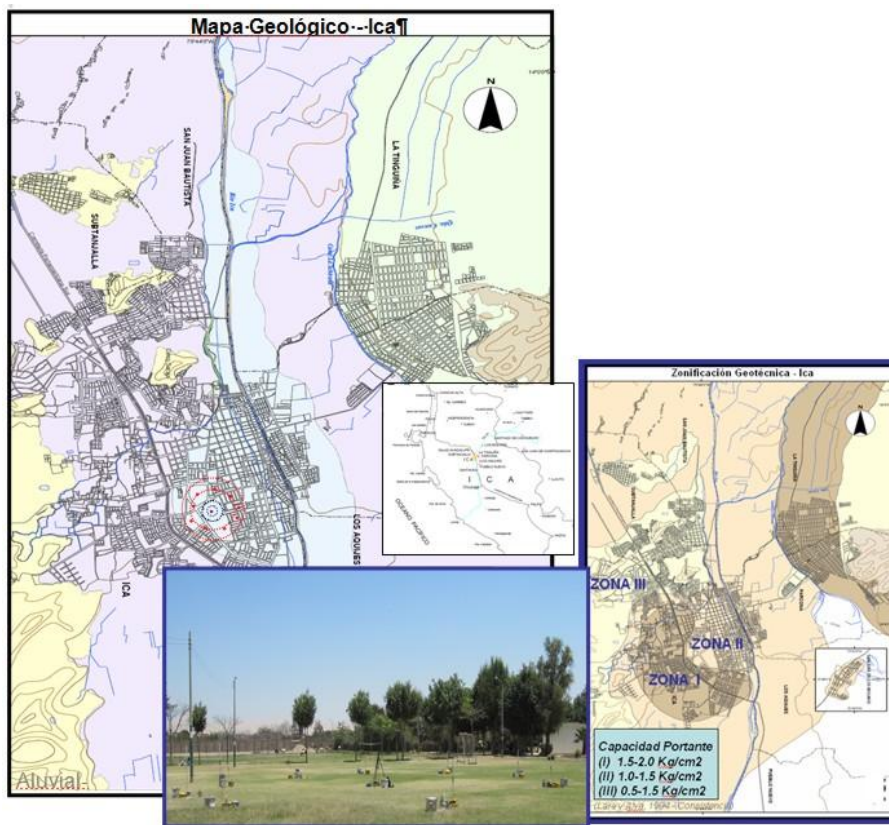
Konno, K. & Ohmachi, T. (1993). Ground motion characteristics estimated from H/V microtremor. BSSA; Vol. 88, No.1, p.228-241.

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.

Nakamura, Y. (1989). A method of dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quart. Rep. Railways Tech. Res. Inst. 30, 25-33.

Roca, A., Oliveira, C., Ansal, A. & Figueras, S. (2006). Local site effects and microzonation, in: Assessing and managing earthquake risk. C.S Oliveira, A. Roca & X Goula (Editors). Springer, Chapter 4, 67-89.

Wathelet, M. (2005), Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversions. Thesis the degree of Doctor of Applied Sciences. Universite de Liege, Belgium.



**Figura 1.** En el extremo izquierdo se presenta el Mapa Geológico de la ciudad de Ica. La zona sombreada de celeste delimita los suelos aluviales sobre el cual se realizaron los arreglos sísmicos tal como se muestra en la foto inferior. En el extremo derecho, se muestra la distribución de los suelos según su capacidad portante.

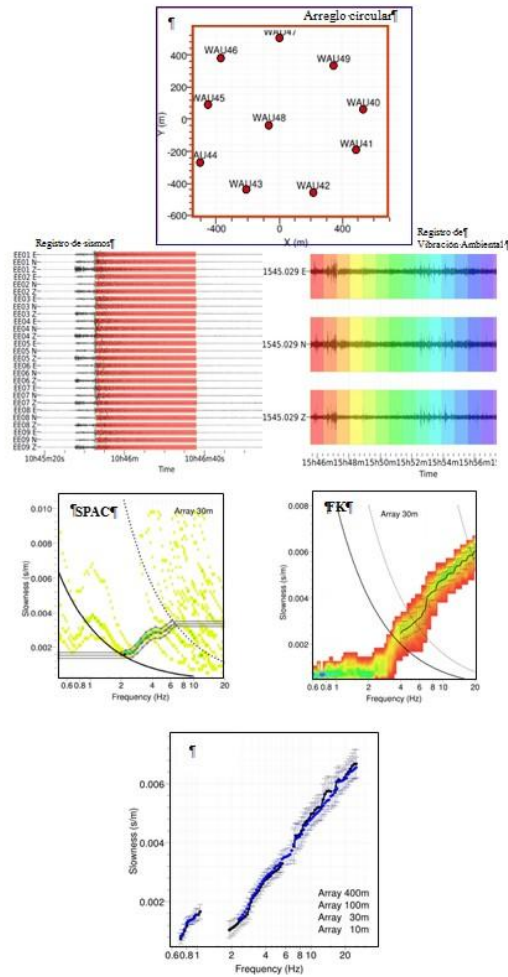


Figura 2. Esquema del trabajo para la aplicación de la técnica de arreglos con los métodos SPAC y FK. En el extremo inferior se muestra una gráfica con las curvas de dispersión obtenida por los diferentes arreglos.

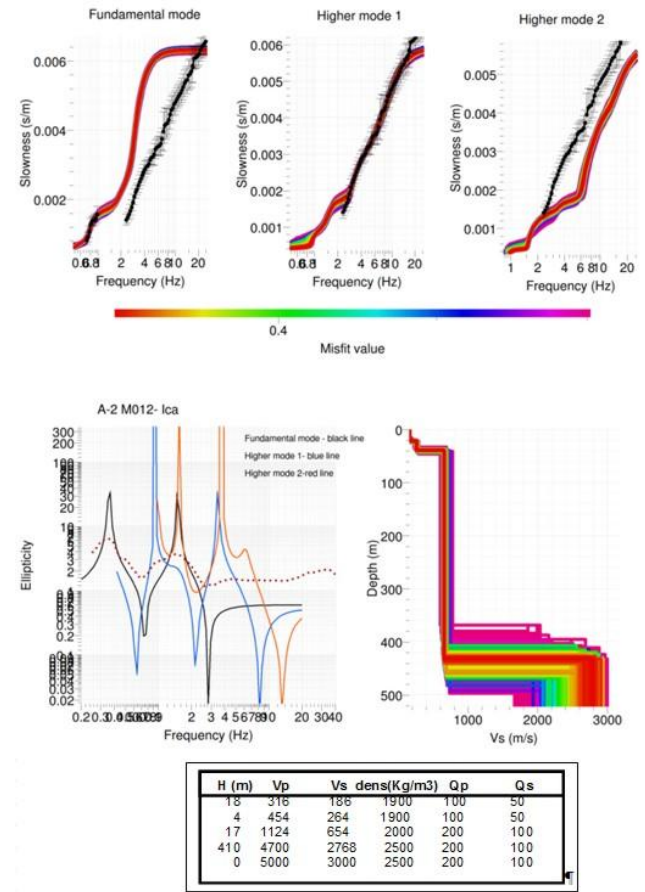


Figura 3. Resultados de la inversión. En el extremo superior de la figura se muestra las curvas de dispersión del modo fundamental, primer y segundo modo superior de las ondas Rayleigh. En el extremo inferior izquierdo, las curvas de ellipticidad obtenidas para los diferentes modos. La línea discontinua representa el promedio de las razones espectrales H/V y en el extremo inferior derecho el perfil de velocidad Vs para la ciudad Ica (área sobre la cual se realizó el arreglo sísmico).