

## ESTIMACIÓN DE MODELOS DE VELOCIDADES 3D USANDO RUIDO SÍSMICO

JORGE AGUIRRE GONZÁLEZ

Una de las tareas cotidianas del Ingeniero Geofísico es la exploración y caracterización de las estructuras del subsuelo. Esta caracterización se realiza utilizando las propiedades físicas de los materiales como densidad, resistividad y propiedades elásticas. Estas últimas son estimadas a través de la propagación de ondas elásticas. Los métodos que utilizan ondas elásticas en general se pueden agrupar en dos, los que utilizan fuentes activas y la sísmica pasiva. El primero requiere la generación de ondas sísmicas por medio de fuentes artificiales controladas: el golpe de un marro, una explosión, la vibración de una masa (bailarina) o un camión (vibroseis) entre otras. Estos métodos son usados ampliamente en la exploración somera de decenas de metros mediante el método de refracción. En turno, el método de reflexión sísmica es ampliamente usado en la exploración petrolera con objetivos más profundos (de algunos kilómetros). Entre más profundos son los objetivos buscados más energía debe contener la fuente generadora. Por ello, para la exploración petrolera, se utilizan explosivos o grandes camiones pesados (vibroseis). En el caso de la sísmica pasiva las fuentes no son controladas ni artificiales. Tradicionalmente la sísmica pasiva consistía en registrar eventos sísmicos y a través de ellos, estudiar la estructura de velocidades por donde pasan las ondas. En las últimas décadas, la sísmica pasiva ha logrado extraer información del subsuelo no sólo usando registros de sismos sino a través del uso del ruido sísmico. El ruido sísmico corresponde a la parte de los registros que antecede a la llegada de las ondas producidas por un sismo, por eso es llamado “ruido”, ya que contrasta con la parte del registro que contiene la “señal” del evento sísmico. Este ruido de fondo corresponde a una señal que los seres humanos no percibimos pero que los instrumentos registran y que está presente de manera permanente. El ruido sísmico es también conocido como vibración ambiental o microtremores.

En nuestra coordinación el ruido sísmico se ha estudiado durante varios años y ha contribuido a generar mapas como el de microzonificación de la ciudad de México que se encuentra en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Paradójicamente el ruido sísmico sí contiene información

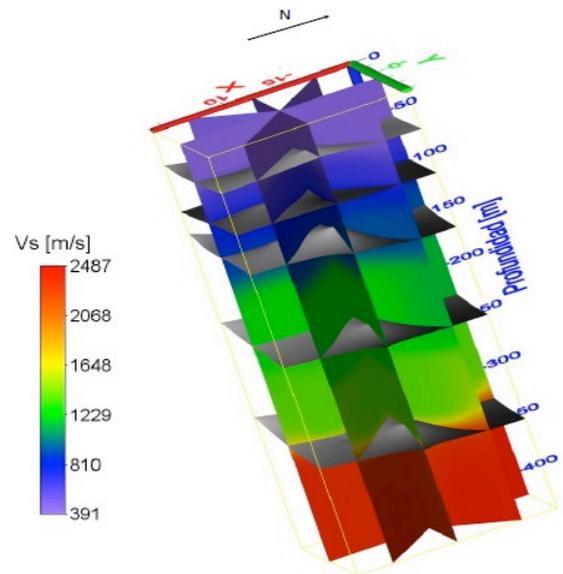
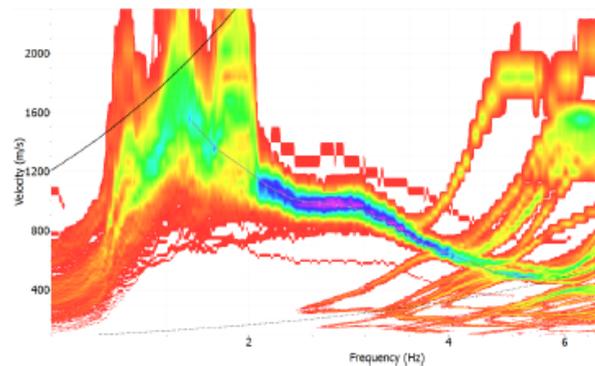


Figura 1. Distribución del arreglo de estaciones en el Jardín Botánico de la BUAP (arriba a la izquierda). Curva de dispersión obtenida (arriba a la derecha). Modelo tridimensional de la estructura de velocidades estimada (abajo)

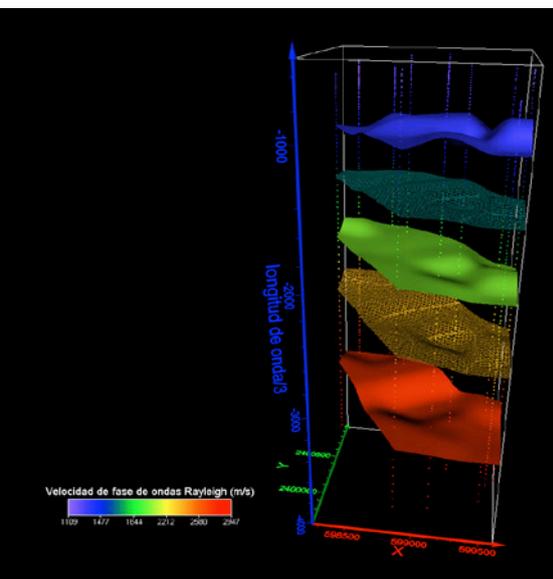


Figura 2. Modelo tridimensional obtenido a partir de las curvas de dispersión de velocidades de fase de las ondas de Rayleigh

que ha resultado útil para explorar y caracterizar el subsuelo. Generalmente el ruido sísmico está compuesto en su mayoría de ondas superficiales. Esto no es de extrañar considerando, por un lado, que las fuentes que lo originan se encuentran en la superficie de la tierra y, por el otro, que las ondas superficiales se atenúan menos que las ondas de cuerpo. Las fuentes que los originan son tanto de origen natural (oleaje, cambios de presión, vientos, etc.) como antropogénico (trenes, camiones, fábricas, minas, y actividad humana en general). Para extraer información de estos registros se usan diversos métodos que requieren de registros obtenidos simultáneamente en varias estaciones que conforman un arreglo con sincronía de tiempo común.

Con el análisis de estas señales se obtienen curvas de dispersión de ondas superficiales que reflejan las características del subsuelo. Al invertir las curvas de dispersión se obtiene una descripción de las características elásticas por debajo de los arreglos.

Hemos ocupado el ruido sísmico para varios objetivos utilizando varios métodos. Uno de ellos corresponde a la exploración somera como apoyo a trabajos de geotecnia y/o la caracterización de efectos de sitio. Un ejemplo de este tipo de exploraciones se muestra en la figura 1 donde obtuvimos una representación tridimensional de la velocidad de ondas S (Olivares *et al.*, 2016). En este arreglo la separación mínima entre sensores fue de 40m y la máxima de 120m. Con ello se logra explorar hasta un poco más de 300m de profundidad.

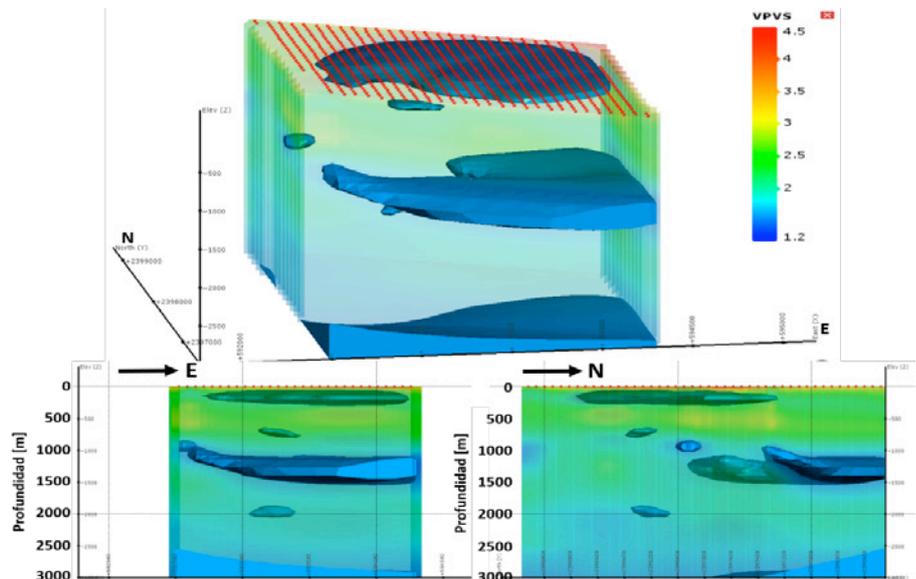


Figura 3. Relación  $V_p/V_s$ . Arriba se muestra el cubo 3D en perspectiva. En azul se muestran los cuerpos con un valor menor o igual a 1.6. Abajo se muestran los perfiles horizontales apuntando hacia el Este (izquierda) y al Norte (derecha)

Otro ejemplo del uso de estos datos para la exploración petrolera se muestra en la figura 2. En este caso se ocupó un arreglo de 21 sensores de banda ancha instalados en una malla de triángulos equiláteros cuya distancia mínima entre sensores es de 462m y la separación máxima entre sensores del arreglo es de 3200m. Con ello se logró explorar hasta una profundidad de más de 3000m.

Dentro de esta línea de investigación obtenemos distribuciones 3D de estructuras de velocidades que *per se* contribuyen a la generación del conocimiento del subsuelo. Con ello, generamos insumos útiles para otros proyectos de investigación como son modelos que permiten realizar la simulación de la propagación de ondas ya sea para estimar el peligro sísmico, evaluar niveles de vibraciones, estimar espectros de diseño, entender los mecanismos de amplificación local, etc. Pero además evaluamos los alcances y limitaciones de los diferentes métodos que utilizamos. Esto resulta de gran importancia cuando se diseñan los arreglos que se deben usar en concordancia con la resolución requerida. En este tenor, hemos encontrado que la combinación de métodos ayuda a incrementar la resolución. Un ejemplo de ello es el modelo mostrado en la figura 3, que fue obtenido combinando la información generada con el método SPAC (método de autocorrelación espacial) y con la interferometría sísmica (correlación entre pares de estaciones). Esta combinación permitió complementar el rango de frecuencias entre un método y otro de tal forma que el rango de frecuencias total usado para obtener este modelo

fue de 0.2 a 7Hz. En esta figura se muestra una combinación de propiedades elásticas obtenidas ( $V_p/V_s$ ) que contribuye a caracterizar lo que se conoce como *sweet spots*. Este término hace alusión a los lugares más propicios para la explotación de yacimientos no convencionales de petróleo y gas en Lutitas. Los resultados obtenidos en este proyecto han mostrado la factibilidad del uso de ruido sísmico en la exploración petrolera, pero existe una gran brecha de mucho desarrollo antes de alcanzar los estándares de resolución y eficiencia que tienen los métodos de reflexión convencionales usados actualmente.

Usar ruido sísmico en lugar de fuentes activas traería, entre otras ventajas, ahorros económicos y menos efectos negativos tanto a la ecología como a las edificaciones y poblados cercanos.

---

### Referencias

Olivares, A B; Aguirre, J; Ferrer, H; Ontiveros, A y Salinas, P (2016), Modelo 3D de las propiedades elásticas del subsuelo utilizando microtemores en Ciudad Universitaria, Puebla, Puebla; Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, del 30 de octubre al 4 de noviembre de 2016.