

---

# REFLEXIONES SOBRE LA INGENIERIA GEOFISICA Y SUS APLICACIONES EN GEOTECNIA: EL CASO DE LA CUENCA DE MEXICO

**Sergio Chávez Pérez**

Seismological Laboratory  
Mackay School of Mines  
University of Nevada  
Reno, NV 89557, USA

**Luis Vieitez Utesa**

Centro de Investigación Sísmica  
Fundación Javier Barros Sierra  
Carretera al Ajusco 203  
Col. Héroes de Padierna Del.Tlalpan  
México, D.F. 14200, MEXICO

## RESUMEN

Revisamos el papel de la ingeniería geofísica en la ingeniería geotécnica discutiendo su complementaridad y el futuro que tienen en la caracterización de sitios para obras de infraestructura. Discutimos el caso de estudios geotécnicos en la cuenca de México y enfatizamos las necesidades de promover más la interacción entre ambas profesiones y facilitar la comunicación con un lenguaje común.

## ABSTRACT

We review the role of geophysical engineering in geotechnical engineering discussing their complementarity and the future they have in site characterization for infrastructure works. We discuss the case of geotechnical studies in Mexico basin and emphasize the needs to further foster the interaction between both professions and to facilitate communication with a common language.

## INTRODUCCION

La ingeniería geofísica comprende a aquellos profesionales que con sus conocimientos de Física, Matemáticas y Geología estudian parámetros físicos del Sistema Tierra con el fin de caracterizar una porción de él. Sus funciones han servido y sirven para encontrar recursos naturales y dar apoyo para la creación de obras de infraestructura en beneficio de la sociedad.

La ingeniería geofísica es una de las ramas más versátiles y especializadas de la ingeniería. Sin embargo, es también una de las más desconocidas. Las áreas preferenciales de actividad de los egresados de esta disciplina se han centrado en la exploración de recursos naturales, sismología y geohidrología. Recientemente, éstas se han ampliado a geotécnica, ecología e informática.

Al menos en el papel, la función del ingeniero geofísico debería ser muy importante. Esta afirmación se fundamenta en que, no sólo en México, sino en todo el mundo, hay preocupación por la contaminación de los ecosistemas, la calidad y cantidad del agua potable, las reservas de petróleo, los desechos industriales, la capa estratosférica de ozono, los cambios climáticos, los hielos árticos y antárticos, el nivel de los océanos, los terremotos, las interacciones aire-mar y las observaciones del

planeta con satélites. En fin, hay un interés generalizado por nuestro medio ambiente y sus efectos en la productividad global y en todas éstas áreas puede ser de interés la aplicación de los métodos que el geofísico utiliza.

Las actividades de geofísica (Marsh, 1991) ya han empezado a fortalecer este renovado interés ambiental y, de hecho, en algunos círculos técnicos y científicos ya se habla, desde hace varios años, de la geofísica ambiental y de la geofísica geotécnica (e.g., Dobecki y Romig, 1985; Steeples, 1991).

## LA GEOFISICA GEOTECNICA

Es bien conocida la aplicación de métodos geofísicos en estudios tradicionales de ingeniería civil para la definición de sitios adecuados para cimentaciones de estructuras. Por su parte, Dobecki y Romig (1985) revisaron las principales aplicaciones de la geofísica a problemas geotécnicos y de exploración de agua subterránea utilizando técnicas de exploración somera.

Todas estas técnicas comprenden mediciones de datos representativos de algún parámetro físico de la tierra bajo el área en estudio. Los parámetros típicos que pueden medirse directamente en reconocimientos geofísicos son: gravedad, conductividad eléctrica, magnetismo, propiedades elásticas, polarizabilidad, transparencia a ondas electromagnéticas y radiación natural (Steeple, 1991). Estas medidas se utilizan para inferir permeabilidad, porosidad, constituyentes químicos, estratigrafía, estructura geológica y otras propiedades del suelo y del subsuelo.

Al parecer, el término *subsuelo* causa controversias y mala comunicación entre geotecnistas y geofísicos. El geotecnista utiliza el término para caracterizar las primeras capas de suelo en profundidades del orden de decenas de metros, mientras que el geofísico considera que el *subsuelo* del geotecnista es suelo. El *subsuelo* en geofísica yace *bajo* el suelo y, usualmente, caracteriza las capas y/o estructuras geológicas en profundidades mayores que las decenas de metros.

Pese a problemas de consenso en aspectos de vocabulario, recientemente se ha empezado a hablar de la geofísica geotécnica debido a la creciente utilización de técnicas geofísicas de exploración aplicadas a resolver problemas propios de geotécnica. A manera de ilustración veamos el caso de los Simposios sobre la Aplicación de la Geofísica a Problemas Ambientales y de Ingeniería (SAGEEP, por sus siglas en inglés). El primer SAGEEP se llevó a cabo en Golden, Colorado, EUA en 1988. Fue organizado y patrocinado por la Sociedad de Geofísicos de Exploración Minera y de Ingeniería (*Society of Engineering and Mineral Exploration Geophysicists*), SEMEG, creada en 1987. SEMEG surgió para promover la aplicación de la geofísica a la exploración de objetivos someros y a problemas de evaluación de sitios) en cooperación con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), la Asociación Nacional de Pozos de Agua (NWWA), la Sección Colorado de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), la Asociación de Agua Subterránea de Colorado, el Departamento de Geofísica de la Escuela de Minas de Colorado y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA).

El propósito del simposium consistió en proveer una revisión de las capacidades y limitantes de la tecnología geofísica actual aplicada a problemas ambientales y de ingeniería y produjo buen impacto en la comunidad geofísica, aunque cierto escepticismo en la comunidad geotécnica. Posteriormente, los SAGEEP han continuado y nuevas organizaciones se han incorporado para su realización (por ejemplo, el Buró de Minas de EUA).

Lo anterior ha conducido a un SAGEEP anual, a la creación de nuevas reuniones técnicas en geociencias [por ejemplo, las reuniones del grupo Denver Geotech sobre sistemas de información geocientífica aplicados a exploración e investigación] y al surgimiento de nuevas publicaciones y una mayor difusión sobre el tema (Ward, 1990).

En 1992 SEMEG cambió su nombre a Sociedad Geofísica Ambiental e Ingeniería (*Environmental and Engineering Geophysical Society*, EEGS). La revista *Geoexploration* cambió su nombre y formato, desde abril de 1993, para convertirse en el *Journal of Applied Geophysics*, reconocido por EEGS y, desde el verano de

1993, la Sociedad de Geofísicos de Exploración (*Society of Exploration Geophysicists*, SEG) estableció su nueva sección de *Near-Surface Geophysics* (Steeple, 1993).

## ESTUDIOS GEOTECNICOS EN LA CUENCA DE MEXICO

En septiembre de 1984 la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS), por conducto de su Comité de Obras Subterráneas, organizó una reunión técnica sobre el tema *Geofísica Aplicada a la Geotécnica* a la que aportaron opiniones y trabajos cuarenta y tres ingenieros. La memoria de esta reunión se publicó en 1985 y en ella aparecen una veintena de contribuciones, escritas la mayor parte por ingenieros geofísicos relacionados en alguna forma con la geotécnica (SMMS, 1985).

Se trató el tema tanto en términos generales como en su aplicación a vías terrestres; proyectos hidroeléctricos; plataformas y tuberías marinas; dragado; túneles, minas y cavidades subterráneas; riesgo sísmico; geohidrología y flujo subterráneo; agresividad de suelos; y arqueología. Los métodos abordados fueron principalmente los más comunes geosísmicos y geoelectrónicos, aunque también se dió atención a otros como percepción remota, tomografía sísmica, polarización inducida, gravimetría y magnetometría, sonar y microsísmica.

Los ciento cincuenta asistentes escucharon que en México, tal como constaba en la revista *Irrigación en México* de la época, cincuenta años atrás, el Ing. de la O. Carreño, geofísico y geólogo, ya efectuaba estudios geofísicos eléctricos, por un método de medidas relativas, según perfiles, que podría considerarse precursor de las técnicas actuales por barrido, aplicado a la interpretación del ambiente geológico en el que se construirían obras de riego. También se informaron de cómo algunos de los primeros ingenieros geofísicos egresados de la carrera habían incursionado en la geotécnica y su presencia estaba favoreciendo en varios casos –no todos los deseables– la comunicación interdisciplinaria. Conocieron, por otra parte, que en el proyecto hidroeléctrico de Chicoasén, en el sureste de México, se había podido determinar el fondo del río (el Grijalva), con base en la interpretación de datos de reflexión y refracción sísmica, con la precisión suficiente para que durante la construcción pudiera realizarse la limpieza del cauce y apoyar la cimentación de la presa en aluvión firme y roca, conforme a un programa de ejecución previamente establecido.

Tomaron nota, en fin, de que aunque el fundamento de las teorías en que se basan los métodos geofísicos sigue siendo igualmente válido a través de los años, el desarrollo tecnológico ha permitido que sus alcances, su precisión y la capacidad de interpretación se hayan multiplicado notablemente. En repetidas ocasiones, durante la reunión se destacó la importancia de promover la comunicación a nivel profesional, entre los especialistas de estas ramas de la ingeniería y, para reforzar lo dicho, se anunció que estaba en proyecto el incorporar al plan de estudios de ingeniero geofísico la materia *Geofísica Aplicada a la Geotécnica*, dentro del módulo terminal correspondiente.

En septiembre de 1985, un año después de esta reunión, México sufrió los sismos de todos conocidos. Al poco tiempo se emprendió una campaña de estudios e investigaciones que aun está en curso, enfocada a entender mejor el fenómeno sísmico y sus consecuencias, particularmente en la cuenca de México.

La geofísica aplicada a la geotécnica y a la ingeniería sísmica se ha hecho presente en esta campaña con mayor fuerza que nunca antes. Comisión Federal de Electricidad (CFE), Petróleos Mexicanos (PEMEX) y el Instituto de Ingeniería de la Univ. Nacional Autónoma de México (IIUNAM) han aportado recursos técnicos y experiencia a esta labor multidisciplinaria. En el curso de 1986 se efectuaron los trabajos y se obtuvieron los resultados y primeras interpretaciones. Además, y en paralelo, se instaló y empezó a operar un conjunto de acelerógrafos a cargo del Departamento del Distrito Federal (por intermedio del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra), la Fundación Ingenieros Civiles Asociados (ICA) y el IIUNAM, al que se han venido a sumar después otros acelerógrafos instalados y operados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Las tecnologías aplicadas son de actualidad tanto en instrumentos como en captura y procesamiento de datos. Estos han servido de base a estudios e investigaciones de más detalle y han extendi-

do el horizonte de conocimientos sobre la estructura y composición de la cuenca y de su respuesta ante sollicitaciones sísmicas. Ha sido en realidad una primera ronda de aproximación a los datos y de interpretación de los sismos.

La calidad de los datos es buena, el volumen de información es considerable y su asimilación requiere tiempo, de ahí que la comprensión del fenómeno sísmico en sí y de sus efectos en la cuenca deje aún muchas interrogantes por resolver. Repasar de nuevo los datos, analizarlos en más detalle y por más especialistas y, en algunos casos, reprocesarlos y reinterpretarlos se considera que es no sólo conveniente sino necesario; hay además que avanzar por partes, porque el rompecabezas es enorme.

Debe unirse toda la información acreditada que resulte, o esté disponible –geológica, geofísica y geotécnica–, para elaborar mapas, secciones y cortes que muestren la composición y estructura de la cuenca hasta su basamento en los que se señalen incluso sus recursos y sus riesgos; es decir, es llevar a cabo la cartografía de ingeniería geológica de la cuenca al menos en sus sitios de mayor interés. Supone ello reprocesar sondeos geotécnicos cuyo objetivo original fue el proyecto y construcción de obras públicas y edificaciones privadas, pero ahora con un enfoque integrador, apoyándose en los resultados de los estudios más recientes mencionados. Así, se tendría una primera cartografía de los 50 a 60 m más superficiales que en áreas localizadas podría alcanzar hasta un centenar de metros bajo el nivel del terreno natural. Es esta primera tajada de terreno bajo la superficie la que se supone más interesa a la geotécnica.

La geofísica de sismorefracción y la de resistividad eléctrica hechas por CFE permitirían extender lo conocido de esos primeros metros de depósitos lacustres, aluviales y volcánicos hasta profundidades de unos 250 m. Con la sismoreflexión realizada por PEMEX, la prospección extendería adicionalmente sus alcances hasta más de 1000 m de profundidad y en algunos casos podría llegarse hasta algo más del triple de ésta. Los datos de los pozos profundos de exploración de la Comisión del Lago de Texcoco y de PEMEX, junto con los de algunos pozos de bombeo del DDF y los realizados por el IIUNAM para determinar estratigrafía, propiedades mecánicas y velocidades de propagación de ondas, servirían de calibración y liga para unir la información de punto a punto y en profundidad. De hecho, trabajos de integración de este tipo se han venido haciendo en parte, en estos últimos años, pero resta aún mucho por hacer.

Por otro lado, los datos acelerométricos obtenidos en los diversos sitios instrumentados de la cuenca, después de varios eventos sísmicos, registrados a partir de los de 1985, configuran su respuesta sísmica que es una liga más para integrar la información geológica aplicada a la ingeniería.

Es decir, se admite la conveniencia de integrar la información, se identifican y estructuran las ligas para hacerla y se está avanzando en ella. Con ello se admite que una visión más global, como ésta, pueda revelar que fenómenos manifestados en superficie o a poca profundidad tienen relación con condiciones más profundas y a fin de cuentas con todo. El ámbito de la geotécnica se interrelaciona, se amplía y se enriquece con el concurso de la geología y la geofísica.

## DISCUSION

El manejo de los datos, su análisis e interpretación y su integración muestran, cada vez más, la complejidad e interdependencia de varios de los rasgos geológicos de la cuenca de México y, por lo tanto, la de sus repercusiones en la ingeniería, lo que obliga a que geólogos, geofísicos y geotecnistas, que se interesan en ella, trabajen cada vez más en estrecha comunicación y con respeto y entendimiento mutuos.

En la medida en que se cuente con un marco de referencia de la cuenca como producto integrado de esta interacción multidisciplinaria, los estudios posteriores que se realicen en ella se planearán más racionalmente y sus resultados encontrarán mayor justificación y mejor base de apoyo; además, encuadrarán bien en un programa y en un proceso de actualización y enriquecimiento progresivo del propio marco de referencia aludido. Llevará a redondear finalmente los intentos por zonificar y microzonificar la cuenca, para fines de ingeniería, que hasta ahora se han llevado a cabo, con éxito, si, pero necesariamente limitados en cada caso por la información disponible.

El desequilibrio hidrológico de la cuenca de tiempo atrás manifiesta síntomas que anuncian potenciales situaciones de peligro y hasta eventuales desastres. Es un fenómeno regional, progresivo, que afecta con intensidad diferente en extensión y en profundidad y que incide en mayor o menor medida en toda obra y en el patrimonio de la macrometrópolis que aloja. Su estudio supone cubrir grandes volúmenes de terreno, definir su estructura y composición, su permeabilidad, su compresibilidad; supone además describir los cuerpos de agua, su distribución, su composición y su movimiento con el tiempo; y los patrones de drenaje natural y artificial, su evolución, así como sus fuentes y recargas y sus sumideros y extracciones.

La extracción del agua del subsuelo sigue siendo un recurso accesible todavía a poca profundidad pero cada vez menos renovable y con más efectos colaterales indeseables; la explotación de los acuíferos más profundos (aprox. 1000 m) es una alternativa por explorar.

Puede uno imaginarse el cúmulo de usos que pueden y deben darse a la geofísica, aplicada a la geotécnica, a la geología y a la ecología para resolver mucho de lo inherente a este gran problema del área metropolitana de la ciudad de México. El uso que se le ha dado a este respecto, hasta ahora, es puntual y esporádico.

Entre los riesgos que mayor amenaza representan para ésta área está el sísmico. A raíz de los sismos del 85, como se ha comentado, la geofísica aplicada ha contribuido muy importantemente a su definición. Hace falta investigar más aún para definir mejor: el fenómeno de resonancia y sus efectos locales y regionales; los tipos de ondas, su velocidad de propagación, su influencia en el comportamiento de líneas vitales y de interacción estructura-suelo-estructura, el análisis de los datos sísmicos y el desarrollo, alcance y utilización de los modelos dinámicos, la relación de los focos sísmicos dentro de la cuenca o cercanos a ella y la sismicidad inducida por variaciones en el régimen de lluvias y de aguas freáticas, la influencia en el entrapamiento de ondas en horizontes lacustres profundos y mucho más antiguos que los ya bien conocidos que existen cerca de la superficie, o en la dispersión y difracción de ondas por irregularidades topográficas y geológicas mayores como en cuencas de erosión y en saltos de falla en grabens y plegamientos.

La mancha urbana y su infraestructura se están extendiendo cada vez más en la zona de transición y en la de lomas, donde la presencia de cavernas o discontinuidades y cambios bruscos de estratigrafía pueden ser definitivos en la construcción y el comportamiento de las obras. La aplicación de la geofísica también aquí ha sido puntual y esporádica y su utilidad ha sido negada o cuando menos discutida. Se necesita aquí adecuar los métodos a las condiciones locales y perfeccionar la complementación de la prospección de cobertura amplia con aquella de barrido y densificación, para poder caracterizar la estructura general y ubicar los pequeños detalles, sean estos masas de tierra inestable, discontinuidades o cavidades.

Un desafío a la geotécnica es el estudio de las zonas de transición brusca con indentaciones de lago y lomas; la definición de sus fronteras divagantes y de sus múltiples cambios de calidad y resistencia hacen muy costosa la exploración directa por sondeos. La geofísica diseñada a la medida de las circunstancias debe ser la solución que, hasta ahora, sólo en pocas ocasiones se ha intentado.

Otros muchos casos más de aplicación de la geofísica podrían citarse, baste por el momento con los citados, así, de paso. Conviene, sin embargo, resaltar que se trata de una cuenca no sólo compleja por su estructura y composición geológica y por los fenómenos naturales regionales y locales que la afectan. Es también compleja en alto grado por efecto de la actividad humana que se ha literalmente apoderado de ella sin medir las consecuencias en el ambiente ecológico en que se desenvuelve y que pueden trastocarlo de raíz.

La geofísica —que se ve ahí obligada a ajustar sus métodos para adaptarlos a las restricciones que impone el urbanismo desbordado— puede ser magnífica herramienta para medir dichas consecuencias y contribuir a que la comunidad que ahí reside busque y encuentre nichos de habitabilidad con al menos un mínimo de seguridad y bienestar.

## COMENTARIOS FINALES

En términos generales, los costos de perforación (de sondeos de suelo, de pozos exploratorios, etc.) se incrementan con la profundidad de los objetivos a alcanzar. Sin embargo, los costos (por unidad de área)

utilizando métodos geofísicos generalmente decrecen con el incremento en la profundidad de exploración deseada. Esto sugiere reconsiderar la utilidad que la geotécnica puede recibir del uso de la ingeniería geofísica y viceversa.

Actualmente, sin embargo, es difícil establecer, en algunos casos, las diferencias y las fronteras entre los geofísicos y los geotecnistas. Por ejemplo, cuesta trabajo pensar que el trabajo de Nazarian y Stokoe (1986) sobre evaluación de pavimentos utilizando inversión de ondas superficiales para determinar velocidades de ondas S no sea *geofísico*. Sin embargo, el ingeniero civil bien podría considerarlo como muy *geotécnico*.

Este es uno de los ejemplos donde hay gran aportación de la geofísica a la geotécnica: la determinación de velocidades de ondas S (de corte). Estas ondas se propagan en la tierra de manera muy diferente a las ondas P (de compresión). En general, las ondas S sólo responden a cambios litológicos y pueden denotar la presencia de fracturamientos, mientras que las ondas P se ven afectadas tanto por cambios litológicos como por el contenido de fluidos en las rocas. El conocimiento de las velocidades de ondas S puede ser de gran utilidad para quienes diseñan cimentaciones y llevan a cabo evaluación de sitios, hincamiento de pilotes, etc. Además, para beneficio del geofísico (y del geotecnista) hay alternativas más económicas y más versátiles que las técnicas de pozos cruzados (*cross-hole*) y de pozo-receptor (*up-hole* y *down-hole*) comúnmente utilizadas en ingeniería.

Por otra parte, ya es común la aplicación de la tomografía, utilizada para estimar velocidades sísmicas, atenuación sísmica y resistividad eléctrica para detectar diferencias en tipos de rocas, a problemas de ingeniería civil. Además, el uso de radares de terreno promete ser generalizado en cuanto se compruebe su gran potencial en la evaluación de tuberías y líneas de conducción. Así, el geofísico puede proporcionarle al geotecnista varios de los parámetros que este último requiere (para un mejor diseño de cimentaciones y para la caracterización adecuada de sitios). Todos ellos obtenidos de manera indirecta y con costos potenciales inferiores a los de las campañas de exploración de mecánica de suelos.

## REFERENCIAS

- Dobecki, T L y P R Romig (1985). Geotechnical and groundwater geophysics, *Geophysics* 50, 2621-2636.
- Marsh, G R (1991). Geophysics and environmentalism, *Geophysics: The Leading Edge of Exploration* 10, 32-33.
- Nazarian, S y K H Stokoe, II (1986). In situ determination of elastic moduli of pavements systems by spectral-analysis-of-surface-waves method (theoretical aspects), *Research Report No. 437-2*, Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin, noviembre.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1985). *Reunión técnica Geofísica Aplicada a la Geotécnica*, México, DF.
- Steeple, D (1991). Uses and techniques of environmental geophysics, *Geophysics: The Leading Edge of Exploration* 10, 30-31.
- Steeple, D (1993). The near-surface geophysics section, *The Leading Edge* 12, 922-923.
- Ward, S H (1990). *Geotechnical and environmental geophysics* (Vol. I: Review and tutorial; Vol. II: Environmental and groundwater; Vol. III: Geotechnical), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.