

Impacto de Proyectos

Coordinación de Ingeniería Sismológica

La ingeniería sismológica emplea métodos teóricos y experimentales para la mejor comprensión y caracterización de los movimientos del terreno durante temblores fuertes. Esta disciplina tiene raíces en la ingeniería sísmica y la sismología. Fue iniciada hace más de 50 años por ingenieros que desarrollaron los primeros acelerógrafos para registrar movimientos fuertes de la tierra y estructuras civiles. El estudio estadístico de estos registros permitió establecer criterios pioneros en el diseño sísmico, algunos de los cuales aún son válidos. En los últimos años, este planteamiento empírico se ha enriquecido con los avances en la comprensión de los mecanismos de ruptura y propagación de las ondas sísmicas en la tierra.

La Coordinación de Ingeniería Sismológica fue creada el 31 de mayo de 1994, reuniendo a investigadores especializados tanto en la observación, análisis y modelado de terremotos, como en la evaluación de riesgo sísmico. Su objetivo general es la reducción del peligro sísmico.

Las líneas de investigación que se cultivan en ella son: a) Análisis de registros sísmicos, b) Monitoreo sísmico, registro y análisis de sismicidad, c) Estudio de vibración ambiental para diversas aplicaciones, d) Análisis y modelado de los fenómenos dinámicos asociados con las fuentes sísmicas, e) Desarrollo de métodos numéricos para el modelado de la propagación de ondas en diversos tipos de medios, f) Desarrollo de leyes de atenuación, g) Estudios de vulnerabilidad y peligrosidad sísmicas, h) Operación de la red SISMEM.

Si bien el trabajo realizado en esta coordinación puede tener un impacto práctico (como sucede con muchos de nuestros proyectos), el área de sismología también abarca aspectos científicos pues trabaja temas muy relacionados con problemas fundamentales cuyo impacto se encuentra principalmente en avances del conocimiento sin una aplicación práctica inmediata.

A continuación, se presentan algunos de los proyectos que muestran algo de los muy diversos estudios que realiza la Coordinación de Ingeniería Sismológica.

Simulación numérica de la propagación de ondas elásticas en medios inhomogéneos fracturados

En este proyecto se trabajó en la difracción y propagación de ondas elásticas con técnicas analíticas y numéricas en medios heterogéneos y fracturados en yacimientos petroleros. Los temas centrales versaron sobre la propagación de ondas sísmicas y fueron enfocados en varias aplicaciones petroleras, usando datos y modelos regionales y locales. Se realizó la simulación sintética de registros sísmicos en varios pozos en yacimientos fracturados heterogéneos. Se procesaron datos de registros acústicos en campos de desarrollo para PEMEX.

Se cuentan ya con magníficos resultados para diversos problemas de difracción de ondas elásticas. Entre ellos, la solución para el problema de difracción por un con-

junto de grietas paralelas, la propagación en diversos medios heterogéneos y una novedosa solución para la función de Green y su recuperación en un régimen de propagación difuso.

Una parte importante de las contribuciones de este subproyecto se centró en el estudio de la difracción múltiple causada por la presencia de difractores cilíndricos y grietas planas en medios homogéneos. Las simulaciones con técnicas numéricas como el IBEM o el método de diferencias finitas (FDM, por sus siglas en inglés) han permitido obtener resultados realistas que revelan la complejidad del fenómeno de difracción en medios heterogéneos y fracturados. Además, en este periodo exploramos la aplicación del método indirecto de elementos de frontera (IBEM), del método de solución directa (DSM) y de las diferencias finitas con mallas triangulares, para el análisis y modelado de la propagación de ondas en medios con grietas en 2 y 3 dimensiones de formas arbitrarias e inclusiones líquidas o fluidas. En esta parte de simulación numérica conseguimos desarrollar programas de cómputo que permiten conocer mejor qué fenómenos se producen en la vecindad de un pozo fluido. Sin embargo, el interés final es poder calcular las propiedades petrofísicas que provienen de la información de los registros de pozo, a fin de extenderlas a volúmenes usando información sísmica. Para conseguir este objetivo se han empleado redes neuronales artificiales y técnicas de minería de datos con las que se logran mejores resultados. En la fig 1 se muestra una sección de porosidad efectiva calculada usando información sísmica y registros convencionales de pozo.

Por otro lado, se logró rederivar la solución para el cálculo de la difracción y dispersión de ondas elásticas por una obstrucción esférica. Se presentó un catálogo para los coeficientes en las expansiones de las series de las ondas difractadas. La solución clásica consiste en una superposición de los campos incidente y difractado. Se asumen ondas planas P y S. Éstas se expresan como expansiones de funciones de onda esféricas, las cuales fueron probadas contra resultados exactos. El campo difractado se calcula a partir de la imposición analítica de condiciones de frontera en la interfase matriz-difrador. La obstrucción puede ser una cavidad, una inclusión elástica o una esfera fluida. Se calcularon conjuntos completos de funciones de onda en términos

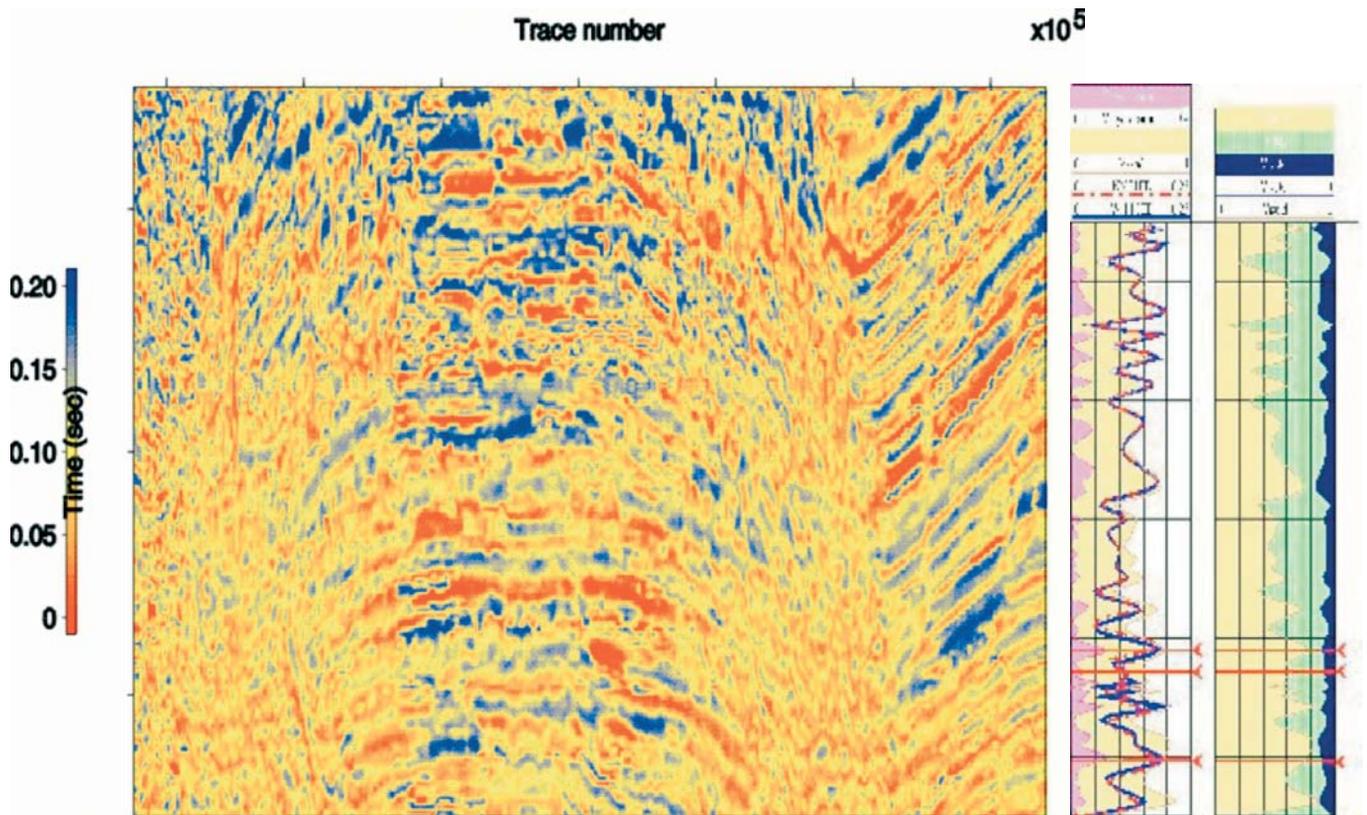


Fig 1 A la derecha, litología correspondiente al pozo incluido en la sección. La porosidad estimada usando las redes neuronales (línea roja punteada) es muy buena pues sigue la curva azul que es la porosidad mediada en el pozo. La tendencia de volumen de arena corresponde a las tendencias de porosidad. El volumen de hidrocarburo es mayor en las zonas de porosidad alta y las arenas productoras (marcadas en rojo) tienen porosidades altas; las estimaciones son muy buenas ahí también

de funciones radiales esféricas de Bessel y de Hankel. Para las coordenadas angulares se utilizaron polinomios de Legendre y funciones trigonométricas. Se obtuvieron resultados en el dominio del tiempo y la frecuencia. Reportamos espectros de amplitudes del desplazamiento contra la frecuencia normalizada y patrones de radiación en frecuencias bajas, medias y altas. Se calcularon sismogramas sintéticos para algunos casos relevantes.

Dentro de este proyecto, durante el pasado septiembre se llevó a cabo con éxito un ciclo de conferencias y un taller sobre el estado del arte en propagación de ondas elásticas en medios heterogéneos fracturados, en los que se mostraron nuevos resultados y perspectivas para yacimientos petroleros.

En los últimos dos años, y como producto de este proyecto, se presentaron varios trabajos en congresos nacionales e internacionales; entre otros, el congreso anual de la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG) y la Unión Geofísica Americana (AGU). Por otro lado, este proyecto contribuyó a la formación de recursos humanos en esta área, apoyando la titulación de dos estudiantes de doctorado, dos de maestría y uno de licenciatura. Un tema central sobre el que se lograron publicar varios artículos internacionales en este periodo fue la aplicación y desarrollo del Método indirecto de elementos de frontera (IBEM), método numérico que ha demostrado su exactitud y versatilidad en la formulación y solución de problemas de propagación de ondas elásticas en medios heterogéneos.

SISMEX

La red sismotelemétrica SISMEX monitorea continuamente la sismicidad de la cuenca de México y su entorno desde hace casi 33 años. Estaciones sismológicas con sensores de periodo corto, $T_0 = 1.0$ s, transmisión FM/FM y registro en papel y tinta constituyeron la red que funcionó hasta mediados de 2005. El número de estaciones sismológicas ha sido variable a través de los años y ahora se cuenta con siete sitios de registro y el Puesto Central de Registro, localizado en el Instituto de Ingeniería, dentro del campus universitario.

Desde 1994 la señal ha sido digitalizada y actualmente se dispone no sólo del registro digital eventual de cada sismo identificado sino también del registro continuo de cada estación, lo cual se logra mediante el sistema de adquisición de datos SEISLOG.

Tres señales generadas en sendos sitios de medición son compartidas en tiempo real con la Red del Valle de México, operada por el Instituto de Geofísica de la UNAM, y la señal de la estación IIS, localizada en el flanco nororiental del Citlaltepétl es tomada directamente del aire por CENAPRED.

Actualmente está en prueba el prototipo de estación sismológica propuesta para el futuro cercano de SISMEX, de alta calidad y bajo costo, en la cual la información se transmite vía internet y sigue siendo SEISLOG quien controla el proceso.

Zonificación sísmica del estado de Tlaxcala y microzonificación de su ciudad capital

Para realizar un análisis sismotectónico regional del estado de Tlaxcala, se han recopilado 45 sismos ocurridos entre 1984 y 2004 ($M_d < 4.0$). De esta sismicidad, casi el 70 % está asociada con la actividad del Graben de Puebla. Con las características sismotectónicas, se elaboró una zonificación sísmica que consta de: una zona de mayor sismicidad (I), una de media (II) y otra de menor sismicidad (III). La Zona I, de mayor peligrosidad, abarca las ciudades con mayor densidad poblacional que son Tlaxcala, Santa Ana Chiautempan, Contla y Apizaco (fig 2). Asimismo, se realizó una esti-

mación experimental de los efectos de sitio (ES) para la ciudad de Tlaxcala, utilizando registros de microtemores en 69 puntos, mediante la técnica de Nakamura. Los resultados obtenidos fueron validados aplicando el método unidimensional. La distribución de los periodos dominantes (T_0) ha permitido realizar su microzonificación sísmica, en la que se ha identificado la presencia de tres microzonas: la microzona I con T_0 entre 0.3 y 0.8 s, la microzona II, con T_0 entre 0.1 y 0.3 s y la microzona III sin efectos de sitio. La microzona II presenta mayor vulnerabilidad por la posibilidad de que coincidan los modos de vibrar del suelo con los de las edificaciones (fig 3).

Otras líneas que desde su origen trabaja esta Coordinación es la relacionada con la sismicidad inducida en presas hidroeléctricas. Este tipo de estudios, se han continuado y en el presente abarcan no sólo presas hidroeléctricas sino campos geotérmicos, como son los casos de Los Azufres, Mich; Tres Vírgenes, BCS, y Los Humeros, Pue. Como ejemplo de este tipo de estudios se presenta a continuación el estudio de la sismicidad inducida en el campo geotérmico de Los Humeros.

Sismicidad en el campo geotérmico de los Humeros, Puebla – Mexico: análisis de su distribución, su relación con los pozos inyectoros, productores y la tectónica local

Este estudio analiza la distribución en superficie y en profundidad de 93 sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue, durante el periodo 1997-2004, y una estadística del número de sismos registrados por dos estaciones de la red permanente, con la cantidad de inyección y producción de vapor de agua. Su distribución en superficie y en profundidad presenta una mayor actividad sísmica en la zona norte, alrededor del pozo inyector I29 y los pozos de mayor producción (fig 4). La estadística, muestra una relación entre el número de sismos registrados por mes, en la estación S05, y el pozo inyector I29; es decir, cuando la cantidad de agua inyectada disminuye, la sismicidad disminuye (fig 5). Estos resultados permiten sugerir que la actividad sísmica en el campo geotérmico de Los Humeros es de tipo *inducido*.

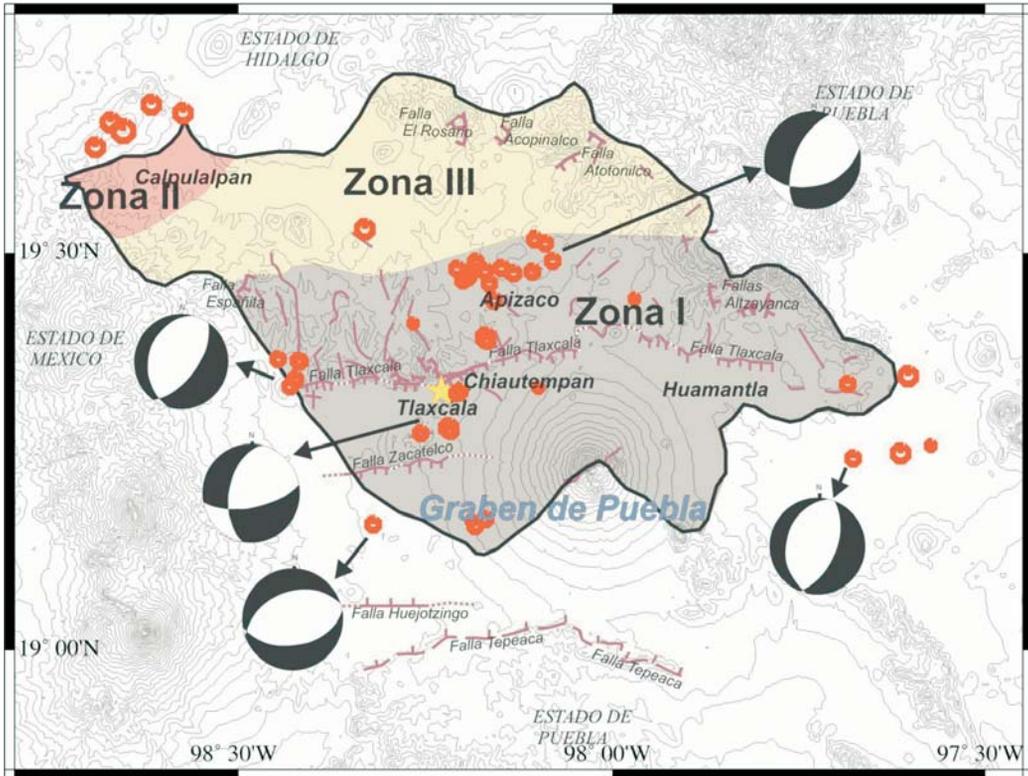


Fig 2

Mapa de zonificación sísmica para el estado de Tlaxcala en función de la distribución de los sismos (círculos) y las características sismotectónicas locales (líneas continuas). La estrella indica la ubicación de la capital del estado. Las flechas indican los mecanismos focales simples y compuestos (Bernal, 2006)

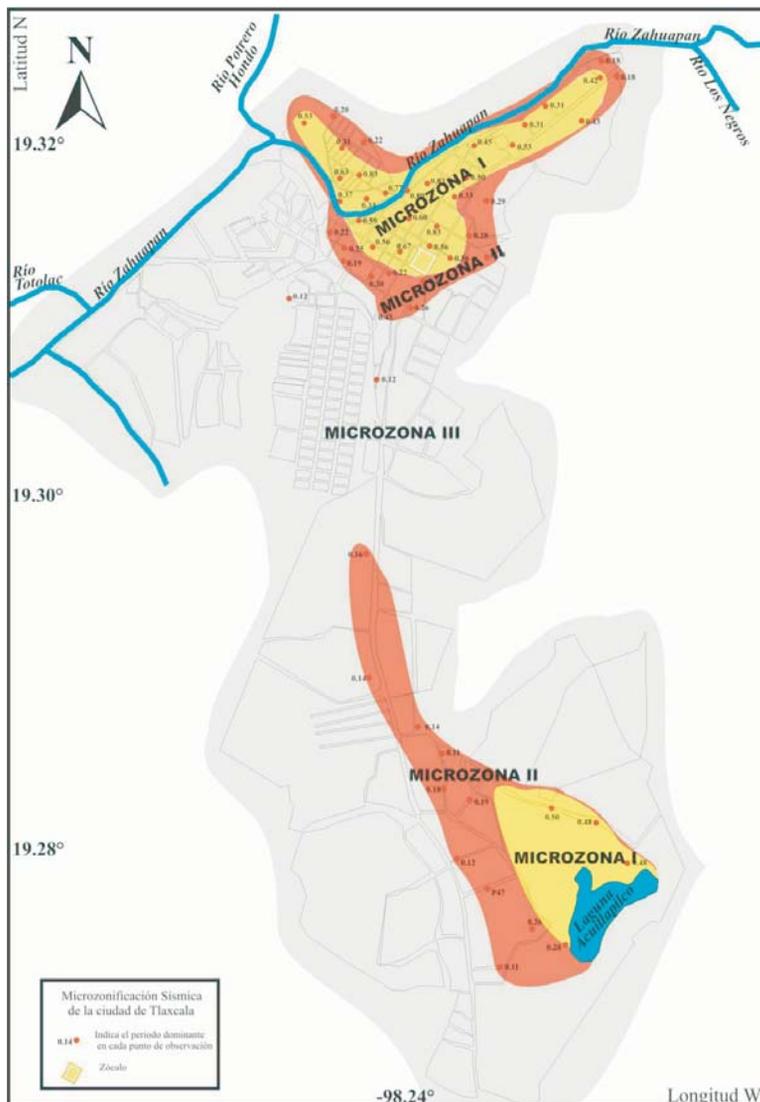


Fig 3.

Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala

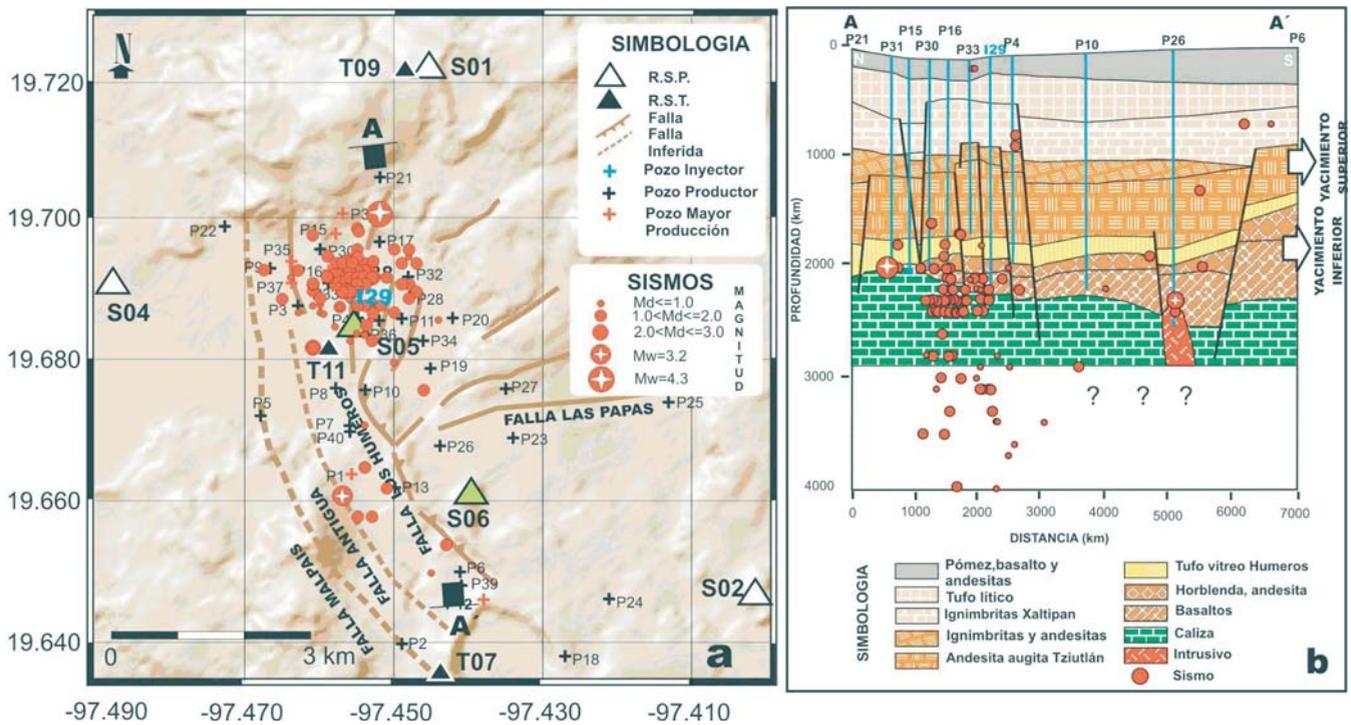


Fig. 4. a) Distribución en superficie de la sismicidad registrada en el campo geotérmico de Los Humeros, México
 b) Perfil estratigráfico y sísmico A-A'

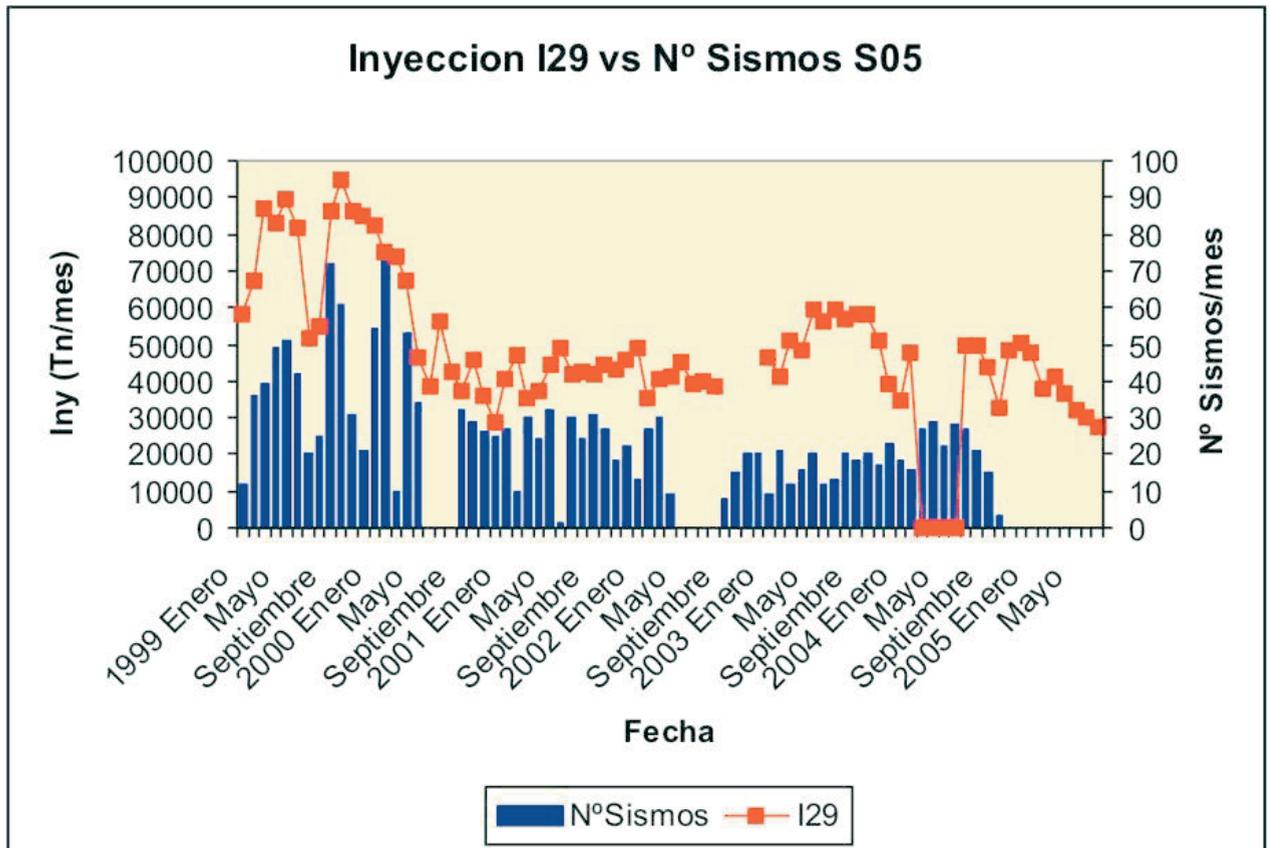


Fig. 5. Gráfica con el número de sismos por mes en la estación S05 y su relación con la cantidad de agua inyectada en el pozo I29

Caracterización de la fuente de sismos de subducción mexicanos a partir de los espectros de fuente de aceleración para la predicción de movimientos fuertes

La simulación de grandes sismos requiere construir modelos de fuente que consisten en parámetros externos a la falla (como mecanismo focal, área total de ruptura, etc) y parámetros internos (como tamaño, número y posición de las asperezas). Los parámetros externos son estimados por medio de relaciones de escala convencionales entre el momento sísmico y el área total de ruptura. Los parámetros internos son estimados a través de los resultados de inversiones de forma de onda usando datos de movimientos fuertes.

Una nueva alternativa para caracterizar el tamaño y la caída de esfuerzos de las asperezas en el modelado de

fuentes sísmicas es a través de las relaciones entre el nivel del espectro de fuente de aceleración y el momento sísmico. Por ello, en este proyecto para caracterizar las fuentes de sismos de subducción mexicanos, se usaron registros de la red acelerográfica de Guerrero de sismos ocurridos durante los últimos 20 años. Los resultados condujeron a las relaciones apropiadas para avanzar en la determinación de las características internas de los sismos de subducción mexicanos.

Estas relaciones son muy útiles para determinar modelos de fuente usados en la simulación de escenarios sísmicos de sismos que se espera ocurran en el futuro. De hecho, estas relaciones ya han sido usadas para construir el modelo de fuente del gap de Guerrero, usado en la simulación de acelerogramas sintéticos para el proyecto hidroeléctrico de La Parota.



Fig 6 a) Localización epicentral de los sismos analizados

Ao & Mo (ns)

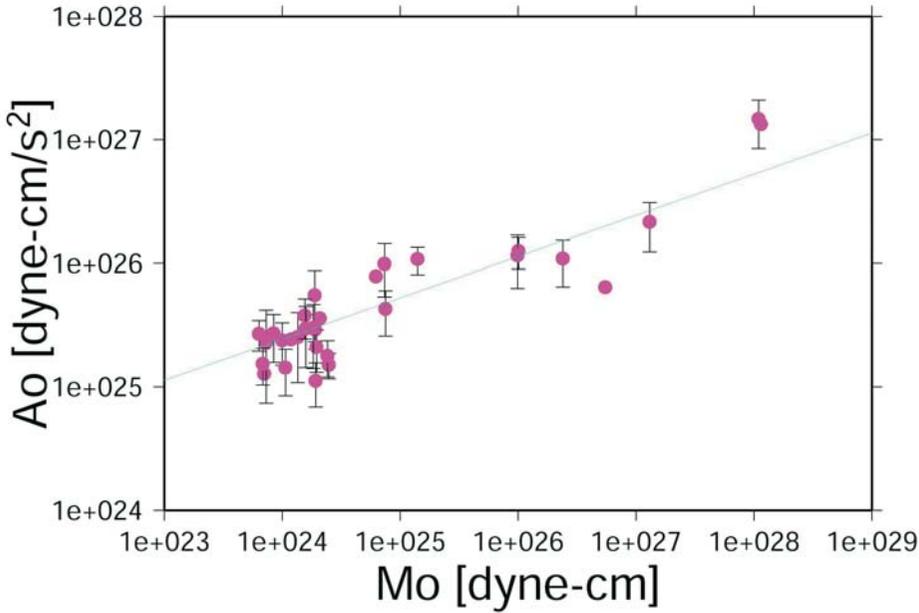


Fig 6 b)

Relaciones entre el nivel plano del espectro de Fourier de aceleración de la fuente y el momento sísmico de sismos de subducción mexicanos

Area & Mo (GAA) <ns>

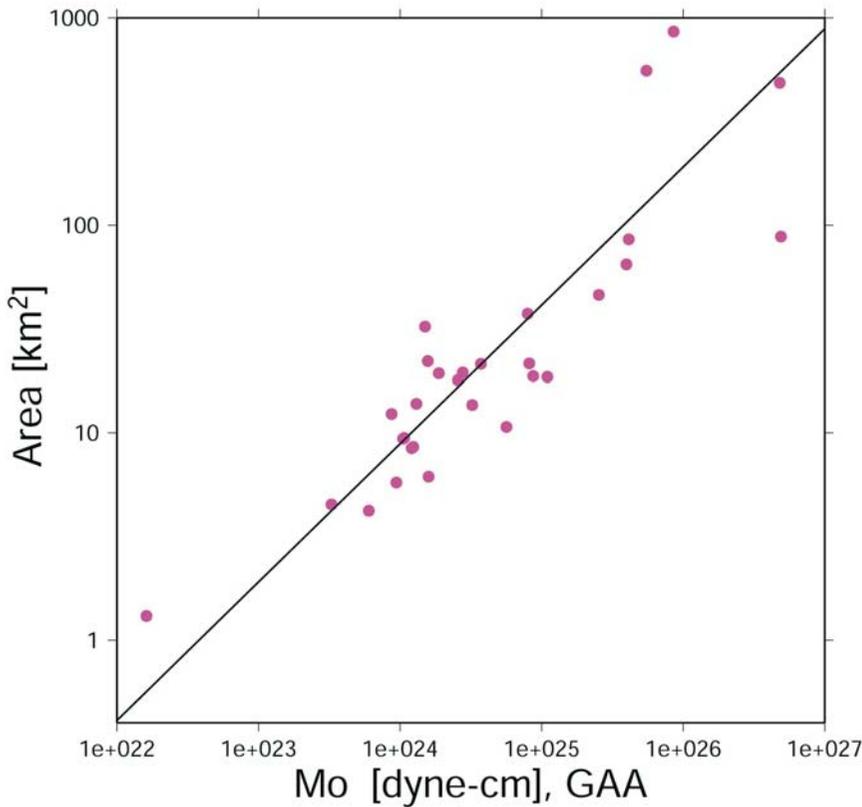


Fig 6 c)

Relaciones entre el área de la aspereza mas grande y el momento sísmico

Coordinación de Sismología e Instrumentación Sísmica

En la Coordinación de Sismología e Instrumentación Sísmica se están desarrollando, entre otros proyectos: los de la Red acelerográfica de campo libre, la Instrumentación sísmica en el puente Impulsora y la instrumentación sísmica de un relleno sanitario en la ciudad de México.

Antecedentes

Con el propósito de ampliar los conocimientos para prevenir los efectos de los sismos en estructuras y en seres humanos, se desarrolló un arreglo instrumental con acelerógrafos digitales a lo largo de la costa del océano Pacífico y en ciudades del interior de la República Mexicana. Con esta instrumentación se ha estudiado la propagación de las ondas sísmicas, la amplificación de los movimientos, los efectos en la fuente y los efectos locales.

Se eligió la costa del Pacífico mexicano porque está clasificada como un territorio donde se han logrado establecer diferentes zonas como fuente potencial de generación de temblores de gran intensidad, debido al contacto entre las placas de Cocos y Norteamérica. La determinación de estas zonas está basada en el estudio y registro instrumental de sismos recientes, así como en la recopilación y análisis de temblores históricos.

En el caso de los sismos que ocurren en el interior del continente, debemos considerar la cercanía a grandes concentraciones de población que pudieran resultar afectadas.

De esta manera, a principios de 1985 quedó instalada la Red Acelerográfica de Guerrero constituida inicialmente por 30 equipos digitales. Sin embargo, esta infraestructura no cubría completamente la zona de subducción mexicana que se extiende desde el noroeste en las costas de los estados de Michoacán, Colima, Jalisco y Nayarit, pasando por el centro hasta el sureste, en los estados de Chiapas, Veracruz y Tabasco. El crecimiento de la red a lo largo de los últimos 20 años, a partir del establecimiento de la Red Acelerográfica de Guerrero, ha sido bastante lento y por tanto algunos equipos estaban al término de su vida útil o no

contaban ya con la tecnología de registro más reciente, por lo que fue necesaria su actualización en algunos casos y, en otros, la sustitución total.

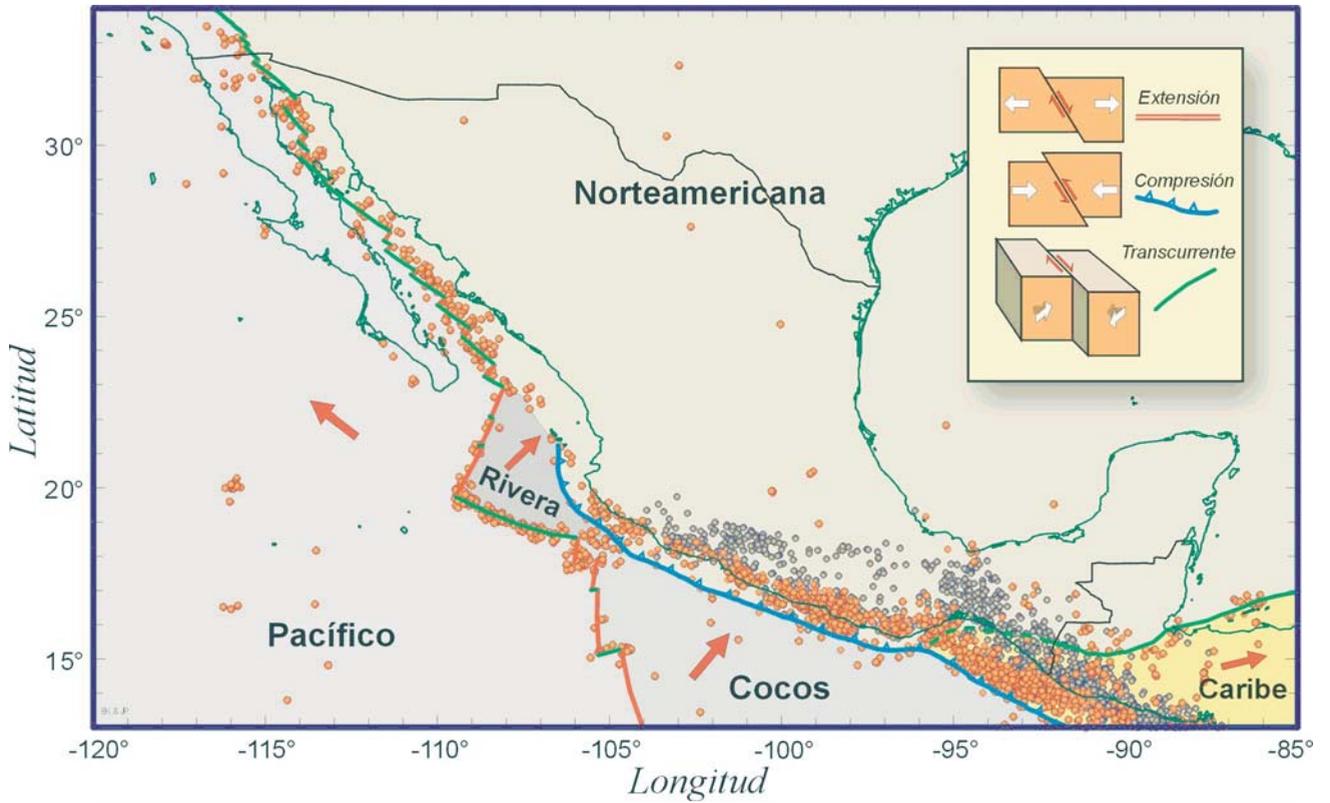
Algunos de los beneficios de la Red Acelerográfica de Guerrero son:

- Proporcionar datos de calidad para el desarrollo de modelos de comportamiento de suelos o para evaluar modelos teóricos y establecer escenarios de desastre por sismo
- Determinar la magnitud de los movimientos en diferentes regiones y especialmente en aquellas poblaciones y ciudades con mayor peligro sísmico
- Mejorar la respuesta ante las emergencias por sismos, captando información en tiempo real de la magnitud y localización del epicentro, con objeto de proporcionarla a las autoridades correspondientes para la toma de acciones
- Mitigar el riesgo sísmico, a través de una mayor cantidad de datos registrados y una mejor calidad de la información
- Mejorar cuantitativa y cualitativamente los mapas de daños potenciales y riesgo sísmico del país.

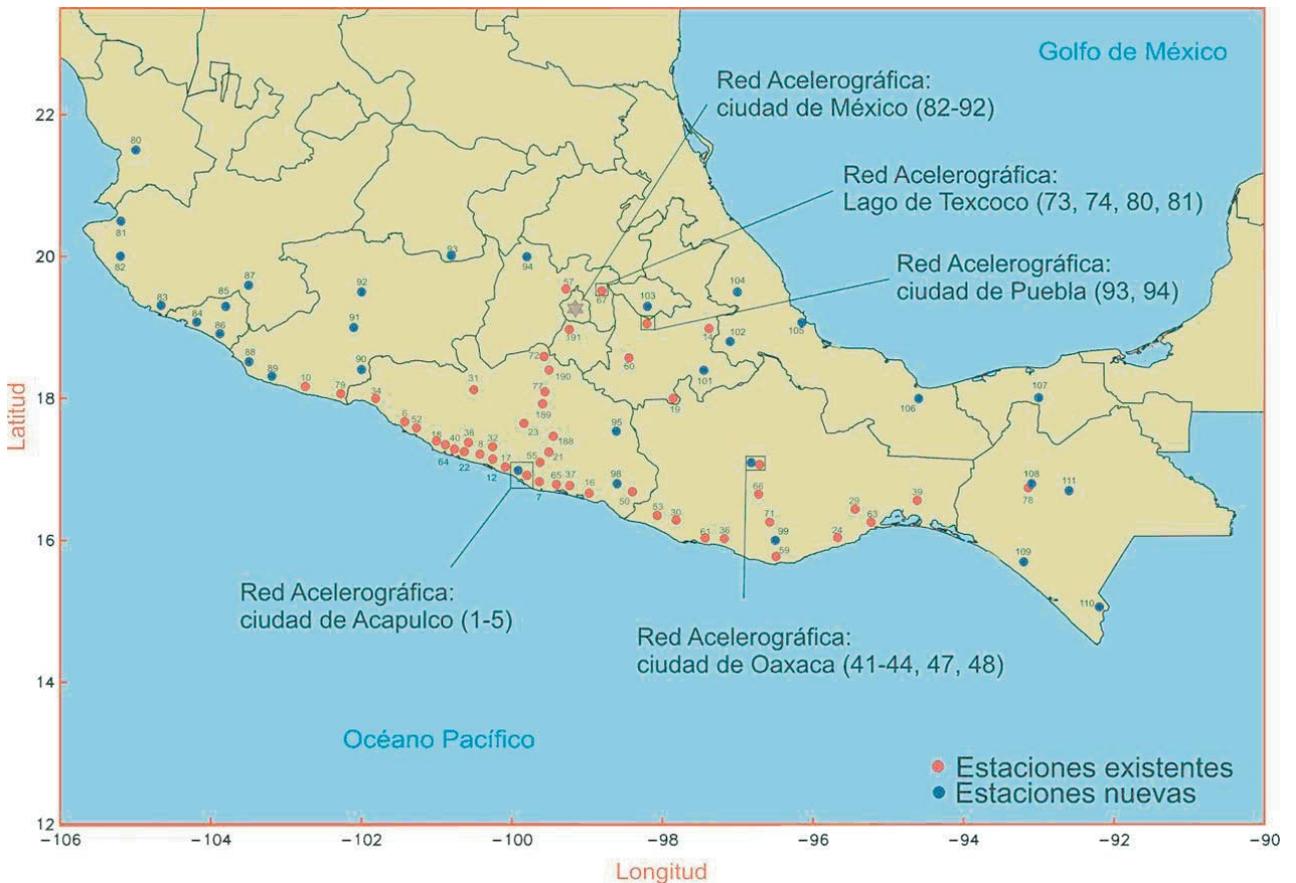
El Instituto de Ingeniería considera dentro de sus líneas de investigación el estudio del fenómeno sísmico, por lo que en julio de 2004 inició los trabajos de ampliación y modernización de la Red Acelerográfica de Campo Libre.

La ampliación de esta Red contempla la instalación de 35 nuevas estaciones de registro equipadas con acelerógrafos digitales de última generación distribuidos de la siguiente manera:

- En la zona del Pacífico, la cobertura se prolonga desde Caleta de Campos en Michoacán, hasta la ciudad de Tepic con ocho estaciones y arreglos hacia las ciudades de Colima y Ciudad Guzmán, con una estación y tres más en el trayecto Lázaro Cárdenas-Uruapan
- En Guerrero se instalarán cinco estaciones, tres en la ciudad de Acapulco, una en Ometepec y otra en la localidad vecina a Tlapa de Comonfort
- En Oaxaca se añadirán tres estaciones en dirección perpendicular a la costa partiendo de Puerto Ángel
- En Chiapas se instalarán cuatro estaciones, dos en el interior y dos en la parte costera
- En poblaciones distantes a la zona de subducción pero que pueden verse afectadas por temblores profundos de gran importancia, se ubicarán nueve estaciones más.



Distribución de las placas tectónicas y la actividad sísmica asociada con ellas



Distribución actual de la Red Acelerográfica de Campo Libre

Los avances del proyecto de ampliación a la fecha son los siguientes:

- Selección de sitios (100 %), de julio a noviembre de 2004
- Construcción de estaciones (100 %), de abril de 2005 a marzo de 2006
- Instrumentación y puesta en marcha. A la fecha se han instalado 28 instrumentos lo que representa el 80 %. Se pretende completar el proyecto a finales de abril de 2006.

Con esta ampliación, el número de estaciones de registro sísmico de campo libre asciende a 98 y se tiene cobertura en el noroeste en los estados de Michoacán, Colima, Jalisco y Nayarit, así como en el centro, y próximamente en Veracruz, Tabasco y Chiapas.

Los resultados principales de la Red Acelerográfica de Campo Libre son un crecimiento importante a lo largo de poco más de 20 años de registro, el cual ha permitido recopilar una amplia colección de registros de temblores en diferentes zonas del territorio mexicano. Gracias a los registros obtenidos, se han logrado establecer zonas de alto potencial sísmico, así como zonas de alto riesgo sísmico. El acervo de registros digitales de tres componentes se ha estandarizado en su formato de presentación para facilitar el manejo de los datos, los cuales se han usado principalmente para estudios de propagación, atenuación y amplificación de las ondas sísmicas, respuesta del subsuelo, zonificación, riesgo sísmico y respuesta dinámica de estructuras.

Instrumentación sísmica en el Puente Impulsora

Para monitorear el comportamiento sísmico y ampliar el estudio del puente Impulsora, se colocó una red de instrumentos que ayudará a comprender el desempeño de la superestructura.

Se eligió este puente de la línea B del Metro por ser representativo del tipo empleado en la obra del Metro, además de convenir los tiempos de construcción y avance de obra para realizar la instrumentación. En la elección también influyó la posibilidad de contar con la memoria de cálculo completa de la estructura. El monitoreo de estas estructuras ante sismos es de vital importancia para comprender el comportamiento de otros puentes similares.

La instrumentación de este proyecto permitirá conocer el comportamiento de la superestructura cuando ocurran sismos. Estos registros darán pauta a un mejor conocimiento de estas estructuras ante movimientos sísmicos, lo que es importante ya que no se cuenta con información previa de este tipo de estructuras. La instrumentación permite mejorar los diseños de este tipo de puentes, con el correspondiente impacto en la funcionalidad urbana.

La red de instrumentos instalada permite medir aceleración, desplazamiento y micro-deformaciones en puntos determinados del puente. Para la aceleración, se ubicaron dos puntos en la parte superior del puente, uno en la base y dos más en campo libre, de los cuales uno de ellos se encuentra en un pozo a 60 metros de profundidad. Cada uno de estos puntos de medición determina la aceleración en tres direcciones ortogonales y el registro de las señales se hace en tres registradores acelerográficos de alta resolución. Se ubicaron también cuatro medidores de desplazamiento en las uniones entre traveses de apoyo y traveses centrales. Los deformímetros, 45 en total, se adosaron en el acero que constituye dos de las uniones trabe-columna del lado este del puente. Los deformímetros y medidores de desplazamiento se registran en un adquisidor de 53 canales. El sistema en su conjunto está interconectado y el registro se activa por umbral, de tal manera que cuando el movimiento rebasa un valor determinado de aceleración, se activa el almacenamiento de los datos. Los registradores acelerográficos cuentan con memoria de pre-evento y post-evento, lo que permite un registro más completo del movimiento durante la ocurrencia de un sismo. El sistema se puede interrogar por vía telefónica.

La instrumentación en el puente Impulsora ha registrado sismos importantes que permiten estudiar su comportamiento ante solicitaciones sísmicas. Se han ajustado los parámetros de activación para registrar sólo sismos, dada la intensa actividad que se registra en este tipo de puentes, por el paso de vehículos pesados y transporte urbano, además del tránsito propio de la estación del Metro ubicada en el mismo puente. La instrumentación de la superestructura permitirá complementar los estudios previos, hechos sobre la cimentación instrumentada del puente.



Puente Impulsora



Trabes instrumentadas



Instrumentos de medición

Instrumentación sísmica de un relleno sanitario en la ciudad de México

La ciudad de México genera diariamente una cantidad importante de desechos sólidos. El sitio de disposición final de residuos sólidos Bordo Poniente está llegando

al final de su vida útil, de acuerdo con su concepción original, aunque existe la necesidad de continuar depositando nuevos residuos sobre las plataformas y pilas de desechos ya existentes. Por ello, es necesario conocer de qué manera afectará el peso adicional de los



desechos, especialmente sobre las membranas existentes entre los desechos y el terreno natural del sitio, las cuales impiden la contaminación del subsuelo por los líquidos producto del escurrimiento de los residuos.

Para conocer el comportamiento de las grandes estructuras formadas por los desechos ante solicitaciones sísmicas, se determinó medir la aceleración del terreno natural de las pilas que conforman los desechos sólidos y del subsuelo a distintas profundidades ante la ocurrencia de sismos, en una de las macroceldas constituidas por los desechos sólidos generados en la ciudad de México y depositados en el sitio de disposición final de Bordo Poniente, ubicado al nororiente de la ciudad.

La instrumentación con acelerógrafos en los depósitos de desechos permitirá conocer el comportamiento de las grandes plataformas formadas por los residuos cuando ocurra un sismo, ya que no existen estudios previos de este tipo de estructuras. Permitirá, asimismo complementar la información que se obtiene con otros estudios sobre el impacto ambiental que pueden tener las pilas de desechos; así como determinar en qué medida puede aumentar el peso de las plataformas de residuos.

La red de acelerógrafos instalada permite medir en cinco puntos la aceleración generada por sismos, en tres direcciones ortogonales para cada punto. La información obtenida de los cinco puntos se graba en tres re-

gistradores ubicados en igual número de estaciones de registro. Dos de estas estaciones y puntos de medición están sobre las plataformas de forma piramidal compuestas por los desechos; estas dos estaciones se colocaron en los dos niveles, intermedio y superior, que constituyen la macrocelda de depósitos sólidos. La tercera estación se encuentra en campo libre alejada de los desechos y alberga los otros tres puntos de medición, uno en la superficie del terreno natural y los dos restantes a profundidades, de 40 y 100 m, en el subsuelo del sitio. Esta disposición permitirá analizar los movimientos sísmicos del subsuelo y su propagación a través de la macrocelda de desechos. Las tres estaciones se encuentran interconectadas a fin de obtener el registro simultáneo de los cinco puntos de medición. Los registradores operan de manera continua, pero sólo almacenan la información de aceleración cuando el movimiento rebasa un umbral prefijado; cuentan con memoria de pre-evento y post-evento, lo que permite un registro más completo del movimiento durante sismos.

La red se encuentra operando desde mayo de 2005 y ha proporcionado ya un primer registro sísmico con esta instrumentación. Se han ido ajustando los parámetros y valores del umbral al que se opera, para el registro óptimo de sismos. Se cuenta además con una red pionera en su tipo para el caso de las grandes estructuras que conforman los desechos sólidos.