

CONCLUSIONES GENERALES

Con la finalidad de determinar el posible impacto de los trabajos de adquisición sísmica de reflexión llevadas a cabo por empresas de servicios para Pemex Exploración y Producción en el estado de Veracruz, la UNAM realizó un estudio multidisciplinario involucrando las áreas de geología, hidrogeología, geofísica edafología y de ingeniería civil. Pemex Exploración y Producción proporcionó las facilidades para que se llevaran a cabo los estudios correspondientes. El área de interés se localiza dentro de los municipios de Tierra Blanca, Tlalixcoya, Ignacio de la Llave, Ixmatlahuacan, Cosamaluapan y Tres Valles, todas en el estado de Veracruz, donde se utilizó dinamita como fuente de energía para generar una onda sísmica y poder realizar los estudios geofísicos para la prospección de hidrocarburos.

Las conclusiones de este estudio se presentan a escala regional así como a escala local. En escala regional se integra la información del análisis geológico, hidrogeológico y edafológico que permitió conocer la geología de la región, comprender el comportamiento del acuífero y los suelos cultivos. A escala local, se presentan evidencias del comportamiento del suelo, subsuelo y del flujo subterráneo (zona no saturada y saturada) cuando estos son sometidos a esfuerzos inducidos por cargas de dinamita; así como de las viviendas donde los pobladores manifestaron supuestos daños. En total se realizó un censo de 395 aprovechamiento subterráneos; 120 terrenos de cultivos estudiados (1,934 has), 207 análisis de muestras de agua y 118 viviendas, en una superficie total de 2,167Km²

- **Resultados a escala regional**

El área que PEMEX Exploración y Producción denominó Bloque Zafiro-Perdiz 3D para desarrollar actividades de Exploración Sísmica, se encuentra localizado en la Planicie Costera de Golfo de México. Geomorfológicamente, la región se encuentra en una bajada conformada por la acumulación y retrabajo de productos volcánicos, en la zona de transición entre la Bajada Huatusco y un extenso sistema fluvio-lagunar. La bajada se caracteriza por una morfología de un sector cónico disecado por corrientes fluviales con patrón de drenaje radial divergente.

En el sector oriental se observa un sistema fluvio-lagunar de corrientes meándricas en la planicie deltaica del Río Papaloapan, En este sector el relieve es llano y presenta extensas zonas sujetas a inundación.

Se definieron dos unidades litoestratigráficas informales: La Formación Nopaltepec del Neógeno (Nn) y la Formación Joaquín del Cuaternario (Qj)

La Formación Nopaltepec está conformada por la intercalación de conglomerados del Neógeno de matriz soportados y areniscas rojas con líticos de rocas metamórficas y cuarzo metamórfico, incluye un horizonte de tobas silíceas alteradas.

La Formación Joachín es una sucesión de depósitos cuaternarios de areniscas fluviales, medianamente consolidadas que presentan cintas conglomeráticas y algunas brechas volcánicas y tobas. Los clastos de la unidad son de origen volcánico y presentan granulometría media a fina.

En la zona de interés se localiza en un acuífero libre a semiconfinado en medio granular correspondiente a la Formación Joachín.

La permeabilidad promedio del medio granular es del orden de 10 a 15 m/día; estas limitaciones están relacionadas con la presencia de depósitos arcillosos que implican un almacenamiento muy bajo. El nivel de saturación se localiza a 20 metros de profundidad en promedio, cuya recarga subterránea se lleva a cabo desde las zona altas, localizada hacia el poniente (montaña - mar). La recarga vertical por lluvias en promedio es del orden de 1,800 mm/año debido al clima característico del Golfo de México siendo la infiltración del orden del 5 % del volumen precipitado. Sin embargo, en años lluviosos los volúmenes extraordinarios infiltrados propician recuperaciones inmediatas en el nivel de agua del acuífero, pero es cierto, que la mayor parte del volumen precipitado, se evapora y escurre a través del sistema de drenaje natural hacia las zonas bajas de inundación en un régimen anual de temperatura que ha aumentado gradualmente año con año.

En las últimas cuatro décadas, el área de estudio se caracteriza por el incremento en la demanda de agua para realizar actividades: agrícolas, municipales, industriales y urbanas, ligado al crecimiento de la población; entre ellas, Tierra Blanca, Joachín y Tres Valles.

En la zona estudiada, la mayoría de las obras de captación se asocian a norias con profundidades que varían de 6 a 12 metros, así como pozos agrícolas y de agua potable, equipados con bombas sumergibles con profundidades que varían desde 45 a 120 m; los mayores volúmenes de extracción están condicionados a fin de abastecer de agua a las poblaciones; los caudales instantáneos en los pozos equipados varían de entre 10 y 30 lps con diámetros de descarga de 3/4 a 6 pulgadas.

De acuerdo al balance de aguas subterráneas, el ingreso horizontal es el más importante de las entradas al sistema acuífero ($89 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$) y es prácticamente con lo que cuenta la población para su sustentabilidad; el volumen extraído es del orden de $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, por lo que, la red de flujo subterráneo se manifiesta con gran deformación considerando los resultados de los recorridos piezométricos. Actualmente, la red de flujo de agua subterránea se observa deformada debido a que el sistema-acuífero es sensible a cualquier extracción, aún cuando esta no sea significativa con una conductividad hidráulica de entre 10 y 15 m/d. Es por ello, que como se señaló en el capítulo de hidrogeología, en época de lluvias, la recarga es inminente y puede levantar los niveles de agua, a grado tal que el efecto de la descarga artificial (extracción) desaparezca, incluso se tenga una distribución de cargas hidráulicas semejantes a la de un sistema en

condiciones naturales. Mientras que en época de estiaje, al no existir recarga superficial por lluvia, cualquier extracción de agua subterránea puede modificar el esquema de distribución de cargas hidráulicas y abatir el nivel de saturación del agua subterránea. Los recorridos piezométricos fueron realizados en los meses de junio, septiembre, octubre y noviembre de 2005 y marzo de 2006 en cuyos esquemas se muestra que se presentó una modificación de la red de flujo de $-60 \times 10^6 \text{ m}^3$. Cabe destacar que localmente se registraron en algunas captaciones tanto recuperaciones como abatimientos del nivel saturado, fenómeno asociado al régimen de extracción diario.

Con relación a los estudios de edafología en la zona de estudio, fue posible detectar y verificar, la presencia de seis Unidades de suelos denominadas, de acuerdo con la clasificación propuesta por la WRB (1998) como Vertisoles (VR); Cambisoles (CM) Fluvisoles (FL) Regosoles (RG); Leptosoles (LP) y Gleysoles (GL). Asimismo, mediante fotointerpretación y datos geológico, se deduce, la presencia de Arenosoles (AR) que ocupan superficies muy pequeñas no cartografiables a la escala seleccionada.

Los suelos en la zona de estudio, presentan una serie de características, inherentes a su naturaleza geológica y geomorfológica, que limitan en diferentes grados, la aptitud de uso de las unidades edáficas del área de estudio.

Las principales limitantes detectadas en la zona de estudio, que condicionan la capacidad productiva de los suelos, se resumen como sigue:

Profundidad efectiva del suelo (de somera a ligeramente profunda).

Presencia frecuente de propiedades vérticas que dificultan su manejo.

Inundación.

Mantos freáticos elevados.

Presencia de capas aluviales, con diferentes niveles de compactación que limitan el desarrollo de las raíces y son causa de condiciones de oxido-reducción (horizontes de gley y de stagnogley), las cuales limitan la disponibilidad de nutrimentos para las plantas y de O_2 para las raíces de las mismas.

Bajo contenido de materia orgánica (M.O).

Pobreza en nitrógeno y fósforo.

Baja disponibilidad de K debida al antagonismo con otros elementos como Ca y Mg.

Una creciente "Degradación Biológica" en las zonas de cultivo intensivo, debido a manejo inadecuado.

El régimen de humedad que domina en los suelos del área se denomina ústico y, en general, se considera adecuado para el desarrollo de varios tipos de cultivos que, como se mencionó, cuentan con una infraestructura para riego de auxilio. Existen varios métodos para estimar la lámina de riego requerida, entre otros el de Thornthwaite (1948).

Por lo que al Clima se refiere, se observa una tendencia a una disminución en la cantidad de lluvia. Del mismo modo, se observa un aumento de temperatura y evaporación. En algunos casos, la evaporación llega a ser superior a la precipitación, lo que significa que este hecho puede ser una de las causas de que el área sufra en promedio, de cinco a seis meses de sequía.

- ***Resultados a escala local***

Los resultados obtenidos a partir de los datos recopilados por los levantamientos geofísicos en dos campañas, indican que las propiedades eléctricas del subsuelo pueden ser modificadas temporalmente.

Se adquirieron imágenes de tomografía eléctrica antes y después de las vibraciones inducidas, los resultados indican que las condiciones eléctricas del subsuelo se reestablecen en menos de 2 horas. La magnitud de las variaciones en la resistividad eléctrica de los materiales depende del tipo y condiciones geológicas de los sitios. Para los sitios estudiados, la estructura del subsuelo no se modifica, pues las imágenes de resistividad eléctrica obtenidas posteriormente a las vibraciones muestran que las condiciones originales del subsuelo están restablecidas.

El otro método geofísico que nos permitió cuantificar los efectos de las vibraciones emitidas al subsuelo por los trabajos de exploración, fueron las medidas de atenuación a lo largo de una línea de acelerómetros que cubría una distancia de aproximadamente 270 m a partir de la fuente de vibraciones. Estas vibraciones fueron generadas por dinamita, y los análisis llevados a cabo indican que las ondas emitidas hacia el subsuelo tienen sus mayores amplitudes en frecuencias mayores a 10 Hz.

En el rango de altas frecuencias, los materiales del medio tienden a atenuar la energía sísmica, en comparación con ondas emitidas a baja frecuencia. Las explosiones registradas en cada sitio durante las pruebas realizadas en este estudio, muestran que la atenuación del movimiento sísmico en función de la distancia decae hasta un factor de 15 en longitudes cercanas a 100 m a partir de los puntos de tiro en el sitio “El Barrio”, y alrededor de un factor de 10 para la misma distancia, en el sitio “El Coyote”. Es decir, la atenuación intrínseca de los materiales del subsuelo juega un papel importante en los niveles de vibración en la superficie del suelo para los sitios de estudio. En particular, no observamos que la energía liberada por las explosiones sea amplificada en un amplio rango de

frecuencias donde ésta es energética. Las mediciones de vibración ambiental muestran que, en los sitios estudiados no existen depósitos importantes de suelo blando, que pueden amplificar el movimiento generado por las explosiones. Se observó que prácticamente en todos los puntos de medición, los cocientes espectrales que evalúan el periodo fundamental de vibración, y la amplificación relativa que provocaría un estrato de suelo blando, son curvas espectrales con amplitud muy cercana a la unidad en todo el rango de frecuencia analizada (1 a 50 Hz). Es decir, en el rango de frecuencias en que se llevó a cabo la liberación y propagación de la energía sísmica, no hubo efectos locales que provocarían amplificaciones del movimiento del suelo.

El tipo de materiales del subsuelo juega un papel importante en las variaciones de resistividad del subsuelo y la forma en que se atenúa la amplitud de las ondas, ante deformaciones inducidas. Así, en el área del proyecto de ambos sitios donde se realizaron los levantamiento de datos geofísicos, el sustrato corresponde a la Formación Joachín, compuesta por material granular. Estas características geológicas propias de materiales competentes y medianamente consolidados, fueron corroboradas por los resultados de las mediciones de vibración. Esta formación asimismo, se distribuye ampliamente en el área de estudio (ver Mapa Geológico, Anexo A1), por lo que el comportamiento sísmico debe ser semejante.

En ambos lugares estudiados geofísicamente se seleccionó una vivienda por sitio, mismas que para efectos de estudio, fueron equipadas con acelerógrafos con el objeto de determinar las distorsiones entre piso y las deformaciones de suelo. Los resultados muestran que dada la distancia de la vivienda a las detonaciones, no existen daños estructurales a estas y las distorsiones de suelo están muy por debajo de los niveles donde se observa daños en las cimentaciones.

Los daños que se encontraron en las casas habitación corresponden a diferentes factores, entre los que se encuentran los debidos a intemperismo y los causados por elementos mecánicos inherentes a las estructuras, la interacción suelo-estructura y la combinación de los factores mencionados.

El deterioro de las casas-habitación se ha incrementado paulatinamente principalmente por la falta de mantenimiento.

Los procedimientos constructivos en casi todas las casas-habitación son deficientes, ocasionando que a través del tiempo los defectos constructivos sean cada vez más evidentes.

La falta de cimentación adecuada ocasiona la aparición de asentamientos diferenciales, ocasionando distorsiones en los elementos estructurales “muro”, acompañadas de fuerzas cortantes, lo que origina las llamadas grietas por tensión diagonal.

Las detonaciones de prueba realizadas en el ejido “El barrio”, contaron con la instrumentación de acelerógrafos a 250 m de la construcción mas cercana, además de la presencia de personal técnico de la UNAM sobre la estructura

monitoreada, con objeto de establecer de manera objetiva el nivel de deterioro que estas detonaciones pudieran ocasionar a las casas-habitación, dando como resultado desplazamientos sumamente atenuados respecto del punto de la detonación, del orden de 0.003 mm. Resultado que permite establecer que las estructuras visitadas no fueron afectadas con motivo de estos eventos.

Como resultado de los estudios de Geología, Hidrogeología, Geofísica, Cultivos y Construcciones se concluye:

1. No hay impacto negativo por las ondas sísmicas producidas por los trabajos de exploración geofísica en el acuífero dentro de la zona de estudio comprendido en los municipios de Tierra Blanca, Tlalixcoyan, Ignacio de la Llave, Ixmattlahucan, Cosamaloapan y Tres Valles, en el área del proyecto conocido como Zafiro – Perdiz 3D, localizado en el estado de Veracruz.
2. Las actividades de exploración sísmica llevadas a cabo por detonación de explosivos no causaron deformación en la red del flujo de agua subterránea, y tampoco en la posición del nivel de saturación y en los caudales de extracción instantáneos.
3. Es importante subrayar que los abatimientos del nivel de agua están asociados al balance subterráneo y al régimen de extracción para cubrir las necesidades de los pobladores.
4. No se encontró ninguna actividad humana, ajena al manejo agropecuario de los suelos de la región de estudio, que constituya una limitante para su productividad, o que haya sido causa directa, de una disminución de la capacidad productiva de los suelos.
5. En relación a la calidad de agua de riego, se concluye que los nitratos y el magnesio superan, de manera importante, los límites permisibles en la norma, en el 87 y 27 %, respectivamente, de las muestras analizadas. Por tanto, en lo que respecta al magnesio, su uso en la agricultura podría acentuar la relación problemática que existe en estos suelos, entre el calcio y el potasio, disminuyendo por este hecho la disponibilidad de este último nutrimento para los cultivos.
6. Es importante considerar, que el agua de las norias al usarse para consumo humano, puede significar un riesgo importante para la salud, particularmente por su alto contenido en nitratos, en vista de que este anión tiene un efecto neurotóxico.

En general, en el caso de la calidad del agua potable de la región, su calidad varía de mediana a buena; no obstante, también en 24 muestras

analizadas del total, los nitratos superan los límites permisibles por la norma de agua potable.

7. Para viviendas situadas a mas de 150 m de distancias de los puntos de detonación, el nivel de vibración del subsuelo producida por la energía liberada causa distorsiones de entre piso y deformaciones del suelo cuyos valores están por debajo de aquellos reportados, donde se observan daños estructurales.
8. Los daños que se encontraron en las casas habitación corresponden a diferentes factores, pero que no esta asociada a la actividad de microsismicidad inducida artificialmente por la exploración sísmica y no es el factor causante de los daños en las estructuras de casa habitación en la zona estudiada.