

EFFECTO DEL CLIMA (EL NIÑO) EN LOS FENÓMENOS DE FLUENCIA DE LAS FALLAS GEOLÓGICAS DE LA CIUDAD DE MORELIA

Garduño-Monroy V.H.¹, Rodríguez-Torrez G.M.¹, Israde-Alcántara I.¹, Arreygue E.^{1,2}, Canuti P.² y Chiesa S.³

¹ Depto. de Geología y Mineralogía, UMSNH, IIM

E-mail: vgmonroy@zeus.ccu.umich.mx

² Universidad de Florencia, Italia

³ Universidad de Milán, CNR, Italia

RESUMEN

En este trabajo se analizan datos climatológicos y del comportamiento piezométrico de pozos que revelan que los hundimientos en las zonas urbanas no son causados exclusivamente por la sobreexplotación de acuíferos, tal como se ha considerado hasta la fecha.

El monitoreo de 14 años de movimientos relacionados con una deformación continua y asísmica en Morelia (fluencia) revela la presencia de dos periodos críticos: uno que inicia en 1993 y continúa hasta 1997 y otro que inició en 1997. Estos eventos son correlacionables temporalmente con los dos fenómenos de El Niño más importantes en la historia.

La explotación de los acuíferos ha tenido como norma que todo pozo que se perfora tenga un tubo ranurado casi en toda la columna del pozo, factor que está generando que la explotación se realice en los acuíferos superficiales, es decir, aquellos que están constituidos por secuencias fluviolacustres, las cuales son las más favorables a generar fenómenos de fluencia (creep). Con datos del subsuelo se observó que el problema principal de fluencia ocurre en los primeros 16 metros de profundidad, en una secuencia fluviolacustre donde el acuífero ha sido sobreexplotado.

El hundimiento en la Falla La Colina, que se conoce desde 1977, es un ejemplo de una "catástrofe anunciada", ya que no obstante su conocimiento y las advertencias, se continuó construyendo sobre la traza de la falla, sobre todo hacia su parte SW. En 1998 se desalojaron más de 40 viviendas, incluidas varias casas "dúplex" y dos edificios del Infonavit Manantiales, que tendrán que ser demolidos.

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Morelia, Michoacán se han presentado una serie de fracturas asociadas con fallamiento de tipo normal que ha causado grandes daños materiales en la zona urbana. Dichos fenómenos se manifestaron antes del sismo de 1985, apareciendo las primeras fracturas en 1982 y 1983 en la Región de Santa Ana Maya, Michoacán. En la ciudad de Morelia las fracturas más relevantes se manifestaron en la colonia de Tres Puentes y La Colina y otra en la Avenida Héroes de Nocupétaro. Los daños en la Avenida Héroes de Nocupétaro se observaron desde las instalaciones del hospital del Seguro Social hasta la colonia Industrial. La avenida presentó daños tan importantes que motivaron el diseño de una obra civil hidráulica que contemplara la deformación del terreno. Durante las excavaciones se observó una falla de tipo normal que afecta a sedimentos fluviolacustres, la que se asocia a la falla de la Central Camionera (Suter, com. per., 1998) (Figuras 1 y 2). Se trata de una estructura regional orientada hacia el NE que, al igual que las mayores fallas regionales, tiene su bloque caído hacia el NW, provocando que las mesas de cantera se inclinen hacia el sur (Figuras 1, 2 y 3).

Hasta ahora, en la zona urbana de Morelia se han identificado cuatro fallas geológicas de tipo normal y de dirección NE-SW (Garduño y Escamilla, 1996; Garduño *et al.*,

1997 y Garduño *et al.*, 1998). Sin embargo, paulatinamente la ciudad comienza a ser afectada por otras que por el momento se manifiestan como fracturas que ya causan daños a las obras civiles.

Las causas de los hundimientos asísmicos (fluencia) han sido discutidas por diferentes autores (Trujillo-Candelaria, 1991; Lermo *et al.*, 1996; Garduño *et al.*, 1998), sin embargo, el problema ya ha sido bien estudiado en otros lugares del mundo, sobresaliendo los estudios realizados en Las Vegas, E.U.A., así como en varios sitios a lo largo de la Falla San Andrés (Holzen, 1984).

En este artículo hemos utilizado el termino de creep o fluencia para describir a aquel fenómeno que se lleva a cabo en sedimentos que ya han sufrido una compactación primaria y que ahora están sujetos a una deformación asísmica continua en el tiempo.

También es importante mencionar que en este trabajo se utilizará el término de falla geológica cuando ésta sea una estructura reconocible en campo, cuyo movimiento relativo sea identificable y que pueda ser cartografiada en un mapa urbano. Los tipos de fallas que estudiamos en la ciudad de Morelia son normales.

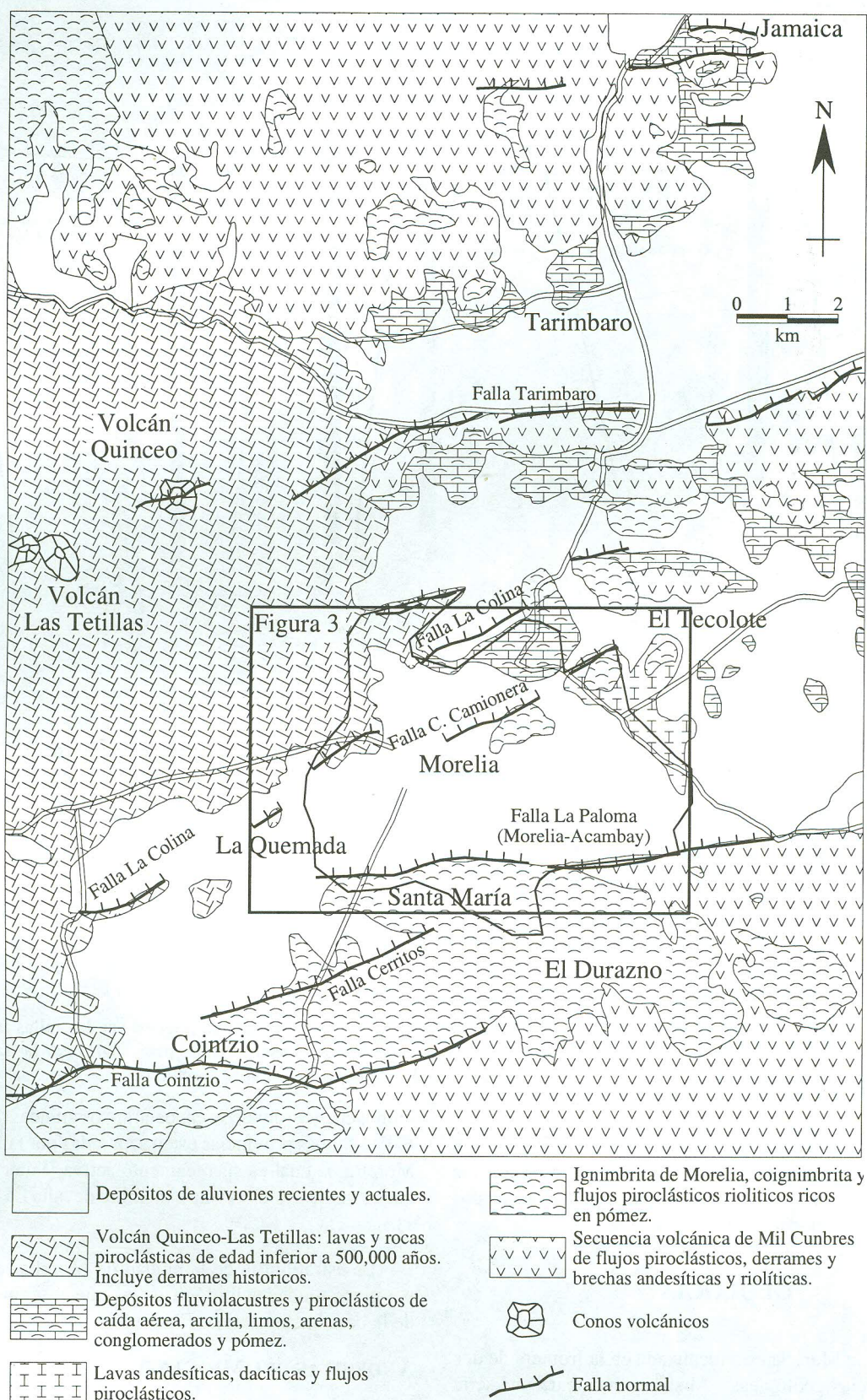


Figura 1. Esquema Geológico de la Ciudad de Morelia (modificado de Carrara y Lanza, 1997). En este esquema se pueden apreciar las principales fallas geológicas de la región de Morelia, destacando las fallas NE-SW y E-W. El recuado corresponde a la Figura 3.

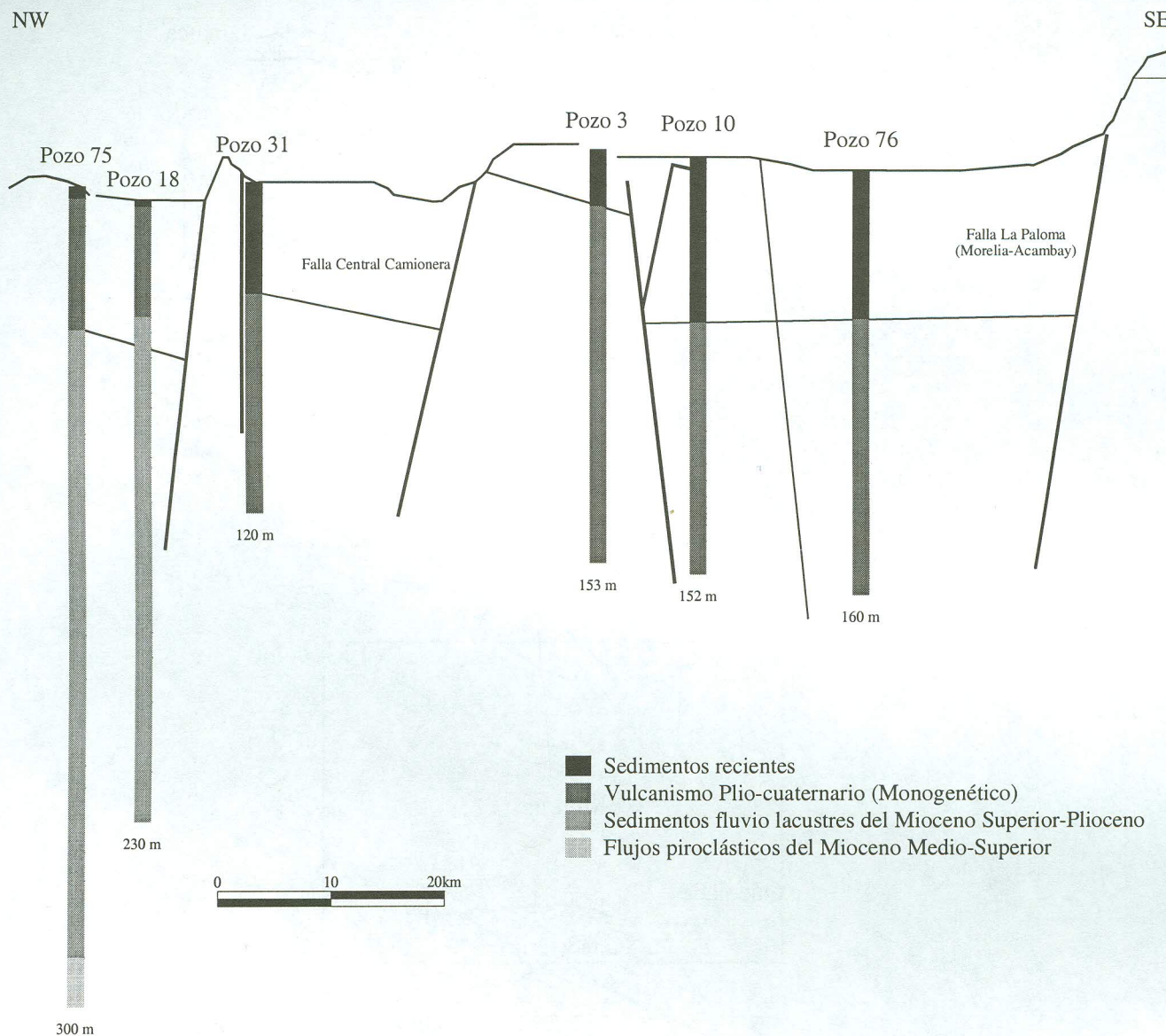


Figura 2. Sección geológica de algunos pozos de la Ciudad de Morelia. En esta sección se pueden ver las fallas principales y el basculamiento hacia el sur de las mesas de ignimbritas provocado por las mismas. Los desniveles provocados por las fallas son de más de 50 m en la Falla Central Camionera y de las de 100 m en la Falla La Paloma (Acambay-Morelia).

En este trabajo presentamos una serie de datos que permiten reconocer que el hundimiento de terreno o fluencia, durante las últimas dos décadas, está directamente relacionado con las condiciones del clima y los desarrollos urbanos mal planificados de algunas grandes ciudades de México.

GEOLOGÍA

La ciudad de Morelia está localizada en la frontera de dos grandes provincias geológicas. Al sur se encuentra una serie de rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno denominada Sierra de Mil Cumbres y hacia el norte se encuentra el Cinturón Volcánico Transmexicano que se manifiesta por el vulcanismo

monogenético, donde se encuentran los grandes lagos orientados E-W. Ambas provincias están separadas por la falla Acambay-Morelia, la cual es sísmicamente activa (Suter *et al.*, 1996) y que al sur de Morelia toma el nombre de falla La Paloma (Figura 1).

La estratigrafía de la ciudad de Morelia está constituida por cinco unidades litológicas, las que enseguida se describen de la base hacia la cima (Figura 2).

ANDESITAS DEL MIOCENO

Esta unidad está constituida por un paquete de derrames de andesita color verde intensamente alteradas y fracturadas, que a menudo alternan con horizontes piroclásticos o con otros

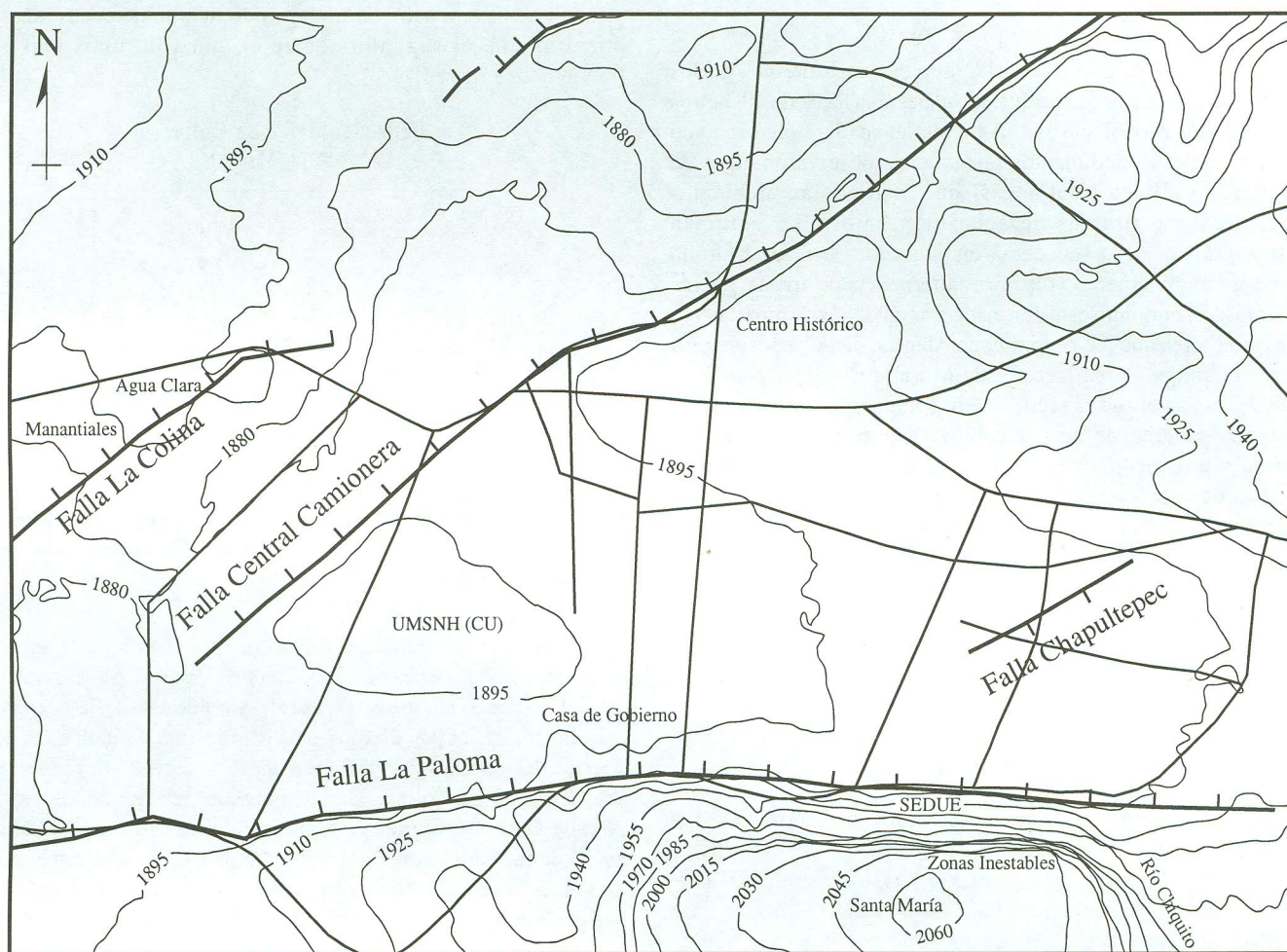


Figura 3. Localización de las principales fallas Geológicas de Morelia que están asociadas a fenómenos de fluencia. Es clara la relación entre la dirección de las fallas regionales y las fallas de la Ciudad de Morelia.

derrames de composición andesítica-basáltica. La edad de la secuencia varía de 20 a 8 Ma (Pasquare *et al.*, 1991; Silva-Mora, 1979, 1995). Estas rocas afloran en la cañada del Río Chiquito, en el sector sureste de la ciudad de Morelia. En el subsuelo de la ciudad estas rocas volcánicas se presentan claramente en los pozos perforados en la zona de Ocolusen.

IGNIMBRITA DE MORELIA

Esta unidad consiste de flujos piroclásticos de composición riolítica que muestra varios horizontes. Del nivel superior, más soldado, se ha obtenido desde la época colonial la cantera para construir los edificios más importantes de la ciudad de Morelia. Se compone de una brecha basal o coignimbrita constituida de material juvenil y de fragmentos líticos de andesita del Mioceno. Sucesivamente, se observan unidades de flujo piroclástico de color claro con bloques y lapilli de pómez alargados. Sobre esta última se encuentra un flujo piroclástico más rico en fragmentos líticos y más deleznable que el anterior. El espesor de la secuencia varía de unos metros a más de 200 m Demant (1981) obtuvo una fecha de 18 Ma para esta secuencia

y Ferrari *et al.* (1994), Garduño y Gutiérrez (1992) y Pasquare *et al.* (1992), consideran al conjunto como del Moceno. La cima de la secuencia está formada por una ignimbrita soldada de color rosa con grandes fiammes de pómez, y es este nivel el que controla la morfología de la zona de Morelia y del que se obtuvo la materia prima con la que se construyó el centro histórico.

SECUENCIA VOLCÁNICA DEL PUNHUATO

Esta secuencia de rocas volcánicas está constituida por derrames de composición andesítica y dacítica asociados con domos. Este complejo volcánico presenta una estructura en herradura de caballo que evidencia que hubo una gran explosión lateral. Los productos piroclásticos de este complejo forman un abanico que se observa en la parte oriental de la ciudad. Su edad no se conoce, pero se podría ubicar en el Mioceno, ya que subyace a los sedimentos lacustres del Mioceno-Plioceno (Istrade, 1996).

SECUENCIA LACUSTRE

Esta secuencia aflora en la parte sur de Morelia. En los pozos de este sector se han cortado espesores hasta de 40 metros de depósitos fluviolacustres. A través del análisis microscópico detallado de los sedimentos lacustres se observaron algas de caparazón silíceo (diatomeas) que testimonian ambientes lacustres con tirantes de agua muy bajos. La columna estratigráfica de la secuencia en el sector norte de Morelia muestra un basamento volcánico, alternancia de arenas, gravas y limos. El conjunto está coronado por un depósito piroclástico de caída aérea que fue denominado Alegría; dicho depósito puso fin a la antigua zona lacustre de Morelia (Israde y Garduño, 1999). Hacia el sur, la secuencia se adelgaza, pero conserva su aspecto granular de tipo sacaroides. Culmina hacia arriba y lateralmente en limos de color café que están cubiertos por depósitos volcánicos de caída aérea. La secuencia lacustre presenta su más completa exposición en la región de Charo donde los fechamientos radiométricos en productos volcánicos le asignan una edad Mioceno superior a Plioceno Superior (Garduño *et al.*, 1997). Sin embargo, los restos de un proboscideo encontrados en las excavaciones del IMSS permiten inferir que esta secuencia lacustre puede extenderse hasta el Pleistoceno (Israde *et al.*, 1992; Israde, 1996).

VULCANISMO MONOGENÉTICO

La unidad estratigráfica más reciente de la región de Morelia corresponde a rocas asociadas con vulcanismo monogenético. Se trata de lavas de composición basáltico andesíticas y basálticas que provienen de los volcanes del Quinceo y Las Tetillas. Este último, por su morfología y sus relaciones estratigráficas, es el más joven. Cabe mencionar que lavas de estos edificios volcánicos contienen impresiones de mazorcas de maíz (Martínez y Hobson, 1907) lo que evidencia que tuvieron actividad histórica. Si consideramos que la falla La Colina (Figura 1) y la de Tarímbaro cortan a estas lavas entonces podemos concluir que se trata de fallas activas.

MONITOREO DEL MOVIMIENTO

Desde 1982 a la fecha se ha monitoreado el hundimiento sufrido en distintas áreas de Morelia y las fallas a las que se asocia. El desnivel total actual es de 80 cm en la Falla de La Colina (Figura 3). Se puede observar de la Figura 4 que la velocidad de hundimiento no ha sido constante durante este tiempo. Antes de 1983 sólo se registraron fracturas en las calles y obras civiles, sin llegar a presentar movimiento vertical. De 1983 a 1987 (4 años) se observa un desnivel de 20 cm, mientras que de 1987 a 1993 (6 años) fue de 10 cm; de 1993 a 1996 (3 años) es de 10 cm y de 1996 a 1998 (2 años) de 40 cm. Lo anterior indica que en las fallas geológicas asociadas a fluencia hay ciertos periodos críticos en los que se acentúa el hundimiento continuo asísmico. Destacan los periodos 1983 y 1987 y 1997-1998. La diferencia entre estos dos periodos se debe a que el

primero se lleva a cabo en un lapso de tiempo de cuatro años mientras que el segundo ocurre en tan sólo unos meses (noviembre a marzo).

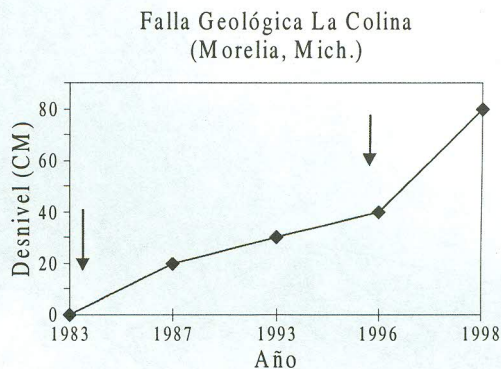


Figura 4. Gráfica del monitoreo de hundimiento de las obras civiles donde se notan varios quiebres y que ellos están relacionados a periodos críticos.

El movimiento durante el periodo 1983 - 1987 posiblemente se acentuó por el sismo de 1985, dejando ver que no se trataba de un fenómeno superficial natural, sino de una falla normal más profunda, cuyos efectos provocaron que a finales de la década de los 80 se demolieran más de 5 casas dúplex del INFONAVIT La Colina. En 1988 algunos medios de difusión pública dieron a conocer el problema de las fallas geológicas en Morelia, Santa Ana Maya y Tarímbaro; en esas notas de divulgación se advertía que toda obra civil que se construyera hacia el surponiente de la ciudad de Morelia debería tomar en cuenta la presencia de la falla (La Voz de Michoacán, 30 de octubre de 1988). A pesar de ello se construyeron las colonias López Mateos, Las Águilas, Agua Clara e INFONAVIT Manantiales. En 1998, vistos los daños en casas y edificios, más de 40 viviendas tuvieron que ser desalojadas.

También durante este primer periodo crítico (1983-1984) las instalaciones del hospital del Seguro Social sufrieron grandes daños, destacando los del área de consulta externa y el de gineco-obstetricia, así como la fábrica de aceites de Tron Hermanos (Figura 3).

En el último periodo crítico 1997-1998 (octubre de 1998) se manifestó una crisis que formó una zona de colapso particularmente evidente en la avenida Héroes de Nocupétaro, que agudizó la deformación en el edificio de gineco-obstetricia del IMSS y además se dañaron varias casas de la colonia Industrial. En la misma zona, la gasolinera La Colonial sufrió más daños de los ya presentados en la década de los 80 y mediados de los 90, creció hacia el NE la franja de hundimiento, así como su zona de influencia más 50 m. Después de esta crisis se identifican los siguientes segmentos: IMSS, Central Camionera y colonia Industrial. La geometría de estos segmentos parece indicar que su formación se debe a movimientos rotacionales que se llevan a cabo en la secuencia fluvio-lacustre (Figura 2).

Es importante resaltar de la Figura 4 que el movimiento en la Falla La Colina ha sido constante en el período de 15 años de observación.

ANÁLISIS DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS Y PIEZOMÉTRICOS

El clima de la región es templado húmedo con verano fresco e incluye las regiones más altas (el más húmedo de los subhúmedos), las zonas entre las montañas y la cuenca (intermedio de los subhúmedos) y la porción del valle (el más seco de los subhúmedos).

Al analizar la gráfica de temperaturas medias en Morelia entre 1976 y 1998 (Figura 5a) y analizando los datos del clima de Antaramian-Harutunián *et al.* (1993) y Antaramian y Múzquiz (1997), se encontró que la temperatura muestra una tendencia a incrementarse (Figuras 5a, b y c), teniéndose que la mínima en 1977 fue de 17.1°C y la máxima en 1998 fue de 19°C. La precipitación media anual ha fluctuado de 1050 mm a 550 mm en el período de 1976 a 1997 y la evaporación de 2200 mm hasta 1550 mm en el período de 1978 a 1997 (Figuras 5b y c).

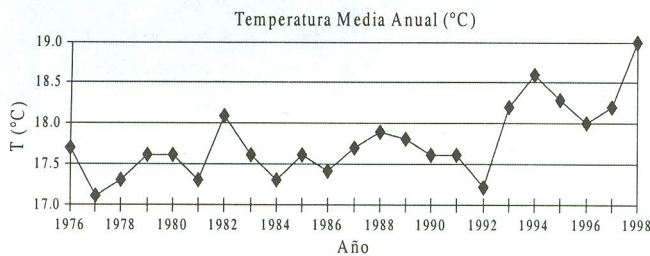


Figura 5a. Gráfica de temperatura Media Anual (°C)/tiempo en la ciudad de Morelia.

Se pueden observar en las curvas de temperatura, precipitación y evaporación algunos picos y valles, como el del período de 1982-1983. En 1982 la temperatura tuvo un importante incremento con respecto al año anterior y la evaporación, por consiguiente, se incrementó (Figura 5c) y la precipitación disminuyó considerablemente en ese mismo año (Figura 5b).

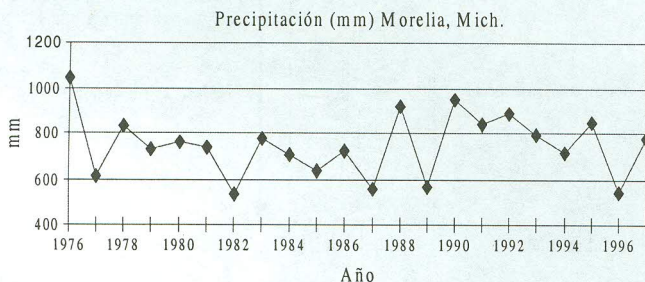


Figura 5b. Gráfica de Precipitación contra tiempo de la zona de Morelia.

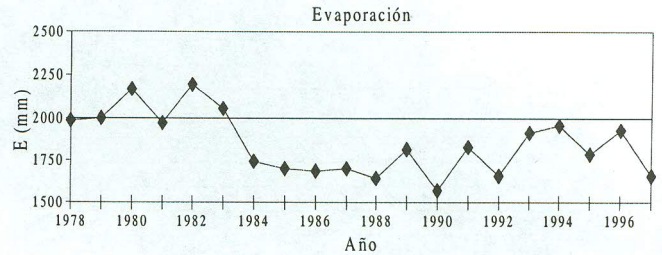


Figura 5c. Gráfica de evaporación contra tiempo de la ciudad de Morelia.

Por otro lado, la curva de piezometría de uno de los pozos en la ciudad de Morelia presenta el inicio de un abatimiento de casi 15 m en 8 años (Figura 6). Sabemos que la disminución de la presión de poro provocada por la poca lluvia, alta evaporación en la región y la constante extracción de agua de los pozos, provoca que el suelo sufra una deformación continua debido a la gravedad. La Figura 4 muestra que desde 1983 comienza a haber hundimiento en la Falla de La Colina con una media de velocidad de 5 cm por año. Al compararla con la Figura 5a, se observa que ambos períodos coinciden con un quiebre de las curvas, tanto del clima como del comportamiento del acuífero de la ciudad de Morelia.

En las gráficas de la Figura 6, del registro de algunos niveles estáticos de pozos en la ciudad de Morelia, podemos observar dos aspectos fundamentales: el primero es que existe un acuífero superficial localizado entre 2 y 20 m y que es el que ha tenido abatimientos más drásticos y donde se encuentran los sedimentos más compactados; por otro lado, se observa un acuífero superior a los 20 metros de profundidad con sedimentos no totalmente compactados, que tiene un comportamiento más estable, es decir, que no se abate en la forma drástica del acuífero superficial. En la misma Figura 6 se manifiesta la misma crisis de 1985 donde nuevamente la pendiente de la curva aumenta, indicándonos que la velocidad de abatimiento es mayor, coincidiendo con el comportamiento de las curvas de temperatura y precipitación.

No se cuenta con datos actualizados de piezometría en pozos; sin embargo, la curva de hundimientos nos indica que en 1996 se inicia otro período de crisis, que coincide con un decremento en la precipitación y un incremento en la temperatura ambiente en ese mismo año. En octubre de 1997, en la zona de la colonia Industrial (Figura 3) se tuvieron hundimientos en el terreno de hasta 15 cm, provocando daños muy severos en las estructuras civiles, de manera que algunas viviendas se tuvieron que desalojar por la magnitud de los daños y ahora están a punto de ser demolidas. Por otro lado los datos de los pozos de agua cercanos al IMSS (Figura 3) muestran que a mediados de los 70 los niveles estáticos se encontraban a 5 o 6 m de profundidad y en la actualidad los pozos registran niveles estáticos por debajo de los 50 m.

Sin duda alguna podemos decir que el hundimiento asociado con fallas geológicas se agudiza por las fuertes variaciones en el clima, así como también por la

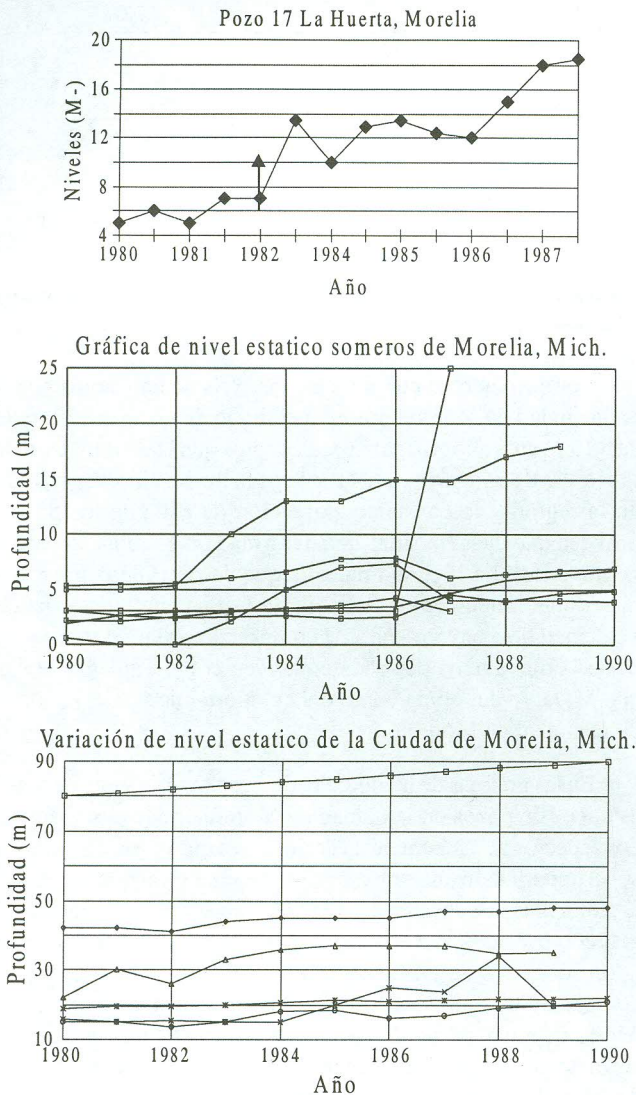


Figura 6. Registro de algunos niveles estaticos de pozos de agua de la Ciudad de Morelia.

sobreexplotación de los acuíferos, en particular los eventos que se han presentado en los últimos años (crisis del 1983-1987 y la iniciada en 1997 que aún no termina).

FENÓMENO DE HUNDIMIENTO CONTINUO ASÍSMICO (FLUENCIA)

Los colapsos, hundimientos o subsidencia en las manchas urbanas causan grandes daños en las obras civiles. Este fenómeno se genera no sólo debido a la explotación excesiva de un acuífero, también está en función del clima, de las técnicas de explotación y del fenómeno de compactación y deformación por movimientos gravitacionales que se generan en el subsuelo de terrenos normalmente constituidos por sedimentos fluvio-lacustres pobremente compactados (Figura 6).

Se puede considerar que si en un suelo se mantiene el esfuerzo externo F (gravedad) aplicado en forma constante, cualquier modificación en la presión de poro (P) podría llevar

a un estado de ruptura (falla) al material, o bien incrementar los efectos de deformación continua en el tiempo. Cuando la presión de poro en un material es grande, la falla que se produciría estaría asociada con poca deformación, en un medio frágil. Por el contrario, en el caso de que la presión de poro sea baja, la falla se desarrollaría en un medio dúctil, por lo que habría mucha deformación en el material.

En el caso de la ciudad de Morelia, los sedimentos lacustres mostrados en la Figura 7, en períodos de lluvia excepcionales (fenómenos de El Niño de 1982 y 1996), la presión de poro (p) se incrementa, provocando que la presión efectiva (σ) entre los granos disminuya, ya que está dada por la presión de confinamiento (F , esfuerzo externo aplicado, gravedad) menos la presión de poro (P). Si la presión de poro se incrementa, la fricción entre los granos disminuye y el proceso de fallamiento se facilita (Badgley, 1965). En función del diagrama de Mohr, el fenómeno se puede expresar de la siguiente manera (Figura 8), F_1 y F_3 son los esfuerzos de confinamiento, siendo soportados por los esfuerzos residuales en el suelo σ_1 y σ_3 más la presión de poro P .

$$F_1 = \sigma_1 + P; \quad \sigma_1 = F_1 - P \quad (\text{ec. 1})$$

$$F_3 = \sigma_3 + P; \quad \sigma_3 = F_3 - P \quad (\text{ec. 2})$$

Como se puede observar, si la presión de poro se incrementa, los esfuerzos σ_1 y σ_3 disminuyen provocando que el círculo de Mohr se recorra hacia la izquierda, ocasionando que en algunos casos llegue a tocar la envolvente de falla. En estas condiciones el estrato presentaría una falla frágil.

Por otro lado, el estrato inmediato inferior (sedimentos lacustres), como se encuentra poco saturado debido a la explotación de este acuífero, la presión de poro será muy

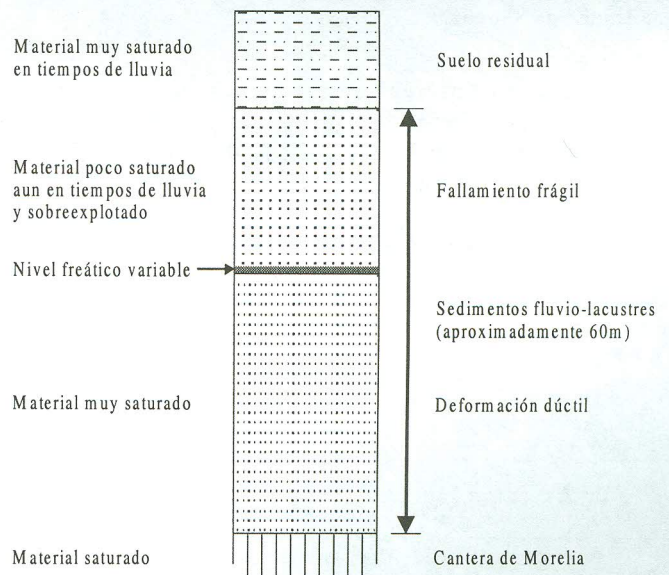


Figura 7. Columna litológica de Morelia, obtenida en base a datos geotécnicos de subsuelo.

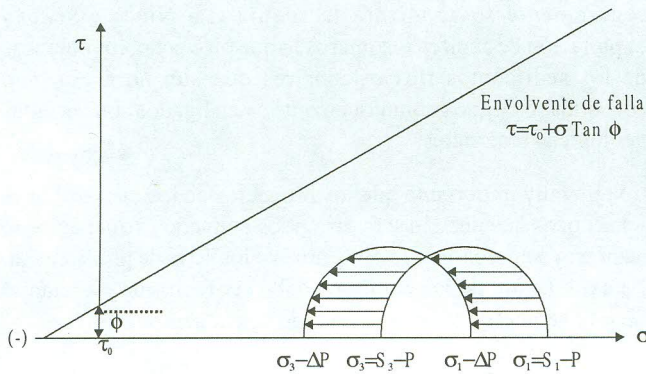


Figura 8. Diagrama de Mohr que representa la influencia de un incremento en la presión de poro en la falla del material.

pequeña, comportándose como un material muy dúctil y presentando por lo tanto deformación continua. Esto es debido a que los esfuerzos residuales del suelo se ven incrementados de acuerdo con las ecuaciones 1 y 2.

En la Figura 8 podemos separar dos tipos de secuencias sedimentarias: a) una superior, constituida por suelos y sedimentos fluvio-lacustres, que de acuerdo a las características geomecánicas obtenidas a partir de los sondeos, son sedimentos ya bien consolidados; b) por debajo de ellos se observa una secuencia fluvio-lacustre con unidades sedimentarias que aún no han sido compactadas en su totalidad.

Al analizar la Figura 7 podemos ver que cuando se tienen períodos de lluvia excepcionales (fenómenos de El Niño), el peso del estrato superior (suelos residuales y sedimentos fluvio-lacustres) aumenta, ocasionando que la secuencia fluvio-lacustre inferior que se encuentra poco saturada sufra deformación continua con mayor rapidez. Lo anterior se puede constatar en la Figura 9. Las pendientes en la curva se incrementan inmediatamente después de la aparición de un nuevo fenómeno de El Niño y sobre todo en períodos de máxima sequía.

Por otro lado en las zonas críticas (brincos de la falla) como es el caso de la Colonia Industrial, se pueden presentar fallas del suelo residual por el incremento de la presión de poro, ocasionando daños muy severos en las estructuras, al grado de tener que desalojarse las viviendas (noviembre de 1997).

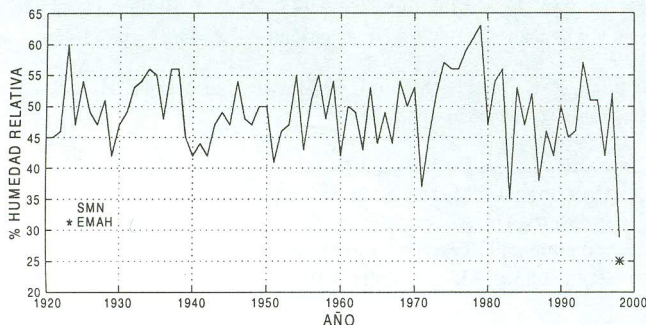


Figura 9. Gráfica de los principales Niños. Valores promedio mensuales para el mes de febrero desde 1921 hasta 1998 (Zavala et al., 1998).

DISCUSIÓN

Los factores que se han mencionado para explicar los fenómenos de fluencia (creep) que afectan a las zonas urbanas son de tres tipos: a) los que se refieren a la influencia antrópica de sobreexplotación de los acuíferos, b) los que se refieren a los efectos de arcillas expansivas y c) los estructurales relacionados a deformación continua y fallas geológicas. Este último se concibe como un fenómeno de deformación lento, paulatino y de tipo asísmico.

En los últimos cinco años se inició la discusión y la investigación sobre el papel tan importante que han jugado los fenómenos de El Niño y La Niña en el mundo. Sus efectos son grandes debido, por un lado a los períodos de abundantes precipitaciones (El Niño) y por otro a los períodos de sequía (La Niña). En la Figura 9 se pueden apreciar cuales han sido los eventos de El Niño más importantes en el período de 1965 a 1997, destacando los de 1982 y 1997.

Los períodos críticos más relevantes de fenómenos de fluencia asociados a las fallas geológicas han ocurrido durante 1983-1987 y 1997-1998. Como se ha visto, los fenómenos de El Niño y La Niña más importantes en la historia corresponden a esos períodos, es decir, que los efectos climáticos provocaron una mayor demanda de agua, haciendo cambiar las propiedades mecánicas de los primeros metros de sedimentos lacustres, ocasionando un comportamiento que ha generado el proceso de fluencia (La Niña). También se observa que el proceso es de deformación continua, agudizándose en los períodos de sequía (La Niña), aunque también en el período de lluvias abundantes se observa el movimiento vertical lento. El período crítico que inició en 1983 duró cuatro años. A partir de 1997 se inició otro período crítico cuya duración podría ser muy semejante al de 1983-1987, es decir que los problemas de hundimiento del suelo podrían ser muy importantes en los próximos dos o tres años. Otras ciudades en donde se observa este fenómeno podrían presentar desniveles de más de 1 metro, afectando en gran medida a las obras civiles, como es el caso de Celaya y Abasolo, Guanajuato.

Los problemas de fluencia asociados con fallas geológicas están afectando a varias ciudades del centro de México. Por lo general éstas están localizadas en antiguas depresiones lacustres, como en los casos de la Ciudad de México, Toluca, Querétaro, Celaya (Trujillo-Candelaria, 1985 y 1991), San Guillermo, Abasolo, Silao, en Guanajuato; Morelia, Tarímbaro y Santa Ana Maya, en Michoacán. Otra característica importante de ellas es que el fallamiento regional controla la geometría de las zonas de hundimientos debido a la explotación del acuífero, aspecto que nos podría indicar la importancia que debe tener el buen diseño de los pozos para la explotación de los acuíferos. Generalmente los pozos tienen un tubo ranurado desde su inicio hasta los 200 m de profundidad para extraer agua de acuíferos muy superficiales. Con esta acción se afecta la presión de poro de los sedimentos lacustres y en ellos se va a manifestar el proceso de hundimiento.

Se ha manejado que es la sobreexplotación de los acuíferos la que da lugar a la formación de zonas colapsadas (Trujillo Candelaria, 1991); sin embargo, consideramos que los movimientos de fluencia también están ligados con los fenómenos climáticos y con las técnicas de diseño de pozos y la forma de explotación de los acuíferos. Podría evitarse la sobreexplotación evitando extraer agua de los estratos superficiales, es decir de los primeros 20 o 60 m. La explotación de acuíferos más profundos evitaría explotar aquellos que, por descuido y mala organización están ahora contaminados, no solo por material orgánico, sino también por metales pesados. En las Figuras 5a y 5b se pueden observar claramente que los acuíferos someros (5m) son los que mayor abatimiento han tenido, mientras que los acuíferos que están a 20 m o más sufren un abatimiento más moderado.

Muchos de los escenarios que involucran desastres naturales se quisieran borrar de la vida cotidiana. Sin embargo, son estos escenarios los que sin duda alguna nos permiten aprender para tener una mayor cultura en la prevención y mitigación de desastres naturales.

CONCLUSIONES

Con los datos presentados y su interpretación se muestra una correlación entre el comportamiento del clima y el fenómeno de fluencia asociado con fallas geológicas. En particular, los dos eventos mayores en la historia de El Niño han provocado los periodos más severos en los procesos de fluencia y que afectan a las obras civiles en zonas urbanas, sobresaliendo los de 1993 y los de 1997. Los meses más destacados en este proceso de hundimiento son los de poca lluvia (invierno-primavera), aunque en los periodos húmedos también se aprecia movimiento. En más de diez años se muestra que este fenómeno de hundimiento es continuo y asísmico, con periodos más acentuados después de un fenómeno El Niño, es decir, en el periodo frío-seco o ante la presencia de La Niña.

Al fenómeno El Niño con mucha lluvia le sigue un período de frío y de sequía (La Niña) que puede ser de varios años, como fue el caso de El Niño de 1982-1983, evento considerado hasta 1997 como el más grande en la historia. Al período de máxima precipitación le siguió un período de sequía que se manifestó con colapsamientos. Dicho fenómeno se presenta en todas las ciudades donde hay problemas de fallas normales y secuencias sedimentarias fluvio-lacustres o lacustres. Considerando los diferentes niveles en las fallas de Morelia, se puede concluir que existe una media de movimiento vertical de 4 a 5 cm anuales. En las ciudades de Celaya, Abasolo, Aguascalientes, Querétaro los desniveles llegan a ser de más de 2 m. En estas últimas ciudades el problema parece haber iniciado en 1972 (Niño de 1972-1973).

Los efectos de El Niño más grandes de la historia, que iniciaron en 1997 y que continuaron en 1998 aún no terminan, por lo que consideramos que los problemas graves podrían presentarse en los años futuros, es decir, en los años en que

seguramente se agudizará la sequía (La Niña) y será la explotación de acuíferos someros la que provocará los colapsos de los sedimentos fluvio-lacustres que aun no están bien consolidados y que geoméricamente están ligados con las fallas geológicas regionales.

Es muy importante que los proyectos de los nuevos pozos y los pozos que puedan ser corregidos evitando extraer agua de acuíferos someros, es decir inferiores a los 40 m de profundidad. La explotación de los acuíferos debe ser realizada estudiando bien la geometría y las rocas donde se encuentran.

También se debe de considerar que a la falla de La Paloma están asociados varios cuerpos inestables, ahora ya urbanizados. Estos cuerpos inestables durante un período de El Niño como el de 1998 pueden ser nuevamente desestabilizados. O bien si se considera la combinación de un evento meteorológico importante y un sismo generado por la fallas sísmicamente activas de Tarímbaro, de La Colina o de la Paloma, podría presentarse un gran deslizamiento de material de rocas volcánicas.

AGRADECIMIENTOS

Llegar a concluir un trabajo de esta naturaleza ha requerido del apoyo de innumerables colaboradores tanto de la UMSNH como del IPN, a todos ellos damos las gracias. Parte del soporte financiero de este trabajo ha sido del fideicomiso SIMORELOS y CONACYT. También damos las gracias a L. Delgado-Argote y a un revisor anónimo por sus correcciones y sugerencias a este manuscrito. Todo el soporte financiero de este proyecto no podría ser tan bien ejercido sin la ayuda de la contadora Irma Tzintzun, quien con su grupo logran dar a la investigación empujes formidables.

REFERENCIAS

- Antaramian-Harutunián, E., Ortega, A., J.M. y Ríos Frías, L.L., 1993. Crecimiento urbano de Morelia y características actuales del terreno utilizado. UMSNH, Revista Trimestral de Ciencia, Arte y Cultura, N.10, p. 48-59
- Antaramian, E. y Múzquiz, E., 1997. Recent climate trends in Michoacan. Quaternary International, Vol. 43/44, p. 33-42.
- Badgley, P. C. 1965. Structural and tectonic principles. Harper and Row, LTD, p. 31-49.
- Carrara, E. y Lanza, D., 1997. La "piedra cantera" nella zona di Morelia (Michoacán, Messico); caratteri geologici e petrografici, caratteristiche fisico-meccaniche ed impiego a scopo di restauro monumentale. Tesis de Laurea in Scienza Geologiche. Università degli studi di Milano, Italia. 138 pp.
- Demant, A., 1981. L'Axe Néo-volcanique Transmexicain- étude volcanologique et pétrographique; signification géodynamique: Marseille, Université du Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille. PhD. 259 pp.

- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquare, G. and Tibaldi, A., 1994. Volcanic and tectonic evolution of the central Mexico: Oligocene to Present. *Geofísica Internacional*, Vol. 33, Num. 1, p 91-105.
- Garduño, V.H. y Gutierrez, A., 1992. Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano. *Geofísica Internacional*, V. 31, p.417-429.
- Garduño, M.V.H. y Escamilla, T.R., 1996. Revisión histórica de la sismicidad en Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita*, vol. 11, p. 57-81.
- Garduño, V.H., Israde, I., Francalanci, L., Carranza, O., Chiesa, S., Corona, P., and Arreygue, E., 1997. Sedimentology, volcanism and tectonics of the southern margin of the lacustrine basins of Maravatio and Cuitzeo, Michoacan, Mexico., IAVCEI General Assambly Puerto Vallarta Mexico, p 23.
- Garduño M., V.H., Arreygue, R.E., Chiesa, S., Israde A., I., Rodríguez T., G.M. y Ayala G., M., 1998. Las fallas geológicas y sísmicas de la Ciudad de Morelia y su influencia en la planificación del territorio, *Ingeniería Civil*, Vol. 1, No. 5 p. 3-12.
- Holzen, T.L., 1984. Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment. *Man-Induced Land subsiden. Geological Society of America Reviews in Engenieering Geology*, vol.VI, p. 67-105.
- Istrade, I., Garduño, V.H. y Ferrari, M., 1992. El origen transtensivo de la depresión del lago de Cuitzeo, Mexico. *Actas de las Sesiones Científicas, Congreso Latioamericano de Geología, Salamanca, España*. 4, p.127-131.
- Istrade, I., 1996. *Bacini lacustri del settore centrale dell' Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evoluzione sedimentaria basata sulle diatomee*. PhD Thesis, Universita degli Studi di Milano, Italia, 254 pp.
- Istrade-Alcántara, I. y Garduño-Monroy, V.H., 1999. Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin systeme (Central wester Michoacan, Mexico). *Palaecogeography, Palaoclimatology, Palaecology* (in press).
- Lermo, J., Nieto-Obregón, J. y Zermeno, M., 1996. Fault and fractures in the valley of Aguascalientes: Preliminary microzonification. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1651, Elsevier Science Ltd.
- Martínez, S.M. and Hobson, B., 1907. Restos de plantas en basaltos. *Boletín de la Sociedad Michoacana de Geología. y Estadística.*, Tomo. III, 15, p. 238-240.
- Pasquare, G., Ferrari, L., Garduño, V.H., Tibaldi, A. and Vezzoli L., 1991. Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán. *Geological Society of America Map and Chart series, MCH072*, 22 pp.
- Silva-Mora, L., 1979. Contribution a la connaissance de l'Axe Volcanique Transmexicain- étude géologique et petrologique des laves du Michoacán oriental: Marseille, Univerité du Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, tesis de doctor ingeniero, 230 pp. (inédita).
- Silva-Mora, L., 1995. Hoja Morelia 14Q-g(2) 1:100000, Resumen de la Geología de la Hoja Morelia, estados de Michoacán y Guanajuato, Instituto de Geología, UNAM.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M. and Quintero-Legorreta, O., 1996. Macroseismic study of shallow earthquakes in the Central and Eastern parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Bulletin Seismological Society America.*, Vol. 86, No. 6, p. 1952-1963.
- Trujillo-Candelaria, J.A. 1985, Subsistencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto., *Sociedad Mexicana de Suelos y Asociación Geohidrológica Mexicana*, Reunión sobre Asentamientos Regionales, México, D.F.
- Trujillo Candelaria, J.A., 1991. Fallamiento de terrenos por efecto de la sobreexplotación de acuíferos en Celaya, Guanajuato, México. *XXIII Congreso de Asociación de Ingenieros Hidráulicos, Sobreexplotación de Acuíferos, España*. p. 175-178.
- Zavala, J., Romero, R. y Romero, F., 1998. Efectos de El Niño en el área metropolitana de la Cd. de México, *Geos*, V. 18-1, p. 31-32.