

SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL  
Programa HABITAT

H. AYUNTAMIENTO DE MORELIA, MICHOACÁN.  
Dirección de Protección Civil y Bomberos de Morelia.

# ATLAS DE PELIGROS GEOLOGICOS DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICH: Estandarización del documento, actualización cartográfica de fallas geológicas de la zona urbana, y evaluación de tasas de hundimiento.

Por:

Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal<sup>1</sup>, Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy<sup>1</sup> y  
Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología y Mineralogía, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio U-3, primer piso, ciudad universitaria, Morelia, Mich. Tel (443) 3223500 ext. 4011. Correo electrónico: vitorio\_manuel@yahoo.it

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Abril del 2011



## INDICE

	Pág.
I INTRODUCCION	4
i.a Materiales	6
I,b Equipo	6
II ANTECEDENTES	9
ii.a Interacción en el conocimiento entre autoridades e Investigadores	12
ii.b Vinculación con la sociedad	16
III ZONA DE ESTUDIO	17
iii.a Localización	17
IV ELEMENTOS DEL MEDIO NATURAL	19
iv.a Fisiografía	19
iv.b Geología	20
iv.c Geomorfología	23
iv.d Hidrología y Geohidrología	25
V ELEMENTOS SOCIALES	28
v.a Dinámica demográfica	28
VI FALLAS GEOLOGICAS DE MORELIA	29
vi.a Actualización cartográfica	29
vi.b Monitoreo de la subsidencia	37
vi.c Modelo Continuo de Subsidencia	42
Referencias	47



## INDICE DE FIGURAS

N° fig.	Descripción	Pág.
1	GPS tipo SIG, marca Magellan, modelo MobileMapper CX Professional.	7
2	Elementos del sistema GPS 500.	8
3	Estación total marca LEICA, modelo TS30.	8
4	Esquema que ilustra al sistema de fallas de Morelia Acambay	9
5	Fallas geológicas de Morelia, cartografiadas en hasta 1988. Es importante notar el trazo de la falla La Colina, donde no obstante ya estar reportada por el INEGI, en esta figura solo se representa a la falla afectando una zona urbana.	10
6	Las fallas geológicas de Morelia para 1993. La zona amarilla representa las potenciales zonas a inestabilidad de laderas.	11
7	Cartografía de las fallas de Morelia publicado por la Voz de Michoacán en 1996.	11
8	Documento de La Voz de Michoacán donde publica en 1988 la presencia de las fallas geológicas en Morelia, Tarimbaro y Santa Ana Maya.	13
9	Sondeos para construir la torre del IMSS en Morelia, donde ya se apreciaba la presencia de la falla geológica de La Central Camionera. La línea roja señala la altura en que se encontró a la cantera en el sondeo 11, la cual nunca se cortó en el sondeo 12, es decir que entre ambos sondeos pasaría la falla de La Central Camionera.	14
10	Daños en el IMSS y en la antigua Central Camionera en H. de Nocupetaro.	15
11	Localización del área de estudio. Infraestructura vial y municipios colindantes.	17
12	A. Contexto geodinámico de México de acuerdo con el campo de esfuerzos que se registran con el movimiento de placas; 1. Placa de Norteamérica; 2. Bloque Jalisco; 3. Terrenos estratotectónicos de arcos volcánicos del sur de México; 4. Planicie Costera del Golfo; 5. Cinturón Volcánico Mexicano (CVM); 6. Movimiento relativo de placas; 7. Distensión en el CVM; 8. Zona de subducción; 9. Subducción en la Placa Rivera. B y C. Planos de localización de la zona de Morelia-Cuitzeo, donde se puede apreciar la importancia de las fallas geológicas NE-SW (Garduño-Monroy V.H. et al., 2001).	19
13	Columnas levantadas en los escarpes de las fallas E-O del sur de Morelia. En ellos se aprecia claramente las diferentes unidades de la cantera de Morelia y sus relaciones con las andesitas del Mioceno.	21
14	Curva del crecimiento poblacional de la ciudad de Morelia, obtenida a partir de los censos de población realizados por la DGE y el INEGI.	28
15	Afectación en red de drenaje e infraestructura urbana a consecuencia del asentamiento diferencial asociado a la falla La Paloma. La imagen corresponde al sitio conocido como "Las escaleras" en el sur de la ciudad.	26
16	Efecto de la subsidencia creep-falla La Paloma en casa habitación y pavimentos. Es obvia una afectación en la red de alcantarillado y agua potable.	26
17	Pavimento y casa-habitación cortados por la falla Viveros.	27
18	Ubicación de los puntos de control que integran la Red Urbana de Monitoreo de Subsidencia en la Ciudad de Morelia.	30
19	Tabla que muestra el geoposicionamiento de la red de testigos permanentes de la Ciudad de Morelia. Los renglones en rojo representan puntos con hundimiento por encima de 10cm al año, y los amarillos con valores de entre 5 y 10cm por año. Nota: las coordenadas están en la proyección UTM 14 Norte.	40
20	Tasa anual de subsidencia de la red de testigos permanentes de la Ciudad de Morelia.	41



21	Tabla que muestra la nomenclatura de las Imágenes ASAR del satélite ENVISAT adquiridas.	43
22	Inteferograma 7137_14151 que cubre la Ciudad de Morelia.	45
23	Mapa de hundimientos de la Ciudad de Morelia (12/07/2003 – 13/11/2004).	46

## INDICE DE MAPAS

Descripción	Pág.
MAPA BASE, escala 1:50,000	18
MAPA GEOLÓGICO, escala 1:50,000	24
MAPA DE LA CUENCA DE CUITZEO, escala 1:325,000	26
MAPA DE HIDROGRAFIA, escala 1:50,000	27
MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA, SECTOR SE	33
MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA, SECTOR SO	34
MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA, SECTOR NE	35
MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA, SECTOR NO	36



## I INTRODUCCION

El crecimiento acelerado de la población en condiciones económicas y sociales adversas, es un factor común en países del tercer mundo y en vías de desarrollo como México. Este fenómeno detona el crecimiento desmedido y poco controlado de manchas urbanas, sobre terrenos altamente susceptibles de ser afectados por algún tipo de fenómeno hidrometeorológico (ej. inundaciones, fallas geológicas, subsidencia y procesos gravitacionales de remoción en masa, entre otros). Por lo que la población en esas condiciones, se convierte en un catalizador que propicia una doble transformación: por una parte, el fenómeno natural se convierte conceptualmente en peligro, y por otra, la población se transmuta así misma en un elemento vulnerable que se auto expone a dicho peligro o amenaza. Si consideramos además, una mayor recurrencia de precipitaciones excepcionales y condiciones climáticas extremas asociadas al Cambio Climático Global, tenemos escenarios cada vez más numerosos y de alto riesgo, que de verificarse afectarían drásticamente la economía y sociedad nacional, conduciendo el país a un escenario de caos y anarquía. Ejemplo de esto último lo observamos en Haití, cuya población altamente vulnerable fue dañada primero por un sismo de 7 grados de magnitud (12 de Enero del 2010) y después por una epidemia de cólera, posiblemente consecuencia del evento sísmico que dañó redes de drenaje y agua potable. En conjunto estos fenómenos suman más de 200 mil defunciones e incalculables pérdidas económicas directas e indirectas, que confinan a la población a una pobreza más que extrema. Si antes de estos eventos Haití era el país más pobre de Latinoamérica, es posible que ahora lo siga siendo, pero del mundo.

En consideración de lo anterior, el Atlas de Peligros y Atlas de Riesgos geológicos, constituyen documentos cartográficos valiosísimos e indispensables para el diseño de estrategias de mitigación y prevención de desastres. Así como de planificación y ordenamiento territorial, dentro del marco de la protección civil y seguridad nacional. Particularmente el Atlas de peligros geológicos constituye el insumo fundamental en la evaluación de riesgos y desastres. “No se puede evaluar la vulnerabilidad y mucho menos el riesgo, si antes no conocemos el peligro al que nos enfrentamos” era el argumento, bastante válido desde nuestro punto de vista, de un investigador cubano en el marco del VI Congreso Internacional sobre Desastres.

En este sentido, el Atlas de Peligros Geológicos de la ciudad de Morelia (APGM) en su versión 2001, constituye el primer antecedente en Michoacán, y probablemente del país, de un documento cartográfico de detalle (a escala de mancha urbana) que se ofrece a la sociedad para la identificación temática y espacial de fenómenos geológicos que afectan a la infraestructura pública y privada de su ciudad. Producto de la relación exitosa Academia–Gobierno Municipal, el primero representado por profesores e investigadores del



Departamento de Geología y Mineralogía del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (IIM) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), y el segundo por el H. Ayuntamiento de Morelia a través de su Dirección de Protección Civil.

Sin embargo, debido al desarrollo científico alcanzado a lo largo de los últimos diez años, en los que se han obtenido nuevas técnicas de estudio con resultados más confiables; aunado a la evolución temporal y espacial de los fenómenos geológicos que se representan en el Atlas; y sobre todo, al crecimiento de la ciudad. Se hizo indispensable realizar la actualización estructural y cartográfica del Atlas de Peligros Geológicos de la ciudad de Morelia.

Entre las deficiencias del Atlas de Peligros (versión 2001) subsanadas en el presente trabajo, se encuentran:

a) *Base cartográfica poco confiable.* El mapa base utilizado para el Atlas de la versión 2001, fue un mapa manzanero de la ciudad de Morelia hecho a principios de la década de los 80's (siglo pasado), carente de parámetros cartográficos básicos (escala, proyección, datum, etc). En consecuencia, la línea gráfica trazada sobre él y que representa el escarpe de fallas geológicas, tiene importantes diferencias con respecto a la trayectoria real.

b) *Uso elemental de la tecnología GPS.* Debido a la disponibilidad selectiva (S/A) impuesta por la Defensa de los Estados Unidos a través del Control Maestro del sistema NAVSTAR-GPS, hasta antes del año 2000 el GPS no fué recomendable para la determinación de coordenadas geográficas en puntos específicos, pues las mediciones presentaban errores de más de 20m. En consecuencia el trazo de la línea de falla no podía ser verificada con esta tecnología.

c) *Conocimiento incipiente del proceso de subsidencia-creep-falla.* Se tenía poca experiencia para la identificación de grietas y fracturas en obras civiles por efecto de falla geológica. En algunos sectores de la mancha urbana las fallas geológicas se llegaron a confundir con asentamientos diferenciales provocados por mala distribución de cargas, mal diseño de cimientos, o incluso, por el asentamiento del terreno en antiguos canales de riego.

d) *Oposición para el estudio de fallas geológicas.* Debido a que el proceso de subsidencia y fallas geológicas asociadas eran procesos geológicos que iniciaban a ser estudiadas en México, existía una renuencia generalizada por parte de profesionistas de la ingeniería civil (en su mayoría funcionarios públicos), para ser consideradas como elemento de riesgo. Aunque el daño provocado por ellas era evidente, se prefería desviar la atención o dar explicaciones ficticias. Por



lo tanto la línea de falla en predios y edificios públicos no pudo ser verificada y trazada con precisión, debido a la falta de autorización para su inspección.

Con base en lo anterior y como etapa inicial de un proceso global de actualización, el presente trabajo se realiza a través de dos actividades complementarias entre sí: **I) Estandarización del documento informativo**, y **II) Actualización cartográfica de las fallas geológicas de Morelia y evaluación de tasas de hundimiento**. Ambas, desarrolladas con base en lineamientos establecidos en la guía SEDESOL (2007), la cual considera criterios del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y los planteados en el Programa Habitat de la misma SEDESOL.

Es claro que el objetivo general de este trabajo fue la actualización cartográfica de las fallas geológicas de la ciudad de Morelia. Para ello se realizaron los siguientes objetivos particulares: *i)* Trazo de líneas de falla geológica con base en recorridos en campo, mapas catastrales y equipo GPS (precisión submétrica). *ii)* Evaluación de tasas de hundimiento en la mancha urbana mediante monitoreo de coordenadas (X, Y y Z) en puntos de control distribuidos en toda la ciudad. *iii)* Obtención del Modelo Continúo de Hundimientos para toda la mancha urbana, con base en interferometría y apoyo en imágenes de satélite. Todo lo anterior dentro de un Sistema de Información Geográfica, usando la plataforma ArcGis 9.3 con datos georreferenciados en la proyección UTM, zona 14n y datum WGS84.

#### *i.a Materiales*

Para la realización del presente trabajo se emplearon materiales cartográficos diversos como:

- a. Fotografías aéreas a escala aproximada 1:10,000 (impresas y en digital).
- b. Carta topográfica de Morelia E14a23 (INEGI, 1999)
- c. Planimetría de la mancha urbana de Morelia, obtenida por restitución fotogramétrica a partir de imágenes aéreas del INEGI (1995).
- d. Altimetría/curvas de nivel a cada metro (DCMM, 2005). Obtenidas por restitución fotogramétrica de imágenes aéreas a escala 1:6,000.
- e. Modelo digital de elevación con resolución de 2m, generado en este trabajo a partir de las curvas de nivel proporcionadas por DCMM (1995).
- f. Bases de datos de censos de población y vivienda, y censos económicos realizados por el INEGI (1990, 1995, 2000, 2005 y 2010).

#### *i.b Equipo*

El equipo elemental usado para la actualización cartográfica de la trayectoria de las fallas geológicas, así como en las campañas de monitoreo puntual de la subsidencia, fue el siguiente:

- a. Geoposicionador satelital con características de un Sistema de Información Geográfica (GPS tipo SIG), marca MAGELLAN, modelo *MobileMapper CX*



*Professional* (Figura 1). Con conexión al sistema NAVSTAR GPS (*Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System*) a través de 14 canales de recepción y frecuencia L1. Corrección en tiempo real mediante sistema WAAS (*Wide Area Augmentation System*).



*Figura 1.- GPS tipo SIG, marca Magellan, modelo MobileMapper CX Professional.*

- b. Geoposicionador satelital de alta precisión (GPS geodésico, marca LEICA, modelo SR500, con 12 canales de recepción y doble frecuencia (L1 y L2) (Figura 2). Para levantamientos en estático y estático rápido que son pos procesados a través del software SKIPro de LEICA.
- c. Estación total marca LEICA, modelo TS30 (Figura 3), con lectura sin prisma hasta una distancia de 200m.



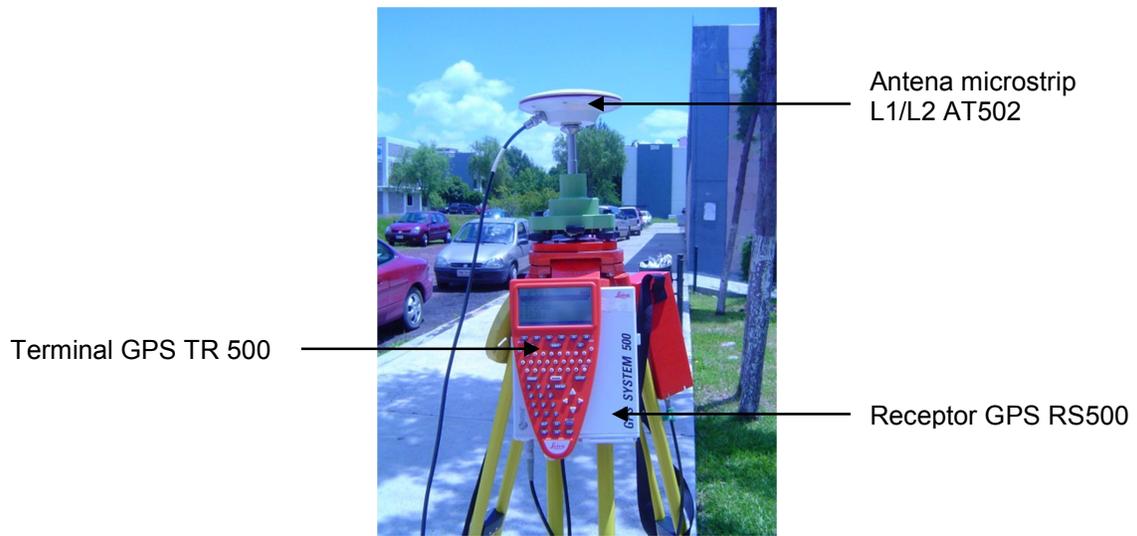


Figura 2. Elementos del sistema GPS 500.



Figura 3.- Estación total marca LEICA, modelo TS30.



## II ANTECEDENTES

Desde 1984 un grupo de investigadores de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y del Instituto Politécnico Nacional (IPN), iniciaron el estudio de una serie de fracturas que se manifestaron en obras civiles de las poblaciones de Santa Ana Maya, Tarímbaro y de la Ciudad de Morelia, Mich (La Voz de Michoacán, 1988). En esta última, las colonias más afectadas eran las de La Colina-Tres Puentes y la Av. Héroes de Nocupetaro (norte del Centro Histórico). Todas estas estructuras geológicas tienen direcciones NE-SO, es decir obedecen a las direcciones de las fallas de la región y que forman parte del sistema de fallas sísmicamente activas de Acambay-Morelia (Figura 4).

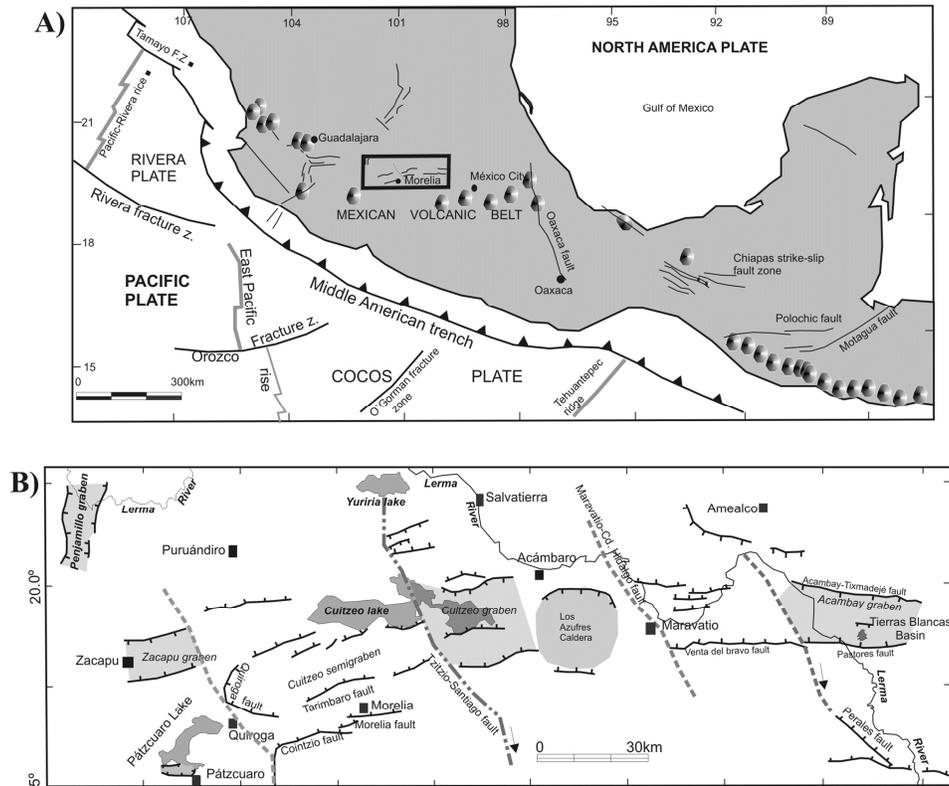


Figura 4. Esquema que ilustra al sistema de fallas de Morelia Acambay

Para 1988 ya se conocían en la Ciudad de Morelia las fallas de: La Colina, Central Camionera, Chapultepec y de La Paloma (Figura 5). Como se puede apreciar en la figura 2 las fallas de La Colina y de La Central Camionera no aparecen hacia el SW debido a que la mancha urbana aun no existía.

En 1993 las fallas crecieron en número ya que se comienza a manifestar la falla de Torremolino. Hoy en día se han agregado otras debido al crecimiento urbano que no tomó en cuenta las opiniones de los científicos. Ellas son la de Cuautla,



Ventura Puente, El Realito y La Soledad, estas últimas estructuras iniciaron a manifestarse a finales de la década de los 90'.

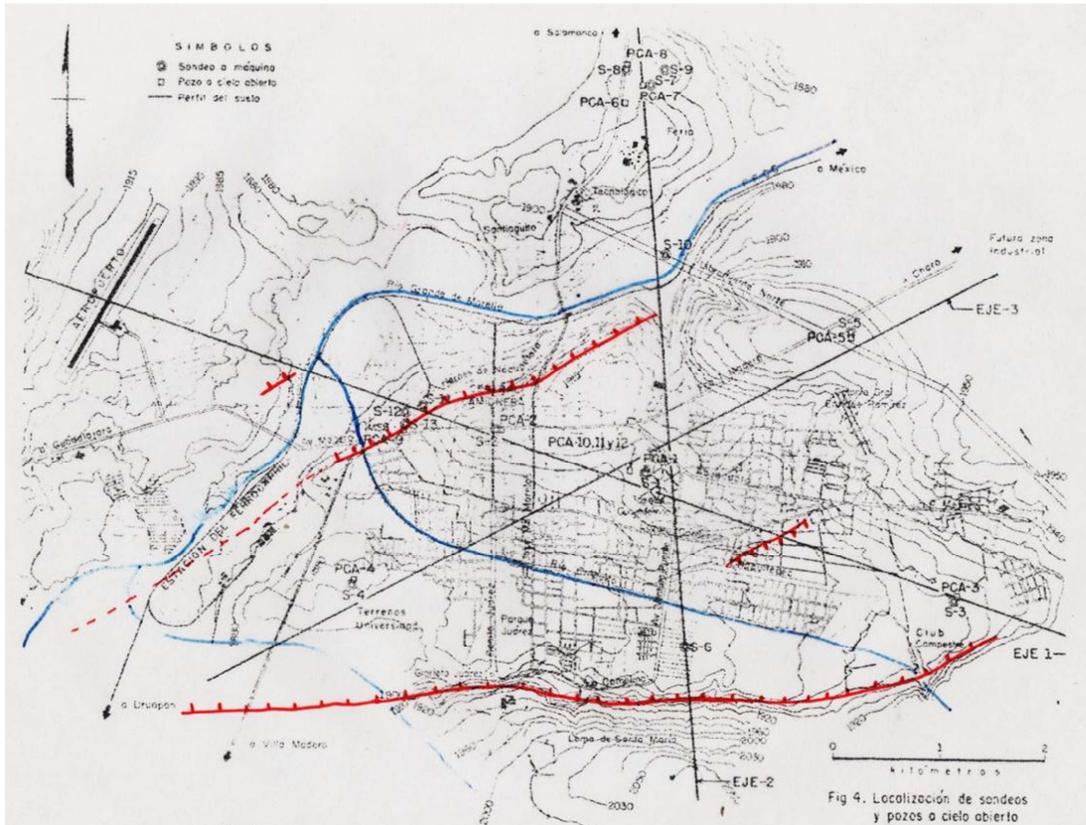


Figura 5. Fallas geológicas de Morelia, cartografiadas en hasta 1988. Es importante notar el trazo de l falla La Colina, donde no obstante ya estar reportada por el INEGI, en esta figura solo se representa a la falla afectando una zona urbana.

De acuerdo a su geometría y a su génesis las fallas de la Ciudad de Morelia podrían ser ordenadas en dos grupos: Las fallas geológicas que se han reactivado por la actividad humana (Procesos de subsidencia Creep-falla, PSCF) y las fallas que pueden ser clasificadas como potencialmente activas, las cuales también podrían estar asociadas a PSCF o bien por su morfología a inestabilidad de laderas (Figura 6). Todas estas estructuras se encuentran dentro de la mancha urbana, haciendo crecer el factor de vulnerabilidad debido a que estas afectan a viviendas, edificios públicos, redes hidráulicas, drenajes, líneas eléctricas, calles, etc.

Para 1996 nuevamente La Voz de Michoacán publica el mapa con las fallas más importantes donde se observan los procesos de subsidencia creep-falla (PSCF). Es importante notar entre otras cosas, el crecimiento de la falla La Colina con respecto al crecimiento de la zona urbana (Figura 7)



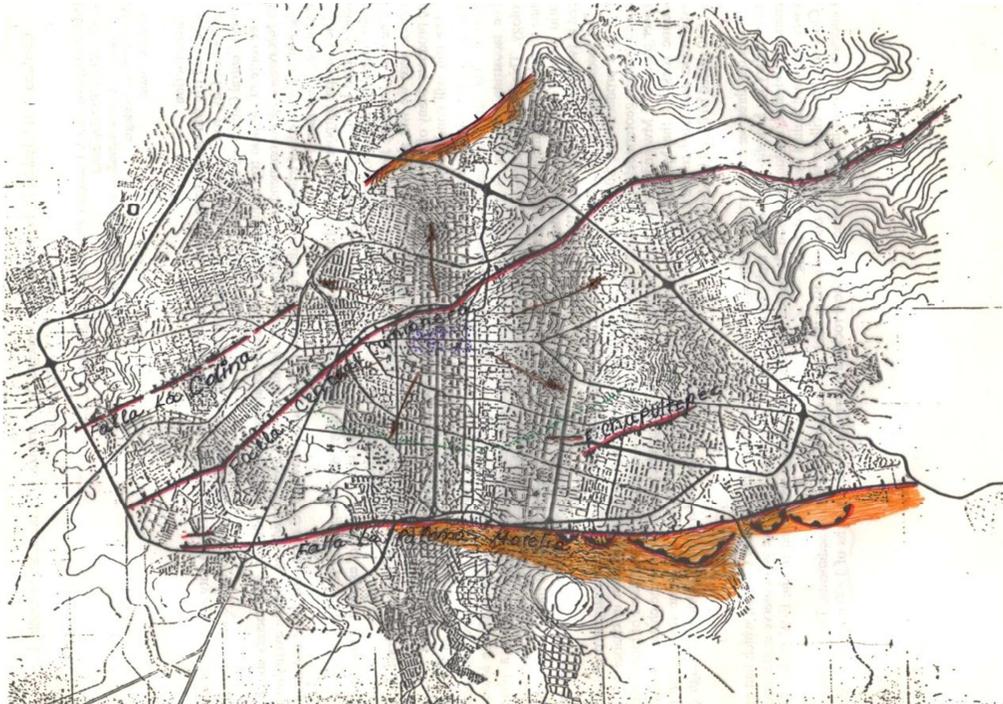


Figura 6. Las fallas geológicas de Morelia para 1993. La zona amarilla representa las potenciales zonas a inestabilidad de laderas.

# Detectadas ya 12 Fallas Geológicas en Morelia

- Localizadas por Sedue y UM, las rutas que siguen
- Pronto, Gobierno Estatal anunciará medidas preventivas

Por Jorge HIDALGO LUGO

Sin que se deba considerar como una situación de grave riesgo o que ponga en peligro la vida de quienes construyeron su residencia sobre terrenos afectados en el subsuelo, hasta el momento se tienen detectadas ya 12 fallas geológicas en Morelia, lo que obliga a tomar en consideración algunas medidas que pronto serán dadas a conocer por el Gobierno Estatal a través de Sedue.

Por su parte, el Ayuntamiento de Morelia dispuso no autorizar ninguna licencia **2-A**

**Felipe Calderón:  
Ha Privilegiado TR  
el Diálogo con las  
Fuerzas Políticas**

Por JAVIER FAVELA GERONIMO

La gestión de Víctor Tinoco Rubi si ha privilegiado el diálogo con las diversas fuerzas políticas. Sin embargo, existen algunos puntos "claro-oscuros" porque muchos se quejan de la falta de atención de algunos de sus colaboradores en algunos casos.

*Morelia, Mich.*

**CENTRO HISTORICO**

Sobre el mapa se aprecia la trayectoria que están siguiendo algunas de las 12 fallas geológicas hasta ahora descubiertas por investigadores de la UMSNH y de la Sedue. Las primeras evidencias se revelaron en La Colina, en 1984.

Figura 7. Cartografía de las fallas de Morelia publicado por la Voz de Michoacán en 1996.



### *II.a.- Interacción en el conocimiento entre autoridades e Investigadores*

Desde la identificación y ubicación de las fallas, en 1983 y 1984, los especialistas del Instituto Politécnico Nacional, ahora investigadores de la UMSNH, tuvieron claro que este problema de fallas geológicas no estaba relacionado con suelos expansivos como había sido considerado en su inicio, y que llevo a realizar grandes obras civiles en la Av. Héroes de Nocupetaro. En excavaciones para desplante de obras civiles, dos geólogos del Instituto de Geología de la UNAM, constataron la presencia de una falla normal con un salto de más de dos metros, a la altura de lo que fue la Central Camionera de Morelia. Al mismo tiempo, un grupo de estudiantes de Ciencias de la Tierra iniciaron la cartografía de los daños a lo largo de las fallas de lo que se denominó Falla Central Camionera (hoy falla Nocupetaro) y falla de La Colina. Ambas con una expresión morfológica clara, es decir, con un escarpe bien desarrollado en dirección NE-SW y un bloque caído hacia el norte. Cartografía de fallas que ya aparecía en las cartas geológicas del INEGI publicadas en 1977.

Por la situación que enfrenta el Hospital del Seguro Social, es importante mencionar que desde 1984 se observó que había daños importantes en la torre de ese centro de salud, comunicando a las autoridades de que pronto varios edificios serian afectados por la falla.

Con estas observaciones y con información de la misma ciudadanía, se iniciaron a reportar otras grietas en la colonia Chapultepec con afectación principalmente en el Seminario Claretiano. Los daños de esta falla, que denominamos Chapultepec, eran atribuidos a arcillas expansivas o bien a el pozo localizado en TELMEX. Sin embargo, ninguna de estas hipótesis podría explicar el comportamiento rectilíneo y el paralelismo con las fallas regionales.

En 1988 el periodista López Guido, de La Voz de Michoacán, entiende el problema y nos facilita publicar tres suplementos dominicales para hablar de las fallas en zonas urbanas, apareciendo en el texto las fallas de Tarimbaro y de Santa Ana Maya. En esta nota se decía del peligro que podría haber si la ciudad de Morelia crecía en dirección al SW, es decir donde posteriormente se asientan las colonias Manantiales, Agua Clara, Las Águilas y López Mateo (Figura 8).



# Michoacán Requiere de una red Sismológica y Geólogos

arrollo del estado. Sus recursos son mínimos, comparados con los que éste puede aportar, no solamente en lo científico, ya que en la minería y recursos geohidrológicos éste cuenta con una riqueza incalculable. Sin embargo, gran parte de él se encuentra enclavado en la principal zona sísmica de México, y en un complejo de aparatos volcánicos que acarrearán un alto riesgo en diversos polos de desarrollo, tanto agrícolas como industriales.

Este servicio puede iniciar una infraestructura en la protección civil por medio de estudios vulcanológicos y sísmicos detallados. Dicha infraestructura a largo plazo puede ayudar a fundar una escuela de Ciencias de la Tierra enfocada a la vulcanología y riesgo sísmico. Resulta una gran pérdida el que en México no exista una Escuela de Vulcanología, contando con un laboratorio natural. Michoacán puede ser alimentador de técnicos y científicos que ayuden a un desarrollo y una protección civil adecuada, dando a conocer los cimientos sobre los cuales se edifica nuestro estado y nuestro país.

## LAS FALLAS GEOLOGICAS DE SANTA ANA MAYA, TARIMBARO Y MORELIA

Como se ha venido señalando, Michoacán es parte de un escenario donde se han generado diversos sismos y surgimientos espectaculares de aparatos volcánicos.

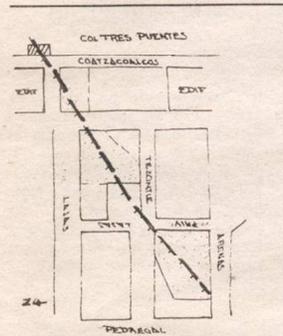
Las investigaciones realizadas por un grupo de geólogos del IPN han aportado datos que resultan de vital importancia para el estado. Son tres fallas geológicas con actividad que han sido encontradas, todas ellas afectando a poblaciones donde los habitantes no están preparados para enfrentar estos problemas.

### LAS FALLAS DE SANTA ANA MAYA

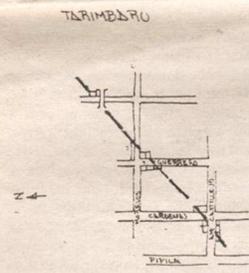
Desde finales de los años cincuenta, del poblado de Sta. Ana Maya ya ha sido testigo de una serie de hundimientos que han causado daños en casas particulares, edificios públicos y campos de cultivo. Estos hundimientos se materializan por una serie de grietas fracturadas con dirección que va del surponiente al nororiente, las que han originado hundimientos con desniveles de más de 30 cm.

En 1983 se abrieron grietas de más de 10 cm. de ancho y profundidades mayores al metro, ellas siempre con una dirección NE-SW. Algunas de estas grietas cortaron a la carretera y provocaron que las aguas escaparan por ellas. Otra fractura, paralela a las anteriores, atraviesa al poblado de Sta. Ana Maya destruyendo todo lo que encuentra a su paso. Un ejemplo de graves daños es la Escuela Primaria "Lic. Benito Juárez", según las observaciones del director, turno matutino, Profr. José Gpe. Ferreira, y de algunos lugareños, los hundimientos se aceleran en la época de secas, es decir, de enero a junio. Este fenómeno coincide con la mayor explotación del acuífero subterráneo, el cual ha sido abatido en 15 años más de 10 metros. Esta sobreexplotación del acuífero y la falla geológica regional de dirección NE-SW, son los que más se pueden ligar a los hundimientos.

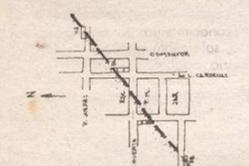
El sismo del 19 de septiembre de 1985 no quedó ajeno a este problema, por ello y lo anteriormente señalado, un gran número de inmuebles han sido demolidos, como es el caso del Palacio Municipal donde su patio ha tenido que estar en cons-



Falla geológica en la unidad habitacional de La Colina, en Morelia.



Plano donde se localiza la falla de Tarimbaro.



tienen una dirección también NE-SW y los hundimientos son hacia el suroriente de las grietas. Durante la visita a esta población se estudiaron las grietas de 7 casas; los lugareños se encuentran en una situación desesperante, ya que no saben qué medidas tomar; la mayoría de ellos han desalojado los cuartos más dañados debido a que tienen temor de que la construcción se venga abajo.

### LA FALLA DE MORELIA

La capital del estado no parece escapar a la actividad de las fallas geológicas. En Morelia se ha detectado una falla activa que se localiza en La Colina y en la colonia Tres Puentes.

Su dirección es NE-SW y el hundimiento hacia el norponiente. Su trazo es claro en las calles (arenas, tezontle, pedregal, etc.), y destructivo al llegar a las zonas de construcción habitacional, donde apro-

ximadamer casas, la mayoría de ellas. Los propietarios han tomado medidas de precaución, y últimamente.

Este problema en Morelia ya de bajos recursos no ha cobrado esta falla no detectada en esta unidad habitacional. Ahora nos permitimos hacer una recepción por posible zona Juanico, Ite, embargo, no se lleva esta natura

Figura 8. Documento de La Voz de Michoacán donde publica en 1988 la presencia de las fallas geológicas en Morelia, Tarimbaro y Santa Ana Maya.







Figura 10. Daños en el IMSS y en la antigua Central Camionera en H. de Nocupetaro.

Entre 1995 y 1999 se dan a conocer con mayor énfasis a las autoridades el problema de las fallas geológicas. En este tiempo se presenta la crisis de más de 60 viviendas de la unidad habitacional Manantiales, donde se hace ver que todos los daños eran producto de la prolongación de la falla La Colina, que de hecho ya afectaba también a las colonias de López Mateos y las Águilas. En este tiempo se construye el fraccionamiento Agua Clara y se informa del trazo de la falla La Colina en este nuevo desarrollo. Visto el crecimiento de la ciudad y la poca consideración a este proceso geológico, se entrega un documento a las autoridades municipales de urbanismo, Obras Públicas y a Protección Civil. Esta información se daba con mapas del trazo de las fallas y de un texto donde se hablaba de la relación entre las fallas geológicas y la sobre explotación del acuífero subterráneo que inicio abatirse en forma alarmante.

Durante este periodo se llevan a cabo estudios geofísicos aplicando la técnica de Georadar, que permitieron identificar claramente las fallas en el subsuelo, por ejemplo se corroboró que todas ellas tenían un salto de más de un metro, que eran fallas sinsedimentarias y que todas tenían la geometría de las fallas regionales. Para profundizar su geometría se realizaron excavaciones perpendiculares a las fallas en las fallas de Héroe de Nocupetaro, La Colina, Chapultepec y en la nueva falla de Torre Molino, que inicia a notarse más debido a las construcciones nuevas que no la consideraron.

Todo el material generado fue entregado a todas las gestiones del Municipio, de ellas se desprenden acciones concretas como las de la compra de dos acelerógrafos durante la gestión de Lic. Galván Infante, y el inicio de un atlas de peligros Geológicos Municipal en formato electrónico y que es el que actualmente está siendo actualizado (motivo del presente estudio)



### *II.b.- Vinculación con la sociedad*

Sin duda alguna todos los investigadores de la UMSNH han tenido claro la ayuda que requiere este tipo de personas que son afectadas por un desastre silencioso. Desde 1985 se apoyó a los habitantes de las unidades habitacionales de La Colina-Tres puentes, y después en 1995 a los de Manantiales. De estos últimos se realizó todo el levantamiento de daños y se entregó un informe a las autoridades haciendo notar los efectos de la falla La Colina.

Existe un sin número de estudios entregado a las autoridades y a organismos en particular de estudios especializados, como son los del FIRA, Tron Hermanos, Seguro Social, Protección Civil estatal y Municipal, SCT, SUMA, y diferentes constructoras, etc.



### III ZONA DE ESTUDIO

#### iii.a Localización

El área de estudio corresponde a la mancha urbana de la ciudad de Morelia, que constituye la cabecera del municipio del mismo nombre y es ciudad capital del Estado de Michoacán de Ocampo. El municipio de Morelia se localiza en la región septentrional de dicha entidad federativa, con coordenadas extremas en la proyección UTM, zona 14, datum WGS84:  $X_{\min}=236,998\text{m}$ ;  $X_{\max}=285,915\text{m}$ ;  $Y_{\min}=2'151,017\text{m}$ ;  $Y_{\max}=2'198,008\text{m}$  (Figura 11 y Mapa Base). Comparte límite municipal al norte con los municipios de Chucándiro, Copandaro y Tarímbaro; al este con los municipios de Charo y Tzitzio; al sur con Acuitzio y Lagunillas; y al oeste con Quiroga. La extensión municipal de Morelia es de  $1,194.4 \text{ km}^2$ , y representa el 2% de la superficie total ( $58,610.5 \text{ Km}^2$ ) del Estado.

A mayor escala, el área de estudio o mancha urbana de Morelia se localiza en el sector noreste del polígono municipal, ocupando una superficie de  $77.2 \text{ Km}^2$  que representa 6.5% de la extensión municipal y el 0.13% de la estatal.

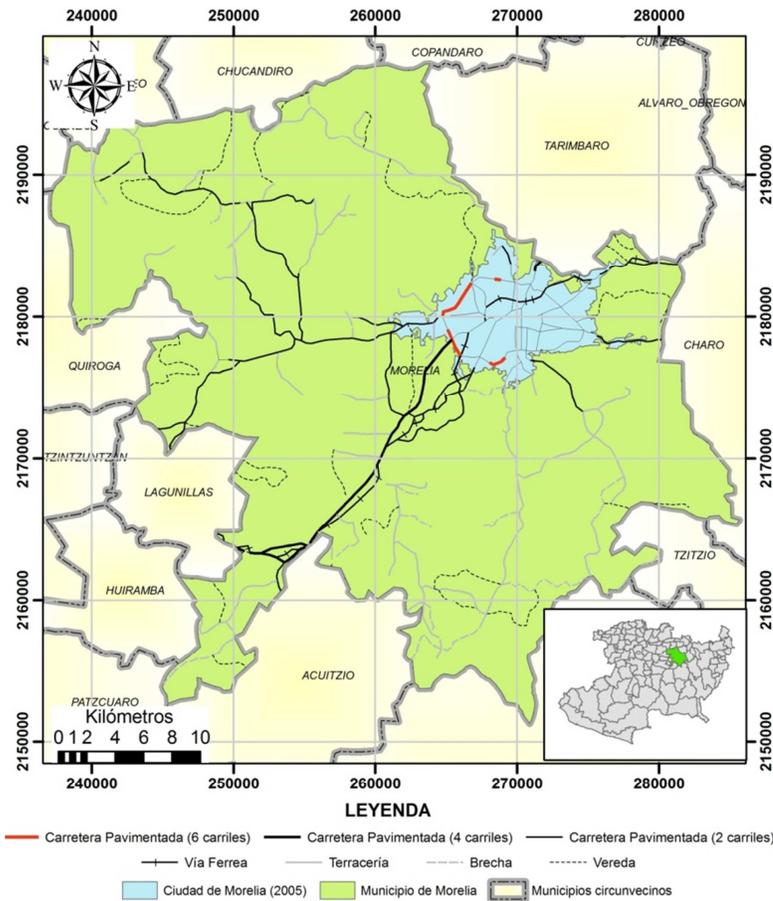


Figura 11.- Localización del área de estudio. Infraestructura vial y municipios colindantes.



## MAPA BASE



## IV ELEMENTOS DEL MEDIO NATURAL

### iv.a Fisiografía

La ciudad de Morelia se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, en la intersección entre dos provincias geológicas: en el sur se tiene la Sierra de Mil Cumbres (SMC) caracterizada por volcanismo miocénico; y en el norte la provincia del vulcanismo cuaternario del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), representado por los volcanes monogenéticos que dan lugar al campo volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985) o Corredor Tarasco (Garduño-Monroy, et al., 2004, figura 12).

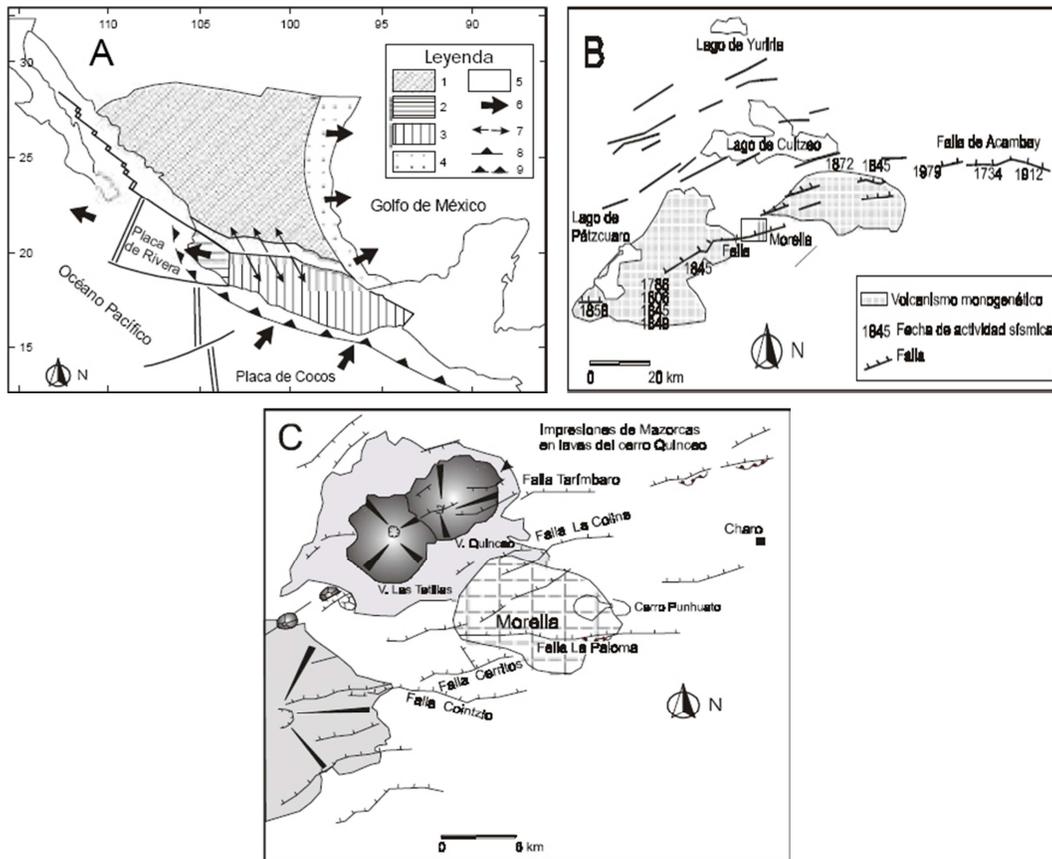


Figura 12.- A. Contexto geodinámico de México de acuerdo con el campo de esfuerzos que se registran con el movimiento de placas; 1. Placa de Norteamérica; 2. Bloque Jalisco; 3. Terrenos estratotectónicos de arcos volcánicos del sur de México; 4. Planicie Costera del Golfo; 5. Cinturón Volcánico Mexicano (CVM); 6. Movimiento relativo de placas; 7. Distensión en el CVM; 8. Zona de subducción; 9. Subducción en la Placa Rivera. B y C. Planos de localización de la zona de Morelia-Cuitzeo, donde se puede apreciar la importancia de las fallas geológicas NE-SW (Garduño-Monroy V.H. et al., 2001).



#### iv.b Geología

Con base en información litológica de pozos perforados en la ciudad de Morelia, del Mapa Geológico y del trabajo de campo, es posible identificar la estratigrafía del subsuelo en las siguientes unidades:

1. Andesitas de Mil-Cumbres (Mioceno medio-superior: >12 Ma)
2. Flujos piroclásticos ignimbríticos o *Cantera de Morelia* (Mioceno: 12 Ma)
3. Complejo volcánico del Cerro Punhuato (Mioceno)
4. Secuencia fluvio-lacustre (Mioceno-Plioceno)
5. Secuencia volcánica del Corredor Tarasco (Plioceno-Holoceno).

1. Andesitas de Mil-Cumbres del Mioceno medio-superior (>12 Ma). Esta unidad es caracterizada por un paquete de lavas andesíticas gris-verdosas intensamente alteradas y fracturadas con presencia de vetillas de calcita o bien de calcedonia (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 2004). Se encuentra aflorando en la cañada del Río Chiquito, en el sector sureste de la ciudad, donde flujos piroclásticos blancos y niveles soldados color vino sobreyacen las andesitas; en la zona de Ocolusen, se observan intercalaciones con brechas y productos piroclásticos alterados de color rojo-amarillo. El espesor de esta unidad no se conoce muy bien, ya que nunca ha sido atravesada por los pozos profundos. Sin embargo se les asigna un valor superior a los 200 metros (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 2004). Dentro todo el paquete de andesitas se observan texturas porfidicas, afiricas y vitreas.

2. Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (Cantera de Morelia). Se le denomina Cantera de Morelia a los productos piroclásticos de composición riolítica generalmente de color rosa, ricos en líticos de andesitas y pómez. Tiene un espesor máximo de 200m y se clasifica como una roca piroclástica denominada ignimbrita. Es posible subdividir esta unidad en varios horizontes, descritos de abajo hacia arriba (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004) (Figura 13):

- Brecha de rezago y flujos piroclásticos juveniles muy fracturados y alterados, de un espesor de más de 10 m, observables cerca del edificio volcánico de la caldera del Atécuaro. Este horizonte es bien visible en la carretera Atécuaro-Morelia y se presenta compuesto por lavas vítreas oscuras.
- Ignimbrita muy soldada de color rojo vino, aflorantes en la zona del Club Campestre. Además se observan interesantes *fiammes* oscuros y líticos.
- Ignimbrita blanca con presencia de grandes pómez, mal soldada. Aflora a lo largo del escarpe de la falla La Paloma.
- Delgada capa de un flujo de matriz arenosa con pómez amarillo claro de unos mm de diámetro



- Flujo piroclástico color rosa de líticos de andesita e ignimbritas en una matriz rica en pómez amarillo claro o blancas. Tiene un espesor de más de 40m y actualmente es la Cantera más usada en la construcción.

- Junto a la capa basal, esta es la capa más espesa de la unidad. Está compuesta por flujos piroclásticos blancos o grises con fragmentos de pómez grandes.

- En la zona de La Paloma se observa un nivel de flujos piroclásticos con matriz arenosa, pómez milimétrica de color claro, todo mezclado con clastos muy bien redondeados de tipo fluvial, donde se distinguen clastos de andesitas, dacitas e ignimbritas, sus diámetros vas de 1cm a 20cm.

- Ignimbrita color rojo o vino, muy soldada, con *fiammes* y líticos más oscuros. Con esta cantera se construyeron las obras civiles del siglo XVII (Israde y Garduño, 2004). Para este horizonte se ha estimado una edad de 12 Ma.

- Ignimbrita blanca con micas, líticos y fragmentos de pómez. Esta capa, más resistente a la erosión, se observa en la cima de la loma de Santa María y en las actuales obras del Tecnológico de Monterrey y, junto con la capa inferior, es la que controla la morfología del área de Morelia.

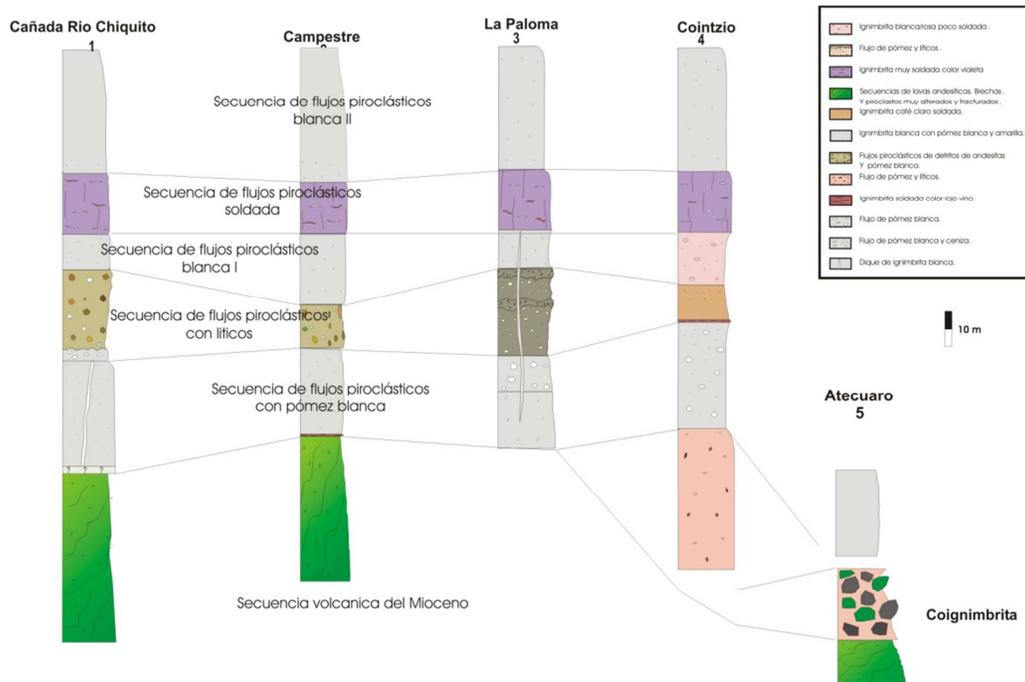


Figura 13. Columnas levantadas en los escarpes de las fallas E-O del sur de Morelia. En ellos se aprecia claramente las diferentes unidades de la cantera de Morelia y sus relaciones con las andesitas del Mioceno.



3. Complejo volcánico miocénico del Cerro Punhuato. Se trata de una secuencias de rocas constituida por derrames de lava y brechas andesíticas y dacíticas, a veces soldadas, que por su estructura y morfología se asocia a un complejo de domos. Este complejo presenta una estructura a herradura abierta hacia el Oeste y los productos asociados, considerados ser el material acumulado después de la destrucción del cono, forman un abanico al oriente de la ciudad, lo que evidencia una gran explosión lateral. A esta unidad se le asigna una edad ubicada adentro del Mioceno, considerando que subyace a los sedimentos lacustres del Mioceno superior-Plioceno (Israde-Alcántara I., 1995). En los cortes del camino a Tres Marias, se distinguen lavas andesíticas muy fracturadas, brechas de colapso de domos de tipo dacítica o andesítica, intercaladas a ellas flujos piroclástico. Afectando a estas unidades y a suelos recientes se observan fallas de dirección E-W. con planos subverticales.

4. Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno. Esta secuencia aflora en la parte sur y oriente de Morelia, donde está caracterizada por limos y arcillas; tiene un espesor, según los cortes efectuados por las perforaciones profundas, hasta de 60 metros, y presentan un basculamiento de 5° hacia el Sur. Por medio de análisis microscópicos de las diatomeas (algas constituidas por caparazón silíceo), se atribuye un nivel del lago muy bajo. Hacia la Huerta la secuencia se compone de cenizas volcánicas con matriz arcillosa alternadas con niveles arcillo-limosos. Todo esto está coronado por un depósito piroclástico de caída aérea y de color amarillo, llamado “Alegría” (Israde-Alcántara., 1995), que puso fin a la antigua zona lacustre de Morelia (Garduño-Monroy, 1999).

Hacia el libramiento norte y a la altura del Río Grande de observan conglomerados y niveles de arenas y limos, afectados por uno de los más importantes fallamientos de Morelia, la falla Nocupetaro. En la zona industrial, hacia la región de Charo, la secuencia fluvio-lacustre está caracterizada por arcillas, limos cafés y cenizas blancas y sobreyace a las brechas y lavas del complejo volcánico del Punhuato. Es aquí donde la secuencia presenta su máxima expresión. En la región de Charo a esta secuencia se le asigna una edad que abarca desde el Mioceno tardío hasta el Pleistoceno (Israde y Garduño, 1999; 2004). Considerando los fechamientos radiométricos en los productos volcánicos subyacentes y los restos de un *Rhincoterium* (elefante) y de un molar de un proboscidio de posible edad pleistoceno-holocénica. Hacia el norte de Morelia fragmentos de cerámica de la cultura Pirinea fueron encontrados en los flujos piroclásticos de pómez. Estos últimos flujos podrían provenir del centro volcánico de Las Tetillas y El Quinceo.

5. Secuencia volcánica holocénica del Corredor Tarasco. Es la unidad más reciente y corresponde a los productos del volcanismo monogenético del CVTM. Son lavas andesíticas y eventualmente andesítico-basálticas que provienen de los volcanes Quinceo, Las Tetillas o del Cerro El Aguila que, además, delinear morfológicamente la cima más importante de la ciudad de Morelia. El aparato de



estos volcanes tiene una base de 10 km de diámetro y más de 800 metros de altura (la punta del volcán El Quinceo se encuentra a 2720 m s.n.m. mientras que la sub-cuenca tiene una altura de 1980-1990 m s.n.m.).

El volcán El Quinceo fue fechado en 500,000 años y ha tenido reactivaciones en los últimos 10,000 años (Holoceno), como lo demuestran impresiones de mazorcas de maíz encontradas en las cercanías de la hacienda de la Magdalena (norte de la ciudad) (Martínez y Hobson, 1907). El volcán Las Tetillas, por las evidencias cartográficas, morfológicas y estructurales, es más joven que el volcán El Quinceo, ambos son de tipo escudo y además, presenta una colada que cubre el sector norte del Quinceo. En el sector de Tarímbaro, tanto las lavas del Quinceo como las de Las Tetillas están afectadas por fallas (falla Tarímbaro) con dirección E-O y ENE-OSO. Dentro de este vulcanismo se encuentra el cerro El Águila, que también es un volcán tipo semiescudo, también desplazado por fallas E-O.

#### *iv.c Geomorfología*

El relieve de la ciudad de Morelia está integrado por un sistema de mesas alargadas en la dirección E-O, originadas por la deposición de depósitos piroclásticos provenientes de la Caldera de Atécuaro, esta última localizada en el sector meridional del municipio de Morelia. Estas geoformas tabulares se encuentran inclinadas o basculadas hacia el sur, y son delimitadas por fallas geológicas de tipo normal con ligero componente lateral izquierdo?. Las depresiones definidas por el basculamiento de estos bloques de falla, constituyen en la actualidad un conjunto de valles conformados por depósitos lacustres y fluvio lacustres, sujetos a un proceso de subsidencia como consecuencia de la sobre explotación de los acuíferos. En los sectores oeste, noroeste y este de la ciudad, predomina un relieve a base de rampas asociadas a flujos de lavas y piroclástos, provenientes de los volcanes el Quinceo y el Punhuato.



# MAPA GEOLOGICO



#### *iv.d Hidrología y Geohidrología*

La ciudad de Morelia se localiza en una microcuenca del sector SO de la gran cuenca endorreica de Cuitzeo (ver mapa de Cuenca de Cuitzeo). Por la morfología, geología y régimen de precipitación de esta microcuenca, se estima que en ella existen tres zonas principales de recarga acuífera: a) Complejo volcánico formado por los cerros La Taza, Zoromutaro y Burro, localizado en el sector más meridional de la cuenca de Cuitzeo y del Municipio de Morelia; es fuente importante de agua para el corredor agrícola Lagunillas-Tiripitio-Morelia, y punto de nacimiento del Río Grande de Morelia. b) Cerro el Águila localizado al SO de la mancha urbana de Morelia; en la falda oriental de esta estructura se localiza el manantial Mintzita, uno de las fuentes de agua potable más importantes de la ciudad. c) Microcuenca del Río Chiquito de Morelia localizada al sur de la ciudad, significa la segunda fuente importante del recurso hídrico para la ciudad. Constituye además, la zona de reserva ecológica más próxima a la mancha urbana de Morelia, con relictos de bosques de pino, pino-encino y bosques modificados de eucaliptos. Que están siendo seriamente amenazados por el crecimiento desmedido de la ciudad.

A una escala más local, en la ciudad de Morelia se presentan dos patrones principales de escurrimiento superficial (ver mapa de hidrografía). En las faldas de los cerros el Quinceo (noroeste), Punhuato (este) y Caldera de Atécuaro (sur), el escurrimiento es de tipo radial típico de un terreno volcánico. Al llegar a la ciudad, este escurrimiento superficial es confinado a dos ríos-canales principales: a) Río Chiquito de Morelia, que nace al sur de la ciudad en el sector occidental de la Sierra de Mil Cumbres con una dirección inicial de flujo en el sentido S-N, que al llegar a la ciudad de Morelia se modifica a la dirección NO hasta desembocar en el río Grande. b) Río Grande de Morelia, nace en el sector más meridional de la cuenca de Cuitzeo y al llegar a la ciudad de Morelia fluye en dirección SO-NE, con una dirección preferencia hacia el este a su salida de la ciudad. Su trayectoria continúa por varios de los municipios que colindan al este con Morelia hasta desembocar en ese gran cuerpo de agua que es el Lago de Cuitzeo.



## CUENCA DE CUITZEO



# HIDROGRAFIA



## V ELEMENTOS SOCIALES

### *v.a Dinámica demográfica*

Con base en los registros de censos de población, realizados primero por la extinta Dirección/Departamento General de Estadística (DGE, 1898, 1900, 1918, 1921, 1935, 1943, 1952, 1963, 1971), y posteriormente por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 1990, 1995, 2000, 2005 y 2010) (Figura 14); se tiene que la población de la ciudad de Morelia presenta dos etapas de crecimiento. Hasta antes de 1950 el número de habitantes se mantuvo por debajo de los 60,000 individuos; registrándose incluso un decrecimiento en el censo de 1921 (31,148 hab, decremento del 8.894) debido posiblemente a las defunciones y emigraciones asociadas a la guerra de la Revolución Mexicana. A partir de 1950, año que significa un punto de inflexión en el crecimiento poblacional de la ciudad, la población de Morelia comienza desarrollarse de manera acelerada, con tasas de crecimiento del 44 al 60% registradas entre 1960 y 1990.

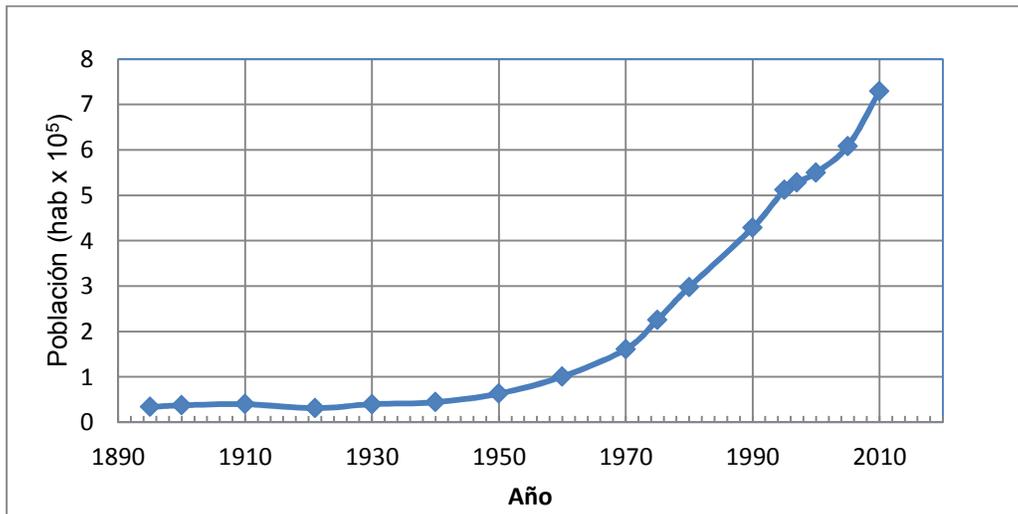


Figura 14.- Curva del crecimiento poblacional de la ciudad de Morelia, obtenida a partir de los censos de población realizados por la DGE y el INEGI.

De acuerdo con el censo de población del 2010 (INEGI, 2010), Morelia registra 729,279 habitantes. Por lo que, desde el punto de vista del riesgo geológico, dicho crecimiento significa: una mayor demanda del recurso hídrico que se traduce en mayor explotación o sobreexplotación de los mantos acuíferos y mayor subsidencia o hundimiento de la superficie de Morelia; y mayor potencial de riesgo debido a que es probable que se incremente el número elementos (población) expuestos a los peligros de subsidencia creep-falla, inundaciones y procesos gravitacionales de remoción en masa (deslaves).



## VI FALLAS GEOLOGICAS DE MORELIA

### vi.a Actualización cartográfica

Como resultado de recorridos y mediciones hechas en campo para la cartografía de la trayectoria de las fallas geológicas de Morelia, tomando como referencia la planimetría y topografía contenidas en el mapa base. Se tiene que la ciudad de Morelia es afectada por 13 fallas geológicas, las cuales se detallarán a continuación de sur a norte:

- **Falla (F) Cerritos.** De tipo normal con techo y piso al norte y sur, respectivamente, presenta una dirección ONO-ENE y un escarpe de hasta 30m de altura. El proceso de subsidencia creep-falla que actualmente se registra en ella, presenta una longitud de 5,670m (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector SO). Debido a que el desarrollo urbano sobre sus márgenes y trayectoria es incipiente aún no se registran afectación en viviendas. Sin embargo, vialidades importantes como la carretera federal que conduce a la ciudad de Pátzcuaro ya es afectada y en consecuencia tiene que estar en continuo mantenimiento.

- **F La Paloma** con dirección E-W se localiza en el sector sur de la mancha urbana de Morelia. Esta estructura de tipo normal, presenta su techo y piso al norte y sur, respectivamente. Su escarpe, que corta a depósitos piroclásticos sobreyacentes a derrames andesíticos (previamente descritos), presenta una altura de hasta 200m de altura (medida en el Club Campestre), y una longitud de 9,100m (Mapas de Fallas Geológicas de Morelia, sectores: SE y SO). Por presentar rompimiento de suelos con restos de cerámica de la cultura Pirinda, y además, con base en estudios recientes de paleosismología, esta falla se considera como sísmicamente activa. En la actualidad, el proceso de subsidencia creep-falla que se desarrolla sobre ella, está provocando numerosas afectaciones a viviendas e infraestructura pública en general. Las figuras 15 y 16 dan cuenta de ello.

- **F. Torremolinos.** Esta estructura corresponde a una falla netamente asociada al proceso de subsidencia regional que afecta a toda la ciudad de Morelia. Presente una dirección ENE-WSW con desniveles máximos de 1m en Av. Periodismo (frente al hotel Torremolinos, de ahí su nombre) y longitud de 1,900m. (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector SO)

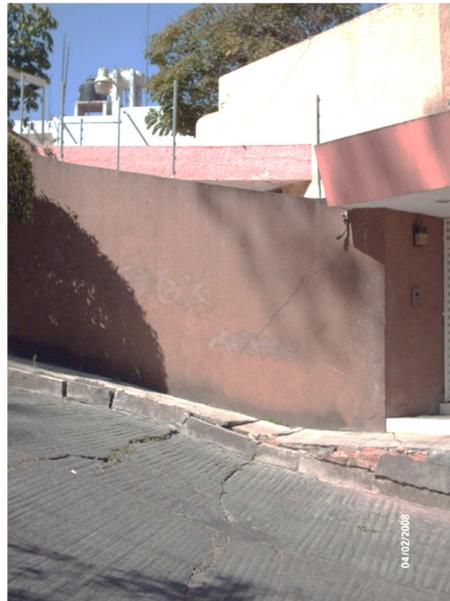
- **F. Viveros.** Estructura que inicia a manifestarse en el 2004, presenta una dirección paralela a la F Torremolinos pero con techo y piso al sur y norte, respectivamente. Es decir el bloque que se hunde se localiza al sur, razón por la cual consideramos sea una falla antitética a la F Torremolinos. Su afectación se centra en la colonia Viveros, de ahí toma su nombre, provocando el agrietamiento



de pavimentos, pisos y muros (Figura 17). (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector SO).



*Figura 15.- Afectación en red de drenaje e infraestructura urbana a consecuencia del asentamiento diferencial asociado a la falla La Paloma. La imagen corresponde al sitio conocido como “Las escaleras” en el sur de la ciudad.*



*Figura 16.- Efecto de la subsidencia creep-falla La Paloma en casa habitación y pavimentos. Es obvia una afectación en la red de alcantarillado y agua potable.*





Figura 17.- Pavimento y casa-habitación cortados por la falla Viveros.

- F. Chapultepec, con un desarrollo longitudinal de 1,025m, se presenta paralela a la F La Paloma. Su techo y piso se localizan al sur y norte, respectivamente, (similar a la falla Viveros), por lo que se presume sea una falla antitética a la F La Paloma. Su afectación se centra en las colonias Chapultepec Norte, Chapultepec Sur y Chapultepec Oriente (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector SE).
- F. Cuautla, con una longitud discontinua de 825m, presenta una dirección ENE-OSO, y un desnivel máximo de 70cm en la Av. Cuautla (de ahí su nombre). Esta estructura comienza afectar el sector oriente del Panteón Municipal, y es posible que en el futuro próximo se una a la F Mirasoles (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector SE).
- F. Mirasoles, se localiza al poniente del Panteón Municipal y Ciudad Universitaria, desarrollando un longitud de 457m, con techo y piso al norte y sur, respectivamente (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector SE).
- F. Manantiales y F. La Colina. Aunque en la actualidad estas dos fallas geológicas se observan separadas por un pantano, su trayectoria es la misma y se espera que en el futuro formen una sola estructura continua. Ambas suman una longitud total de 7,657m (5,081m Manantiales y 2,576m La Colina), Estas dos estructuras son parte de las fallas geológicas que más daño han ocasionado al desarrollo urbano de la ciudad, pues basta recordar que a causa de sus efectos se demolieron dos edificios de departamentos y varias viviendas duplex del



INFONAVIT Los Manantiales (de ahí el nombre de una de ellas). Debido a que estas estructuras afectan a depósitos de lava con improntas de mazorcas, se consideran, al igual que la Falla La Paloma, como sísmicamente activas (Mapas de Fallas Geológicas de Morelia, sectores NO y SO)

- F. Nocupétaro, con dirección NE-SW y una longitud de 3,081m, es la primera estructura que empezó a presentar problemas de subsidencia en la ciudad. El extremo oriente de esta falla se localiza en la Colonia Obrera, afectando en su trayectoria hacia el occidente, a edificios importantes e históricos como el predio donde se localizaba antiguamente la industria aceitera “Tron Hermanos”, Antigua Central de Autobuses (hoy estacionamiento público), edificio de Urgencias médicas del IMSS, y Palacio de Justicia, este último construido hace 7 años aproximadamente (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector NE)

- F. La Soledad, su traza presenta una longitud de 2,193m con una trayectoria que varía en las direcciones NE-SW y E-W (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector NE)

- F. El Realito, con longitud de 5,781mm presenta una dirección NE-SW, afectando tanto a depósitos del Quinceo como a depósitos lacustres y flujos piroclásticos (Mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sectores NE y NO)

F. Puerta del Sol. Esta estructura geológica se localiza en el fraccionamiento “Puerta del Sol”, del cual toma el nombre, ubicado en el sector sur del municipio de Tarimbaro, casi en límite con el municipio de Morelia. Con base en mediciones y observaciones directas, hechas en campo el día 11 de noviembre del 2009, se tiene que esta estructura corresponde a una falla normal con posible componente lateral (estudios en proceso analizan esta posibilidad), con dirección NE 57°, cuyo bloque caído o techo se encuentra al NNW y el bloque en alto o piso al SSE; es decir, la zona que se hunde es aquella que se encuentra al NNW de la línea de falla. Lo anterior permite evidenciar que esta estructura pertenece al sistema de fallas Morelia-Acambay, con dirección preferencial E-W, y que han afectado intensamente a la zona urbana de Morelia. Actualmente esta estructura tiene una longitud de 170m, y afecta de forma oblicua a las vialidades del fraccionamiento Puerta del Sol: Sierra de Pichataro, Sierra de Tlalpujahuá y Sierra de Yoricostio. En el área afectada se observa un hundimiento mínimo aproximado de 10cm hacia el oriente de la falla (calle Sierra de Pichátaro), y un máximo de entre 30 a 40cm en el extremo oriente de la falla (calle Sierra de Yoricostio) (mapa de Fallas Geológicas de Morelia, sector NE).



# MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA SECTOR SE



# MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA SECTOR SO



# MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA SECTOR NE



# MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA SECTOR NO



## vi.b Monitoreo de la subsidencia.

Uno de los elementos fundamentales para el estudio del Proceso de Subsidencia Creep-Falla, es el monitoreo y evaluación de las tasas de hundimiento o tasas de subsidencia. Para tal fin, en la mancha urbana de Morelia se diseñó la Red Urbana de Monitoreo de Subsidencia, integrada por testigos permanentes o puntos de control, sobre los cuales se realizan periódicamente mediciones geodésicas para la obtención de los valores de posición X, Y, y Z (coordenadas en la proyección UTM, zona 14n y datum WGS84). Estos datos significan un insumo invaluable en el análisis de la evolución temporal y espacial de la subsidencia, así como en la identificación de zonas urbanas con valores máximos de subsidencia (zonificación de la subsidencia).

La red de monitoreo utilizada para este trabajo está constituida por 47 puntos de control distribuidos estratégicamente en toda la mancha urbana (Figura 18), las cuales fueron colocadas por el Departamento de Geología y Mineralogía del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, e iniciado su monitoreo desde el 2005. En los próximos días se colocarán 20 puntos más para tener un total de 67 puntos de control; cantidad que rebasaría el número comprometido en este proyecto. Dichos puntos de control están constituidos por pijas que se colocan en guarniciones, banquetas, bases de monumentos, y losas de azotea. Preferentemente alejados de rasgos urbanos que interfieran en la recepción de la señal GPS. Es decir, se evitan puntos geográficos próximos a: jardines con árboles altos y frondosos, edificios altos (más de dos niveles), calles estrechas flanqueadas por edificaciones altas (cañones urbanos) y líneas eléctricas de alta tensión. El equipo empleado para la medición geodésica fue integrado por: Dos receptores de la señal NAVSTAR-GPS (*NAVigation System Time and Ranking-Global Position System*), marca Leica, modelo SR500, de doce canales y dos bandas (L1 y L2) de recepción. Dos antenas microstrip L1/L2, modelo AT502, con plano de tierra integrado. Dos terminales del receptor, modelo TR5000. Y dos tripies de madera con brida montada en base nivelante (Figura 3).

El monitoreo se realizó en dos etapas principales: El trabajo de campo se realizó en la primera de ellas, y consistió en la medición (no corregida) de coordenadas UTM de cada uno de los puntos de control, mediante levantamiento GPS con la técnica Estático Rápido. Esta técnica consiste en la medición simultánea de dos puntos denominados base y móvil. El punto base se coloca en un sitio en donde el terreno es relativamente estable, y el punto móvil corresponde a cualquiera de los puntos de control que integran la red de monitoreo. El tiempo de ocupación GPS en el punto de control, es función de la distancia entre éste último y el punto base (línea base). En general, para cada uno de los puntos de control se tuvieron 20 minutos como tiempo mínimo de ocupación. En la segunda etapa se realizó el posprocesamiento de las medidas obtenidas en campo, implementándose una corrección de tipo diferencial mediante el uso del software SKI-Pro de Leica



Geosystems, en el cual se compararon época a época los datos capturados en la base con respecto a los obtenidos en el punto móvil, para obtener así las diferencias a ser consideradas en los valores X,Y y Z.

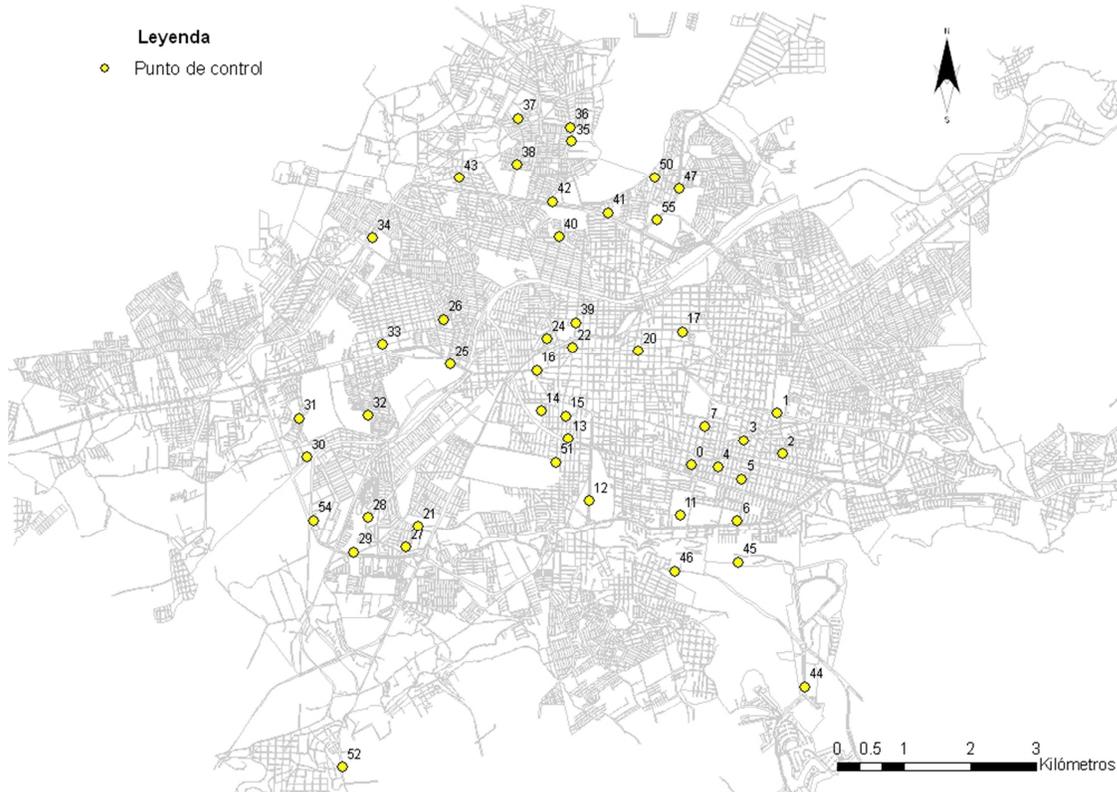


Figura 18.- Ubicación de los puntos de control que integran la Red Urbana de Monitoreo de Subsistencia en la Ciudad de Morelia.

Es importante mencionar que en ésta última etapa, y previo a la corrección de lecturas tomadas por el receptor móvil, se utilizó una corrección diferencia en el punto base a partir de los registros GPS hechos por la estación TOL2 (ubicada en Toluca, Edo. Mex) de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) instalada por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

### Resultados

Los datos del geoposicionamiento efectuado a finales de este año, como parte de las actividades del presente proyecto, se compararon con las lecturas de la primera campaña de monitoreo realizada en el 2005, para determinar los desplazamientos que sufrieron los testigos permanentes en ese lapso de tiempo; en la figura 19 se muestran los resultados obtenidos.



No.	Nombre	Coordenadas		
		X (m)	Y (m)	ΔZ (mm)
0	Base	271378.2010	2178619.8013	-32.50
1	Venustiano Carranza	272676.7708	2179397.8288	-12.60
2	Fantasma Figueroa	272751.5990	2178780.7192	13.30
3	Glorieta Peña y Peña	272179.7258	2178991.9844	-4.30
4	SEDESOL	271781.8782	2178577.4827	-5.60
5	Secundaria "Santos Degollado"	272146.7779	2178402.4639	-17.50
6	IMSS Camelinas	272073.5557	2177778.0907	-79.90
7	Cruz Roja (Ventura Puente)	271587.0894	2179198.6561	-14.90
11	Centro de Convenciones	271215.1449	2177863.5237	-25.50
12	Zoológico	269850.3585	2178080.5060	-52.60
13	Cancha de Básquet (Av. Solidaridad)	269530.6898	2179020.0862	-28.50
14	Unidad Deportiva IMJUD	269118.5276	2179439.8153	-18.30
15	Comercial Mexicana Centro	269494.2254	2179356.5710	-42.40
16	Obelisco Niños Héroes	269060.3049	2180047.2438	9.60
17	Deportivo 1° de Mayo	271249.3053	2180632.1475	-14.60
20	Templo San José	270576.7010	2180339.4394	-51.90
21	Cinepolis La Huerta	267262.5992	2177693.5510	-48.60
22	Guadalupe Victoria vs Santiago Tapia	269592.5044	2180385.7626	9.80
24	Glorieta Av. Michoacán	269208.9141	2180520.2371	-125.60
25	Aurrera Av. del Pedregal	267755.1018	2180137.3507	-57.80
26	Mercado Av. del Pedregal	267650.4774	2180815.1367	-109.60
27	Centro Estatal de Estudios Municipales	267088.8295	2177377.5669	-47.60
28	Deportivo INDECO	266512.7599	2177827.4113	-32.10
29	Protección Civil del Estado	266296.6688	2177302.6831	-24.40
30	Jardín Manantiales	265587.6991	2178733.0271	-53.20
31	Obras Públicas del Municipio	265474.3467	2179326.4117	-121.90
32	López Mateos	266517.0323	2179370.0318	-30.60
33	La Corona (Av. Madero Poniente)	266731.3631	2180434.6420	-129.30
34	Central Camionera	266575.3566	2182048.4783	21.50
35	Gasolinera (Camino a Torreón Nuevo)	269570.7335	2183504.4577	-31.90
36	Super 10 (Camino a Torreón Nuevo)	269567.1613	2183709.9124	-165.70
37	Fin del pavimento	268781.9612	2183848.5268	-181.80
38	Jardín	268757.8374	2183153.4808	-67.40
39	CFE Colonia Industrial	269639.7251	2180764.5583	-147.00
40	NADRO	269399.4504	2182058.6384	-10.60
41	Cancha	270122.6943	2182424.8023	-32.50
42	Gasolinera Cantera	269300.5946	2182590.0627	-9.90
43	El Realito	267896.0181	2182951.1692	-201.20
44	Tec de Monterrey	273091.0737	2175276.1551	-8.30
45	La Bandera	272087.6567	2177147.3132	-4.20
46	Valladolid Prepa	271138.1419	2177016.4773	-12.90
47	Pebellón Don Vasco	271209.2305	2182783.5414	-38.90



50	Hacienda La Soledad	270829.3224	2182956.6092	-68.90
51	Radio Nicolaita	269339.0700	2178654.8936	-30.90
52	UNAM	266123.8257	2174066.5729	-18.50
54	Barandilla	265687.5466	2177789.4066	5.50
55	Tecnológico de Morelia	270873.1839	2182317.9845	-32.10

*Figura 19.- Tabla que muestra el geoposicionamiento de la red de testigos permanentes de la Ciudad de Morelia. Los renglones en rojo representan puntos con hundimiento por encima de 10cm al año, y los amarillos con valores de entre 5 y 10cm por año. Nota: las coordenadas están en la proyección UTM 14 Norte.*

En la tabla anterior, la tercera columna de las coordenadas ( $\Delta Z$ ) muestra el hundimiento total, en milímetros, registrado en cinco años para cada uno de los puntos de control considerados. Como puede observarse, el hundimiento (valor numérico negativo) se presenta en el 91% del conjunto de puntos, con valores de subsidencia que van de los 4 mm (.4cm) a los 201mm (20cm). Los puntos de mayor hundimiento, por encima de 10mm, se localizan en la Av. Michoacán, Av. del Pedregal, Obras Públicas del Municipio, La Corona (Av. Madero Poniente), Camino a Torreón Nuevo, CFE de Colonia Industrial y El Realito; en correspondencia con las fallas geológicas de mayor desplazamiento vertical: La Colina, Manantiales, Nocupétaro y El Realito, respectivamente.

En la figura 20 se muestra la distribución espacial de los puntos de control, agrupados en cinco clases de acuerdo al siguiente rango de subsidencia media anual: 0-5mm (Nulo), 5-15mm(Bajo), 15-25mm(Medio), 25-35mm(Alto), >35mm(Muy alto). La primera clase se considera nula debido a que cae en el rango de error del equipo GPS. Con base en lo anterior, se identifica una relación entre el hundimiento del terreno y la ubicación espacial de los puntos de control. Es decir, los valores máximos de hundimiento se localizan en el sector norte de la mancha Urbana de Morelia, valores medios y altos en el sector central (col. Industrial y Av. Nocupetaro) y valores bajos en el sector sur de la ciudad (Av. Cuautla y col. Chapultepec.)



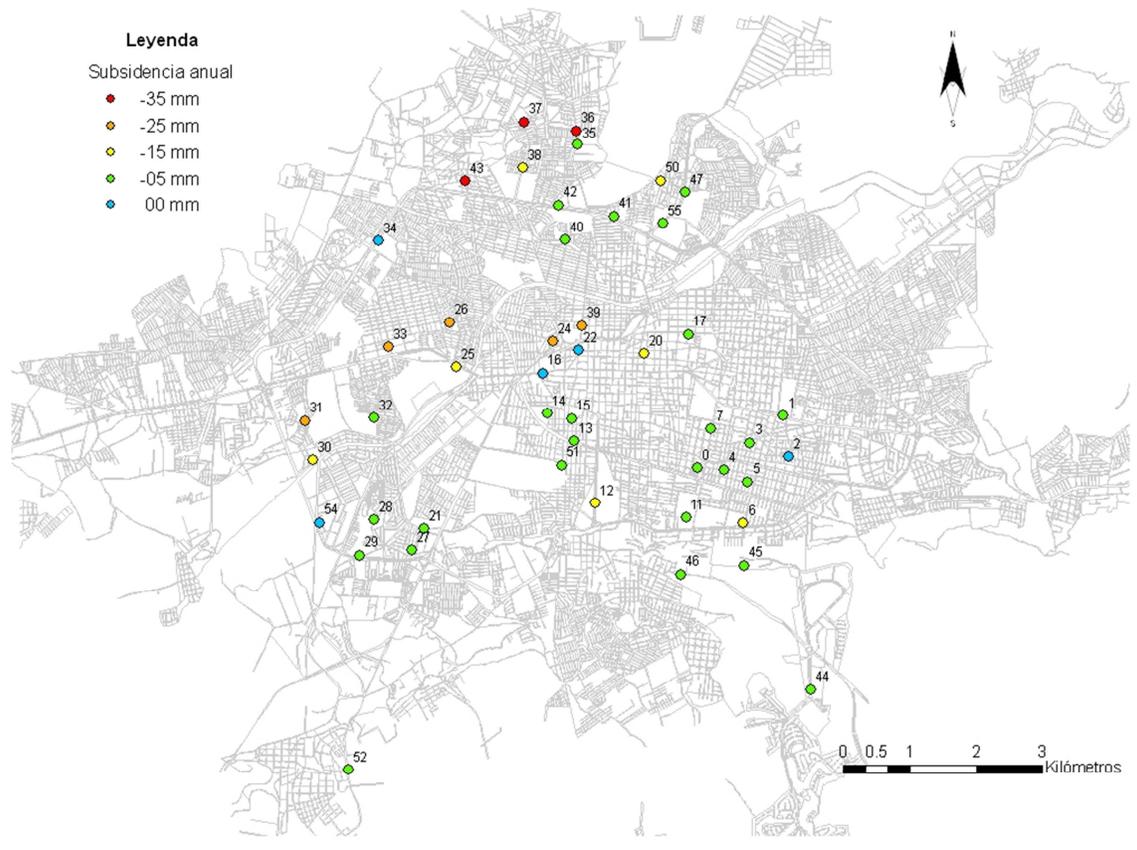


Figura 20. Tasa anual de subsidencia de la red de testigos permanentes de la Ciudad de Morelia.



## vi.c Modelo Continuo de Subsistencia (MCS)

En el área de estudio se determinó el Modelo Continuo de Subsistencia (MCS) a partir de la técnica InSAR (**I**nterferometría de imágenes de **R**adar de **A**pertura **S**intética). Esta es una técnica que conjuga la percepción remota con la geodesia, y consiste en determinar el patrón de interferencia que se genera por la diferencia de fase entre dos imágenes de la misma zona, tomadas por un radar de apertura sintética montado ya sea sobre un aeroplano o en el mejor de los casos sobre un satélite, en instantes diversos.

La técnica interferométrica permite determinar deformaciones de la superficie terrestre como las que generan los sismos, las erupciones volcánicas, los procesos gravitacionales de remoción en masa, la subsidencia, el movimiento de glaciares; así como también, las perturbaciones que se generan en la atmósfera. Además, bajo ciertas condiciones específicas, puede ser capaz de identificar modificaciones dieléctricas en el suelo.

La interferometría comenzó a emplearse a principios de los años 90 cuando el satélite ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite 1*) provisto de una antena SAR (Radar de Apertura Sintética), además de otros instrumentos, fue puesto en órbita en el año de 1991 por parte de la Agencia Espacial Europea (ESA). Las primeras aplicaciones relacionadas con los diferentes tipos de subsidencia aparecieron a mediados de los 90's (Carnec, *et al.*, 1996; Massonnet, *et al.*, 1997; Amelung, *et al.*, 1998).

### *Metodología*

La interferometría es conceptualmente posible a través de sensores de radar a bordo de plataformas (aeroplanos, helicópteros, etc.); sin embargo, las dificultades que se presentan para repetir las trayectorias limita la aplicación de dicha técnica, ya que es una condición fundamental que las imágenes sean tomadas desde el mismo punto de observación o en su defecto con un ligero desfase de unos cuantos metros. Por lo anterior, se prefiere el empleo de satélites ya que estos siguen trayectorias orbitales previamente establecidas.

Para llevar a cabo el monitoreo de los hundimientos que se presentan en la Ciudad de Morelia por medio de la interferometría, se adquirieron a través del portal de Internet de la ESA nueve imágenes ASAR (imágenes Avanzadas de Radar de Apertura Sintética), las cuales fueron tomadas por el satélite ENVISAT (*Earth Observation ENVironmental SATellite*) que fue puesto en órbita en el año 2002. Dicho satélite tiene un ciclo orbital de 35 días, lo que significa que es posible obtener imágenes de la zona de estudio con un espacio temporal de un poco más de un mes, por lo que se puede realizar un monitoreo de la subsidencia con la periodicidad que se requiera.



Las escenas que se obtuvieron cubren un espacio temporal que comprende del 12 de Julio del 2003 al 27 de Mayo del 2006. Dichas escenas se adquirieron en Modo de Imagen S2, lo que quiere decir que el ángulo de visión de la antena montada en el satélite es  $\theta = 20.8^\circ$  con respecto a la vertical, y que la franja que cubre cada imagen es de 100 Km. Presentan una polarización vertical y fueron tomadas a lo largo de orbitas descendentes. En la figura 21 se presenta la información de las imágenes que se emplearon para llevar a cabo el análisis interferométrico.

Órbita	Fecha
7137	12/07/2003
7638	16/08/2003
14151	13/11/2004
14652	18/12/2004
17157	11/06/2005
18159	20/08/2005
19662	03/12/2005
20664	11/02/2006
22167	27/05/2006

Figura 21.- Tabla que muestra la nomenclatura de las Imágenes ASAR del satélite ENVISAT adquiridas.

Las imágenes SAR contienen datos tanto de la amplitud como de la fase de las ondas electromagnéticas que emite y recibe el sensor. La fase señalada contiene la información geometría de la imagen, incluida la contribución que se debe a los desplazamientos; el proceso interferométrico consiste en eliminar todas las demás contribuciones de la fase de la imagen – contribuciones orbitales, topográficas, atmosféricas, por inestabilidad del oscilador – por medio de la diferenciación de dos o más imágenes de la misma zona tomadas en diferentes tiempos.

La técnica interferométrica que se aplicó para eliminar las contribuciones de la fase de la imagen no deseadas es la que se denomina “interferometría diferencial de dos pasos”, en la cual se requieren dos imágenes SAR y un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Al tener dos escenas tomadas desde la misma posición se eliminan las contribuciones orbitales, estas contribuyen a la fase a medida que una imagen se desfasa con respecto de la otra. La función del MDE es simular una fase que corresponde a la topografía del área de estudio, para de esta manera sustraer la contribución topográfica. En lo que respecta a las contribuciones atmosféricas, estas se pueden eliminar trabajando con imágenes que no presenten un espacio temporal muy grande o que se hayan tomado en la misma época del año. La contribución que corresponde a la inestabilidad del oscilador no se puede determinar y por lo tanto tampoco eliminar.



EL proceso interferométrico se realiza por medio de una serie de algoritmos que son los en cargados de registrar tanto las imágenes SAR y el MDE, así como de llevar a cabo la diferenciación para determinar la contribución de la fase que se debe a los desplazamientos de la superficie terrestre. Para el presente estudio se empleó el software GAMMA desarrollado por la corporación Suiza *GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG*.

### *Resultados*

Los resultados de aplicar la técnica interferométrica fueron imágenes denominadas interferogramas, las cuales son una configuración de interferencias o franjas, que representan diferencias de fase entre las dos imágenes SAR procesadas. Dicha configuración de franjas contiene información de una determinada geometría. Para el caso del satélite ENVISAT cuyo sensor opera en la banda “C” con una longitud de onda  $\lambda = 5.6$  cm y una frecuencia  $f = 5.3$  GHz, una franja del interferograma representa un ciclo de fase, lo que corresponde a una deformación de 28 mm.

Para la elaboración de los interferogramas se emplearon varios pares interferométricos, los cuales son el resultado de combinar las diferentes imágenes adquiridas. En la figura 22 se presenta el interferograma derivado de las escenas 7137 y 14151 que corresponde a un espacio temporal de 490 días comprendido del 12 de Julio de 2003 al 13 de Noviembre de 2004. En dicha figura se observan franjas al NO de la ciudad, sobre el techo (o bloque bajo) de la falla geológica La Colina, así como también hacia el Norte, en el piso (o bloque en alto) de la falla El Realito.

Como se puede apreciar en la figura 22, la información que proporciona un interferograma es bastante ambigua debido a que está agrupada en ciclos de fase (franjas), por lo que comúnmente se prefiere someter al interferograma a un proceso conocido como “desenvolver la fase”, el cual permite convertir la información contenida en un interferograma, en datos de desplazamientos de la superficie terrestre del área que abarca las imágenes, desde la línea de visión del satélite.

En la figura 23 se muestra el mapa de desplazamientos derivado del interferograma 7137\_14151 (figura 22). Los desplazamientos que se observan en la figura señalada (ver escala de colores-hundimiento), corresponden al hundimiento de la superficie terrestre, desarrollada en el espacio temporal que comprende el par interferométrico del cual procede (del 12 de Julio de 2003 al 13 de Noviembre de 2004 – 490 días).

En la figura 23 se puede apreciar con mayor claridad las diferentes zonas de la ciudad donde se presentaron problemas de subsidencia: a lo largo de la traza de la falla La Paloma (en el bloque que se hunde), en los alrededores de Ciudad



Universitaria, en el bloque que se hunde de la falla Nocupétaro (Central Camionera) a la altura de la colonia industrial, en la zona del Meandro del Río Grande ubicado en el bloque que se hunde de la falla La Colina, en el espacio comprendido entre las fallas El Realito y La Soledad; en estas dos últimas zonas, los hundimientos alcanzaron valores de hasta 5 cm.

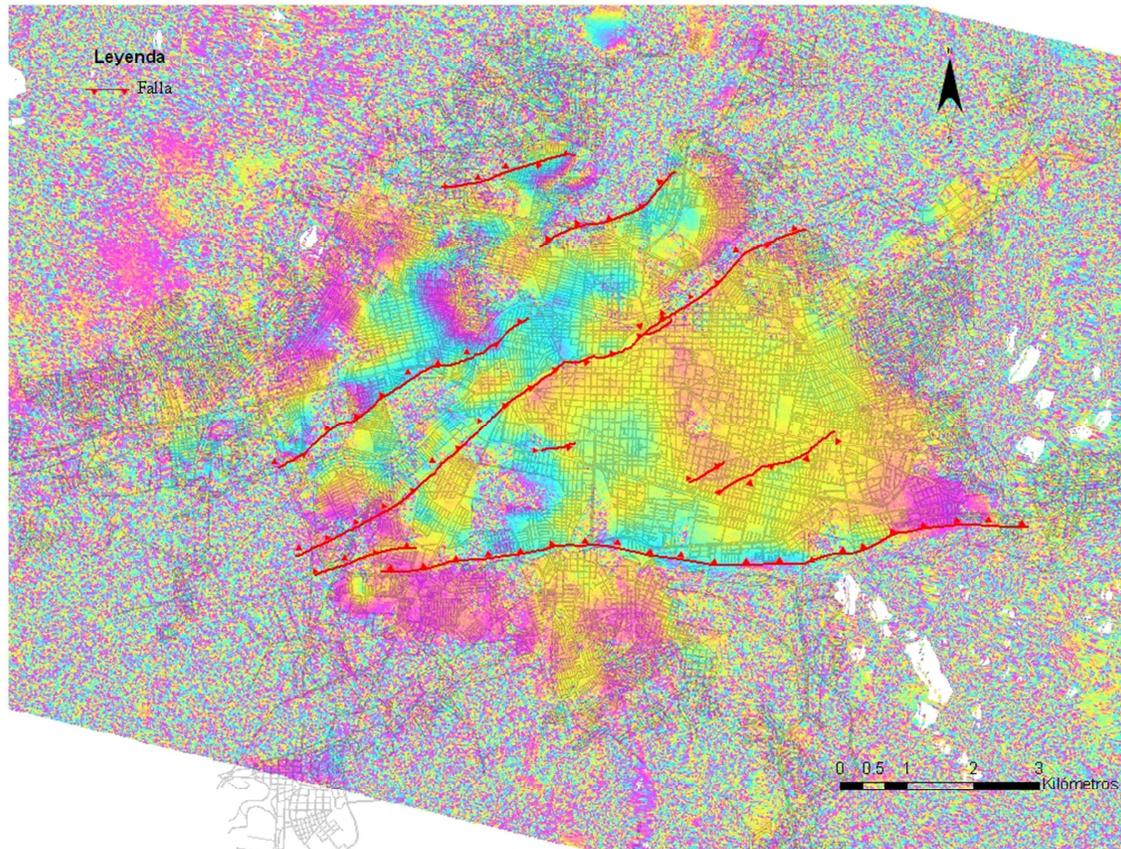


Figura 22. Inteferograma 7137\_14151 que cubre la Ciudad de Morelia.

Con el análisis tanto del resto de los interferogramas como de los mapas de desplazamientos, provenientes de los diferentes pares interferométricos conformados, y llevando a cabo una normalización de la información obtenida, se determinó que las zonas que presentan problemas de hundimientos en la Ciudad de Morelia, lo hacen a un ritmo entre 3 y 4 cm de hundimiento al año (tasa anual de subsidencia).



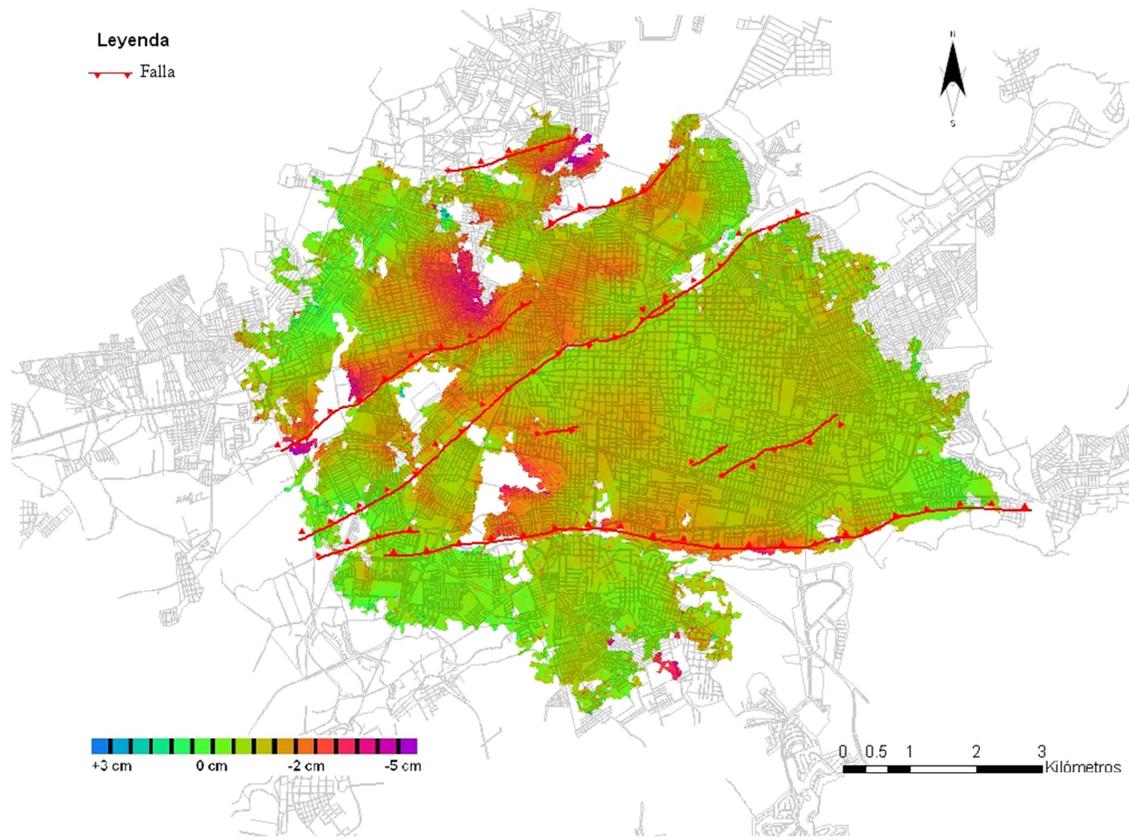


Figura 23. Mapa de hundimientos de la Ciudad de Morelia (12/07/2003 – 13/11/2004).

En resumen, el monitoreo geodésico que se realiza en la Ciudad de Morelia indica que la máxima tasa anual de subsidencia se presenta principalmente en el bloque que se hunde de la falla El Realito, con un hundimiento de 35 mm/año en el periodo comprendido entre los años 2005 - 2010. Dentro del área de máxima subsidencia se ubican las colonias Lago I, Solidaridad y Villas del Real.

Otras zonas que también requieren especial atención son: el bloque que se hunde de la falla Central Camionera en la porción comprendida ente el IMSS y la antigua central de autobuses, donde se localizan las colonias Melchor Ocampo, Industrial y El Porvenir; así como también el bloque que se hunde de la falla La Colina, principalmente a la altura de las colonias Guadalupe y Popular Solidario. En las zonas señaladas la tasa anual de subsidencia determinada en el periodo indicado es de 25 mm/año.

## REFERENCIAS

- Adrian OG, Rudolph DL and Cherry JA, 1999. "The analysis of long term land subsidence near Mexico City: field investigations and predictive modeling". *Water Resour Res* 35. Pp. 3327–3341.
- Alexander D, 1993. "Natural Disasters". UCL Press, 632 p.
- Avila-Olivera J A y Garduño-Monroy V H, 2008. "A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico". *Engineering Geology*.
- Crozier JM y Glade T, 2005. "Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach". En T Glade, M Anderson y M J Crozier (editores) "Landslide Hazard and Risk", John Wiley & Sons, Inglaterra. Pp. 1-40.
- Dirección de catastro del Municipio de Morelia (DCMM), 2005. "Altimetría/curvas de nivel a cada metro". Programa de actualización cartográfica del Municipio de Morelia.
- Dirección General de Estadística (DGE), 1898. "Censo General de la República Mexicana. Verificado el 20 de octubre de 1895". Secretaría de Industria y de Comercio.
- Dirección General de Estadística (DGE), 1900. "Censo General de la República Mexicana verificado el 28 de octubre de 1900". Secretaría de Industria y Comercio.
- Dirección General de Estadística (DGE), 1918. "Tercer Censo de Población de los Estados Unidos Mexicanos. Verificado el 27 de octubre de 1910". Secretaría de Agricultura y Fomento. Talleres gráficos de la Nación. Tomo I. 556 p.
- Departamento de la Estadística Nacional (DEN), 1927. "Censo General de Habitantes: 30 de noviembre de 1921". Estado de Michoacán. Talleres gráficos de la Nación. 44 p.
- Dirección General de Estadística (DGE), 1935. "Quinto Censo de Población, 15 de Mayo de 1930". Estado de Michoacán. Secretaría de la Economía Nacional. 55 p.
- Dirección General de Estadística (DGE), 1943. "Sexto Censo General de Población de los Estados Unidos Mexicanos: 6 de marzo de 1940". Michoacán. Secretaría de la Economía Nacional. 41 p.
- Dirección General de Estadística (DGE), 1952. "Séptimo Censo General de Población: 6 de junio de 1950". Michoacán. Secretaría Economía. 40 p.
- Dirección General de Estadística (DGE), 1963. "Octavo Censo General de Población: 8 de junio de 1960". Estado de Michoacán. Secretaría de Industria y de Comercio. 42 p.
- Dirección General de Estadística (DGE), 1971. "IX Censo General de Población: 28 de enero de 1970". Estado de Michoacán. Secretaria de Industria y Comercio. 42 p.
- Farina P, Ávila-Olivera JA, Garduño-Monroy VH y Catani F, 2008. "DInSAR analysis of differential ground subsidence affecting urban areas along the Mexican Volcanic Belt (MVB)". *Rivista italiana di Telerilevamento*. Pp. 103-113.

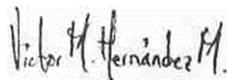


- Galloway D, Jones DR and Ingebritsen SE, 1999. "Land subsidence in the United States" U. S. Geological Survey Circular 1182, 117p.
- Gambolati G and Frezze RA, 1973. "Mathematical simulation of the subsidence of Venice: theory". Water Resour Res 9. Pp.721–733.
- Garduño-Monroy VH, Arreygue-Rocha E, Israde-Alcántara I y Rodríguez-Torres GM, 2001. "Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México". Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 18. N° 1. Pp. 37-54.
- González de Vallejo L I, Ferrer M, Ortuño L y Oteo C, 2002. "Ingeniería Geológica". Pearson Educación, Madrid, 2002. P. 744
- Hanson RT, Li Z and Faunt C, 2005. "Simulation of subsidence for the regional-aquifer system in the Santa Clara Valley, California". En Zhang AG, Gong SL, Carbognin L, Johnson AI (editores) "Land subsidence. Proceedings of the seventh international symposium on land subsidence", vol 2. Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai. Pp 616–627.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 1999. "Carta topográfica e14a23, Morelia, escala 1:50,000". Ed. INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 1995. "Fotografías aéreas a escala 1:75,000". Fecha de vuelo: febrero de 1995. INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 1990.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 1995.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2000.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2005.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2010.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1983. "X Censo general de población y vivienda, 1980". Estado de Michoacán. Vol. 1 tomo 16. 98p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1990. "XI Censo general de población y vivienda, 1990 (en línea)". INEGI 2010. <[http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?roy=cpv90\\_pt](http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?roy=cpv90_pt)>, consultado: 2 de Octubre del 2010.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1995. "Censo de Población y Vivienda, 1995 (en línea)". INEGI 2010. <[http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?roy=cpv95\\_pt](http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?roy=cpv95_pt)>, consulta: 2 de Octubre del 2010.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2000. "Censo general de población y vivienda, 2000 (en línea)". INEGI 2010. <[http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?roy=cpv00\\_pt](http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?roy=cpv00_pt)>, consultado: 2 de Octubre del 2010.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2005. "Censo general de población y vivienda, 2005 (en línea)". INEGI 2010. <[http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?roy=cpv05\\_pt](http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?roy=cpv05_pt)>, consultado: 2 de Octubre del 2010.



- Kreps G A, 2001. "Disaster, Sociology of". En N.J. Smelser and Paul B. Bates (editores.) "International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences". Amsterdam: Elsevier Publishing Company. Pp. 3718-3721
- López E, Mendoza M y Bocco G, 2004. "Cambio de cobertura vegetal y uso de terreno en la ciudad de Morelia y sus alrededores". En Garduño-Monroy (editor) "Contribuciones a la geología e impacto ambiental de Morelia", Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Vol 1. Pp. 106-115.
- Neuendorf K, Mehl Jr J y Jackson J, 2005. "Glossary of Geology". Fifth edition. American Geological Institute. 779 p.
- Phien-wej N, Giao PH and Nutalaya P, 2006. "Land subsidence in Bangkok, Thailand". Eng Geol 82. Pp.187-210.
- Poland JF, 1969. "Status of present knowledge and needs for additional research on compaction of aquifer Systems". Land subsidence. Proceedings of the Tokyo Symposium, September 1969. Pp. 11-21.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2007. "Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo". Gobierno Federal de México 2007-2012. 137p.
- Serva L y Brunamonte F, 2007. "Subsidence in the Pontina Plain, Italy". Bull. Eng. Geol. Env n° 66. Pp. 125-134.
- Therzaghi K, 1936. "The shearing resistance of saturated soils". Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1. Pp. 6-54.
- World Water Council, 2004. "Proceedings of the Workshop on Water and Politics: Understanding the role of Politics in Water Management". Marseille, 26-27 February 2004.
- Zhang AG and Wei ZX, 2005. "Land subsidence in China (in Chinese)". Shanghai Science and Technology Press, Shanghai, 240p.
- Zhang Y, Xue Y, Wu J, Yu J, Wei Z and Li Q, 2008. "Land subsidence and earth fissures due to groundwater withdrawal in the Southern Yangtse Delta, China". Environ Geol 55. Pp. 751-762.

ATENTAMENTE




---

Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal  
Departamento de Geología y Mineralogía  
IIM-UMSNH

Tel: 443 3223500 ext. 4011

Mail: vmhernan@umich.mx / vitorio\_manuel@yahoo.it

