

## EFFECTOS GEOLÓGICOS DE LA TECTÓNICA RECIENTE EN LA PARTE CENTRAL DE MÉXICO

Juventino Martínez-Reyes\* y  
Ángel Francisco Nieto-Samaniego\*

### RESUMEN

Los sismos intensos que en septiembre de 1985 conmocionaron al país motivaron el estudio del fallamiento de la porción central del Eje Neovolcánico Transmexicano. El área involucrada se localiza entre las ciudades de México y Guadalajara, extendiéndose a la altura del paralelo 20°N, entre los meridianos 99 y 103°W.

Los estudios emprendidos sobre el terreno y el análisis de la documentación cartográfica y bibliográfica correspondiente, permitieron la elaboración de mapas regionales de escalas diferentes, basados en cartas topográficas de escala 1:50,000 de CETENAL.

La estratigrafía de la región está representada por una secuencia volcánica del Oligoceno al Reciente, en la que predominan las rocas de composición intermedia. El volcanismo pliocénico-cuaternario es especialmente abundante.

Las estructuras de la región definen tres sectores: el oriental, con fallas que toman una orientación E-W, NE-SW o NW-SE; el central, donde la orientación está definida claramente de NE a SW, y excepcionalmente de N a S; y el occidental, en el que la orientación predominante es de E a W, con una tendencia ligera hacia el WNW.

Las fallas son normales, de decenas de kilómetros de extensión, con inclinación hasta de 80° y desniveles verticales de varias centenas de metros. Cortan a toda la secuencia estratigráfica, incluyendo las lavas del Cuaternario.

Las fallas forman, regionalmente, sistemas que definen fosas y pilares tectónicos de dimensiones considerables; las fosas tectónicas de Chapala, Penjamillo, Cuitzillo, Iramuco, Acambay y el pilar tectónico de Santa Ana Maya son, entre otros, ejemplos de las estructuras más relevantes de la región. Las características estructurales de las fallas de la región indican que esta parte del país ha estado sometida durante las últimas épocas geológicas a la acción de un régimen tectónico distensivo.

El fallamiento, el volcanismo y la sismicidad son fenómenos relacionados estrechamente con la actividad tectónica de la región. Sus manifestaciones geológicas actuales permiten clasificarla como una región tectónicamente activa.

Las fallas de esta parte del país pueden ser clasificadas como "fallas activas" o "fallas potencialmente activas", con manifestación sísmica importante. Una de estas fallas originó un sismo que es considerado como el de mayor magnitud registrado en las cercanías de la Ciudad de México. En consecuencia, los casos de agrietamiento en la región son numerosos. El fallamiento, el volcanismo y la sismicidad, que se manifiestan plenamente en la región de estudio, constituyen los efectos geológicos de la actividad tectónica más reciente de la parte central de México. La actividad actual de estos fenómenos representa la mayoría de los riesgos naturales (riesgos geológicos) para esta región y hacen de ella una zona de gran vulnerabilidad, en virtud de su densidad demográfica alta.

Palabras clave: neotectónica, riesgos geológicos, México central.

### ABSTRACT

Studies of faults in the central part of the Transmexican Volcanic Zone were initiated after the intense earthquakes that shook the country in September, 1985. The studied area extends between Mexico City and Guadalajara, following the 20°N parallel.

Review of literature and maps as well as field work allowed the elaboration of maps with different scales, using topographic maps, scale 1:50,000, from CETENAL as base maps.

Volcanic rocks of intermediate composition predominate in a sequence of Oligocene to Recent ages; Pliocene-Quaternary volcanism is particularly abundant.

Three sectors can be defined according to observed structural trends: an eastern sector, where faulting shows orientations E-W, NE-SW and NW-SE; a central sector, with NE-SW and scarce N-S trends; and a western sector, with a predominant E-W, slightly WNW, trend.

Normal faults occur along distances of tens of kilometers, with dips up to 80° and displacements of several hundred meters. They cut the whole sequence, including the Quaternary lavas.

Grabens and tectonic pillars are defined by regional fault systems. Chapala, Penjamillo, Cuitzillo, Iramuco and Acambay are good instances of graben structures, and Santa Ana Maya is a horst.

The structural characteristics of faulting in the region reveal an extensional regime during recent geologic epochs.

\*Estación Regional del Centro, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 376, 36000 Guanajuato, Gto.

Faulting, volcanism, and seismic activity are phenomena closely linked to tectonics in the region. Geologic evidence indicates that the region is active from the viewpoint of tectonics.

Existing faults in the region can be classified as "active faults" or "potentially active faults", with accompanying seismic manifestations. One of these faults caused an earthquake that has been considered to be the strongest in the surroundings of Mexico City. Earth fissures are numerous in the region.

Faulting, volcanism and seismicity are conspicuous in the studied region, and result from the most recent tectonic activity in central Mexico. They are natural phenomena of the highest potential hazard in the region which, due to its high density of population, becomes extremely vulnerable.

Key words: tectonics, geologic hazard, central Mexico.

## GENERALIDADES

### INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que la República Mexicana es tierra de temblores. Su ubicación actual dentro del marco de la tectónica global lo justifica plenamente. También es conocido que las principales zonas generadoras de movimientos telúricos en nuestro país están en relación directa con la zona de subducción del Pacífico, o con las zonas de fracturamiento cortical que lo bisectan en varias direcciones. Estas son regiones que poseen un potencial de sismicidad alto. Como lo muestra la geología, los sismos son solamente una de las manifestaciones de la actividad tectónica de una región. Esta actividad, sin embargo, no se da aislada, sino acompañada por fenómenos geológicos, tales como fallamiento y volcanismo.

En la República Mexicana existen regiones que, desde el punto de vista de esos fenómenos, son consideradas como zonas geológicamente activas. El Eje Neovolcánico Transmexicano, uno de los rasgos más característicos de la geología nacional, es sin duda una de ellas.

Motivados por los intensos sismos que conmocionaron al país en septiembre de 1985 y gracias al apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, se emprendió, en 1986, el estudio geológico de las fallas de la porción central del Eje Neovolcánico Transmexicano, una de las regiones más densamente pobladas de la República. El estudio estuvo enfocado especialmente a individualizar aquellas fallas que pudieran ser consideradas como activas o potencialmente activas, y que de alguna manera pudieran representar algún riesgo para la población civil, específicamente algún riesgo sísmico. Los métodos y técnicas utilizados en este estudio son aquellos que emplea la neotectónica. Se incluyó la fotointerpretación de la región a escalas de 1:25,000 y/o 1:50,000, el análisis de la cartografía topográfica de escala 1:50,000 (CETENAL, 1971a, 1971b, 1971c, 1972a, 1972b, 1972c, 1973a, 1973b, 1973c, 1973d, 1973e, 1973f, 1973g, 1973h, 1973i, 1974, 1975, 1976a, 1976b, 1977a, 1977b, 1978a, 1978b, 1978c, 1978d, 1980, 1981a, 1981b, 1982, 1988), la compilación bibliográfica y la investigación de la sismicidad histórica.

### LOCALIZACIÓN

La región de estudio se extiende a lo largo de unos 400 km, desde el Lago de Chapala, al poniente, hasta las inmediaciones de la Ciudad de México, al oriente; sus límites geográficos los constituyen aproximadamente las siguientes coordenadas: los meridianos 99 y 103°W y los paralelos 19°30' y 20°45'N. Incluye parte de los territorios de los estados de México, Michoacán, Querétaro, Guanajuato y Jalisco.

Desde el punto de vista fisiográfico, esta región pertenece a la Meseta Neovolcánica (Raisz, 1964), misma que corres-

ponde geológicamente al dominio del Eje Neovolcánico Transmexicano (López-Ramos, 1976).

Dentro de este contexto, el área de estudio queda ubicada en la porción central de esas provincias.

### ANTECEDENTES

La bibliografía existente es abundante y también un testimonio, ya que han sido numerosos los investigadores que se han ocupado del Eje Neovolcánico Transmexicano, ya sea desde un punto de vista global o de una perspectiva menos regional y más específica; sin embargo, muy pocos se han ocupado de esta región en particular.

Entre los estudios que de manera más directa interesan para el análisis de esta región, están los de Silva-Mora (1979), Demant (1981) y Sánchez-Rubio (1984). Se trata de tesis doctorales, inéditas, dedicadas al conocimiento de las características petrográficas y geoquímicas del volcanismo de la región, de su origen y evolución. El primero y el tercero incluyen una cartografía geológica, de escala 1:100,000, de una porción de la parte oriental del área del estudio presente; el segundo, una cartografía más regional del Eje Neovolcánico Transmexicano y la interpretación geodinámica del mismo. Este último ofrece, en cierto modo, un resumen de los conocimientos que más prevalecen en la región a la luz de la tectónica de placas.

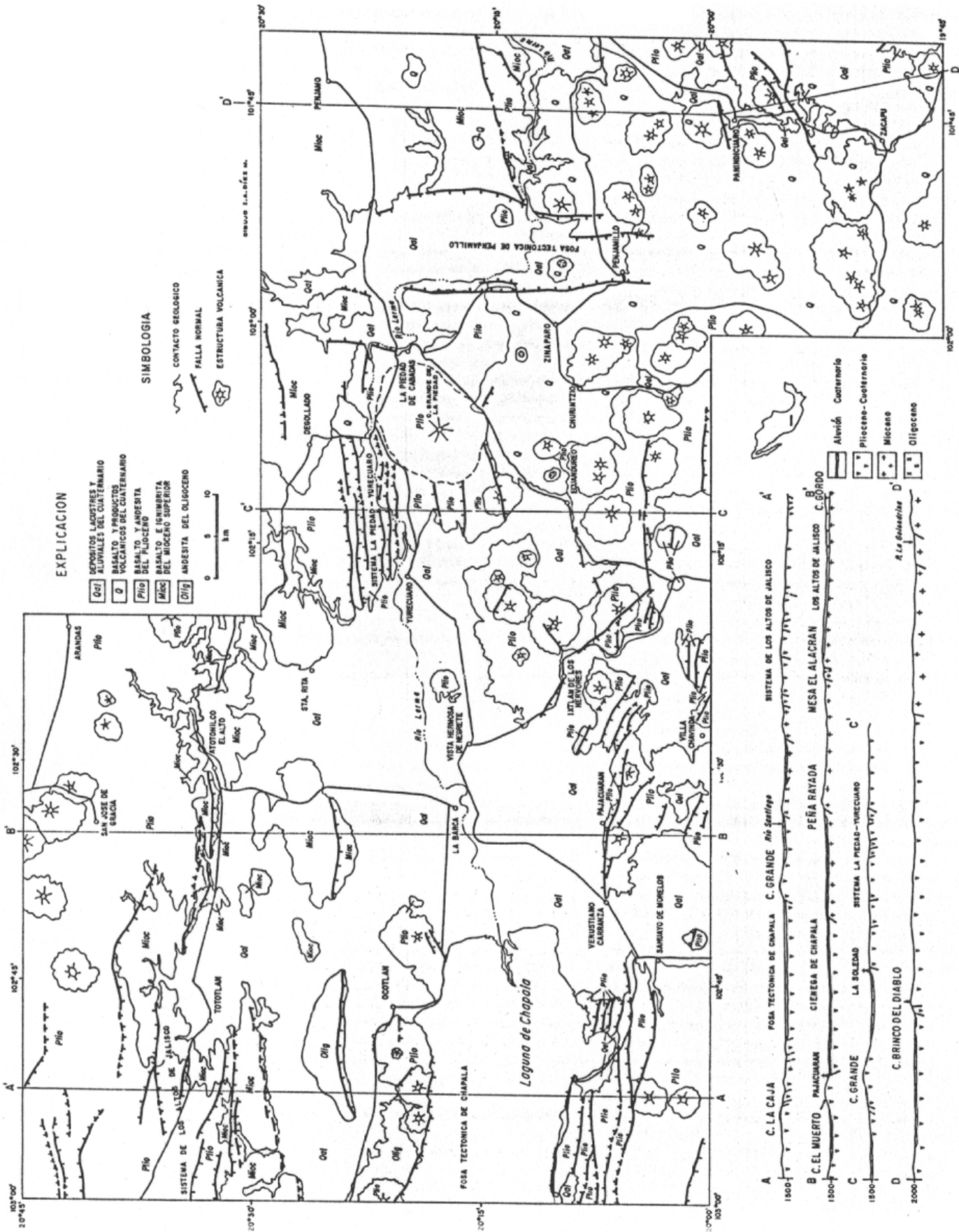
Desde un punto de vista estrictamente tectónico, de la región de estudio casi nada se ha publicado. Sólo dos artículos, con tintes sismotectónicos, han llamado la atención: el de Urbina y Camacho (1913), relacionado con el sismo que el 19 de noviembre de 1912 conmovió a la zona de Acambay, Estado de México, y el de Astiz-Delgado (1980), que se refiere al temblor del 22 de febrero de 1979 que sacudió a la región de Maravatío, Michoacán. Un tercer artículo, más reciente (Johnson, 1986), fue dedicado al mapeo preliminar de las estructuras de la parte central de México con base en imágenes LANDSAT, en el que queda incluida, por supuesto, la región de este estudio.

### SÍNTESIS ESTRATIGRÁFICA

Como ya fue establecido (Martínez-Reyes *et al.*, 1987), con base en los documentos cartográficos analizados y en los trabajos que allí habían sido emprendidos, las rocas de la región de estudio pueden ser agrupadas en tres conjuntos litoestratigráficos definidos claramente. En los mapas de las Láminas 1 y 2 están representadas las unidades de las rocas de la región.

### ROCAS PRECENOZOICAS

Estas rocas afloran escasa y esporádicamente en la porción oriental del área, escondidas debajo de las secuencias volcánicas terciarias; representan el basamento de la región.



MAPA GEOLÓGICO DE LA PARTE OCCIDENTAL DEL ÁREA ESTUDIADA





A este conjunto de rocas pertenecen la secuencia metamorfoseada de la región de El Oro-Tlalpujahua (esquistos verdes) y las calizas de Apaxco. En el primer caso, se trata de una alternancia de facies clásticas carbonatadas con intercalaciones ocasionales de lavas andesíticas, plegadas intensamente y cortadas localmente por pequeños cuerpos dioríticos; en el segundo, de calizas estructuradas en pequeños cerros de orientación preferencial NNW-SSE que representan los afloramientos más meridionales de la Sierra Madre Oriental.

Las edades atribuidas a las rocas metamórficas se sitúan en el Triásico (Flores, 1920), en el Triásico-Cretácico (Fries *et al.*, 1965) y en el Jurásico-Cretácico (Campa *et al.*, 1974). Las calizas de la región de Apaxco pueden ser consideradas, sin duda, del período Cretácico.

#### ROCAS OLIGOCÉNICO-MIOCÉNICAS

Este conjunto litoestratigráfico se encuentra bien distribuido en toda la región y está representado por derrames lávicos o ignimbríticos de composición intermedia, ocasionalmente ácida. Cubre discordantemente al conjunto mesozoico anterior, en algunos casos por intermedio de una unidad conglomerática continental atribuible al Eoceno-Oligoceno.

Las rocas atribuidas al Oligoceno afloran preferencialmente hacia la región de la laguna de Cuitzeo, al SSE de la ciudad de Morelia y hacia el nororiente del lago de Chapala. Se trata de secuencias gruesas de derrames de lavas de naturaleza basáltica, andesítica o dacítica, predominando las segundas.

Las facies atribuidas al Mioceno, más abundantes que las anteriores, están distribuidas así: al oriente, lavas dacíticas (sierra de Las Cruces) y andesíticas (región de Ixtlahuaca-Acambay); hacia el centro (región de la laguna de Cuitzeo) y poniente (región del lago de Chapala) rocas piroclásticas, donde abundan especialmente las ignimbritas de composición riolítica.

#### ROCAS PLIOCÉNICO-CUATERNARIAS

Estas facies están distribuidas más ampliamente en el área, ya que durante el Plioceno y el Cuaternario, el volcanismo fue extremadamente abundante en la región. Los aparatos volcánicos allí reconocidos tienen edades aparentemente pliocénico-cuaternarias y, en general, las estructuras grandes (estratovolcanes) son asignadas al Plioceno y las pequeñas (volcanes monogenéticos y conos cineríticos) al Cuaternario.

El Plioceno está representado por apilamientos enormes de lavas de naturaleza andesítica generalmente, aunque puede ser basáltica y dacítica localmente y riolítica en algunas ocasiones. Las ignimbritas dacíticas de la región de Amealco también han sido atribuidas a esta época (Sánchez-Rubio, 1978), así como los productos sedimentarios lacustres acumulados en depresiones tectónicas originadas por fallamiento tensional finiterciario en toda la región; estas fallas finiterciarias han sido, en la mayoría de los casos, los conductos del volcanismo cuaternario.

Por otra parte, el cuaternario está representado esencialmente por lavas y productos escoriáceos de naturaleza predominantemente andesítico-basáltica, que constituyen los pequeños y numerosos volcanes del área, y que son especialmente abundantes en la porción central-occidental. En general, se trata de conos piroclásticos (bombas, lapilli y cenizas) de cuyos

cráteres, o al pie de ellos, surgen derrames lávicos importantes en muchas ocasiones.

La columna estratigráfica cuaternaria de la región se termina con el depósito de materiales lacustres recientes y productos aluviales actuales. Se trata de materiales conglomeráticos, arenosos y arcillosos, y productos volcánicos retrabajados.

#### ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Con base en la interpretación de fotografías aéreas (en blanco y negro y de escala 1:50,000, de CETENAL), en el análisis de documentos cartográficos diversos, entre otros las cartas topográficas de escala 1:50,000 de CETENAL (1971a, 1971b, 1971c, 1972a, 1972b, 1972c, 1973a, 1973b, 1973c, 1973d, 1973e, 1973f, 1973g, 1973h, 1973i, 1974, 1975, 1976a, 1976b, 1977a, 1977b, 1978a, 1978b, 1978c, 1978d, 1980, 1981a, 1981b, 1982, 1988), y en los trabajos de campo que fueron realizados en varios períodos, se preparó los mapas estructurales de las Láminas 3 y 4, en las que además de las fallas, también fueron representados los volcanes más importantes de la región. En ellas se omitió voluntariamente rasgos que podrían ser catalogados simplemente como lineamientos, los que sobre el terreno no se manifestaron claramente como fallas u otras estructuras tectónicas. Las fallas de la región de estudio son muy numerosas y, por su importancia y extensión, son tanto de carácter local como regional; en lo sucesivo, se va a considerar especialmente las fallas de carácter regional, y sólo aquellas que se pudo definir y corroborar sobre el terreno. Si algunas faltan, como faltarán seguramente, serán aquellas que no pudieron observarse por ser demasiado grandes (escala continental), demasiado pequeñas (en relación con la escala que se utilizó) o demasiado viejas (totalmente erosionadas o cubiertas).

Para abordar con mayor facilidad el análisis de la región de estudio, ésta se dividió en tres sectores, los cuales fueron denominados simplemente como sector oriental, sector central y sector occidental. Esta división, sin ser estrictamente geográfica, responde sobre todo a las características geológicas de la zona, especialmente a las características estructurales de las fallas.

#### SECTOR ORIENTAL

Se encuentra limitado, aproximadamente, por los meridianos 99 y 100°45'W. Este sector se caracteriza tanto por una orientación preferencial E-W de las estructuras (aunque también las hay sensiblemente NE-SW y NW-SE), como por la gran continuidad longitudinal de algunas de ellas; allí se pudo individualizar las siguientes fallas:

*Fallas de Guadalupe, La Quebrada, Salirillo, Santa María Ilucan y Taximay*

Estas estructuras, las más orientales del área, se destacan entre las innumerables y pequeñas fallas que puede apreciarse claramente a lo largo de los cortes de las carreteras de la zona. De dimensiones relativamente reducidas, estas fallas tienen como característica común una orientación generalizada NE-SW. Éstas afectan desde rocas miocénicas hasta productos volcánicos y lacustres recientes. La *falla de Guadalupe* atraviesa la sierra del mismo nombre en una longitud de unos

11 km. Posee un rumbo N50°E con un ángulo de inclinación muy alto, quedando hacia el NW el lado hundido.

La *falla de La Quebrada* es claramente visible sobre los cortes de la autopista México-Querétaro, donde se manifiesta como una zona de trituración amplia, asociada a numerosas fallas pequeñas. Puede seguirse a lo largo de una decena de kilómetros con un rumbo que puede variar localmente desde N40°E hasta N70°E, inclinación al SE y un salto vertical mínimo de 100 m; su traza termina hacia el NE contra la sierra de Guadalupe.

La *falla de Salitrillo* empieza a manifestarse desde la ladera nororiental de la sierra de Tepozotlán. Se extiende por unos 7 km hacia el NE, con un rumbo N55°E y una inclinación de 75° al NW. Esta falla se destaca entre las numerosas y pequeñas estructuras que aparecen sobre la autopista México-Querétaro en el sitio denominado El Salitrillo, entre Tepozotlán y Tepeji del Río.

Al oriente de Jilotepec, sobre la autopista México-Querétaro, se individualiza una zona de unos 3 km de anchura, donde aparecen fallas de todas dimensiones, entre las que destaca la que aquí llamamos *falla de Santa María Ilucan*. Estas son fallas con orientación predominante NE-SW, aunque puede variar individual o localmente desde N40°E hasta E-W, con inclinaciones cercanas a la vertical tanto hacia el norte como hacia el sur y desplazamientos que pueden alcanzar desde unos cuantos centímetros hasta una treintena de metros. Esta falla se sitúa regionalmente en la prolongación oriental de la falla de Pastores, pudiendo de esta manera representar su continuidad estructural.

En la zona de la presa Taximay se cartografió un grupo de fallas que aquí se llamó *fallas de Taximay* y, más hacia el sur, otras estructuras orientadas igualmente NE-SW y E-W. Todas poseen una acentuada inclinación hacia el norte, entallando cañadas profundas. Una de las últimas fallas es visible claramente en los cortes de la carretera a Tlalnepantla, entre Villa del Carbón y Tlazala de Fabela.

#### *Falla de Perales*

Esta estructura se extiende a lo largo de unos 50 km, desde San Agustín Mextepec, al SSW de San Felipe del Progreso, hasta el flanco occidental de la sierra de Las Cruces, al SSE de San Felipe de Santiago. Tiene una orientación preferencial E-W en su porción oriental, pasa a otra nítidamente N45°W en su porción occidental, con su bloque hundido invariablemente al norte y una inclinación de más de 70°. Esta estructura es una de las más prominentes de la región.

La mitad occidental de la falla de Perales limita hacia el SW con el valle de Ixtlahuaca y pone en contacto una serie de rocas volcánicas miocénicas con sedimentos lacustres pliocénico-cuaternarios, formando escarpes que pueden alcanzar hasta 300 m de desnivel topográfico. Dos fallas menores se asocian con la falla principal en la porción occidental.

La mitad oriental, cuya traza pasa inmediatamente al sur de Ixtlahuaca, constituye la línea divisoria entre los valles de Ixtlahuaca y Toluca. Ésta corta los sedimentos lacustres pliocénico-cuaternarios que rellenan estos valles, formando un desnivel topográfico que puede alcanzar los 100 m. A dos kilómetros hacia el sur, a la falla principal se asocia otra de las mismas características, que corta tanto rocas volcánicas miocénicas de la sierra de Las Cruces como sedimentos lacustres pliocénico-cuaternarios del valle de Toluca.

#### *Falla de Pastores*

Sánchez-Rubio (1984) utilizó este término para definir el rasgo estructural que forma la pared meridional de la fosa tectónica de Acambay, extendiéndolo unos 25 km; sin embargo, este accidente geológico puede seguirse por una longitud de más de 100 km, desde la región de Maravatío, al poniente, hasta la zona de Santa María Ilucan, al nororiental. La continuidad más allá del primer límite, hacia el occidente, no puede garantizarse a la luz de estas observaciones, aunque entre Maravatío y Morelia aparecen estructuras (fallas de Los Azufres, Queréndaro y Morelia y alineaciones de volcanes y conos cineríficos) que podrían sugerir esa posibilidad.

La falla de Pastores puede individualizarse fácilmente como una sola y continua estructura a lo largo de la mayor parte de su trayectoria, siendo solamente en su porción occidental donde pierde esa continuidad y aparece entonces como un sistema de fallas escalonadas que mira siempre hacia el norte. La falla de Pastores se manifiesta estructuralmente en terranos miocénicos y pliocénico-cuaternarios por medio de escarpes que pueden alcanzar 250 m de desnivel topográfico (Figura 1). Se trata de una falla normal cuyo plano se inclina 65° al norte (Figura 2). Su orientación es E-W en su porción occidental y, a partir de Atlacomulco, se flexiona paulatinamente hasta establecerse NE-SW en su porción oriental. Por su extensión y continuidad morfológica, la falla de Pastores constituye el rasgo estructural más espectacular de la región.

#### *Sistema Acambay-Tixmadejé*

Bajo este nombre se agrupó a las fallas localizadas en la región de las poblaciones de Acambay y Tixmadejé, que sirven de límite meridional al macizo montañoso del mismo nombre y que constituyen, al mismo tiempo, la pared septentrional del valle de Acambay.

Las fallas de Acambay-Tixmadejé son fallas normales que se extienden a lo largo de 40 km, aproximadamente, con una orientación que tiende al ESE-WNW. Sus planos se inclinan hacia el sur, alcanzando hasta 70°. Estas fallas cortan rocas asignadas al Mioceno y en conjunto constituyen un desnivel topográfico escalonado de unos 400 m.

#### *Falla de Epitacio Huerta*

Esta estructura se individualiza fácilmente en una longitud de unos 40 km, desde Coroneo, Guanajuato, al norponiente, hasta el sitio conocido como Cerrito Colorado, al suroriental. El poblado de Epitacio Huerta se localiza al centro e inmediatamente al bajo de la falla.

Se trata de una falla normal que de una orientación WNW-ESE (N75°W) en su parte oriental, cambia a otra NW-SE (N40°W), en su parte occidental. Su plano se inclina fuertemente hacia el sur y se traduce morfológicamente como un escarpe que alcanza hasta 150 m de desnivel vertical, constituyendo así una barrera neta que limita septentrionalmente al valle de la presa Tepuxtepec. Esta estructura, que afecta casi siempre a rocas ignimbríticas del Plioceno, corta a la caldera de Amealco en su porción meridional.

#### *Caldera de Amealco*

Es una estructura volcanotectónica que se localiza inmediatamente al sur de la población de Amealco, Querétaro. De



Figura 1.- La falla de Pastores vista hacia el oriente. En primer plano se ve el rancho de Pastores.

forma circular, su diámetro E-W se aproxima a los 11 km y los desniveles verticales de sus paredes pueden alcanzar 250 m de hundimiento en relación con la topografía circundante. Su pared meridional, como se señaló, fue truncada por la falla Epitacio Huerta.

La caldera de Amealco está constituida geológicamente por ignimbritas y estructuras dómicas diversas, de composición que varía desde andesítica hasta riolítica (Sánchez-Rubio, 1984). Los domos están en el interior de la estructura y el principal de ellos se levanta unos 200 m por encima del nivel de la misma. La edad de las rocas de la caldera de Amealco fue estimada en menos de 5 Ma (Sánchez-Rubio, 1984).

#### *Sistema Temascalcingo-Tepuxtepec-Acámbaro*

Se nombró así al grupo de fallas que se extiende desde la región de Temascalcingo, al oriente, hasta las inmediaciones de Acámbaro, al poniente, pasando por las poblaciones de Tepuxtepec y Tarandacuao. Se trata de fallas normales de rumbo  $N60^{\circ}W$ , entre Temascalcingo y Cerro Altamirano, que cambian después a E-W, o excepcionalmente NE-SW, entre este último lugar y la población de Acámbaro.

Las fallas de este sistema poseen planos que alcanzan hasta  $80^{\circ}$  de inclinación, lo mismo hacia el norte que hacia el sur, formando algunas pequeñas fosas tectónicas, como las de Temascalcingo-San Pedro el Alto, Tepuxtepec y Tarandacuao. La columna litoestratigráfica, involucrada en las estructuras de este sistema, incluye rocas que van desde el Oligoceno hasta el Cuaternario.

#### *Fallas de los Agustinos*

Hacia el norponiente de la población de Jerécuano, Guajuato, se encuentra la sierra de Los Agustinos, cuya secuen-

cia de rocas volcánicas oligocénico-miocénicas y pliocénico-cuaternarias fue cortada por fallas normales que pueden extenderse hasta unos 15 km. Sus orientaciones varían de NW-SE, en las inmediaciones de Jerécuano, a NE-SW, en la zona nororiental de Parícuaro. Sus planos se inclinan tanto hacia el norte como hacia el sur, formando localmente pequeños pilares y fosas tectónicas.

#### *SECTOR CENTRAL*

Este sector queda comprendido entre los meridianos  $100^{\circ}45'$  y  $102^{\circ}00'W$ . Se caracteriza geológicamente por la abundancia de aparatos volcánicos y por una orientación bien definida de la mayoría de sus fallas en dirección NE-SW. Cabe mencionar que sólo se pudo diferenciar estructuralmente el sistema de fallas de Cuitzeo y la fosa tectónica de Penjamillo, siendo el primero el de mayor importancia en el área.

#### *Sistema de fallas de Cuitzeo*

Este conjunto de fallas se extiende sobre la parte más extensa de este sector, atravesándolo diagonalmente en dirección NE-SW. Las fallas son numerosas y de tipo normal, con longitudes que se extienden desde unos cuantos kilómetros hasta más de 25 de ellos. Son, también, fallas paralelas con orientación bien definida, que promedia  $N65^{\circ}E$ ; son raras las estructuras que tienen orientación diferente, NW-SE por ejemplo.

Las fallas del sistema de Cuitzeo se inclinan con gran ángulo lo mismo al NW que al SE, definiendo estructuras en pilares y fosas tectónicas, como la fosa tectónica de Cuitzillo (en honor al poblado ubicado sobre la pared meridional de la estructura), que se localiza hacia el nororiente de la ciudad de Morelia, la fosa tectónica de Iramuco, ocupada por la parte



Figura 2.- Mapa de la falla de Pastores, cerca del río Lerma, NW de Atlacomulco.

oriental de la laguna de Cuitzeo y el pilar tectónico de Santa Ana Maya, ubicado inmediatamente al oriente de esa población. Este último se levanta hasta 2,640 m.s.n.m., 780 m sobre la laguna de Cuitzeo.

El sistema de fallas de Cuitzeo afecta una secuencia de rocas volcánicas, cuyas edades varían desde el Oligoceno hasta el Cuaternario. Hacia la parte sudoccidental del sector (regiones de Zacapu y Panindícuaro), las fallas pierden definición y desaparecen debajo de la parte de grosor mayor del volcanismo cuaternario, la que se conoce como campo volcánico de Michoacán. Es evidente que el material volcánico alcanzó la superficie a través de las fallas, ya que las estructuras volcánicas (volcanes y conos cineríticos) se alínean en la misma dirección que las estructuras de la región.

El límite meridional del sistema de fallas de Cuitzeo, en la región estudiada, lo constituyen las fallas de Morelia, conocidas localmente como falla de Santa María, falla de Morelos y falla de Cointzio. Estas son fallas normales escalonadas que miran al norte, con inclinación de 80° y con orientación que tiende a ser sensiblemente ENE-WSW. Estas fallas, junto con las de Queréndaro (localizadas hacia el NE) y las de Los Azufres, que comparten las mismas características estructurales, podrían constituir la continuidad occidental de la Falla de Pastores, como ya se había insinuado.

#### *Fosa tectónica de Penjamillo*

Localizada hacia el sudoriente de La Piedad, Michoacán, y al nororiente del sector central (el poblado de Penjamillo de Degollado, Michoacán, se ubica en el extremo sudoccidental de la fosa tectónica), esta estructura se tradujo como una depresión tectónica caracterizada por su bien definida orientación N-S, diferente totalmente y hasta opuesta a la tendencia general de las estructuras de toda la región. Sólo un caso similar puede encontrarse, aunque de dimensiones mucho más importantes, en la fosa tectónica de Colima.

La fosa tectónica de Penjamillo se define claramente a lo largo de más de 25 km, con una anchura que varía desde unos 6 km, en su parte más meridional, hasta más de 12 km, en su porción septentrional. Las paredes que la limitan son fallas normales de gran ángulo de inclinación, que constituyen escarpes que pueden alcanzar hasta 150 m de desnivel topográfico y cortan rocas volcánicas consideradas como del Mioceno y del Cuaternario.

La fosa tectónica de Penjamillo es una estructura reciente que parece continuar mucho más hacia el norte de nuestro sector de estudio y se encuentra sobrepuesta al sistema estructural regional. Sus fallas, casi meridianas, cortan al sistema de Cuitzeo con una orientación ENE-WSW (a lo largo de una de ellas se encauza el río Lerma) y al sistema de La Piedad-Yurécuaro, de orientación E-W; este último pertenece ya al sector occidental.

#### *SECTOR OCCIDENTAL*

Este sector tiene como límites geográficos los meridianos 102 y 103°W. Su característica principal es una tendencia estructural predominantemente E-W. En ella se pudo individualizar varios conjuntos de fallas.

#### *Sistema de fallas La Piedad-Yurécuaro*

Truncadas estructuralmente por la fosa tectónica de Penjamillo, al oriente, y la fosa tectónica de Chapala, al poniente, entre La Piedad y Yurécuaro aparece un grupo de fallas paralelas que, en conjunto, forma una depresión topográfica sobre la que se encauza el Río Lerma. Se trata de fallas normales orientadas sensiblemente E-W, con una ligera tendencia al ENE-WSW, que entallan individual y profundamente las rocas volcánicas pliocénicas. Casi todos sus planos tienen una inclinación hacia el norte.

Distribuidas en una franja de unos 6 km de anchura por 30 de longitud, a este sistema debe agregarse la falla que se localiza al nororiente de Degollado y las que aparecen al poniente y surponiente del Cerro Grande de La Piedad, que mantienen las mismas características estructurales.

#### *Fallas de la región de Villa Chavinda-Ixlán de Los Hervores*

En esta zona se cartografió varias fallas de dimensiones moderadas, que se extienden preferentemente del NW al SE, orientación que es truncada por fallas que tienden a ser E-W o sensiblemente del ENE al WSW (como las que aparecen al poniente y surponiente de Ecuandureo).

Las fallas de esta región cortan rocas volcánicas asignadas al Mioceno y el Plioceno. Con desniveles verticales importantes, estas fallas forman estructuras de pilares y fosas tectó-



nicas de dimensiones pequeñas. Sobre una de esas fallas se localiza el yacimiento hidrotermal que da el nombre a la región (Ixtlán de Los Hervores), donde es intersectada precisamente por una falla pequeña de orientación perpendicular (NE-SW).

#### *Fosa tectónica de Chapala*

Esta fosa tectónica es de grandes dimensiones; se extiende de oriente a poniente por espacio de más de 110 km de longitud por unos 35 km en sus partes de más anchura. Esta región es conocida, sobre todo por estar allí localizado el lago de Chapala; nuestro sector de estudio incluye solamente la parte más oriental de esa estructura y de ese lago.

Las fallas que conforman la fosa tectónica de Chapala son numerosas, de dimensiones importantes, de tipo normal y de orientación E-W con ángulos de inclinación pronunciados. Morfológicamente, se traducen en escarpes espectaculares con desniveles topográficos importantes.

El límite meridional de la fosa tectónica lo constituyen fallas paralelas, a veces bifurcadas, con planos que se inclinan hacia el norte, formando bloques tabulares, escalonados y apretados. La falla de Pajacuarán (Figura 3), una de las más espectaculares, resume bien las características estructurales de esta región: falla normal, con orientación regional E-W que tiende ligeramente al WSW, cuyo plano se inclina  $62^\circ$  al N, constituyendo escarpes que pueden alcanzar hasta 500 m de desnivel topográfico.

Hacia la parte septentrional de la fosa tectónica (regiones de Ocotlán, Tototlán y Atotonilco), las fallas son más espaciadas, pero no menos importantes. Con planos que miran siempre hacia el sur, ellas poseen las mismas características estructurales que las de la parte meridional. En ambos casos,

son las fallas las que constituyen las paredes de la fosa tectónica y los límites del lago.

La fosa tectónica de Chapala afecta rocas del Mioceno y del Plioceno, incluyendo algunas de las estructuras volcánicas asignadas a esta última época.

#### *Sistema de fallas de Los Altos de Jalisco*

Paralelamente a la fosa tectónica de Chapala, en la porción noroccidental del sector y de la región de estudio, es posible reconocer algunas fallas que cortan las mesetas ignimbríticas de la parte más meridional de la región conocida como Los Altos de Jalisco. Se trata de fallas normales que, en su conjunto, forman pilares y fosas tectónicas de dimensiones moderadas y desniveles topográficos modestos.

Del mismo modo que en la fosa tectónica de Chapala, las fallas del sistema de Los Altos de Jalisco toman una orientación E-W, también con una ligera tendencia hacia el WNW.

#### TECTÓNICA

En áreas continentales, el fallamiento de la corteza terrestre es el fenómeno geológico más característico de la actividad tectónica de una región. Las fallas allí generadas son, además, fuentes importantes de sismicidad y los conductos más apropiados para la manifestación del volcanismo.

El análisis del Eje Neovolcánico Transmexicano, rasgo característico del continente mexicano donde se ubica la región estudiada, ha sido abordado por numerosos autores desde diferentes puntos de vista. El resultado fue la elaboración de diferentes modelos de evolución geodinámica que intentan explicar su comportamiento estructural y el origen de su volcanismo.



Figura 3.- La falla de Pajacuarán, vista al SE.

Para unos (Menard, 1955; Mooser y Maldonado-Koerdell, 1961), el Eje Neovolcánico sería simplemente la prolongación en la parte continental mexicana de la fractura de Clarión, falla transformante del Pacífico oriental. Para otros (Gastil y Jensky, 1973), representaría la continuación meridional del sistema distensivo diestro del Golfo de California-falla de San Andrés. Algunos más lo interpretan como un *rift* continental (Flores, 1978; Johnson, 1986) o como una geosutura prepaleozoica entre dos bloques cratónicos, reactivada en el Terciario por procesos de subducción (Mooser, 1968, 1972a, 1972b). Muchos otros, sin embargo, lo relacionan con los mecanismos de subducción de la placa de Cocos debajo de la placa de América del Norte (Mooser, 1975; Álvarez, 1975; Urrutia-Fucugauchi y del Castillo, 1977; Urrutia-Fucugauchi y Pal, 1977; Pal y Urrutia-Fucugauchi, 1977; Hanus y Vanek, 1977-1978).

Demant (1981, 1984), por su parte y para mencionar el último ejemplo, descarta la posibilidad de una relación entre los fenómenos de subducción de la placa de Cocos debajo de la placa de América del Norte y el fallamiento en el Eje Neovolcánico; sostiene que el origen de este fallamiento en esta parte del país debe buscarse en el Mioceno: supone las fallas que están localizadas al oriente del meridiano 102° (sectores oriental y occidental) ligadas a los movimientos entre las placas del Caribe y de América del Norte, y las que están al poniente de ese mismo meridiano, a aquéllos relacionados con la apertura del Golfo de California.

#### TECTÓNICA Y FALLAMIENTO

Independientemente de los modelos diferentes propuestos para explicar la evolución geodinámica del Eje Neovolcánico Transmexicano a través del tiempo y del espacio, las características estructurales de las fallas de la región de estudio son testimonio de que en las últimas épocas geológicas esta parte del país ha estado sometida a la acción de los esfuerzos y deformaciones de un régimen tectónico distensivo. Su disposición estructural y su arquitectura actual reflejan la mayoría de los efectos de los fenómenos tectónicos más recientes.

En efecto, si la cartografía y los trabajos emprendidos sobre el terreno no permiten evidenciar con facilidad los movimientos tectónicos que hayan podido originarse en el Mioceno o en épocas anteriores, sí permiten en cambio afirmar con seguridad que, en función de las evidencias estratigráficas, sísmológicas e históricas, el fallamiento que allí se presenta puede ser considerado activo en el Cuaternario, pudiendo calificarse hasta de "reciente", entendiéndose que el Reciente es la última época geológica en la escala del tiempo. Muchas de las fallas que allí fueron cartografiadas podrían ser clasificadas fácilmente como "fallas activas".

La tectónica cuaternaria se manifiesta claramente a lo largo de toda la región. El fallamiento que allí se observa afecta tanto a rocas del Terciario como del Cuaternario, incluyendo las lavas más jóvenes de este último período.

Por otra parte, existen algunas fallas que cortan rocas terciarias pero no cuaternarias, lo que permite considerarlas como finiterciarias o, cuando mucho, pleistocénicas. Una falla que ilustra plenamente esta edad es la falla meridional de la fosa tectónica de Cuitzillo, al NNW de la ciudad de Morelia. Esta falla corta rocas terciarias (oligocénico-miocénicas) y desaparece debajo de los productos volcánicos cuaternarios del

Quinceo, sin cortarlas. Del mismo modo, existen fallas que se intersectan entre sí, evidenciando, de esta manera, que a lo largo de la región ha habido más de una orientación de la actividad tectónica en las últimas épocas geológicas.

Otros de los criterios que permiten afirmar que la mayoría de las fallas de la región de estudio es reciente (y haciendo caso omiso por ahora de las evidencias geofísicas), son los criterios de tipo morfológico: desniveles verticales importantes, escarpes erosionados poco o nulamente, trazas visibles a través de todo tipo de terrenos, control estructural de la red hidrográfica (el curso del río Lerma es controlado así).

En resumen: ya sea que los movimientos tectónicos, y con ellos el fallamiento, que estructuran la parte central del país, hayan tenido su origen en el Mioceno, o bien antes, es evidente que las fallas de la región de estudio son una consecuencia de la continuación de esos movimientos hasta el presente. Este fallamiento facilitó, además, la manifestación del volcanismo en la región, retomando las fallas existentes para llegar a la superficie.

#### TECTÓNICA Y VOLCANISMO

Se ha señalado que la actividad tectónica de una región no se da aislada, sino acompañada por eventos geológicos como el volcanismo y la sismicidad. A la luz de la tectónica de placas, se sabe también que el magmatismo, en general, y el volcanismo, en particular, están asociados a procesos geodinámicos presentes tanto en los continentes como en los océanos.

En la evolución geodinámica de una región, el volcanismo se manifiesta a través de las zonas de debilidad de la corteza terrestre, zonas que en los continentes no son otras que los sistemas de fallas que previa o contemporáneamente a los procesos volcánicos son originados por los procesos tectónicos. En la región de estudio, la relación entre fallas y volcanismo es evidente. Los aparatos volcánicos son numerosos; los conos cineríticos pequeños son incontables. En la Tabla 1 se listó los volcanes principales del área, mismos que fueron localizados en las Láminas 3 y 4.

Ignorando un poco las rocas oligocénico-miocénicas, que por su carácter, en su mayoría ignimbítico, no constituyen estructuras volcánicas que delaten sus fuentes de emisión, las rocas pliocénico-cuaternarias, al contrario, aparecen asociadas a volcanes y conos cineríticos y escasamente a emisiones fisurales.

El material volcánico pliocénico-cuaternario en esta región es abundante, especialmente hacia su porción central-occidental. Hasenaka y Carmichael (1985) contaron en esa área más de 1,000 centros volcánicos (901 conos cineríticos, 43 domos, 22 *maars*, 13 volcanes escudo y 61 derrames fisurales), estimando una tasa en el volumen de erupción de 0.8 km<sup>3</sup>/1,000 años.

Las estructuras volcánicas están localizadas sobre la prolongación de las fallas o, bien, se alinean con una orientación similar a la de ellas. Su distribución espacial confirma plenamente que su emplazamiento obedece estrictamente al control estructural existente en el área. Esto permite afirmar que en esta región del país existe una estrecha relación entre fallas y volcanes, es decir, entre tectónica y volcanismo.

El origen del volcanismo pliocénico-cuaternario ha sido asociado por algunos (Demant, 1984, entre otros) a procesos de subducción de la placa de Cocos debajo de la placa de América del Norte. Este volcanismo, de naturaleza calcálcica,







Tabla 1.- Volcanes principales de la región de estudio.\*

1 Cerro El Picacho	34 Cerro el Sauz
2 Cerro El Maguey	35 Cerro Camatarán
3 Cerro El Chico	36 Cerro La Campana
4 Cerro La Zapoteca	37 Cerro Las Ranas
5 Cerro Grande	38 Cerro Ziriguato
6 Cerro Ojo de Rana	39 Cerros Merino y El Gallo
7 Cerro La Caja	40 Cerro El Corazón
8 Cerro El Muerto	41 Cerro El Varal
9 Cerro El Encinal	42 Cerro Las Ventanas
10 Cerro Los Nogales	43 Cerro El Picacho (Gendo)
11 Cerro Grande de Ecuandureo	44 Cerro El Quinceno
12 Cerro Blanco de Ecuandureo	45 Cerro Las Tetillas
13 Cerro Grande de la Piedad	46 Cerro Los Amoles
14 Cerro Tacari	47 Cerro El Capulín
15 Cerro Las Gallinas	48 Cerro La Cejita
16 Cerros Churintzio, Zináparo y Grande	49 Cerro El Comal
17 Cerro La Palma	50 Cerro Santiago
18 Cerro El Agostadero	51 Cerro La Joyita
19 Cerro El Tule	52 Cerro Tetillas
20 Cerro El Tecolote	53 Cerros Grande y Pelón
21 Cerro Capaxtiro	54 Cerro El Colorado
22 Cerro El Fresno	55 Cerro Chupícuaro
23 Cerro Brinco del Diablo	56 Cerro Cuevas de Moreno
24 Cerro La Cantera	57 Volcán San Andrés
25 Cerros de Patámbaro	58 Cerros La Capilla, La Calabaza y El Pilar
26 Cerro Guándaro	59 Cerro San Miguel el Alto (El Calvario)
27 Cerro Blanco	60 Cerro Altamirano
28 Cerro El Metate	61 Caldera de Amealco
29 Cerro Prieto	62 Volcán Nádó
30 Cerro Los Tres Reyes	63 Volcán Temascalcingo
31 Cerro El Costalito	64 Volcán Jocotitlán
32 Cerro Blanco de Curimeo	65 Cerro Papalotepec
33 Volcán Grande	66 Cerro Mayorazgo
	67 Cerro La Guadalupeana

\*Los nombres fueron tomados de las cartas topográficas de CETENAL, escala 1:50,000

aprovechó únicamente el fallamiento preexistente en la región para manifestarse en la superficie.

Dicho volcanismo ha sido, por otra parte, considerado como actualmente activo en la parte central de México (Lugo-Hubp *et al.*, 1985); de esta manera representa, junto con la sismicidad asociada igualmente a la actividad tectónica de la región, la mayoría de los riesgos naturales para esta porción de nuestro país.

#### TECTÓNICA Y SISMICIDAD

En los límites de las placas litosféricas (zonas de subducción, fallas transformantes y *rifts*) tiene lugar una infinidad de sismos: son regiones dinámicas y zonas sísmicas por excelencia. En esas regiones, la relación entre la tectónica y la sismicidad es ampliamente conocida.

La actividad sísmica en las áreas continentales y oceánicas, es decir, en el interior de las placas, parece ser menos importante. La frecuencia con que allí aparece podría conducirnos a considerar que algunas de estas regiones son prácticamente asísmicas.

El fallamiento de una región es, por otro lado, el resultado de la acción de esfuerzos tectónicos compresivos o disten-

sivos, que producen fallas de compresión o distensión, según sea el caso. Si los esfuerzos persisten, los bloques limitados por las fallas se ven sujetos a las fuerzas tectónicas que actúan sobre ellos y así acumulan energía que poco a poco los va deformando; cuando el coeficiente de fricción de la roca es rebasado, a lo largo del plano de falla se produce un movimiento que libera la energía acumulada y en ese momento se genera un sismo. Y son los sismos la manifestación más espectacular y más característica de la actividad tectónica de una región.

Independientemente de que el Eje Neovolcánico represente un límite entre placas (*rift*, falla transformante u otro), o sea una estructura continental independiente, representa una zona tectónicamente activa, con fallamiento y volcanismo asociados, donde la actividad sísmica también se ha manifestado.

En efecto, tal como se ha mencionado en los "Antecedentes", el 19 de noviembre de 1912, la región de Acambay, Estado de México, fue sacudida por un temblor cuya magnitud fue estimada en 7. Los efectos de ese fenómeno fueron estudiados por Urbina y Camacho (1913), quienes concluyeron que el movimiento telúrico fue causado por la reactivación de una de las fallas de la región. Los datos publicados por estos autores han sido utilizados para ubicar el epicentro en relación con las fallas y calcular las intensidades de la zona epicentral; los resultados se muestra en la Figura 4. Asimismo, este sismo ha sido el de mayor magnitud y el más próximo a la Ciudad de México (100 km, aproximadamente). Los efectos fueron sentidos fuertemente por su población y causaron derrumbes de bardas, grietas en el pavimento, rupturas de cables y tuberías (Valero, 1986, p. 12).

Además de los daños materiales y humanos que causó en la zona epicentral (la población de Acambay prácticamente desapareció del mapa), los efectos geológicos de ese sismo fueron patentes en toda la región: agrietamientos y dislocaciones de terrenos, desprendimientos y deslizamientos de rocas (Figura 5); muchas de las fallas de la zona fueron reactivadas. Se cartografió los agrietamientos y dislocaciones de terrenos y su relación con las fallas de la región epicentral (Figura 6), de acuerdo con los datos publicados por Urbina y Camacho (1913).

Otro de los sismos importantes ( $m=5.3$ ) registrados en esta región fue el del 22 de febrero de 1979. Su epicentro fue localizado al norte de las poblaciones de El Oro y Tlaipujahua, en el valle de Maravatío, Michoacán, al oriente de esa población. Sus efectos fueron sentidos en toda la región, especialmente en Maravatío, donde causó mayor pánico (Figura 7).

Este sismo recibió la atención de los especialistas y fue estudiado por Astiz-Delgado (1980) para la elaboración de su tesis profesional. Con los datos de esta autora, se localizó sobre un mapa los epicentros del evento principal y sus réplicas, así como las fallas de la región (Figura 8). El análisis de la distribución de los epicentros muestra claramente que ese sismo tuvo como origen la activación de la falla de Pastores, lo cual provocó la reactivación de las fallas asociadas a ella, en esa región.

Los estudios de estos dos sismos, los únicos efectuados hasta ahora sobre la sismicidad de esta región, ejemplifican claramente su relación directa con el fallamiento de la misma. Esto permite aseverar que en esta parte del país la tectónica y la sismicidad guardan una relación estrecha.

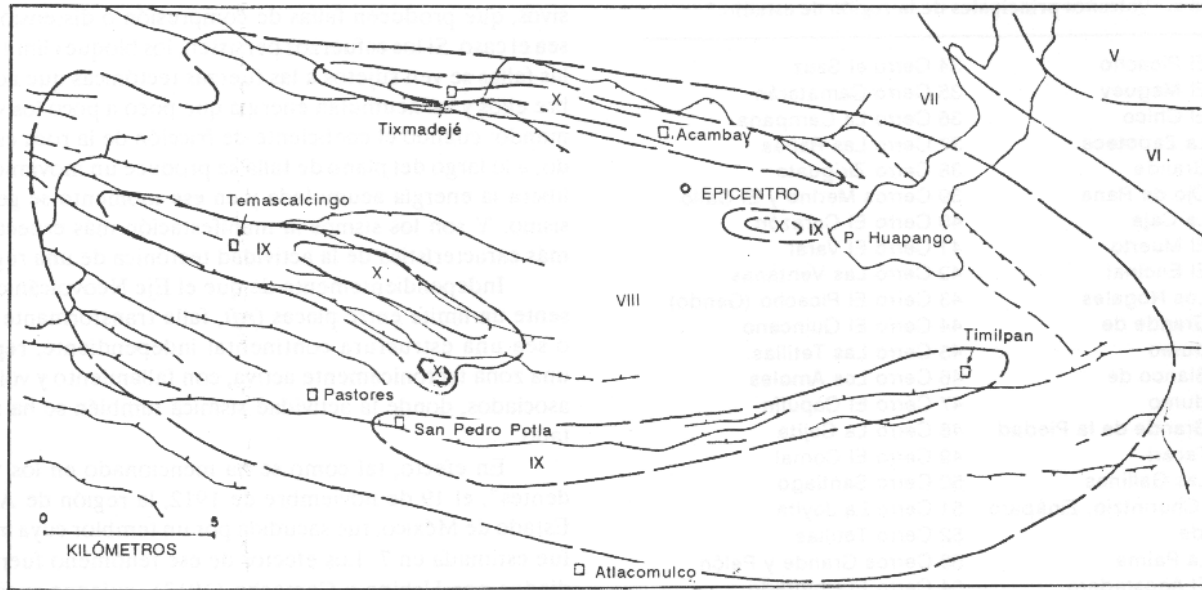


Figura 4.- Intensidades (isosistas) del sismo del 19 de noviembre de 1912, registrado en la región de Acambay, Estado de México, calculadas a partir de los datos publicados por Urbina y Camacho (1913).

Además, han existido otros sismos aparte de éstos. A título de ejemplo, en la Tabla 2 se lista algunos de los sismos de magnitudes mayores que 4 en la escala de Richter, registrados en la región durante este siglo.

#### AGRIETAMIENTO Y DESLIZAMIENTO DE TERRENOS

En esta región y áreas aledañas se ha venido detectando, en los últimos tiempos, numerosos casos de agrietamiento de

terrenos; muchos de ellos han causado daños a la población. Estos fenómenos no han sido considerados como tectónicos, sino causados por la compactación de los sedimentos, debido a la excesiva extracción de agua (Trujillo-Candelaria, 1985).

Aunque, ciertamente, se ha detectado en las ciudades esos agrietamientos, que se manifiestan en terrenos no consolidados, con base en las observaciones realizadas en sitios diversos de la región, aquí se considera su relación estrecha con el fallamiento regional.



Figura 5.- Roca desprendida a causa del sismo del 19 de noviembre de 1912. Inmediaciones de Temascalcingo.



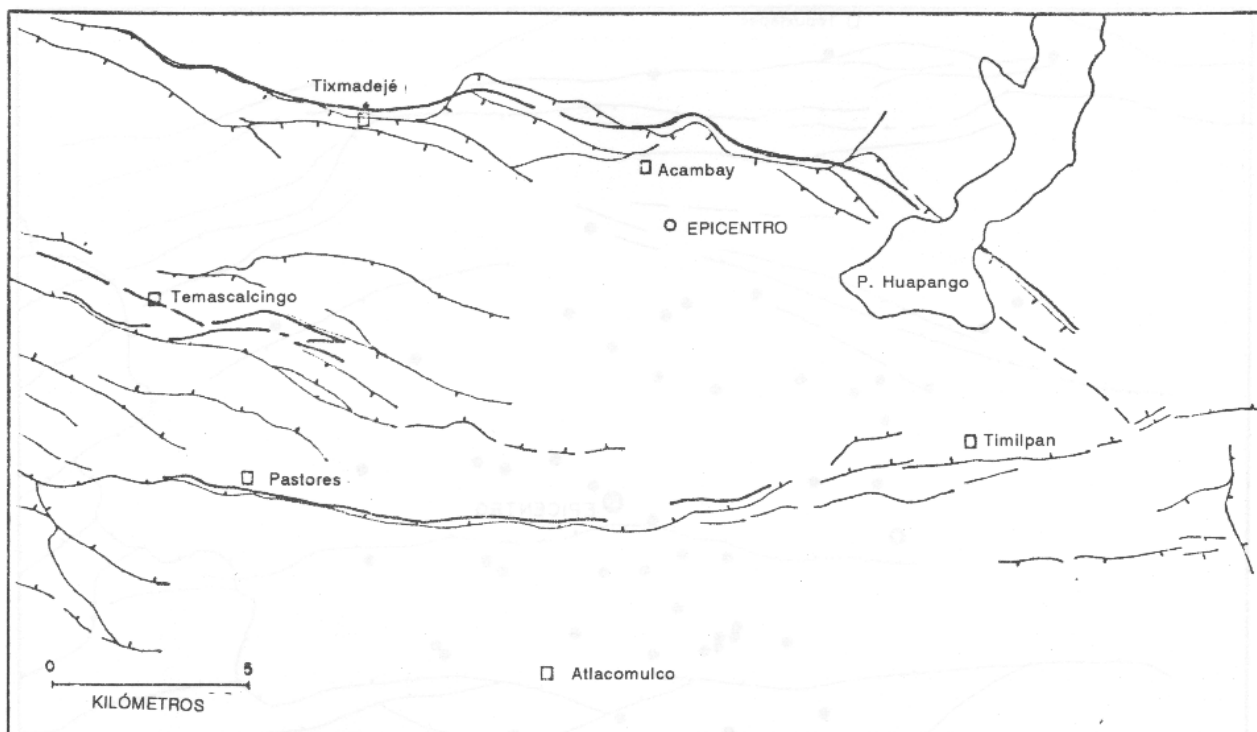


Figura 6.- Fracturamientos de terrenos resultantes del sismo del 19 de noviembre de 1912 en la zona de Acambay, Estado de México, de acuerdo con los datos publicados por Urbina y Camacho (1913).

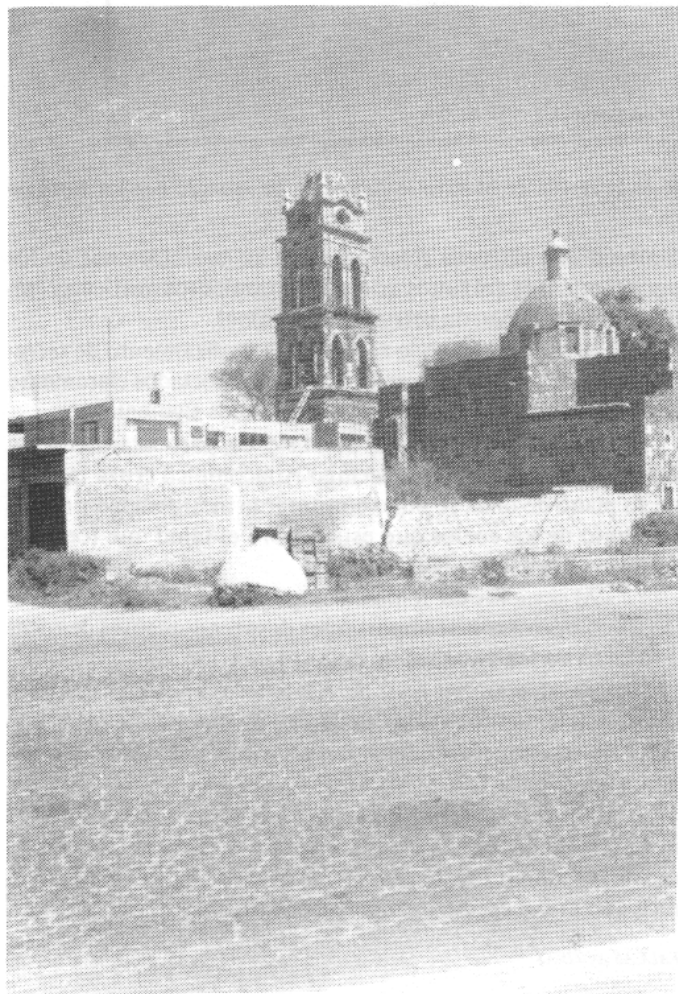


Figura 7.- Efectos del sismo del 22 de febrero de 1979, en Maravatío.

Al norte de la laguna de Cuitzeo, en los límites de los estados de Michoacán y Guanajuato, en 1985 aparecieron algunas grietas (periódico "El Centro", Irapuato, Gto., 13 de octubre de 1985). Ese agrietamiento afectó las construcciones del poblado de Cuamio, Michoacán y la carretera pavimentada que va a Santa Ana Maya. Se trata de fracturas que se pudo seguir por algunos kilómetros, de orientación estructural similar a las de las fallas de la región. Sin desplazamiento vertical importante, esas grietas se ubican claramente en la continuidad estructural de las fallas.

La actividad de una de las grietas queda manifestada sobre la carretera a Santa Ana Maya, la cual ha sido reparada en ocasiones repetidas, en virtud de que su carpeta asfáltica se ve afectada continuamente por la grieta, formando un pequeño desnivel.

En la región de Ixtlahuaca, Estado de México, en 1980 fueron detectadas algunas grietas en las inmediaciones de la población, las que afectaron algunas casas. En un reconocimiento efectuado entonces para analizar el fenómeno (Aguilar-Contreras, 1980), se estableció su estrecha relación con una de las fallas de la zona y la orientación del agrietamiento resultó ser también similar a la tendencia general de las estructuras regionales, directamente donde se proyecta la traza de la falla de Perales.

En Ixtlahuaca, estos fenómenos, que vienen presentándose desde hace muchos años, continúan manifestándose todavía. A varios años de haber sido detectados, aún se sigue reparando con frecuencia la carretera Ixtlahuaca-Jilotepec que resulta afectada continuamente (Figura 9).

Fuera de la región de estudio, los fenómenos de esa naturaleza son numerosos. Ciudades como Toluca, Celaya, Silao, Abasolo (Figuras 10 y 11), Aguascalientes y otras, dan testimonio de sus efectos en las construcciones, propiciando en algunos casos situaciones muy críticas. En todos los casos, existe

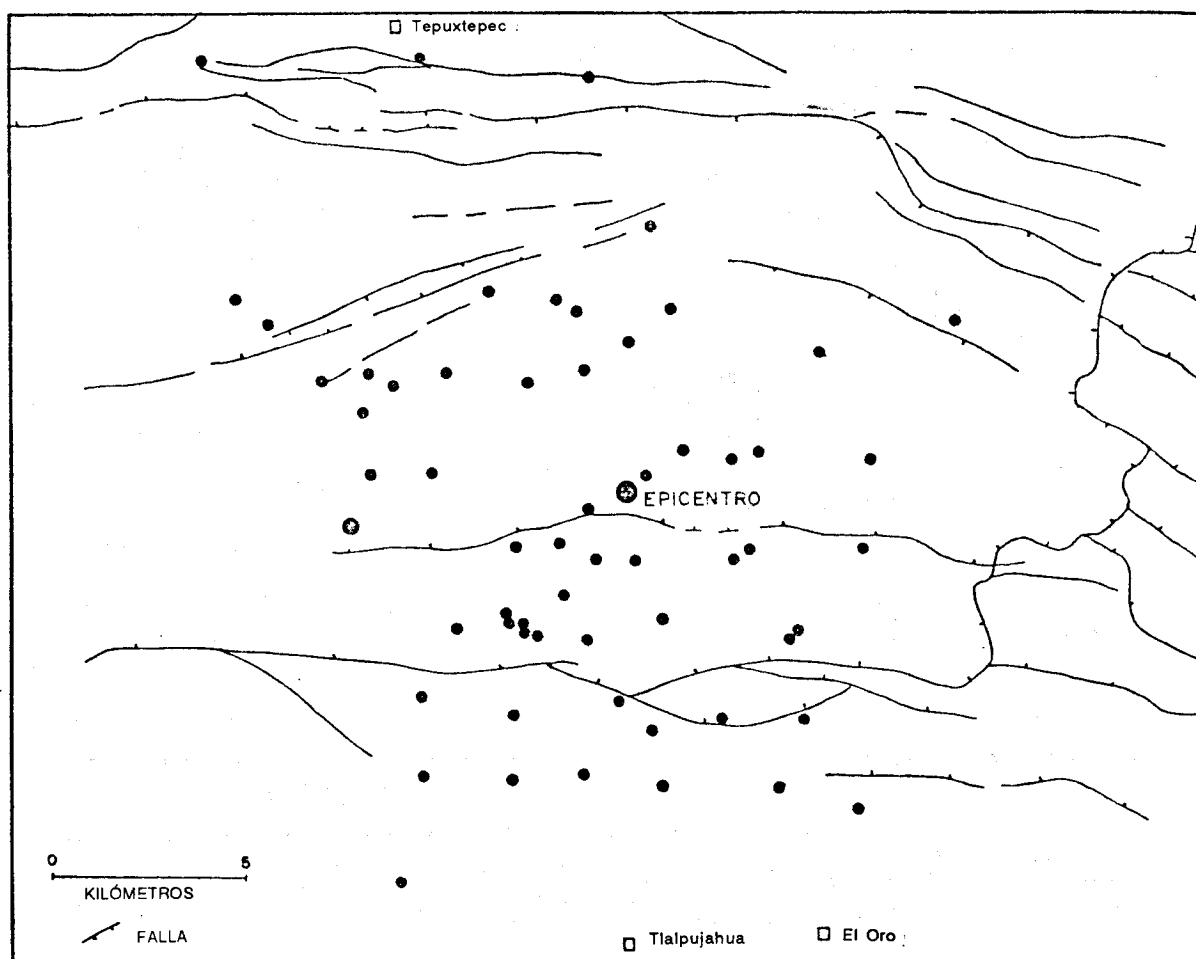


Figura 8.- Epicentro y réplicas del sismo del 22 de febrero de 1979, ocurrido en la región de Maravatío-Acambay, de acuerdo con los datos de Astiz-Delgado (1980).

Tabla 2.- Epicentros de algunos sismos registrados en la región de estudio.\*

NÚM. SISMO	DÍA	MES	AÑO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	PROF. [km]	MAGN. [Richter]
1	19	11	12	19.93N 99.83W	SUP.	7.0
2	19	07	15	19.93N 99.83W	50 (?)	?
3	10	10	16	19.93N 99.83W	50 (?)	4.0
4	10	12	26	20.41N 101.93W	?	4.0
5	06	03	31	20.11N 102.88W	?	4.0
6	21	11	47	19.93N 99.83W	?	4.0
7	10	05	53	19.93N 99.83W	?	4.2
8	10	05	53	19.93N 99.83W	?	4.0
9	11	12	61	19.70N 99.10W	33	5.0
10	07	10	64	19.93N 99.83W	?	4.4
11	22	02	79	19.89N 100.17W	8	5.3
12	22	02	79	20.18N 100.35W	26	4.0
13	26	02	79	19.82N 100.12W	SUP.	4.4
14	28	02	79	20.16N 100.30W	18	4.5
15	01	03	79	19.76N 100.26W	10	4.8
16	01	03	79	19.85N 100.37W	23	4.7

\*Tomados de Figueroa-Abarca (1970) y de Astiz-Delgado (1980)

también una estrecha relación entre las orientaciones de los agrietamientos (algunos con desplazamientos verticales importantes) y el patrón estructural regional.

Por otra parte, en lo referente al deslizamiento de terrenos, éstos se manifiestan en varios sitios, asociados claramente a las fallas; a manera de ejemplo se cita los siguientes:

- A lo largo de la falla de Pastores, particularmente en donde la carretera Temascalcingo-Atacomulco cruza la traza de su plano de falla, se pudo constatar la inestabilidad y colapso de los suelos que están sobre el talud que forma el escarpe de la falla (Figura 12).

- Al poniente de Temascalcingo y sudoriente de Maravatío, es común observar importantes desprendimientos de rocas a lo largo de los escarpes de falla (Figura 13).

- Finalmente, al ESE de Acámbaro, aparecen numerosos desgarramientos y deslizamientos de bloques de rocas a lo largo de los escarpes de falla, tan recientes que incluyen la vegetación (Figura 14).

El análisis anterior induce a considerar que los fenómenos de agrietamiento y deslizamiento de terrenos son simplemente las manifestaciones más sensibles de la actividad tectónica que prevalece actualmente en la región.

#### FALLAS ACTIVAS

El término "falla activa" es empleado comúnmente en la literatura geológica sin una definición precisa. Como en la





Figura 9.- Grieta sobre la carretera Ixtlahuaca-Jilotepec. Inmediaciones de Ixtlahuaca.

práctica este término tiene connotaciones diversas, criterios diferentes han dado definiciones diferentes.

Una revisión de las definiciones de "falla activa" que han aparecido entre 1916 y 1976 fue realizada por Slemmons

y McKinney en 1977, quienes después de analizarlas sugieren el uso de los términos "falla activa" (*active fault*), "falla potencialmente activa" (*capable fault*) y "falla inactiva" (*dead fault*), a las que caracterizan de la manera siguiente:



Figura 10.- Efectos de los agrietamientos actuales en Abasolo, Gto.; medio urbano.



Figura 11.- Efectos de los agrietamientos actuales en Abasolo, Gto.; medio rural.

Falla activa: es aquella que ha tenido movimientos (actividad) durante el régimen sismotectónico actual, por lo que es probable que pueda activarse en el futuro. Además, este

tipo de fallas presenta evidencias de movimientos holocénicos (en los últimos 10,000 años), las evidencias pueden ser históricas, geológicas, geodésicas o geofísicas (sismológicas).

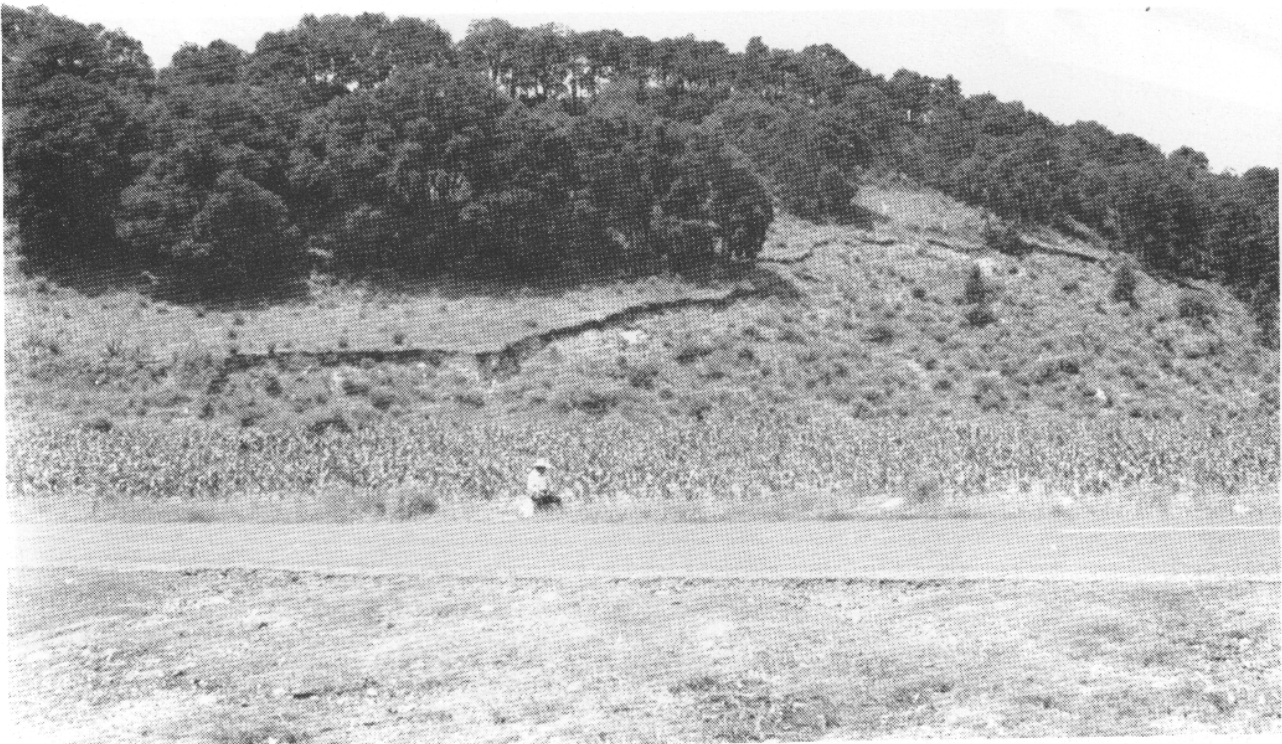


Figura 12.- Deslizamiento de terrenos sobre la falla de Pastores; carretera Atlacmulco-Temascalcingo.





Figura 13.- Desprendimientos de roca a favor de los planos de falla en la región de Maravatío.

Falla potencialmente activa: Es aquella que ha tenido movimientos (actividad) una vez durante los últimos 35,000 años, o más de una vez en los últimos 500,000 años.

Falla Inactiva: Es aquella que estuvo activa durante un período orogénico antiguo, pero no durante el régimen tectónico presente; no afecta terrenos del Cenozoico superior y no está activa sísmicamente.

Tomando en consideración los criterios anteriores, y con base en sus características geológicas y sísmológicas, las fallas de la región de estudio pueden ser clasificadas, sin ninguna ambigüedad, como "fallas activas" o "fallas potencialmente activas"; son raras aquellas que pudieran comportarse como "fallas inactivas".

Dentro de la primera categoría ("fallas activas"), debe considerarse a la falla de Perales, la falla de Pastores, el sistema Acambay-Tixmadejé, la mayoría de las fallas del Sistema Temascalcingo-Tepuxtepec-Acámbaro, algunas de las fallas del sistema de Cuitzeo, la falla de Epitacio Huerta, la fosa tectónica de Penjamillo y la mayoría de las fallas de la fosa tectónica de Chapala; en la segunda categoría ("fallas potencialmente activas"), el resto de las estructuras.

Las consideraciones anteriores están basadas fundamentalmente en las características geológicas (estratigráficas, estructurales, geomorfológicas), en algunos datos geofísicos (muy escasos) y en los fenómenos de agrietamiento y desliza-

miento de terrenos. Para consideraciones más definitivas y categóricas en relación con la clasificación de todas las fallas de la región en "activas", "potencialmente activas" o "inactivas", se hace necesario un conocimiento detallado de la estratigrafía del Cuaternario, así como la información sísmológica indispensable, en virtud de que es la sísmicidad la evidencia más contundente de la actividad tectónica de una falla.

#### CONCLUSIONES

Al finalizar esta contribución, se desea manifestar que, dadas las características geológicas y la magnitud del área involucrada, este artículo debe ser considerado necesariamente como de carácter preliminar, e interpretarse como un primer acercamiento al conocimiento de los efectos geológicos más característicos de la actividad tectónica reciente, en esta parte del país. Esto no impide, sin embargo, que se pueda concluir desde ahora lo siguiente:

- La región estudiada se encuentra fracturada intensamente por numerosas fallas, que pueden ser agrupadas en conjuntos y sistemas.

- Todas las fallas son de tipo normal, de gran ángulo de inclinación, de dimensiones longitudinales que varían desde unos cuantos kilómetros hasta varias decenas de ellos y de saltos verticales considerables.

- Las orientaciones estructurales principales son E-W, NE-SW y, más escasamente, NW-SE y N-S; las últimas generalmente sobrepuestas a las primeras.

- En conjunto, las fallas forman pilares y fosas tectónicas, éstas últimas constituyen estructuras importantes.

- Las fallas involucran rocas que son en su mayoría volcánicas, de edades que oscilan desde el Oligoceno hasta el Reciente.

- Independientemente de los modelos diversos propuestos que intentan explicar la evolución del Eje Neovolcánico Transmexicano, las fallas definidas tectónicamente en esta región responden a esfuerzos de tensión originados en el Mioceno, o antes, pero que manifestaron una actividad importante en el Cuaternario.

- Las fallas guardan una relación estrecha con los fenómenos volcánicos y sísmicos de esta región.

- Los criterios más empleados para definir fallas "activas", "potencialmente activas" o "inactivas", permiten catalogar las fallas de la región dentro de los dos primeros términos; en la primera categoría debe considerarse las fallas de Perales, de Pastores, de Acambay-Tixmadejé y algunas de las regiones de Temascalcingo-Tepuxtepec-Acámbaro, de Cuitzeo y de la fosa tectónica de Chapala; el resto de ellas, dentro de la segunda categoría.

- La actividad tectónica actual de algunas de las fallas se manifiesta por los sismos, agrietamiento de terrenos y una expresión morfológica fuerte, donde se incluye la inestabilidad de rocas y suelos.

- Finalmente, y como puede adivinarse, se trata de una región tectónicamente activa, cuyos efectos (sismos, volcanes, agrietamiento de terrenos y deslizamiento de rocas, y colapsamiento de suelos) representan riesgos naturales (riesgos geológicos) para esta parte del país que, por su densidad demográfica alta, resulta ser de una gran vulnerabilidad.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar-Contreras, Adrián, 1980, Reporte de las observaciones que se hicieron a unas grietas de reciente apertura en la población



Figura 14.- Colapsamiento de rocas a favor de los planos de falla en la región de Acámbaro.

- de Ixtlahuaca, Méx.: Toluca, Departamento de Minería, Gobierno del Estado de México, informe técnico, 18 p. (inédito).
- Álvarez, Román, 1975, Transcontinental faulting—evidence for superimposed subduction in Mexico: Transactions of the American Geophysical Union, v. 56, p. 63-94.
- Astiz-Delgado, L. M., 1980, Sismicidad en Acambay, Estado de México—el temblor del 22 de febrero de 1979: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 130 p. (inédita).
- Campa, M. F., Campos, Mario, Flores, Roberto, y Oviedo, Amador, 1974 (1975), La secuencia mesozoica volcánico-sedimentaria metamorfozada de Ixtapan de la Sal, Méx.-Teloloapan, Gro.: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 35, p. 7-28.
- CETENAL, 1971a, [Hoja] Atlacomulco (E14-A17), Estado de México: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1971b, [Hoja] Tepeji del Río (E14-A18), Hidalgo: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1971c, [Hoja] Tula de Allende (F14-C88), Hidalgo: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1972a, [Hoja] Sahuayo de Morelos (F13-D87), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1972b, [Hoja] Villa Chavinda (F13-D88), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1972c, [Hoja] Presa Solís (F14-C85), Guanajuato: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973a, [Hoja] Tototlán (F13-D67), Jalisco: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973b, [Hoja] Atotonilco el Alto (F13-D68), Jalisco: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973c, [Hoja] La Barca (F13-D78), Jalisco: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973d, [Hoja] La Piedad de Cabadas (F13-D79), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973e, [Hoja] Ecuandureo (F13-D89), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973f, [Hoja] Pénjamo (F14-C71), Guanajuato: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973g, [Hoja] Angamacutiro (F14-C81), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973h, [Hoja] Moroleón (F14-C83), Guanajuato: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1973i, [Hoja] Acámbaro (F14-C34), Guanajuato: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1974, [Hoja] Puruándiro (F14-C82), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1975, [Hoja] Ocotlán (F13-D77), Jalisco: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1976a, [Hoja] Cuitzeo (E14-A13), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1976b, [Hoja] Zinapécuaro (E14-A14), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1977a, [Hoja] Zumpango de Ocampo (E14-A19), Estado de México: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.

- 1977b, [Hoja] Ixtlahuaca (E14-A27), Estado de México: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1978a, [Hoja] El Oro de Hidalgo (E14-A16), Estado de México: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1978b, [Hoja] Morelia (E14-A23), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1978c, [Hoja] Villa del Carbón (E14-A28), Estado de México: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1978d, [Hoja] Polotitlán (F14-C87), Hidalgo: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1980, [Hoja] Maravatío (E14-A15), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1981a, [Hoja] Zacapu (E14-A11), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1981b, [Hoja] Coeneo de la Libertad (E14-A12), Michoacán: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1982, [Hoja] Cuautitlán (E14-A29), Estado de México: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000.
- 1988, [Hoja] Amealco (F14-C86), Querétaro: México, D. F., Secretaría de la Presidencia, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta topográfica escala 1:50,000, 4a reimpresión.
- Demant, Alain, 1981, *L'Axe Néovolcanique Transmexicain—étude volcanologique et pétrographique; signification géodynamique*: Marsella, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, disertación doctoral, 259 p. (inédita).
- 1984, Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 5, p. 217-222.
- Figueroa-Abarca, Jesús, 1970, Catálogo de sismos ocurridos en la República Mexicana: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Reporte 272, 88 p. (inédito).
- Flores-L., R., 1978, Las posibles relaciones tectónicas entre la Faja Volcánica Mexicana y una porción de la cuenca sedimentaria de Morelos-Guerrero: México, D. F., Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional, 4, Resúmenes, p. 19 (resumen).
- Flores, Teodoro, 1920, Estudio geológico-minero del distrito El Oro-Tlalpujahua: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 37, 87 p.
- Fries, Carl, Jr., Ross, C. S., y Obregón-Pérez, Alberto, 1965 (1977), Mezcla de vidrios en los derrames cineríticos Las Américas de la región de El Oro-Tlalpujahua, Estados de México y Michoacán, parte centromeridional de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 70, 85 p.
- Gastil, R. G., y Jensky, W. A., 1973, Evidence for a strike-slip displacement beneath the Trans-Mexican volcanic belt: Stanford University Publications, Geological Sciences, v. 13, p. 171-180.
- Hanus, Vaclav, y Vanek, Jisi, 1977-1978, Subduction of the Cocos plate and deep active fracture zones of Mexico: Geofísica Internacional (México), v. 1, p. 14-53.
- Hasenaka, Toshiaki, y Carmichael, I. S. E., 1985, A compilation of location, size and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, central Mexico: Geofísica Internacional (México), v. 24, p. 577-607.
- Johnson, C. A., 1986, A study of neotectonics in central Mexico from a LANDSAT Thematic Mapper imagery: Coral Gables, Florida, Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, tesis de maestría, 112 p. (inédita).
- López-Ramos, Ernesto, compilador, 1976, Carta geológica de la República Mexicana, 4a ed.: México, D. F., Comité de la Carta Geológica de México, escala 1:2'000,000.
- Lugo-Hubb, J. L., Ortiz-Pérez, M. A., y Bocco-Verdinelli, G., 1985, Las zonas más activas en el Cinturón Volcánico Mexicano (entre Michoacán y Tlaxcala): Geofísica Internacional (México), v. 24, p. 83-96.
- Martínez-Reyes, Juventino, Quintero-Legorreta, Odranoel, y Nieto-Samaniego, A. F., 1987, Estudio geológico de las fallas potencialmente activas en las regiones de Acambay, Maravatío, Cuitzeo y Chapala, estados de México, Michoacán, Guanajuato y Jalisco: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Proyecto PCECCNA-040291, 91 p. (inédito).
- Menard, H. W., 1955, Deformation of the northeastern Pacific basin and the west coast of North America: Geological Society of America Bulletin, v. 66, p. 1149-1196.
- Mooser, Federico, 1968 (1969), The Mexican Volcanic Belt structure and development—formation of fractures by differential crustal heating: México, D.F., Simposio Panamericano del Manto Superior, grupo 2, v. 2, p. 15-22.
- 1972a, El Eje Neovolcánico Mexicano—debilidad cortical pre-paleozoica reactivada en el Terciario: Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional, 2, Resúmenes, p. 186-188.
- 1972b, The Mexican volcanic belt—structure and tectonics: Geofísica Internacional (México), v. 12, p. 55-70.
- 1975, The Mexican Volcanic Belt—interpretation derived from fractures and form: Transactions of the American Geophysical Union, v. 56, p. 1066 (resumen).
- Mooser, Federico, y Maldonado-Koerdell, Manuel, 1961, Tectónica penecontemporánea a lo largo de la costa mexicana del Océano Pacífico: Geofísica Internacional (México), v. 1, p. 3-20.
- Pal, Surendra, y Urrutia-Fucugauchi, Jaime, 1977, Paleomagnetism, geochronology and geochemistry of some igneous rocks from Mexico and their tectonic implications: Calcuta, India, International Gondwana Symposium, 4, sect. 8, p. 814-831.
- Raisz, Erwin, 1964, Landforms of Mexico (2a ed.): Cambridge, Mass., edición privada, mapa con texto, escala 1:3'000,000.
- Sánchez-Rubio, Gerardo, 1978, The Amealco caldera: Geological Society of America Abstracts with Program, v. 10, p. 145 (resumen).
- 1984, Cenozoic volcanism in Toluca-Amealco region, central Mexico: Londres, University of London, Imperial College of Science and Technology, tesis de maestría, 275 p. (inédita).
- Servicio Sismológico Nacional, 1971-1986, Boletín Sismológico (números publicados desde 1971 hasta 1986): México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica.
- Silva-Mora, Luis, 1979, Contribution à la connaissance de l'Axe Volcanique Transmexicain—étude géologique et pétrologique des laves du Michoacán oriental: Marsella, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III, tesis doctor ingeniero, 230 p. (inédita).
- Slemmons, D. B., y McKinney, Roy, 1977, Definition of "active fault": U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper S-77-8, p. 22.
- 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.
- Urbina, Fernando, y Camacho, Heriberto, 1913, La zona megasísmica Acambay-Tixmadejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912: Instituto Geológico de México, Boletín 32, 175 p.
- Urrutia-Fucugauchi, Jaime, y del Castillo, Luis, 1977, Un modelo del Eje Volcánico Mexicano: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 38, p. 18-28.
- Urrutia-Fucugauchi, Jaime, y Pal, Surendra, 1977, Paleomagnetic data from Tertiary igneous rocks, northeast Jalisco, Mexico: Earth and Planetary Science Letters, v. 36, p. 202-206.

Valero, J. M., ed., 1986, México tierra de temblores: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Información Científica y Tecnológica, v. 8, núm. 123, 64 p.

Manuscrito presentado: 2 de diciembre de 1987.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 22 de mayo de 1989.

Manuscrito aceptado: 10 de julio de 1989.