

ANÁLISIS TECTÓNICO DEL SISTEMA TRANSPRESIVO NEOGÉNICO ENTRE MACUSPANA, TABASCO, Y PUERTO ÁNGEL, OAXACA

Luis Alberto Delgado-Argote¹ y
Enrique Alberto Carballido-Sánchez²

RESUMEN

La compleja geometría estructural del sureste de México se explica parcialmente a través del análisis de estabilidad de la región, donde existe una interacción de las placas de América del Norte, del Caribe y de Cocos. Esta zona de junta triple, de tipo trinchera-trinchera-falla transformante, ubicada hacia el SSE de Salina Cruz, es inestable y emigra desde hace aproximadamente 8 Ma hacia el oriente, a partir de Puerto Ángel, a lo largo del sistema Polochic-Motagua. La solución de la junta triple del Golfo de Tehuantepec explica rasgos tectónicos mayores, entre los que están incluidos: (a) una cuenca marginal, entre Puerto Ángel y Salina Cruz, definida por gravimetría de aire libre; (b) un sistema transpresivo izquierdo, de orientación SW-NE, de aproximadamente 100 km de anchura, trazado desde Puerto Ángel hasta Macuspana; y (c) la definición de la región comprendida entre los sistemas transcurrentes Puerto Ángel-Macuspana y Polochic-Motagua, de un bloque activo con una rotación en el sentido de las manecillas del reloj, cuyos límites hacia el norte no están bien definidos.

Se concluye que el sistema Puerto Ángel-Macuspana está, probablemente, activo. Por medio del análisis de la información litológica y estructural, aunado a la interpretación de imágenes de satélite de escala 1:1'000,000, se encontró que este sistema afecta a rocas que varían en edad desde el Precámbrico hasta, por lo menos, el Mioceno tardío (5 Ma). Los lineamientos tienen una orientación N30-70°E, con variaciones locales controladas litológicamente, lo cual coincide con la solución geométrica de la junta triple, que predice estructuras en el continente cercanas a N65°E.

Palabras clave: tectónica, transpresión, Tabasco, Oaxaca, México.

ABSTRACT

The structurally complex geometry of southeastern Mexico can be partially explained by stability analysis of the region of convergence between the North America, Caribbean and Cocos plates. A trench-trench-transform fault triple junction is located south-southeast of Salina Cruz. It is unstable and migrates eastward since about 8 Ma, from Puerto Ángel, along the Polochic system. The geometric solution and evolution of the triple junction of the Gulf of Tehuantepec explains major tectonic features such as: (a) a gravimetrically defined basin, between Puerto Ángel and Salina Cruz; (b) a left-handed transpressive system, 100 km wide and SW-NE oriented, which runs from Puerto Ángel to Macuspana; and (c) a probably active clockwise rotative block located between the Puerto Ángel-Macuspana and Polochic-Motagua transcurrent systems. The northern limits of this block are not well-defined.

An important conclusion of this study was the definition of the Puerto Ángel-Macuspana system as probably active. It is shown, through lithologic and structural data and interpretation of satellite images, that such system affects Precambrian to late Miocene (5 Ma) rocks. The triple junction geometric solution and evolutionary trend predicts N65°W oriented continental structures which closely approximate the observed N30-70°E oriented lineaments.

Key words: tectonics, transpression, Tabasco, Oaxaca, Mexico.

INTRODUCCIÓN

De la inspección de mapas de contornos de sismicidad mundial (Lomnitz, 1974) y, en especial, de México, resulta evidente la estrecha relación existente entre ésta y los rasgos tectónicos mayores activos. En la Figura 1, es claro el paralelismo entre las líneas de isosismicidad y la trinchera mesoamericana, de donde se ha dado en denominar a esta sismicidad como de

“tipo Pacífico” (Lomnitz, 1974); sin embargo, no resulta el mismo paralelismo cuando se trata de correlacionar el vulcanismo del Holoceno con la misma trinchera (especialmente para el SSE de México), a pesar de que el vulcanismo neogénico sigue, en términos generales, la línea isosísmica de 1×10^{15} erg/(km² · año). Por otro lado, existen claras discontinuidades de las líneas de isosismicidad hacia el norte de Veracruz y en el Golfo e Istmo de Tehuantepec. Para la zona de este estudio en particular, la discontinuidad localizada en Veracruz es considerada de valor marginal por estar relativamente lejana de los rasgos estructurales del Istmo de Tehuantepec, mientras que las relaciones entre isosismicidad y las estructuras existentes entre la discontinuidad del Golfo de Tehuantepec y Ciudad del Carmen, detectadas desde hace tiempo por Petróleos Mexicanos, tienen un alto significado en el contexto neotectónico de la región del Istmo de Tehuantepec.

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F. Dirección actual: Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), Av. Espinoza 843, 22800 Ensenada, Baja California.

²Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F. Dirección actual: Geology Department, Tulane University, New Orleans, 70118 LA, USA.

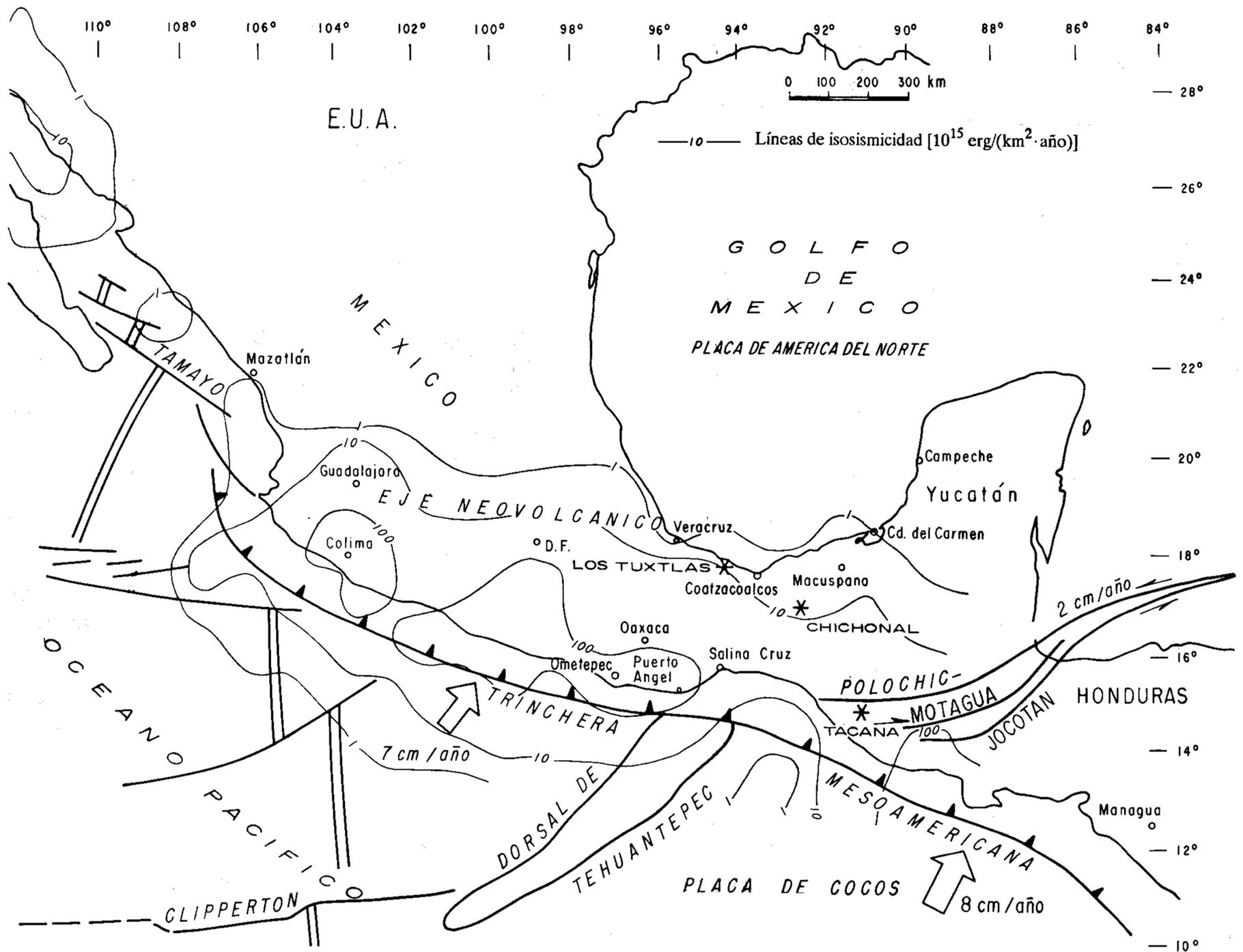


Figura 1.- Mapa de rasgos tectónicos mayores (Auboin y von Huene, 1985) y líneas de isosismicidad en unidades de 10^{15} erg/($\text{km}^2 \cdot \text{año}$) (Lomnitz, 1974). Los vectores de velocidad de placas fueron tomados de Drummond (1981).

En varios estudios anteriores (Guzmán-Speziale, 1985; Sánchez-Barreda, 1981; Lejsec *et al.*, 1978), de carácter sísmológico, se ha propuesto la posibilidad o necesidad de la existencia de una falla continental transistmica de orientación N-S, la cual cortarían al istmo en su parte más angosta. De igual forma, las complejidades estructurales y sísmicas, que en esta zona han sido identificadas, han requerido de modelos más sofisticados de correlación entre las diferentes estructuras mayores (Mota-Palomino *et al.*, 1986).

Tectónicamente, la región de estudio se caracteriza por una compleja geometría entre las placas del Caribe, de América del Norte y de Cocos, las cuales pueden ser analizadas desde un punto de vista regional al considerar la existencia de una junta triple en algún lugar del Golfo de Tehuantepec, alrededor de las coordenadas 15°N y 95°W , aproximadamente. Este tipo de relaciones y el estudio de estabilidad en otras regiones, como la costa occidental de Estados Unidos y Canadá (Dickinson y Snyder, 1979a, 1979b), muestran correlación con accidentes geológicos mayores en el continente (*i.e.*, vulcanismo, fallas, desarrollo de cuencas, etc.). Para la región de Chiapas, se ha propuesto la individualización del bloque correspondiente al macizo cristalino de Chiapas, del Pérmico, en respuesta a la evolución del bloque de Chortis (Guzmán-Speziale,

1985; Meneses-Rocha, 1986), el cual se considera aún activo a lo largo de la provincia de fallas de transcurrancia de Chiapas, que termina, hacia el oeste, en el Istmo de Tehuantepec.

Para fines de análisis de estabilidad tectónica de la región, se debe hacer la correlación de los rasgos mayores entre placas para explicar, dentro del contexto de evolución de juntas triples, a los pliegues y fallas *en échelon* derivados de una tectónica transpresiva o de desplazamiento lateral, a la luz de datos de geología superficial correlacionados con datos geofísicos, tanto continentales como oceánicos.

Los objetivos de este análisis tectónico son los de presentar de una manera sintetizada los rasgos neotectónicos más importantes desde el punto de vista de estabilidad estructural, así como de sísmicidad asociada. En ese sentido, se propone dar un marco geológico de referencia para la sísmicidad registrada en la zona del istmo, como respuesta a la interacción de placas para ser utilizada en análisis posteriores de riesgo sísmico.

Es importante hacer notar que se ha omitido una diferenciación de provincias geológicas, pues parece evidente que los rasgos neotectónicos no están influenciados por éstas. Con excepción de los rasgos estructurales interpretados por medio de las imágenes de satélite, esta síntesis tectónica fue elabora-

da, en su mayor parte, a partir del material publicado, por lo que el alcance de ésta presentará las limitaciones propias de la falta de documentación de campo, *sensu stricto*.

PRESENTACION DEL PROBLEMA

Se mencionó, en la introducción, que la estabilidad tectónica de la región se considera controlada, principalmente, por la interacción de tres placas que convergen a la altura del Golfo de Tehuantepec, para definir una zona que con propiedad debe ser considerada como de junta triple. Las unidades tectónicas en juego son: el sistema de fallas transformantes de Polochic-Motagua y la trinchera mesoamericana, donde esta última está dividida en dos porciones, de acuerdo con las características que le imprime la placa de Cocos, utilizando como frontera aproximada a la paleozona de fractura de la dorsal de Tehuantepec, según se describe enseguida.

SISTEMA POLOCHIC-MOTAGUA

En el sentido de Rose y colaboradores (1975), estas fallas de tipo transformante incluyen a los sistemas de fallas Cuilco-Chixoy-Polochic, los cuales son observables con claridad hacia el norte de Guatemala y sur de Chiapas. El sistema Polochic-Motagua funciona como límite entre las placas de América del Norte y del Caribe, con movimiento lateral izquierdo (Figura 1). Este sistema en algunas porciones incluye grandes bloques de serpentinita, alargados en el sentido de las fallas (Case, 1980). Rose y colaboradores (1975) hacen mención al hecho de que, a pesar del sentido izquierdo del sistema, una gran cantidad de fallas secundarias de desplazamiento lateral muestra un sentido inverso al desplazamiento esperado, lo cual es parcialmente interpretado por Malfait y Dinkelman (1972) como un efecto complejo, debido a compresión asociado con un sistema de subducción posterior al Mioceno tardío. Posteriormente, Burkart (1983) y Burkart y colaboradores (1987) mostraron rasgos estructurales y estratigráficos que indican un desplazamiento del orden de 130 km a lo largo de la falla Polochic. En el mismo sentido, Deaton y Burkart (1984), basados en fechas de rocas volcánicas y otras evidencias estratigráficas, consideran la actividad principal de esta falla dentro del intervalo de 10.3 a 6.6 Ma, haciéndolo sincrónico y genéticamente relacionado con la dorsal de Caimán. Una amplia discusión sobre la geometría y rasgos internos de esta falla se encuentra principalmente en los tres últimos artículos citados. Finalmente, destaca el marcado cambio de orientación del sistema Polochic, respecto a los lineamientos del área del Istmo de Tehuantepec, en lo que aquí se definirá como sistema Puerto Ángel-Macuspana, según se muestra después.

TRINCHERA MESOAMERICANA

Batimétricamente, la trinchera está identificada por las isobatas de 5,000 y 5,500 m, hacia el W y SE de la dorsal de Tehuantepec, correspondiente a las costas de Oaxaca y Chiapas-Guatemala, respectivamente. En la zona de trinchera, se ha reconocido sedimentos del Mioceno tardío (Watkins *et al.*, 1982) en la base de la pila sedimentaria, lo que permite asegurar que esta zona de subducción está activa por lo menos a partir de esta época. La inclinación de la zona de Benioff ha sido determinada por Dean y Drake (1978) en 15° para la zona correspondiente a México (NW de la dorsal de Tehuantepec) y en 21° para la zona de Guatemala. De la misma manera, los

vectores de desplazamiento relativo (subducción) entre una y otra zona son de N35°E y N20°E, respectivamente, lo que permitió la solución de una junta triple en el área mencionada, la cual se discute adelante. Según Drummond (1981), las velocidades utilizadas son de 8 y 7 cm/año, respectivamente. Los datos anteriores tienen una correlación aceptable con los utilizados por Sánchez-Barreda (1981), quien empleó velocidades de 8.25 y 6.68 cm/año para las regiones primera y segunda, respectivamente.

Por otro lado, Havskov y colaboradores (1982) indicaron que, en el área de Tehuantepec, la zona de Benioff está definida por un plano de 45° de inclinación, con un vector de desplazamiento de orientación N45°E. Esta aparente irregularidad, también mencionada por Mota-Palomino y colaboradores (1986), demuestra en parte las complejidades del sistema de subducción relacionado con la dorsal de Tehuantepec. En el mismo sentido, Couch y Woodcock (1981) resaltaron algunas características de la placa de Cocos a partir de esta frontera, las cuales pueden ser resumidas de la siguiente manera:

Las anomalías de aire libre positivas se extienden hacia el NW, a lo largo de la plataforma exterior de Guatemala y se curvan abruptamente hacia el continente a la altura del Golfo de Tehuantepec (Figura 2). Este rasgo gravimétrico es correlacionable con el basamento ofiolítico aflorante en la península de Nicoya, en Costa Rica, y fue evidenciado por el Leg 84 del *Deep Sea Drilling Project* a la altura de la costa de Guatemala (Aubouin y von Huene, 1985); la profundidad del Moho en la placa de Cocos, en uno y otro lado de la dorsal de Tehuantepec, determinada por sismología de refracción, es de 12 km hacia el NW y de 9.5 km hacia el SE; líneas gravimétricas de aire libre menores que -60 mgal indican la presencia de una gran cuenca de sedimentación, alargada con su eje mayor paralelo a la línea de costa entre Puerto Ángel y Salina Cruz; temporalmente, la edad de la corteza oceánica hacia el NW es de aproximadamente 10 Ma, mientras que hacia el SE, es de 20 Ma, pudiendo haber variaciones de edad hasta de 25 Ma en cada lado de la dorsal (Couch y Woodcock, 1981) y, por tanto, de espesor y densidad (Figura 2). Se menciona, también, que este sistema de fractura de Tehuantepec debió haberse formado antes de 8 Ma (Lynn y Lewis, 1976), de manera que un pequeño cambio en el movimiento Cocos-Pacífico y una reorientación de 20° de la dorsal del Pacífico oriental produjo la discordancia entre el presente alineamiento de la dorsal de Tehuantepec y las zonas de fractura de Clipperton y Siqueiros. Un detalle adicional que debe ser remarcado es la inflexión de las líneas batimétricas mostrada a la altura de Puerto Ángel, donde la trinchera se ve flexionada en un tramo de más de 100 km hacia el norte, de manera que ésta cambia su orientación de aproximadamente N70°W en Oaxaca, a E-W en esa porción (Figura 2). Como se mencionó anteriormente, Burkart (1983) y Burkart y colaboradores (1987), con base en información geológica de campo en Guatemala y Chiapas, estiman un desplazamiento a lo largo de la falla Polochic mayor al considerado de la medición sobre la trinchera. En este estudio, esta inflexión es explicada por medio de un modelo de evolución de la junta triple según se describirá en la siguiente sección. Debe mencionarse, además, que la edad de la trinchera frente a las costas de Oaxaca, se estima posterior al movimiento transcuriente localizado en la misma zona de subducción, el cual tiene una edad aproximada de 10 Ma, sobre la base de sedimentos del Mioceno tardío que representan la parte inferior del pa-

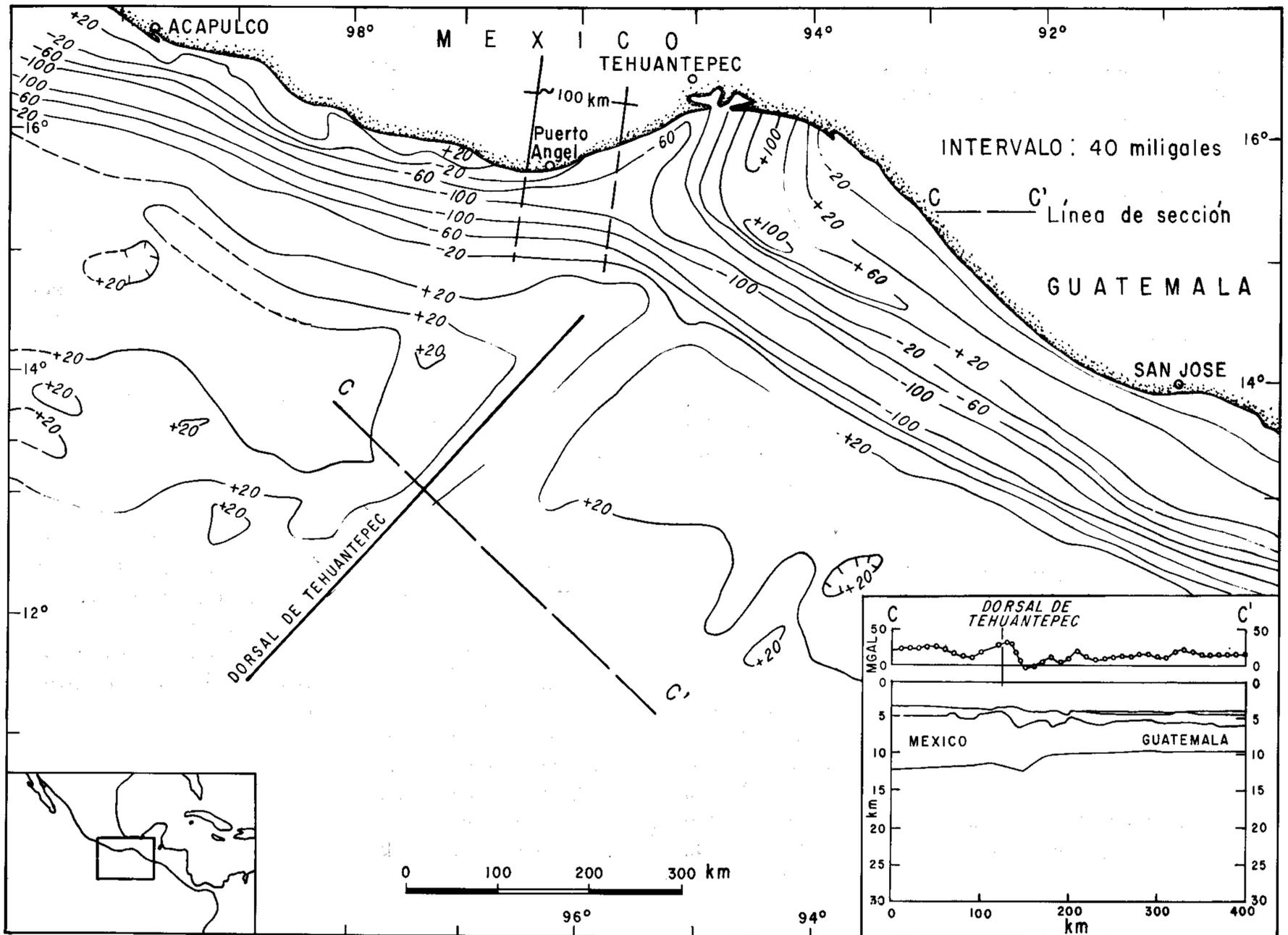


Figura 2.- Mapa de anomalías de gravedad de aire libre de la margen continental del sur de México y Guatemala, y sección cortical de la placa de Cocos, perpendicular a la dorsal de Tehuantepec (tomados de Couch y Woodcock, 1981). Se observa el cambio de orientación de la trinchera en un segmento de aproximadamente 100 km, al sur de Puerto Ángel.

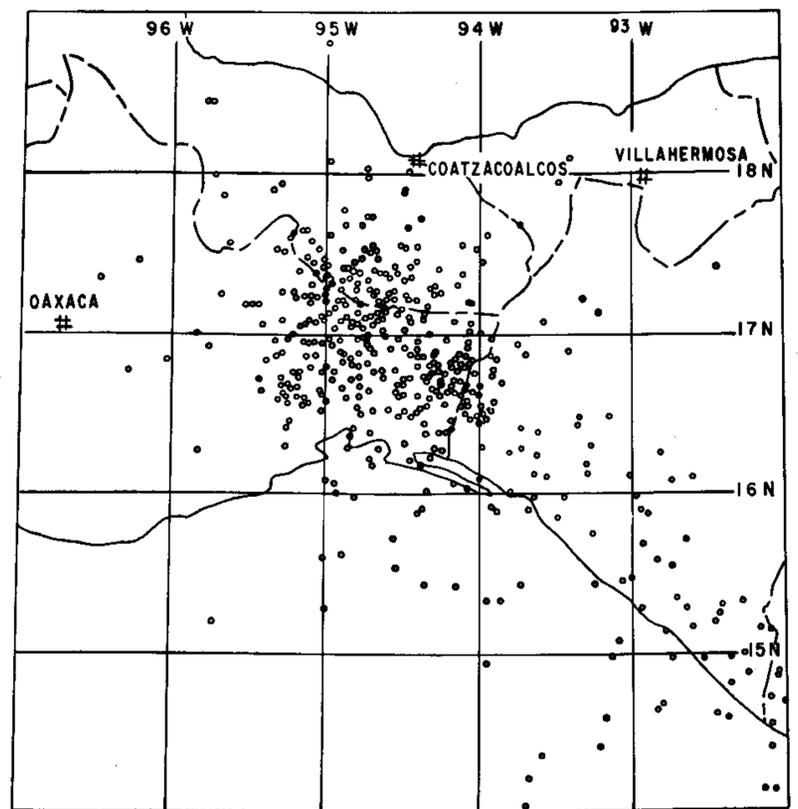
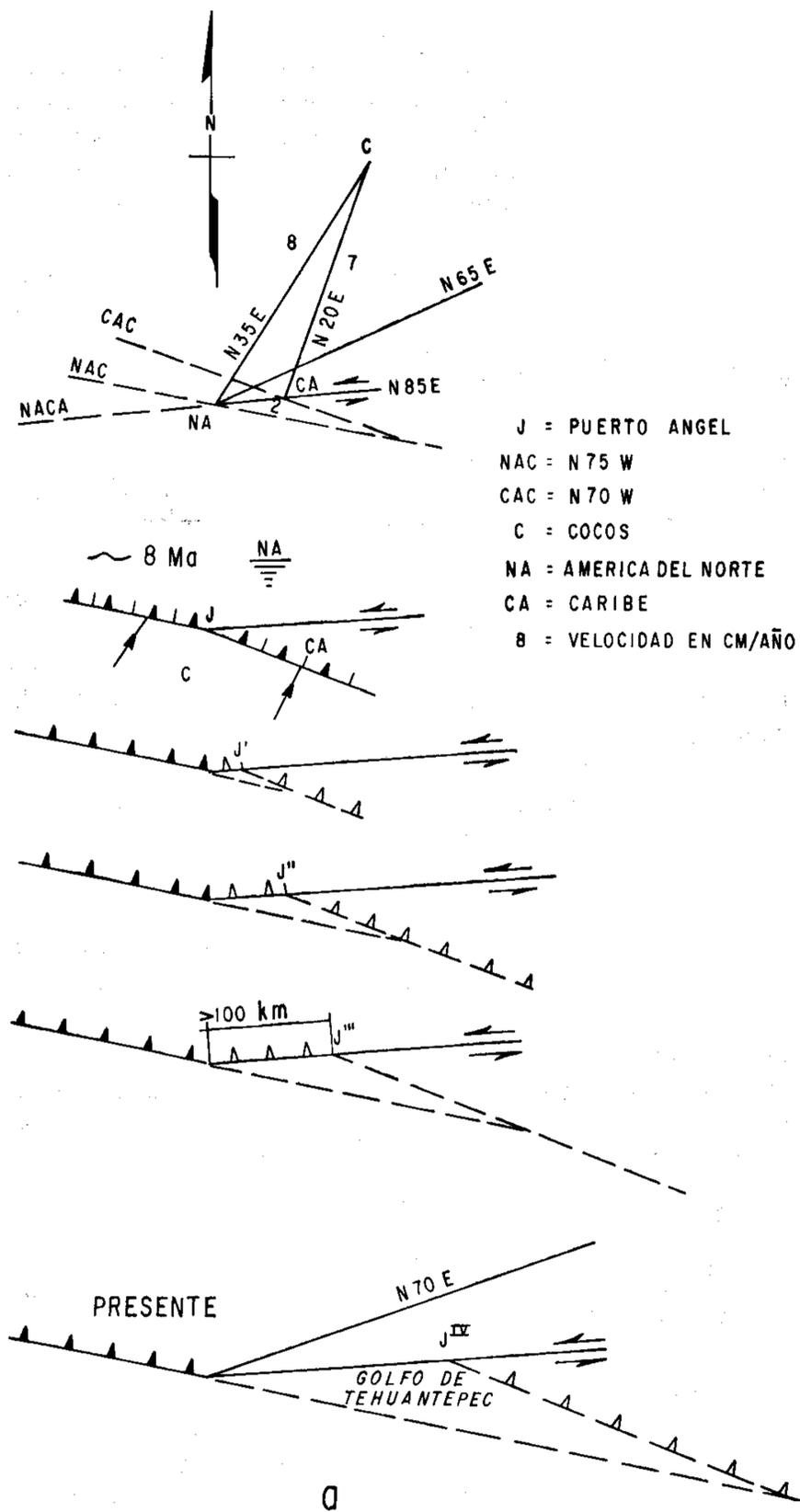
quete sedimentario localizado frente a las costas de Ometepe, Oaxaca (Watkins *et al.*, 1982), y que concuerda con la estimación del reordenamiento de placas propuesto anteriormente para la corteza oceánica de más de 8 Ma.

DEFINICIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA JUNTA TRIPLE DE TEHUANTEPEC

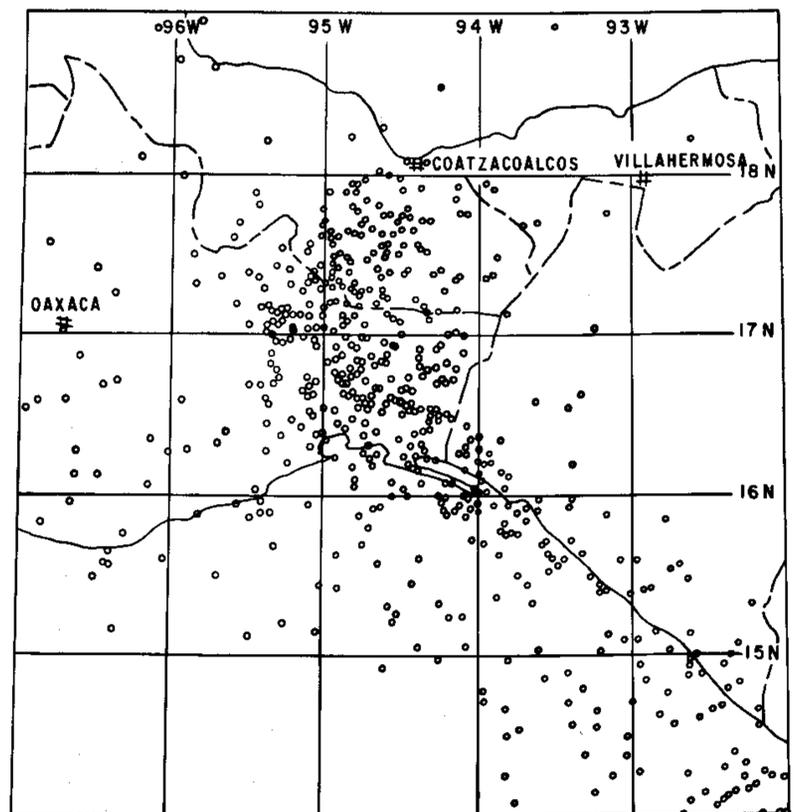
De una manera sintética, se puede decir que una junta triple está definida por una zona donde convergen tres límites de placas y que, en el caso de que ésta sea inestable, evoluciona a lo largo de una de las fronteras. De hecho, las mayores complejidades tectónicas son observadas en estas zonas, ya sean continentales u oceánicas. McKenzie y Morgan (1969) describieron los distintos tipos de juntas triples y las soluciones que permiten definir la estabilidad de éstas. Por su parte, Dickinson y Snyder (1979a, 1979b) plantearon sus posibles implicaciones tectónicas dentro de un ámbito continental, específicamente asociado con sistemas del tipo dorsal-trinchera-falla transformante, en el oeste de Canadá, Estados Unidos de América y México. El caso del Golfo de Tehuantepec está definido por un sistema del tipo trinchera-trinchera-falla transformante, que en ninguno de los casos analizados por McKenzie y Morgan (1969) se observa que sea estable.

La solución del sistema de Tehuantepec se presenta en la Figura 3, donde se muestra la evolución de la trinchera mesoamericana a lo largo del sistema de fallas de Polochic-Motagua, definido anteriormente como izquierdo. Se plantea la evolución de la junta triple a partir de una región frente a las costas de Puerto Ángel, lugar donde se inicia la inflexión principal de la trinchera y el inicio de la cuenca definida por gravimetría, que en este trabajo será denominada "cuenca de Salina Cruz". Tomando en consideración las edades publicadas de la trinchera y de la actividad de la dorsal de Tehuantepec, se propone que la evolución de la junta triple se haya iniciado hace 10 Ma y que su desarrollo no haya cambiado cualitativamente la geometría inicial; además, se considera que las velocidades relativas entre las placas no hayan variado sustancialmente, de manera que afecten esta geometría.

Con base en las consideraciones anteriores, se observa que la evolución de la junta explica geoméricamente la inflexión mencionada de la trinchera y la generación de la cuenca de Salina Cruz al seguir la geometría de la solución vectorial. El traslado de la porción sudoriental de la trinchera, sin considerar en este caso a la dorsal de Tehuantepec como un rasgo activo, permite conservar la orientación de la trinchera hacia el SE, de la misma manera en que es observada actualmente. Por otro lado, el vértice en el cual se unen las proyecciones



b



c

Figura 3.- (a) Geometría de estabilidad de la junta triple de Tehuantepec y evolución propuesta a partir de Puerto Ángel (J), hace aproximadamente 8 Ma. La geometría y velocidades, exceptuando la del vector NA-Cocos, fueron tomadas de Drummond (1981), y están referidas en la Figura 1. Se observa la resultante de esfuerzos en el continente, de orientación N70°E; (b) y (c) muestran datos de sismicidad para profundidades entre 40-100 km y 100-500 km, respectivamente (Jiménez, 1985).

geométricas de las dos porciones de la trinchera define un ángulo que evoluciona desde N63°E a N70°E donde, aparentemente, se estabiliza o, por lo menos, cambia menos drásticamente que en las primeras etapas de desarrollo, cuando se considera que la migración se efectuó a lo largo de más de 100 km, como se muestra en las Figuras 2 y 3. Se propone aquí que la proyección hacia el continente de este ángulo, resultante entre la orientación de las estructuras y los vectores de las velocidades relativas, debe traducirse en el ambiente continental como una zona de inestabilidad y discontinuidad estructural, según se verá en la sección siguiente, aunque la expresión sísmica no sea concluyente para sismos intermedios y profundos (Figura 3).

RASGOS LITOLÓGICO-ESTRUCTURALES DE LA REGIÓN COMPRENDIDA ENTRE SALINA CRUZ Y CIUDAD DEL CARMEN

AGRUPACIÓN ESTRATIGRÁFICO-ESTRUCTURAL

En esta sección, se hace un agrupamiento de las unidades litológicas más importantes para la definición del problema estructural del Istmo de Tehuantepec. Se utilizó, para este efecto, las cartas geológicas de DEGETENAL (1981a, 1981b), de escala 1:1'000,000, para facilitar la correlación con la interpretación de estructuras por medio de imágenes de satélite de la misma escala.

Con base en la litología reportada por DEGETENAL (1981a, 1981b), la cual concuerda aceptablemente con el Terciario sedimentario cartografiado por otros investigadores (Gutiérrez-Gil, 1950; Gibson, 1950; Cepeda-de la Garza, 1950; de la Llata-Romero *et al.*, 1979), se hizo un agrupamiento de ocho unidades litológicas básicas (Figura 4).

Se incluye las unidades intrusivas del Pérmico junto con las unidades metamórficas del Precámbrico y Paleozoico, las cuales son conspicuas en la porción meridional del área más cercana a la costa. Las unidades precretácicas sedimentarias quedaron agrupadas bajo el Triásico-Jurásico; afloran en contacto con la unidad anterior, en las partes internas del continente. Esta última unidad muestra aparentemente los efectos de la deformación nororiental que afecta principalmente a la zona del istmo.

Las rocas sedimentarias del Cretácico tienen una distribución amplia, principalmente hacia la región de Chiapas, siguiendo una tendencia estructural regional NW-SE. Según de la Llata-Romero y colaboradores (1979), estas rocas cabalgan sobre sedimentos del Cenozoico, mientras que una morfología precenozoica es evidente en la parte central de Chiapas. Hacia la región de Guatemala, este período está representado por el emplazamiento de una parte de las ofiolitas que están alojadas a lo largo del sistema Polochic-Motagua.

El Mesozoico intrusivo aflora en regiones aisladas, principalmente en el área cercana a Puerto Ángel y hacia el occidente del Istmo de Tehuantepec. En esta porción, es importante destacar la presencia de actividad magmática intrusiva, o por lo menos actividad termal considerable, al grado de reajustar geocronológicamente a especies minerales como la biotita hasta edades de aproximadamente 15 ± 1.5 y 10.8 ± 0.3 (Rb-Sr) en ortogneis (Guerrero, 1975, *in* Bellon *et al.*, 1982). Este par de edades muestra una correlación bastante aproximada con las discontinuidades tectónicas identificadas en la zona, especialmente para la región del este de Puerto Ángel. Se considera que parte de los intrusivos cartografiados como del Mesozoico, hacia el este de Chapultenango (oriente del volcán Chichonal), pudieran ser del Neógeno, como lo indican algunos intrusivos de 2.17 y 2.79 Ma, fechados por Damon y Montesinos (1978, *in* de la Llata-Romero *et al.*, 1979).

En relación con la cubierta sedimentaria del Terciario, se hizo una agrupación que puede resultar un poco arbitraria al reunirse dentro de una sola unidad a todas aquellas rocas pertenecientes a este período, con la sola excepción del Oligoceno. La causa principal se debe al hecho de que esta unidad es la que de mejor manera expone el sentido de desplazamiento del sistema transcurrente del istmo. Se observa, en la Figura 4, que entre los límites de las discontinuidades interpretadas por Gibson (1950) (Figura 5) y que serán discutidas con mayor detalle en la siguiente sección, la unidad del Oligoceno parece estar rotada en el sentido de las manecillas del reloj, interpretándose desplazamientos del orden de los 50 km en el sur de Coatzacoalcos y tal vez menores en el extremo oriental del bloque considerado. Resulta de primera importancia observar la polaridad de estos bloques, a fin de poder hacer estimaciones del orden de las rotaciones cuando los bloques hayan sido identificados. En este sentido, es recomendable efectuar estudios de paleomagnetismo con el fin de definir con certidumbre el efecto de rotación inferido. No se hizo una separación de las unidades del Mioceno, debido a que en este nivel de observación, éstas no muestran un grado alto de desplazamiento, aunque la deforma-

ción es clara en imágenes de satélite (Figura 6). De la Llata y colaboradores (1979) han interpretado que los sedimentos de la base del Terciario fueron depositados en cuencas estructurales formadas bajo un régimen tectónico laramídico, el cual tiene una expresión distensiva con formación de *horsts* y *grabens* con depósitos molásicos asociados.

Se incluye dentro de una misma unidad a las rocas volcánicas del Terciario tardío-Cuaternario. Desde el punto de vista geométrico, vale la pena destacar la aparente continuidad existente entre los edificios volcánicos activos de Los Tuxtlas, el campo volcánico del Chichonal y el Tacaná, los cuales, en conjunto, parecen definir un arco volcánico arqueado y semi-paralelo a la trinchera mesoamericana (Figura 1). Contrasta con lo anterior un sistema volcánico, distinto en orientación y localización respecto a la trinchera, ubicado cerca de Tehuantepec (Zanatepec) y que se prolonga hacia la parte central del Estado de Oaxaca, cubriendo parcialmente al complejo cristalino. Tomando en cuenta la disposición de estos cuerpos, y con fines de correlación, se propone que las rocas volcánicas de Zanatepec, del Oligoceno-Mioceno (?), hayan empezado a ser transportadas hacia el NE en un tiempo comprendido entre 8 y 5 Ma, mientras que el arco volcánico neogénico haya migrado aparentemente hacia el norte. La edad probable de las rocas volcánicas de la parte central de Oaxaca puede entonces correlacionarse con la reportada por Murillo-Muñetón y colaboradores (1986) en el área de Miahuatlán. Aquí, las rocas volcánicas arrojaron edades variables entre 52 ± 4 y 47 ± 4 Ma, correspondientes a la actividad piroclástica ácida de la región. Por otro lado, fueron determinadas edades de 27 ± 2 Ma para la actividad volcánica del centro de Oaxaca, al igual que la encontrada en la zona de Tehuantepec-Zanatepec (Grajales-N. *et al.*, 1986).

ESTRUCTURAS

Para el análisis estructural del área, se hizo la recopilación de datos publicados en varias fuentes, entre las cuales destacan los estudios estructurales de de la Llata-Romero y colaboradores (1979), Gutiérrez-Gil (1950), Monroy-Audelo (1986), Riva-Palacio (1980), Gibson (1950) y Cepeda-de la Garza (1950). Una parte importante en la interpretación de las estructuras se derivó del análisis de lineamientos de imágenes de satélite, de escala 1:1'000,000, en pares de bandas en película. Inicialmente, también fueron considerados los datos publicados por DEGETENAL (1981a, 1981b), de la misma escala, dentro de los que se hizo la discriminación de aquéllos que no tuvieran correlación con los de las publicaciones anteriormente citadas.

Se muestra en la Figura 5 aquellas estructuras compiladas a la escala mencionada para hacer su comparación con las interpretadas. A pesar de que esta escala no es la más adecuada para hacer comparaciones detalladas con las publicadas en la literatura en análisis estructurales de detalle, se consideró conveniente para efectuar un estudio sinóptico de la región y confrontarla con otras regiones del mundo, principalmente con el sistema de San Andrés, E.U.A. En la Figura 5 se observa la interpretación original de Gibson (1950), que consiste en dos grandes sistemas de fallas izquierdas, aunque debe aclararse que tales lineamientos no deben ser considerados como fallas en sentido estricto, sino como lineamientos o regiones de frontera de un sistema de inestabilidad cortical que excede los 100 km de anchura.

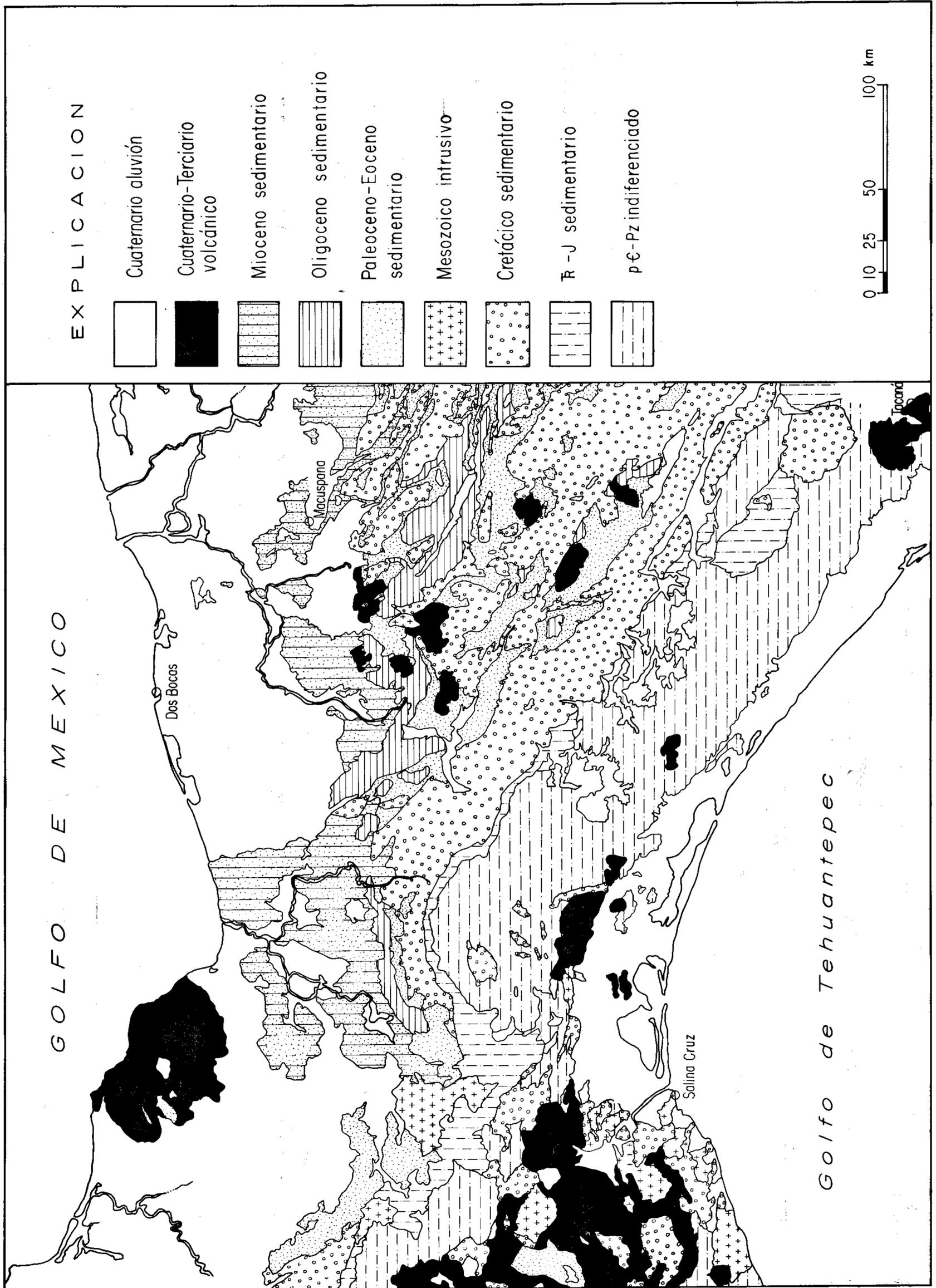


Figura 4.- Mapa litológico modificado de los mapas geológicos de la SPP (DEGETENAL, 1981a, 1981b), de escala 1:1'000,000, donde destacan las unidades oligocénicas afectadas por el sistema transpresivo neogénico.

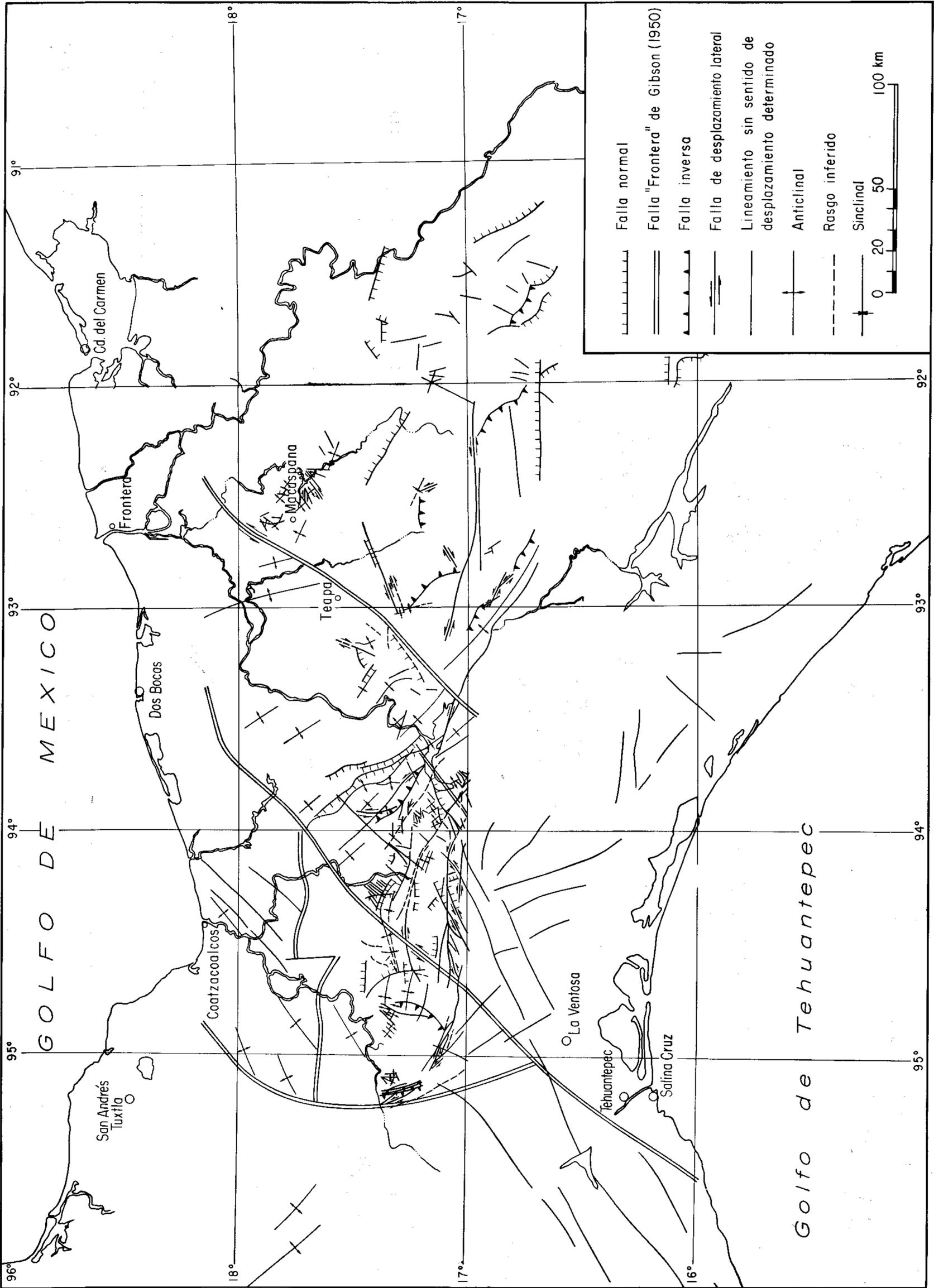


Figura 5.- Mapa estructural compilado de diversos trabajos de campo y de datos de perforación (Cepeda-de la Garza, 1950; de la Llata *et al.*, 1979; Gibson, 1950; Gutiérrez-Gil, 1950; Monroy-Audelo, 1986; Riva-Palacio, 1980; Martínez-Legorreta y Sánchez-Zavala, 1987). Nota: las "fallas frontera" de Gibson (1950), fueron trazadas respetando el trazo original del autor.

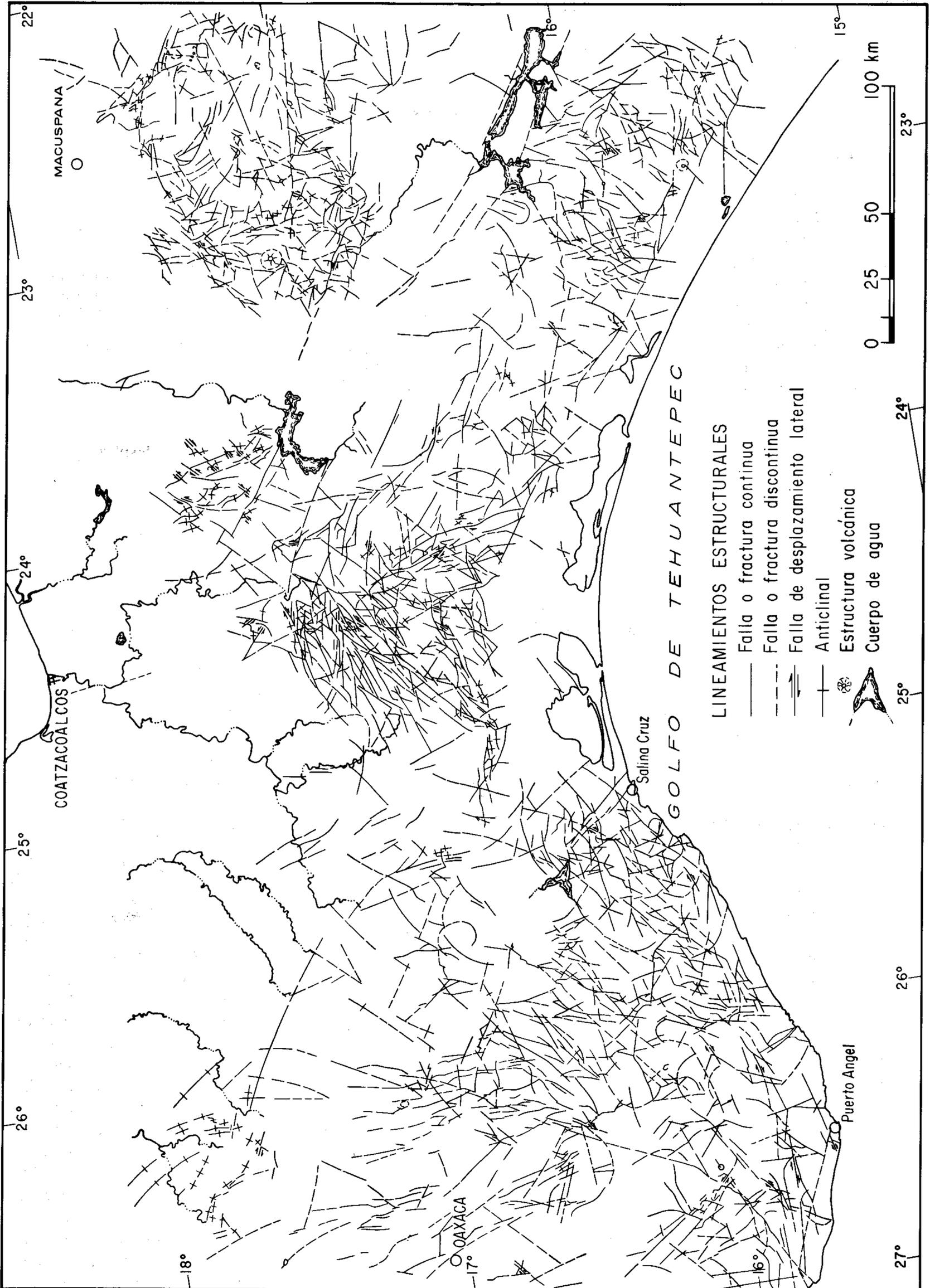


Figura 6.- Mapa de interpretación de rasgos estructurales mayores, a partir de imágenes de satélite (Landsat 1) de escala 1:1'000,000. Se puede observar los desplazamientos en zonas de ruptura de los ejes de anticlinales hacia el centro y el extremo nororiental del área.

Haciendo una descripción de los rasgos mayores interpretados en las imágenes de satélite (Figura 6), y partiendo del área de Puerto Ángel, Oaxaca, sitio en el que son identificados los lineamientos más cercanos al punto de partida de la solución de junta triple para hace menos de 10 Ma, se observa dos estilos estructurales distintos, correspondientes a dos épocas de deformación. La más antigua presenta una orientación de tendencia N-S y NW-SE, impuesta principalmente sobre los terrenos cristalinos y rocas sedimentarias preterciarias. Este control parece estar gobernado principalmente por estructuras de basamento, especialmente cuando se observa las rocas volcánicas del Terciario. Por otro lado, más hacia la costa, en general las estructuras muestran una tendencia más conspicua a orientarse con rumbo NE-SW, identificándose incluso la presencia de fallas de desplazamiento lateral del orden de hasta 30 km de longitud con sentido izquierdo predominante. En la definición de estas últimas fallas, se utilizó como referencia los desplazamientos de los ejes de algunas estructuras anticlinales. A partir de la latitud 16°N, algunas de estas estructuras muestran una tendencia más en sentido N-S, para que a partir del paralelo 17°N cambie hacia el NW, definiendo una gran estructura continental arqueada, posiblemente controlada por un basamento más grueso, a diferencia de lo observado hacia el este del Istmo de Tehuantepec.

En la región del Istmo de Tehuantepec, a partir de La Ventosa hacia el oriente, donde afloran rocas sedimentarias del Mesozoico, es posible distinguir estructuras plegadas y falladas con desplazamiento lateral izquierdo. Hacia el norte de esta angosta zona sedimentaria, que se muestra en la Figura 4, aparece una conspicua red de lineamientos preferentemente orientados N40-50°E, sin rasgos de plegamiento por encontrarse desarrollados dentro del macizo cristalino de Chiapas. En esta zona, donde la deformación es rígida, resulta especialmente difícil interpretar desplazamientos relativos, aunque en la parte central de este enjambre de lineamientos, se puede distinguir desplazamientos laterales tanto derechos como izquierdos.

Hacia el oriente de la zona anterior, se observa una segunda tendencia de lineamientos igualmente importante que complica la interpretación estructural del área, correspondiente al sistema de fallas de rumbo general E-W. A este sistema se conoce en la parte central de Chiapas como la "provincia de fallas de transurrencia de Chiapas" (Meneses-Rocha, 1986). Hacia el NNE, en la región de convergencia de los estados de Chiapas, Veracruz y Oaxaca (Monroy-Audelo, 1986), la región del Chichonal (de la Llata-Romero *et al.*, 1979), y el área de Macuspana (Gutiérrez-Gil, 1950), el sistema muestra una correlación notable con la interpretación de las imágenes de satélite, favoreciendo una tectónica transpresiva orientada hacia el NE, que disloca estructuras anticlinales tan jóvenes como del Mioceno tardío. Este sentido de desplazamiento izquierdo está acompañando de estructuras que son clasificadas como de pasos derechos, lo que significa que entre un par de fallas maestras, que definen un desplazamiento general izquierdo, las estructuras internas parecen avanzar hacia la derecha, según se muestra en la Figura 7. Este mecanismo predice principalmente que en esta zona interna el tipo de deformación observado será de tipo compresivo, el cual se traduce en plegamiento, desarrollo de fallas inversas y la formación de fallas de desplazamiento lateral, burdamente paralelas al sistema principal. Cabe hacer notar que este último tipo de fallas no

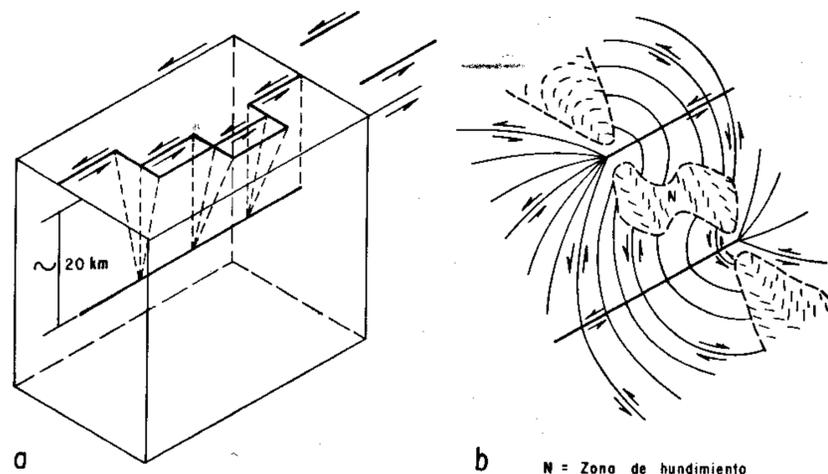


Figura 7.- (a) Bloque esquemático de un sistema transpresivo izquierdo, donde se muestra la unión de diferentes segmentos a una profundidad de aproximadamente 20 km, según el modelo sísmico de Segall y Pollard (1980). (b) Modelo de Rodgers (1980) sobre la potencial expresión superficial de un patrón de fallas, cuando las fallas principales tienen una separación de 20 km y los frentes de éstas se traslapan 10 km.

necesariamente debe tener el sentido de desplazamiento del sistema, sino una combinación de la forma en que se observa en el sistema Polochic-Motagua, definido por Rose y colaboradores (1975), y que muestra una correlación aceptable con los modelos conocidos de Wilcox y colaboradores (1973), Harding (1974, 1976) y Dibblee (1977), entre otros.

Finalmente, se debe mencionar que la correlación entre los sistemas NE, definido entre Puerto Ángel y Macuspana, y Polochic, que se localiza cercano a la costa del Pacífico, debe ser entendida en términos regionales como un sistema de un par continental. Su compleja tectónica interna debe estar asociada con el movimiento diferencial que entre éstos se da, y no simplemente con el hecho de estar bajo un régimen de junta triple inestable que se traduce en el sistema NE referido, interpretación que, por otro lado, fue visualizada por Dean y Drake (1978) al analizar la trinchera mesoamericana en la región del Golfo de Tehuantepec.

CORRELACION CON DATOS DE SISMICIDAD

Los datos de sismicidad utilizados en esta correlación, provienen del Servicio Sismológico Nacional y del Instituto de Geofísica de la UNAM, referentes a sismos registrados en el período de 1974-1983 (Gerardo Suárez, comunicación personal, 1986) según se muestra en la Figura 3. Aquí se presenta la sismicidad de magnitud superior a 2, para los intervalos de profundidad 40-100 y 100-500 km. Aunque los sismos con asociación más directa con el sistema transpresivo que aquí se propone son de profundidad inferior a 40 km, se adopta el modelo de Segall y Pollard (1980) para el área de San Joaquín, California, donde se puede observar un esquema tectónico de transurrencia, cuyas evidencias superficiales están asociadas con un arreglo múltiple de fallas que teóricamente se unen a una profundidad estimada menor que 20 km (Figura 7). Para las profundidades de sismos con que se cuenta, no parece existir una correlación inequívoca (Gerardo Suárez, comunicación personal, 1986), de manera que lo que se observa en las figuras es el resultado de una interacción compleja entre placas y, específicamente, un sistema de subducción poco común, cuya

geometría todavía está por ser aclarada. Por otro lado, un sistema de fallas transcurrentes, como el observado en esta zona, cuya anchura se aproxima a los 100 km, define un área muy amplia de disipación de energía. Segall y Pollard (1980) indican con algunos ejemplos, como el de Parkfield, California, en 1966, que *aftershocks* (magnitud aproximada a 5) asociados con pasos (separación de rasgos estructurales entre fallas de desplazamiento lateral paralelas) separados aproximadamente 1 km, se extienden hasta profundidades del orden de 10 km. Este caso, tomado del sistema de San Andrés, ilustra, en términos generales, las características que pueden imperar en el sistema de fallas de Tehuantepec, en la región comprendida entre Salina Cruz y Ciudad del Carmen.

Finalmente, parece necesario un estudio más detallado de la sismicidad de esta zona, mediante monitores, el cual podría arrojar alguna luz sobre la actividad reciente de este sistema estructural, especialmente dentro de los terrenos cristalinos ya identificados y, en particular, en las estructuras secundarias localizadas entre las fallas laterales mayores.

CONCLUSIONES

1. El área delimitada por las localidades de Ciudad del Carmen, Dos Bocas y Cayo Arcas puede ser estudiada desde el punto de vista tectónico, utilizando como marco de referencia la interacción de tres placas mayores cuyos límites convergen en una zona localizada en el Golfo de Tehuantepec. Esta zona de junta triple entre las placas de América del Norte, de Cocos y del Caribe, define un sistema tectónico inestable con migración hacia el este a lo largo del sistema Polochic. Esta evolución, a partir de hace aproximadamente 8 Ma (?), imprime un estilo tectónico en el área continental que incluye: (a) el desarrollo de una cuenca marginal entre Puerto Ángel y Salina Cruz; (b) el desarrollo de un sistema transpresivo de sentido siniestro, orientado SW-NE, que puede ser trazado desde Puerto Ángel hasta Ciudad del Carmen-Macuspana; y (c) la caracterización de la región comprendida entre los sistemas Puerto Ángel-Macuspana y Polochic, como un bloque activo con rotación en el sentido de las manecillas del reloj, cuyos límites hacia el norte no están bien definidos.

2. Los datos de sismicidad aparentemente definen una zona de subducción compleja, que posiblemente esté relacionada con las características físicas y estructurales de la placa de Cocos, la cual está dividida por la dorsal de Tehuantepec, que se traduce en el continente como un enjambre de sismos intermedios y profundos en la parte centromeridional del Istmo de Tehuantepec.

3. La compilación de la información estructural y litológica de la región del Istmo de Tehuantepec, aunada a una interpretación de lineamientos mayores por medio de imágenes de satélite, de escala 1:1'000,000, permitió reconocer que el sistema transcurrente SW-NE del istmo afecta indistintamente a rocas que varían en edad desde el Precámbrico hasta el Mioceno tardío (aproximadamente 5 Ma) y posiblemente hasta el Holoceno.

4. La conclusión más importante se deriva del reconocimiento del sistema Salina Cruz-Ciudad del Carmen, dentro del cual se puede observar estructuras que varían en orientación en el intervalo N30-70°E (media aritmética de 52°), lo cual concuerda favorablemente con una primera interpretación dada por Gibson (1950), quien define un par de fallas de despla-

zamiento lateral, de rumbo N50°E, y con la resultante de la solución geométrica de la junta triple que evoluciona de N63°E a N70°E. Los ángulos más bajos están principalmente concentrados en el borde oriental del terreno cristalino de Oaxaca, mientras que la mayor angularidad se concentra en los bordes septentrional y meridional del macizo cristalino de Chiapas, en la zona del Istmo de Tehuantepec. Una concentración de rumbos N45-60°E se presenta en la parte central de las unidades litológicas anteriores, lo cual indica un pequeño, aunque localmente considerable, efecto en los contactos entre unidades que se comportan rígida y plásticamente. Las unidades deformadas más jóvenes y más nororientales están ubicadas en la región de Macuspana, Tabasco, y corresponden a rocas sedimentarias del Mioceno tardío.

Finalmente, esta síntesis tectónica se presenta como hipótesis de trabajo, la cual requiere de una investigación estructural y sismológica de detalle, para comprobar la actividad actual de esta franja transpresiva, según lo indica la solución de inestabilidad de la junta triple del Golfo de Tehuantepec.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen sinceramente al Dr. Fernando Ortega-Gutiérrez los comentarios hechos durante las primeras etapas del desarrollo de este estudio, así como la revisión al primer manuscrito de éste. De la misma manera, agradecen al Dr. Gerardo Suárez sus opiniones sobre la sismotectónica de la región de Tehuantepec y a los Dres. Burke Burkart y T.W. Donnelly sus valiosos comentarios al efectuar el arbitraje de este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aubouin, Jean, y von Huene, Roland, 1985, Summary—Leg 84, Middle America trench transect off Guatemala and Costa Rica, *in* von Huene, Roland, ed., Initial reports of the Deep Sea Drilling Project covering Leg 84 of the cruises of the drilling vessel Glomar Challenger; Balboa, Panamá, to Manzanillo, Mexico: Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, v. 84, p. 939-957.
- Bellon, Herve, Maury, R. C., y Stephan, J. E., 1982, Dioritic basement, Site 493—petrology, geochemistry and geodynamics, *in* Lee, Marianna, *et al.*, eds., Initial reports of the Deep Sea Drilling Project covering Leg 66 of the cruises of the drilling vessel Glomar Challenger; Balboa, Panamá, to Manzanillo, Mexico: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, v. 66, p. 723-730.
- Burkart, Burke, 1983, Neogene North American-Caribbean plate boundary across northern Central America—offset along the Polochic fault, *in* Hilde, T. W. C., y Uyeda, S., eds., Convergence and subduction: Tectonophysics, v. 99, p. 251-270.
- Burkart, Burke, Deaton, B. C., Dengo, Gabriel, y Moreno, G., 1987, Tectonic wedges and offset of Laramide structures along the Polochic fault of Guatemala and Chiapas, Mexico—reaffirmation of large Neogene displacement: Tectonics, v. 6, p. 411-422.
- Case, J.E., 1980, Crustal setting of mafic and ultramafic rocks and associated ore deposits of the Caribbean region: U.S. Geological Survey, Open-File Report, 80-304, 95 p.
- Cepeda-de la Garza, Edmundo, 1950, Geología general de la cuenca de Tabasco: Convención Técnica Petrolera Mexicana, 1, México, D. F., p. 229-237.
- Couch, Richard, y Woodcock, Stephen, 1981, Gravity and structure of the continental margins of southwestern Mexico and northwestern Guatemala: Journal of Geophysical Research, v. 86, núm. B3, p. 1829-1840.
- Dean, B. W., y Drake, C. L., 1978, Focal mechanism solutions and tectonics of the Middle America Arc: Journal of Geology, v. 86, p. 111-128.

- Deaton, B. C., y Burkart, Burke, 1984, Time of sinistral slip along the Pochic fault of Guatemala, *in* Carlson, R. L., y Kobayashi, K., eds., *Geodynamics of back-arc regions: Tectonophysics*, v. 102, p. 297-313.
- DEGETENAL, 1981a, Hoja Mérida: México, D. F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección General de Geografía del Territorio Nacional, Carta Geológica, escala 1:1'000,000.
- 1981b, Hoja Villahermosa: México, D. F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección General de Geografía del Territorio Nacional, Carta Geológica, escala 1:1'000,000.
- De la Llata-Romero, Rolando, Gutiérrez-Coutiño, Ricardo, Moreno-Corzo, Manuel, Buchelli, G., y Carfantán, J. C., 1979, Geología y tectónica del sureste de México, principalmente en el norte de Chiapas (zona Peñitas-Chicoasén-Itzantún): México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, informe inédito, 191 p.
- Dibblee, T. W., Jr., 1977, Strike-slip tectonics of the San Andreas fault and its role in Cenozoic basin evolution, *in* Late Mesozoic and Cenozoic sedimentation and tectonics in California: San Joaquin Geological Society, p. 26-38.
- Dickinson, W. R., y Snyder, W. S., 1979a, Geometry of subducted slabs related to San Andreas transform: *Journal of Geology*, v. 87, p. 609-627.
- 1979b, Geometry of triple junctions related to San Andreas transform: *Journal of Geophysical Research*, v. 84, No. B2, p. 561-572.
- Drummond, K. J., ed., 1981, Plate-tectonic map of the circum-Pacific region—northeast quadrant: Tulsa, OK, American Association of Petroleum Geologists, escala 1:10'000,000.
- Gibson, J. B., 1950, Rasgos tectónicos salientes del Istmo de Tehuantepec: *Convención Técnica Petrolera Mexicana*, 1, México, D.F., p. 239-244.
- Grajales-N., J. M., Torres-Vargas, Ricardo, y Murillo-Muñetón, Gustavo, 1986, Datos isotópicos potasio-argón para rocas ígneas y metamórficas en el Estado de Oaxaca: *Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional*, México, D. F., Resúmenes, p., 150-151 (resumen).
- Gutiérrez-Gil, Roberto, 1950, Yacimientos petrolíferos en el distrito de Macuspana, Tabasco: *Convención Técnica Petrolera Mexicana*, 1, México D. F., Memoria, n. 249-257.
- Guzmán-Speziale, M., 1985, The triple junction of the North America, Cocos and Caribbean plates—seismicity and tectonics: University of Texas at Austin, tesis de maestría, 67 p. (inédita).
- Harding, T. P., 1974, Petroleum traps associated with wrench faults: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 58, p. 1290-1304.
- 1976, Tectonic significance and hydrocarbon trapping consequences of sequential folding synchronous with San Andreas faulting, San Joaquin Valley, California: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 60, p. 356-378.
- Havskov, J., Singh, S. K., y Novelo, D., 1982, Geometry of the Benioff zone in the Tehuantepec area in southern Mexico: *Geofísica Internacional (México)*, v. 21, p. 325-330.
- Jiménez, Casiano, 1985, Sismicidad 1974-1983 (tres mapas de profundidades 0-40 km, 40-100 km y 100-500 km): México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional (inédito).
- Lejsec, R. J., del Castillo-García, Luis, González, M. T., y Domínguez, G. A. H., 1978, Interrelación geodinámica del Golfo de México y el Eje Neovolcánico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 39, p. 77-90.
- Lomnitz, Cinna, 1974, *Global tectonics and earthquake risk*: Nueva York, Elsevier, 320 p.
- Lynn, W. S., y Lewis, B. T. R., 1976, Tectonic evolution of the northern Cocos plate: *Geology*, v. 4, p. 718-722.
- Malfait, B. T., y Dinkelman, M. G., 1972, Circum-Caribbean tectonic and igneous activity and the evolution of the Caribbean plate: *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, p. 251-272.
- Martínez-Legorreta, Francisco, y Sánchez-Zavala, J. L., 1987, Exploración geológica e interpretación tectónica del valle de Uzpanapa, Veracruz: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 53 p. (inédita).
- McKenzie, D. P., y Morgan, W. J., 1969, Evolution of triple junctions: *Nature*, v. 224, p. 125-133.
- Meneses-Rocha, J. J., 1986, Evolución tectónica de la provincia de fallas de transcurrencia de Chiapas, México: *Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional*, 8, México, D.F., Resúmenes, p. 29-30 (resumen).
- Monroy-Audelo, M. E., 1986, Estudio geológico estructural del área El Sauzal, estados de Veracruz y Oaxaca: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 126 p. (inédita).
- Mota-Palomino, Reynaldo, Andrieux, Jean, y Bonnin, Jean, 1986, Bosquejo sismotectónico del sur de México: *Geofísica Internacional (México)*, v. 25, p. 207-231.
- Murillo-Muñetón, Gustavo, Grajales-N., J. M., y Torres-Vargas, Ricardo, 1986, Estudio petrográfico y radiométrico K-Ar de la porción centro-sur del Estado de Oaxaca: *Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional*, 8, México, D. F., Resúmenes, p. 149-150 (resumen).
- Riva-Palacio, R., 1980, Geología y geotecnia del proyecto hidroeléctrico de Chicoasén, Chiapas: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ingeniería, v. 50, núm. 3, p. 73-96.
- Rodgers, D. A., 1980, Analysis of pull-apart basin development produced by en echelon strike-slip faults, *in* Sylvester, A. G., compilador, 1984, *Wrench Fault Tectonics: American Association of Petroleum Geologists, Reprint Series 28*, p. 345-360.
- Rose, W. I., Jr., Johnson, D. J., Hahn, G. A., y Johns, W. G., 1975, Skylab photography applied to geological mapping in northwestern Central America: U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Earth Resources Survey Symposium, Houston, TX, Geology information systems and services, Proceedings, v. I-B, p. 869-884.
- Sánchez-Barreda, L. A., 1981, Geologic evolution of the continental margin of the Gulf of Tehuantepec in southeastern Mexico: University of Texas at Austin, disertación doctoral, 191 p. (inédita).
- Segall, P., y Pollard, D. D., 1980, Mechanics of discontinuous faults: *Journal of Geophysical Research*, v. 85, No. B8, p. 4337-4350.
- Watkins, J. S., McMillen, K. J., Bachman, S. B., Shipley, T. H., Moore, J. C., y Angevine, Charles, 1982, Tectonic synthesis, Leg 66—transect and vicinity: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, v. 66, p. 837-849.
- Wilcox, R. E., Harding, T. P., y Seely, D. R., 1973, Basic wrench tectonics: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 57, p. 74-96.
- Manuscrito presentado: 6 de agosto de 1987.
 Manuscrito corregido devuelto por el autor: 15 de agosto de 1988.
 Manuscrito aceptado: 3 de octubre de 1988.