



8
2 Ejes

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**NEOTECTÓNICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC Y SU IMPACTO
EN LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO**

**TESIS PRESENTADA EN
LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**COMO ASPIRANTE AL GRADO DE
INGENIERO GEOFÍSICO**

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

POR

LUIS GERMAN VELASQUILLO MARTÍNEZ



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MÉXICO, D.F.

24 de agosto de 1994



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-005

SR. LUIS GERMAN VELASQUILLO MARTINEZ
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Mario Chávez González, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geofísico:

NEOTECTONICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC Y SU IMPACTO EN LA
ESTIMACION DEL RIESGO SISMICO

- I INTRODUCCION
- II GEOLOGIA DEL CENTRO-SUR DE MEXICO
- III NEOTECTONICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC
- IV APLICACION DE MODELOS DE PROPAGACION DE ONDAS
SISMICAS EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC
- V EVALUACION DEL RIESGO SISMICO EN EL ISTMO
DE TEHUANTEPEC
- VI CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 15 enero de 1993.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gggt*

A mis padres:

Clemente Velasquillo y Luz Martínez

Como una recompensa al amor,
estímulos y apoyo que hicieron
posible la realización de mis objetivos
hasta ahora logrados.

A Claudia

mi futura esposa

por su amor, paciencia
y estímulos que me brindó.

A mis hermanos

Arturo

Cristina

Ricardo

con cariño

En especial a Ricardo,
esperando que este trabajo
le sirva como estímulo
para sus objetivos
estudiantiles.

RECONOCIMIENTOS

Agradezco al Dr. MARIO CHÁVEZ GONZÁLEZ por la dirección, consejos y facilidades para la realización del presente trabajo. Al M.C. MIGUEL RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Dr. FERNANDO ORTEGA GUTIÉRREZ, Dr. GERARDO SUÁREZ REINOSO por sus valiosas sugerencias y observaciones. Al Ing. JORGE AGUIRRE GONZÁLEZ por sus comentarios y haberme facilitado el algoritmo de las funciones de Green empíricas.

A mis compañeros RICARDO BAUTISTA BAUTISTA, JUAN R. BARRÓN MAYA por toda la ayuda que me brindaron durante la elaboración del presente trabajo. A JOSÉ MANUEL CASTILLO COVARRUBIAS por su amistad desinteresada y el gran interés que mostró en este trabajo.

Así mismo agradezco al Instituto de Ingeniería el apoyo y facilidades otorgadas en el uso de sus instalaciones. Al *Laboratoire de Tectonique Quantitative, URA 1315 CNRS et Université P & M. Curie*, al Dr. JACQUES ANGELIER, y particularmente al Dr. ERIC BARRIER y Dr. ROLAND GAULON, por las facilidades técnicas que me brindaron para mi estancia y procesamiento de datos de microtectónica en el laboratorio antes mencionado, cuyos resultados se presentan en este trabajo.

El presente estudio formó parte del proyecto 0751 "ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL CENTRO-SUR Y EL OESTE DE FRANCIA" y del proyecto en ejecución 3514 "EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ALGUNAS PLATAFORMAS MARINAS DE LA SONDA DE CAMPECHE" del Instituto de Ingeniería, UNAM, a cargo del Dr. Mario Chávez González.

C O N T E N I D O

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 ANTECEDENTES	1
I.2 OBJETIVOS	4
II. GEOLOGÍA DEL CENTRO-SUR DE MÉXICO	5
II.1. PRESENTACIÓN GENERAL	5
II.2. GEODINÁMICA REGIONAL	10
II.3. GEOLOGÍA REGIONAL	16
II.4 ZONAS POTENCIALMENTE ACTIVAS EN EL CENTRO-SUR DE MÉXICO	19
III. NEOTECTÓNICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC	21
III.1. ANÁLISIS DE LAS DEFORMACIONES DE RUPTURA	21
III.1.A. La Aproximación Neotectónica y objetivos del estudio	21
III.1.B. Reconstrucción de los sistemas de paleoesfuerzos	22
III.1.B.1 Bases teóricas	22
III.1.B.2 Consideraciones prácticas	27
III.1.B.3 Algoritmos utilizados en el estudio	30
III.1.B.4 Trabajo de Campo	33
III.1.B.5 Procesamiento de la información de campo	39
III.2. ESTUDIO REGIONAL	41
III.2.A. Generalidades	41
III.2.B. Zona Norte	42
III.2.B.1. Presentación general	42
III.2.B.2. Geología	42
III.2.B.3. Tectónica de Ruptura	43
III.2.B.4. Evolución Neotectónica	46
III.2.C. Zona Centro	50
III.2.C.1. Presentación general	50
III.2.C.2. Geología	50
III.2.C.3. Tectónica de Ruptura	55
III.2.C.4. Evolución Neotectónica	55
III.2.D. Zona Sur	58
III.2.D.1. Presentación general	58
III.2.D.2. Geología	58

III.2.D.3. Tectónica de Ruptura	59
III.2.D.4. Evolución Neotectónica	60
III.3 SÍNTESIS DE LA EVOLUCIÓN NEOTECTÓNICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC	62
IV. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC	65
IV.1 MÉTODO DE LAS FUNCIONES DE GREEN EMPÍRICAS EN LA VERSIÓN DE IRIKURA	65
IV.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE FUNCIONES DE GREEN EMPÍRICAS EN LA VERSIÓN DE IRIKURA, PARA SISMOS LOCALIZADOS EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC	73
V. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC	78
V.1 MODELO DE RIESGO SÍSMICO APLICADO	78
V.2 ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN CINTALAPA, CHIAPAS	79
VI. CONCLUSIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	
APÉNDICES	
ANEXOS	

I. INTRODUCCIÓN

I.1 ANTECEDENTES

Para estimar la amenaza sísmica (*seismic hazard*) de un sitio o una región se requiere reconocer la tectónica y la sismicidad regional, así como las características de propagación de la señal sísmica en el trayecto fuente sísmica-sitio. La información anterior es utilizada en los denominados "modelos de riesgo sísmico", que como resultado final proporcionan curvas que relacionan parámetros característicos del movimiento del terreno en el sitio *versus* periodo de recurrencia (Chávez *et al*, 1987, 1993, 1994; Padilla, 1992).

En el presente trabajo la zona de interés es la región del Centro-Sur de México (Fig. 1). Esta región ha sido objeto de estudios previos (Chávez *et al*, 1987, 1992, 1993, 1994; Padilla, 1992) cuya finalidad ha sido estimar la amenaza sísmica de sitios localizados en esa región, a partir de información general sobre la tectónica regional e información detallada sobre la sismicidad y las características de propagación de las ondas sísmicas en dicha zona.

Dentro de esta región, se tienen un gran número de asentamientos humanos, además de varios complejos hidroeléctricos e industriales de importancia económica, por lo cual resulta de interés el desarrollar trabajos que conduzcan a la estimación del potencial sísmico de la región.

Con respecto a los estudios de propagación de ondas sísmicas en la zona mencionada, en estudios previos (Chávez, 1989; Padilla, 1992) se mostró que los movimientos del terreno observados en un sitio de la zona generados por temblores superficiales en la zona de subducción y los correspondientes de profundidad intermedia, para distancias fuente sísmica-sitio comparables, presentan diferentes características. Se han obtenido conclusiones cualitativas similares en un estudio sobre la atenuación, en función de la distancia, y de la Intensidad de Mercalli Modificada para sismos mexicanos (Chávez y Castro, 1988).

En la zona de interés prácticamente se carece de instrumentación sísmica, por lo cual no se cuenta con registros del movimiento del terreno (excepto algunos acelerogramas obtenidos en Minatitlán; Chávez, 1989) generados por la intensa actividad sísmica de la región (Chávez *et al*, 1987).

Debido a lo anterior, la información sísmica utilizada en este trabajo proviene principalmente de los sismogramas observados en una campaña sismológica efectuada en la región en 1986 (Ponce *et al*, 1992). Los sismogramas están asociados a eventos locales con magnitudes locales que varían entre 2.5 y 4.9.

En esta tesis, además de considerar los aspectos mencionados anteriormente se analiza el impacto de contar con información más precisa sobre la tectónica regional (Neotectónica) en la estimación de la amenaza sísmica de sitios localizados en el Centro-Sur de México.

Con la finalidad primordial de establecer la situación neotectónica y su posible impacto en la estimación del riesgo sísmico de la región, se realizaron tres campañas de mediciones y una campaña de verificación de datos estructurales, en los Estados de Veracruz, Oaxaca y Chiapas; comprendidos dentro de la zona Centro-Sur de México.

Del análisis e integración de información neotectónica recabada, con la sismicidad natural y la solución de mecanismos focales, se propondrá un modelo neotectónico del Istmo de Tehuantepec (zona dentro del Centro-Sur de México), y sentar las bases para resolver la problemática geológica de esta zona, desde el punto de vista de estabilidad estructural así como de sismicidad asociada. En este sentido, se trata de establecer un marco geológico de referencia para la sismicidad registrada en la zona del Istmo, como respuesta a la interacción de las estructuras tectono-estratigráficas involucradas.

Partiendo del hecho que la neotectónica se enfoca al estudio del último episodio tectónico activo para una época y en un lugar dado, y una de estas evidencias esta representada por una serie de fallas, cuyas huellas están presentes y pueden cuantificarse en el terreno, las cuales permiten explicar su posible evolución en el tiempo y en el espacio.

Dicho estudio, esta fundamentado en la continuidad y la homogeneidad de un mecanismo geodinámico regional. Esto no excluye las interrupciones menores o reorientaciones ilustradas por las rotaciones significativas de las trayectorias de los esfuerzos acompañadas de las modificaciones cinemáticas. El análisis de los mecanismos de ruptura, efectuados a todas las escalas y en términos de esfuerzos, se conciben como una herramienta alternativa y una liga directa al estudio neotectónico.

El estudio de las deformaciones recientes se sustentan principalmente en el dominio de ruptura. El análisis de la tectónica de ruptura se encuentra ligada directa y esencialmente en la

reconstrucción de los estados de esfuerzos a partir de las poblaciones de fallas o de mecanismos focales de sismos. La reconstrucción local de las orientaciones de los ejes de los paleoesfuerzos σ_1 , σ_2 , σ_3 y de la relación ϕ vinculada a la forma del elipsoide de esfuerzos se encuentra sustentada en métodos gráficos y numéricos. No obstante, el análisis cuantitativo se acompaña generalmente de un estudio cualitativo, particularmente para las tectónicas polifásicas.

Partiendo de un estudio local se extrapolará la información a un estudio regional con la finalidad de sentar bases, de tal forma que se puedan incorporar los resultados regionales dentro de un cuadro geodinámico general (la dinámica, campos de esfuerzos; y la cinemática, movimientos relativos y deformación).

La comprensión de la distribución de los sistemas de fallas y de los juegos es liga directa del razonamiento en términos de esfuerzos que se revela poderosamente en el estudio geodinámico de una región.

La aproximación mecánica del análisis de los juegos de fallas esta enfocada como aplicación en sismología, y en particular para la estimación del riesgo sísmico del Istmo de Tehuantepec; pues la mayor parte de los mecanismos focales de los sismos pueden ser analizados aproximadamente de la misma manera; y por lo consiguiente, se puede lograr una correlación de los resultados, apoyándonos en gran medida de modelos de propagación de las ondas sísmicas de la Región.

Para la estimación del potencial sísmico de sitios localizados en la zona del Istmo de Tehuantepec se utilizará, en parte, la metodología propuesta por Chávez *et al* (1987a, b). El potencial sísmico, es decir, la probabilidad de que se presente una cierta intensidad de movimiento del terreno en un sitio dado correspondiente a un sismo de magnitud, M_s , ocurrido a una distancia hipocentral D , requiere contar con una descripción de la neotectónica y la sismicidad natural regional, así como de las características de propagación de la señal sísmica en el trayecto fuente-receptor. Esta información se utiliza como entrada para modelos de riesgo sísmico. Dicho potencial de actividad sísmica de una región, o en un sitio específico, puede estimarse en términos del número de temblores de magnitud igual o mayor que una magnitud M generados en promedio por unidad de volumen y por año en las fuentes sísmicas pertenecientes a la región.

1.2 OBJETIVOS.

Con base a lo mencionado anteriormente, los objetivos planteados en este trabajo son los siguientes:

- a) Estudiar la situación neotectónica del Istmo de Tehuantepec (IT).
- b) Analizar e integrar de información neotectónica recabada de las campañas mediciones de datos estructurales, con la sismicidad natural y la solución de mecanismos focales, de tal forma que permita proponer un modelo neotectónico.
- c) Proponer una metodología para estimar el potencial sísmico en sitios localizados en la zona de interés, empleando los resultados de los incisos (a) y (b).
- d) Analizar el impacto de la información neotectónica del Istmo de Tehuantepec (IT) en la estimación de la amenaza sísmica en sitios localizados en la zona de interés.

Para llevar a cabo los objetivos descritos, el trabajo se dividió de la siguiente forma: En el capítulo II se hace una breve revisión de la geología del Centro-Sur de México, con la finalidad de seleccionar zonas donde probablemente se localicen fallas potencialmente activas desde el punto de vista sísmico. El capítulo III se dedica al análisis de las deformaciones de ruptura, reconstrucción de paleocofuerzos y el estudio regional de la evolución neotectónica de la zona de interés; es decir, se trata lo relacionado con los trabajos de campo efectuados para estudiar la neotectónica del IT, sobre el procesamiento por métodos de inversión de datos de deslizamiento de planos de fallas, así como de los resultados obtenidos del estudio de la neotectónica del IT. En el capítulo IV se aplican los modelos de propagación de ondas sísmicas considerando el método de las funciones de Green empíricas para generar sismogramas sintéticos esperados (información acerca de las aceleraciones máximas esperadas), correspondientes a la sismicidad histórica de la región, así como a los posibles sismos que se generarían en las fallas neotectónicas analizadas en el capítulo III. En el capítulo V se utilizan de las aceleraciones máximas estimadas en el capítulo IV para estimar el potencial sísmico en un sitio del IT incluyendo la conclusión neotectónica de la región de interés. Las conclusiones más relevantes del trabajo se presentan en el capítulo VI.

II. GEOLOGÍA DEL CENTRO-SUR DE MÉXICO

II.1. PRESENTACIÓN GENERAL

El área que comprende el presente estudio se encuentra localizada en el sureste de México, la cual cubre una superficie de 154 000 Km² aproximadamente. Por el "Centro-Sur de México", entenderemos la parte del territorio mexicano limitada al Norte por el paralelo 19°00'; al Sur, el paralelo 14°00'; al Este, el meridiano 92°30'; al Oeste, el meridiano 96°00' (Fig. 1). La zona de interés incluye regiones de los estados de Veracruz, Tabasco y Golfo de México al Norte; Oaxaca, Chiapas y el Golfo de Tehuantepec al Sur. Como la zona de estudio comprende gran parte del Istmo de Tehuantepec, por comodidad en algunos casos citaremos al Istmo de Tehuantepec como un equivalente del Centro-Sur de México. El material que se presenta en el resto del capítulo se basa en el Apéndice 1.

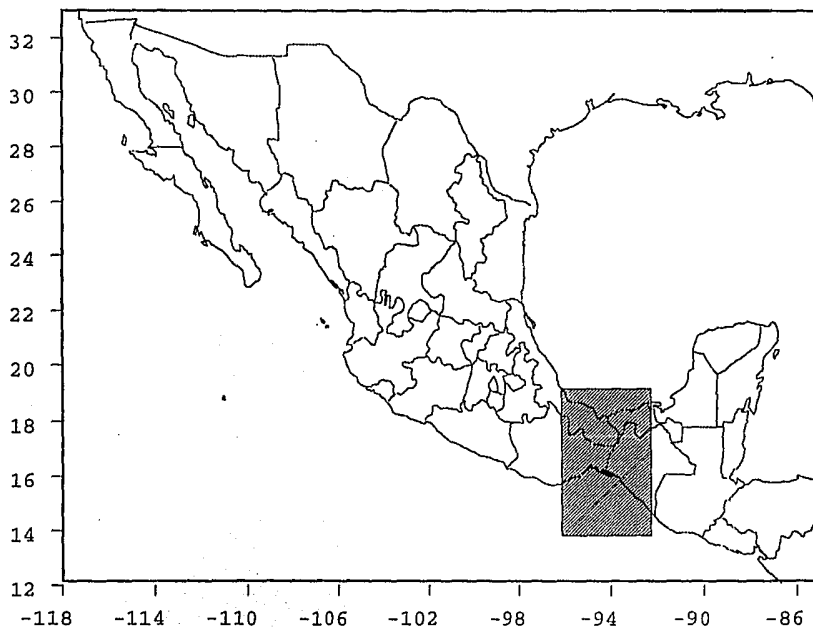


Figura 1. Localización del área de estudio

El Istmo de Tehuantepec es una de las zonas en la República Mexicana de gran interés desde el punto de vista geológico y tectónico-estructural, caracterizado por un alto grado de actividad sísmica, el cual repercute en objetivos económicos y sociales. Otra de las particularidades que presenta dicha zona es, que en ella convergen seis provincias fisiográficas de la República Mexicana definidas por E. Raisz (1959, Fig. 2), las cuales son: la Planicie Costera del Golfo, la Cordillera Oriental o Sierra de Juárez, el Cinturón Plegado de Chiapas y Guatemala, la Sierra Madre de Chiapas, la Planicie Costera del Pacífico y la Sierra Madre del Sur. Esta particularidad se refleja probablemente en la doble asimetría en las direcciones N-S (Fig. 3a) y E-W (Fig. 3b) que se observa en el Istmo de Tehuantepec.

Según el eje N-S, el Istmo presenta un ligero basculamiento hacia el Norte, observado principalmente en afloramientos de rocas sedimentarias del Plio-Cuaternario (campañas de mediciones de campo, capítulo III). Por otra parte las regiones Central y Septentrional están caracterizadas por una superficie de material sedimentario (Plio-Cuaternario) que disminuye regularmente de la Costa del Golfo de México al borde septentrional de la Planicie Costera Pacífica. Finalmente, la parte Meridional se distingue por un hundimiento repentino ocasionando la Planicie Costera Pacífica (Fig. 3a, parte derecha).

Desde el punto de vista geológico, el Istmo de Tehuantepec es una región tectónicamente activa. Esto se asume desde el punto de vista de la convergencia de tres de las grandes placas tectónicas aceptadas a nivel mundial (Fig. 4), caracterizadas por una compleja geometría entre las placas del Caribe, de América del Norte y de Cocos, definiéndose con esto una junta triple en algún lugar del Golfo de Tehuantepec (15° N y 95° W, según Delgado y Carballido, 1990). Por lo consiguiente, la interacción de placas puede correlacionarse con los accidentes geológicos mayores en el continente, tales como vulcanismo, fallas, desarrollo de cuencas, etc. Finalmente, la actividad sísmica de esta zona es considerada por Palomino *et al* (1986), como el resultado de la interacción de las Placas del Pacífico, América del Norte, Cocos y Rivera (Fig. 4).

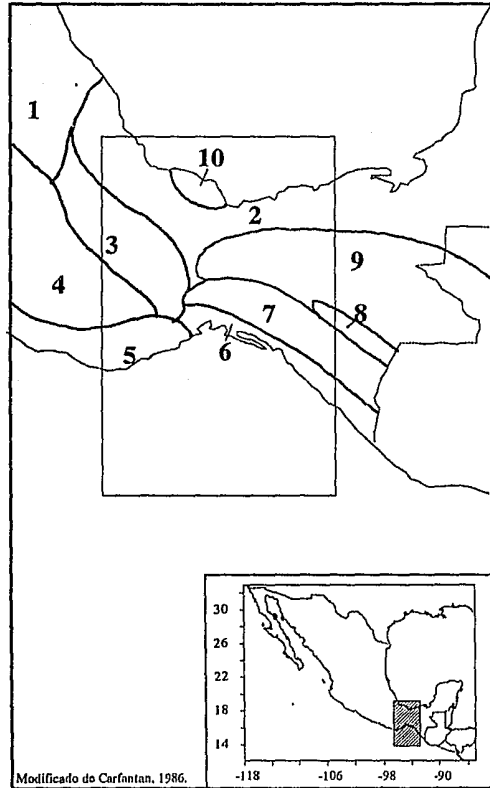
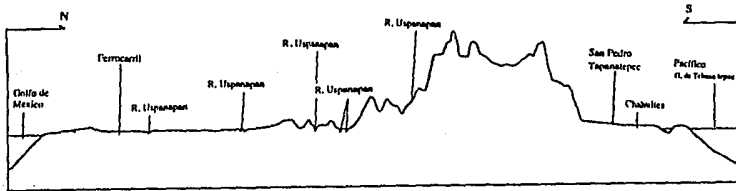
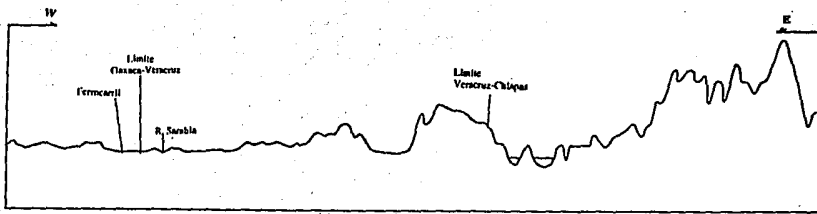


Figura 2. Provincias Fisiográficas 1. Eje Neovolcánico, 2. Planicie Costera del Pacífico, 3. Cordillera Oriental, 4. Altiplano de Oaxaca, 5. S. Madre del Sur, 6. Planicie Costera del Pacífico, 7. S. Madre de Chiis. 8. Depresión de Chiapas, 9. Cinturón Plegado de Chiapas y Guatemala, 10. Volcanes de los Tuxtlas.



A



B

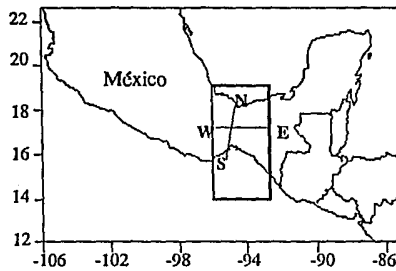


Figura 3. Secciones Topográficas dentro de la Zona de Estudio □. A. Norte-Sur, B. Esto-Oeste.

En este capítulo se efectuará una síntesis de la revisión bibliográfica de los trabajos sobre la geodinámica y la geología del Centro-Sur de México y zonas aledañas con el fin de intentar comprender la evolución tectónica regional. Lo anterior tiene como objetivo pre-seleccionar las zonas de la región de interés en las cuales probablemente se localicen fallas tectónicamente activas.

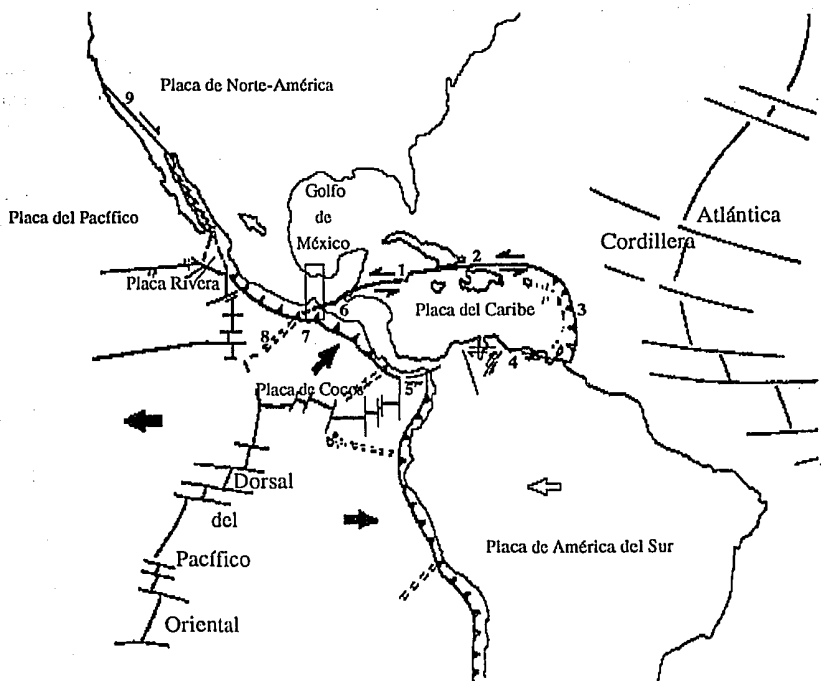


Figura 4. Placas Tectónicas cercanas a la Zona de Estudio (Demant, 1978). 1. Falla Caimán o Bartlett; 2. Fosa de Puerto Rico; 3. Z. de Subducción de las Pequeñas Antillas; 4. Fallas Oca-El Pilar; 5. Fractura de Panamá; 6. Fallas Motagua-Polochic; 7. Trinchera de Centro-América; 8. Dorsal de Tehuantepec; 9. Sistema de Fracturas de San Andrés-Golfo de California.

II.2. GEODINÁMICA REGIONAL

El Centro-Sur de México esta comprendido entre el Eje Neovolcánico Transmexicano al NE, y al SE por el Sistema de Fallas Trancurrentes que limitan las placas de Norteamérica y el Caribe. Estas regiones están bordeadas al Norte por el Golfo de México y al Sur por la Trinchera de Centro-América (Océano Pacifico; Fig. 5).

A continuación se presentará un resumen de la geodinámica de la región donde se encuentra el Istmo de Tehuantepec (para mayor detalle ver apéndice 1 sección 2)

El Centro-Sur de México es una zona caracterizada por un alto grado de actividad sísmica, dentro de la cual se encuentran presentes unidades tectono-estratigráficas que la distingue como tectónicamente activa. Lo anterior se sustenta desde el punto de vista de la convergencia de tres placas, la cual se distingue por una compleja geometría entre las placas del Caribe, de América del Norte y de Cocos, definiendo de esta forma una Junta Triple de tipo Trinchera-Trinchera-Falla (TTF), la cual ha sido propuesta por Guzmán-Speziale *et al* (1989), Delgado y Carballido (1990), Vázquez y Villaseñor (1990), figura 5, la existencia de esta junta todavía es sujeto de estudio.

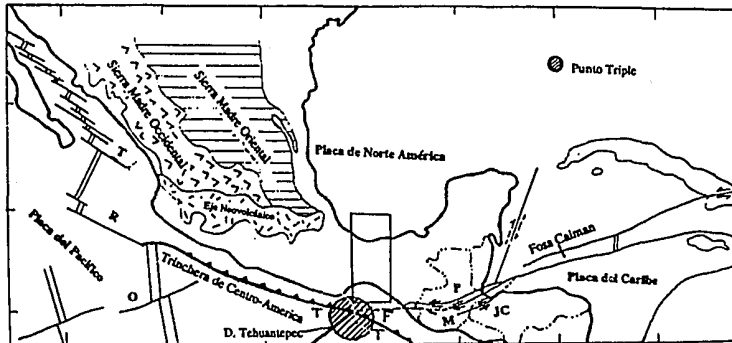


Figura 5. Situación del Centro-Sur de México y Dominios Limfrofes. P. Sistema Polochic; M. Sistema Motagua; JC. Sistema Jicotán-Chamelecon. Fallas transformantes: T. Tamayo, R. Rivera; O. Orozco (Modificado de Carfantán, 1986)

Además de la junta triple, dentro de la zona de estudio se tienen estructuras tectónicas mayores, tales como los sistemas de fallas transcurrentes sinistral Polochic-Cuilco-Chixoy, Motagua y Jocolón-Chamelcón (Fig. 5), que por comodidad las llamaremos "Sistema Motagua-Polochic" (límite entre las placas de Norteamérica y Caribe); la Trinchera de Centro-América dividida en dos porciones debido a las características que impone la placa de Cocos; y la Dorsal Oriental del Pacífico que separa las placas de Cocos y Pacífico (Fig. 4), la cual presenta un movimiento aproximadamente Este-Oeste entre las placas del Pacífico y Cocos.

A pesar del movimiento lateral izquierdo del Sistema Motagua-Polochic, localmente se presentan fallas secundarias de desplazamiento lateral derecho; esto puede asociarse con la compresión ligada con un sistema de subducción posterior al Mioceno Tardío (Burkart, 1983, Burkart *et al* 1987). Las dataciones de rocas volcánicas (Deanton y Burkart, 1984) y otras evidencias estratigráficas, revelan que la actividad de este sistema de fallas es de 10.3 Ma. a 6.6 Ma., haciéndolo síncrono y genéticamente relacionado con la Dorsal del Caimán.

Así mismo, la migración al Este a lo largo del Sistema Motagua-Polochic de la junta triple, define un sistema tectónico inestable, y a partir de una región frente a las costas de Puerto Ángel, se inicia la flexión principal de la Trinchera originando una cuenca marginal entre Puerto Ángel y Salina Cruz (denominada "Cuenca de Salina Cruz"), y como consecuencia se formó un sistema transpresivo de sentido siniestro y la existencia de un bloque activo con rotación en el sentido de las manecillas del reloj, cuyos límites no están bien definidos al Norte (Delgado y Carballido, 1990).

Los accidentes geológicos mayores en el continente, tales como vulcanismo, fallas, desarrollo de cuencas, etc.; así como, la actividad sísmica de esta zona, pueden estar vinculados con la interacción de las Placas del Pacífico, América del Norte, Cocos y Rivera.

La actividad volcánica puede tener relación con la subducción del fondo Océánico Pacífico (placa de Cocos), que se sumerge debajo de la placa de Norteamérica a la derecha de la Trinchera de Acapulco. La orientación oblicua de la cadena con respecto a la Trinchera y la existencia de varias provincias petrográficas se puede vincular a las variaciones de las condiciones de convergencia entre estas dos placas, asociadas a la historia reciente del Pacífico Oriental. No obstante, el vulcanismo del Eje Transmexicano data del Neógeno-Cuaternario y se superpone oblicuamente a los edificios antiguos de México Septentrional, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental (Carfanta 1986; apéndice 1 secciones 2.a y 2.b).

Los datos de sismicidad (Ponce *et al*, 1992; Vázquez *et Villaseñor*, 1990; Guzmán-Speziale, 1989), figura 6, y la solución de mecanismos focales (Dean *et Drake*, 1978) subrayan la existencia activa de la Trinchera de Centro-América. La cual está identificada batimétricamente por las isobatas de 3660 y 5856 metros (2000 y 3200 Fathoms, Fig. 7) hacia el Oeste y Sureste de la Dorsal de Tehuantepec. Las edades fechadas de la Trinchera (corteza oceánica) y la actividad de la Dorsal de Tehuantepec indican que la evolución de la junta triple se inició aproximadamente hace 10 Ma. para la parte NW y hace 20 Ma. para la parte SE (Couch *et Woodcock*, 1981), y cuyos cambios no han sido substanciales con respecto a su geometría inicial. Lo anterior se establece, bajo la consideración de que las velocidades relativas entre las placas no variaron significativamente.

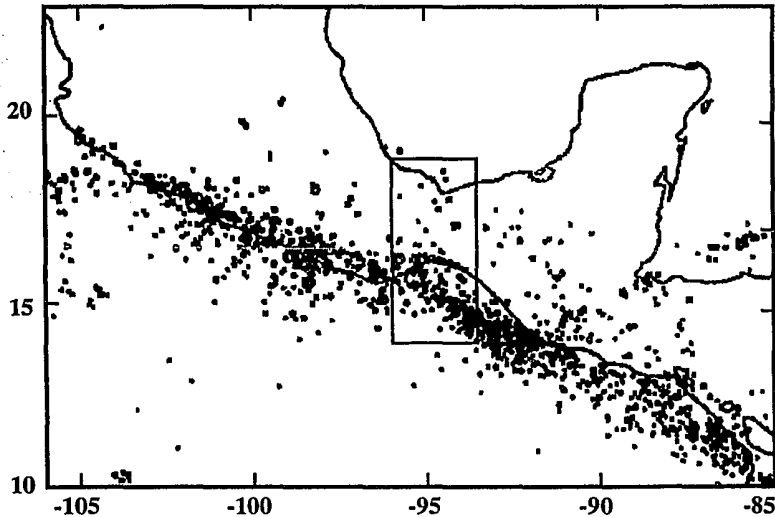


Figura 6. Actividad sísmica en el área del punto triple y regiones adyacentes. Epicentros con $M > 4.5$, reportados por la ISC para los años de 1964 a 1986 (Guzmán-Speziale, 1989).

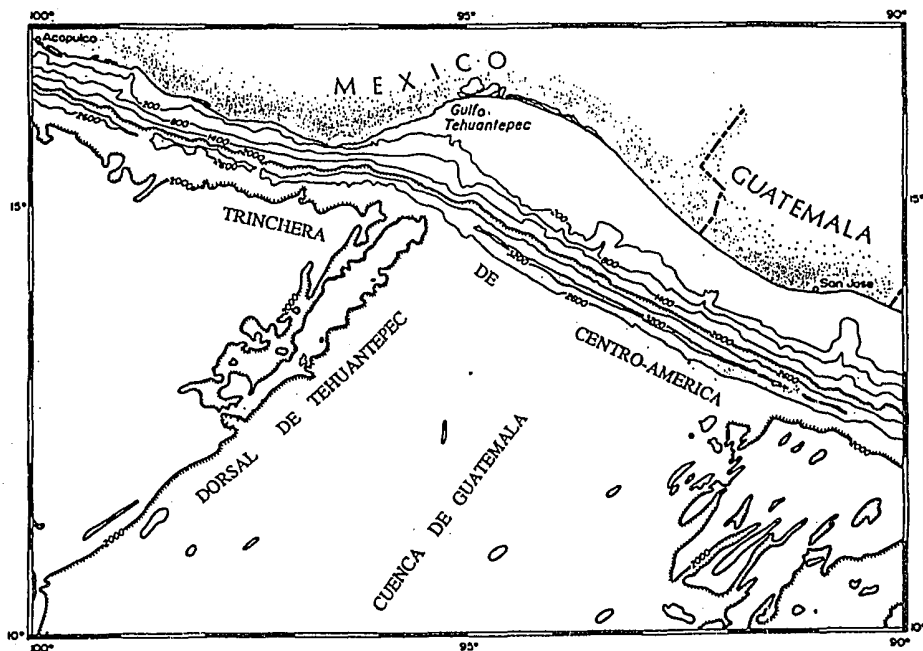


Figura 7. Mapa de batimetría de la Dorsal de Tehuantepec y la Trinchera de Centro-América. La Profundidad esta en *Fathoms*. (1 fathom equivale a 1.83 metros; Couch et Woodcock, 1981)

Por su parte, la Dorsal de Tehuantepec se pudo haber formado hace 8 Ma según Lynn y Lewis (1976), de tal forma que un mínimo cambio en el movimiento de Cocos-Pacífico y una reorientación de 20° de la Dorsal Oriental del Pacífico ocasionaron la discordancia entre el alineamiento de la Dorsal de Tehuantepec y las zonas de fractura de Clipperton y Siqueiros (Fig. 8).

Estudios para conocer la inclinación de la zona de subducción han revelado los siguientes resultados: según Dean y Drake (1978) existe una inclinación de 15° para la zona correspondiente

al NW de la Dorsal de Tehuantepec (México) y de 21° para la zona de Guatemala, con vectores de desplazamiento relativo (subducción) entre una y otra zona de $N35^\circ E$ y $N20^\circ E$ y velocidades de 8 y 7 cm/año, respectivamente; según Havskov *et al* (1982) esta definida por un plano de 45° de inclinación; mientras que los estudios de microsismos efectuados por Ponce *et al* (1992), revelan planos de subducción a partir de los 96° de longitud oeste de 45° a 50° hacia la longitud este (Fig. 9).

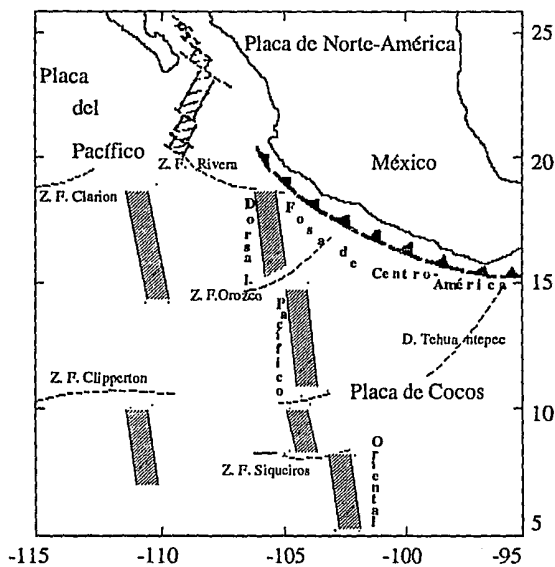


Figura 8. Discordancia entre el alineamiento de la Dorsal de Tehuantepec y las zonas de fracturas de Clipperton y Siquiros (Lynn et Lewis, 1976).

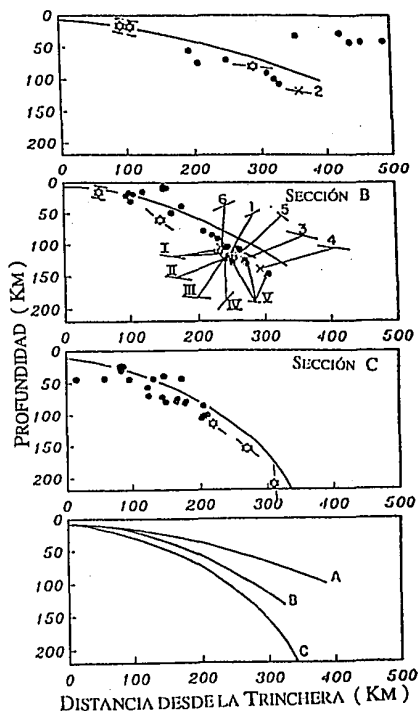
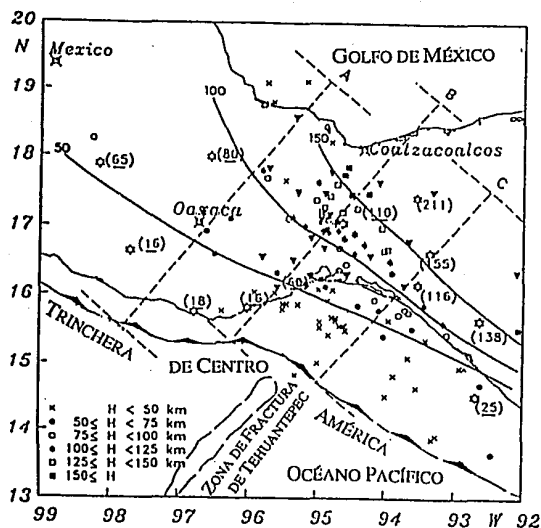


Figura 9. Inclinación de la zona de subducción en el Istmo de Tehuantepec (Ponce *et al*, 1992). A la derecha se muestra la localización de estaciones sísmicas (triángulos oscuros) y la localización de los microsismos ($M_c > 2.8$) en función a sus profundidades focales; las estrellas en blanco indican la profundidad focal de los telosismos, y la profundidad en Km. esta indicada entre paréntesis; Las líneas indican curvas de isopropundidades de la placa que subduce en Km. A la derecha se presentan las secciones de sísmicidad señaladas en la figura de la derecha;

II.3. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la provincia geográfica Sureste de México (XIV; López Ramos, 1979; Fig. 10) subdividida en las subprovincias siguientes:

- A. Cuencas Terciarias del Sureste: Istmo de Tehuantepec y Tabasco.
- B. Sierra de Chiapas.
- C. Macizo de Chiapas.
- D. Planicie Costera de Chiapas.
- E. Porción Sur del Istmo de Tehuantepec.

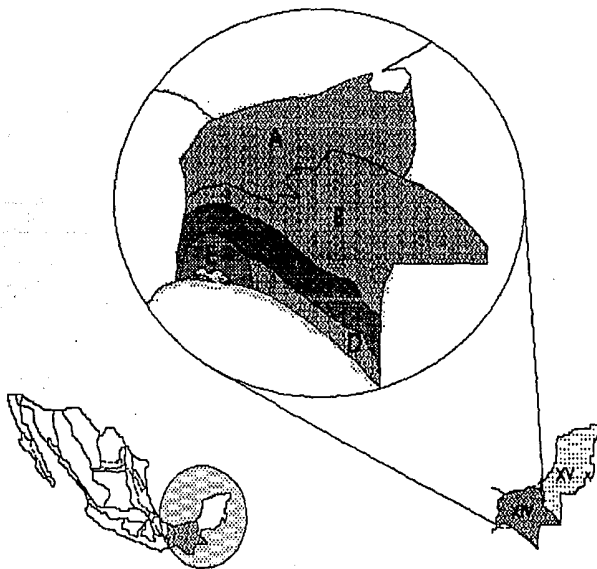


Figura 10. Provincias Fisiográficas dentro de la zona de estudio (López Ramos, 1979)

Esta provincia está caracterizada por la conjunción de diferentes alineamientos tectónicos (mencionados sintéticamente en la sección anterior), los cuales imponen un cambio notable entre una zona muy plegada y afallada como la Sierra Madre de Chiapas, y por otra parte, la Cuenca Terciaria de Veracruz-Tabasco con una plataforma estable desde el Cretácico Medio (López-Ramos 1979).

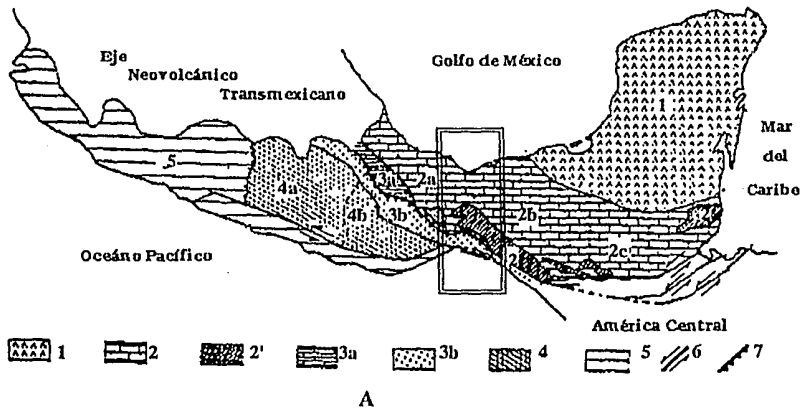
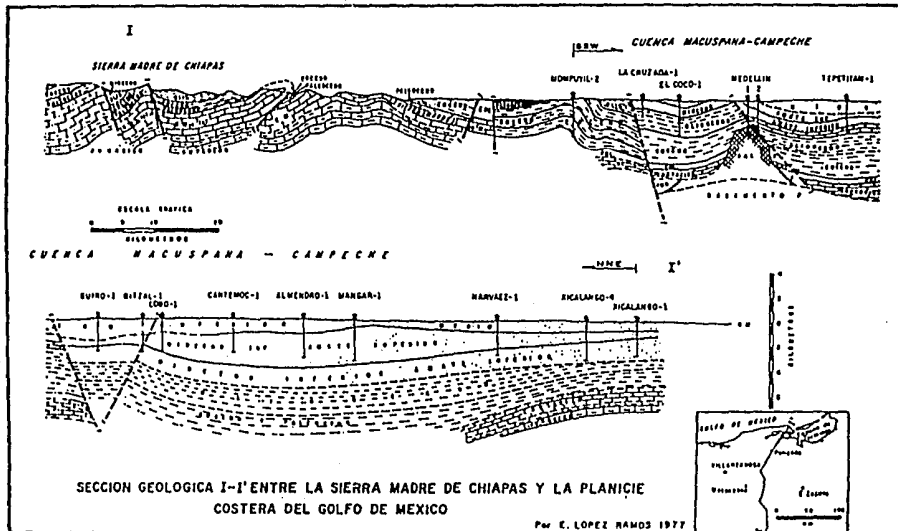


Figura 11. A. Conjuntos Geológicos del Centro-Sur de México. 1. Antepaís Maya; 2. Dominio Olmeca (2a); Chiapaneco (2b) y Quiche (2c); 2'. Basamento del Dominio Olmeca, Chiapaneco y Quiche; 3. Sierra de Juárez; 3a. Dominio Externo; 3b. Dominio Interno; 4. Dominio Oaxaqueño; 4a. Dominio Zapoteco; 4b. Dominio Mixteco; 5. Dominio Cordillerano Oriental; 6. Principales Fallas de movimiento lateral; 7. Cabalgamientos Mayores. (Carfantán, 1986).
 B. Sección Geológica (López Ramos 1977)



B

El Eje Neovolcánico Transmexicano, esta constituido por cinco distritos volcánicos con límites geográficos y características petroquímicas diferentes, de más de 1000 Km de extensión, orientada a grandes rasgos E-W.

La Sierra Madre Oriental es una cadena plegada, constituida principalmente de formaciones sedimentarias marinas mesozoicas inicialmente carbonatos y rematadas por terrigenos; a su vez, estas soportan en discordancia molasas cenozoicas continentales. La estructura actual resulta de la superposición de varias fases tectónicas, de las cuales la fase Laramídica (compresiva) durante el Paleoceno, fue la responsable de las principales deformaciones.

Por su parte la Sierra Madre Occidental, esta constituida por varios eventos volcánicos. Este vulcanismo es principalmente del Oligoceno (con edades entre 34 y 23 Ma; Mc Dowell *et Keiser*, 1977; Mc Dowell *et Clabaugh*, 1979; Cameron *et al.*, 1980)). El conjunto es horizontal o ligeramente inclinado, tal vez ligeramente deformado por los pliegues de gran radio de curvatura.

Durante el Plio-Cuaternario la tectónica distensiva, se refleja en Chiapas por una gran depresión, en formación paralela al límite del Pacífico, homóloga a las depresiones costeras Centroamericanas.

Dicha tectónica distensiva, resulta del régimen "convergencia-extensión" entre la placa de Cocos y de la Placa de Norteamérica a la altura del Dominio Chiapaneco. Este mismo régimen, al sur del sistema Motagua-Polochic, entre la placa de Cocos y la placa Caribeña, provocó la formación de las depresiones costeras Centroamericanas.

La Sierra de Juárez, al igual que la Sierra Madre Oriental emergen en su totalidad en el Paleoceno. Por lo consiguiente se depositan las molasas continentales discordantes después de los derrames volcánicos cubriendo una gran parte del edificio, particularmente en sus regiones meridionales (Carfantan, 1986).

Al oeste de las fallas que limitan la Sierra de Juárez, el Dominio Oaxaqueño comprende la Meseta Alta de Oaxaca y la región oriental de la Cuenca de Morelos-Guerrero.

En el límite del Senoniano Temprano-Senoniano Tardío, existe una fase Sub-Herciniana de la Cuenca Cuicateca que es el resultado del acercamiento del Dominio Oaxaqueño-Honduras y de la plataforma oriental sudmexicana. Por otro lado, la generalización de las facies detríticas a partir

del Campaniano sobre el borde occidental del Dominio Oaxaqueño, y en sus regiones centrales se presenta una reactivación tectónica sub-Herciniana del edificio orogénico occidental.

La tectónica de fallamiento del Cenozoico, esta representada por fallas asociadas por una parte al Sistema Cuicateco de orientación general NNW-SSE; y por otra parte, al Sistema Atoyac de orientación general WNW-ESE y ENE-WSW; el cual en la paleofrontera transcurrente izquierda de las placas de Norteamérica y del Caribe.

II.4. ZONAS POTENCIALMENTE ACTIVAS EN EL CENTRO-SUR DE MÉXICO.

De lo expuesto en las secciones anteriores se puede concluir que en el Centro-Sur de México probablemente se localicen fallas tectónicamente activas en las zonas Norte y Centro del Istmo de Tehuantepec (Fig. 12). Estas zonas se preseleccionaron para efectuar el trabajo de campo descrito en el capítulo III, dado que en ellas se tienen formaciones Plio-Cuaternarias que han sido afectadas por episodios tectónicos posteriores al último gran evento del Mioceno tardío (Orogenia Chiapanca), como se discutió en II.1, II.2 y II.3.

Es decir, para la Zona Norte se tienen afloramientos del Plio-Cuaternario representadas por rocas sedimentarias marinas y rocas volcánicas extrusivas con algunos afloramientos de edad Mioceno. En la Zona Centro, predominan las rocas sedimentarias del Plio-Cuaternario y en menor proporción el Jurásico, Cretácico, Mioceno marino y Paleoceno (?) volcánico. Por último, para la Zona Sur se tienen afloramientos del Mioceno principalmente, representados por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, concentradas en la Planicie Costera y Sierra de Juárez

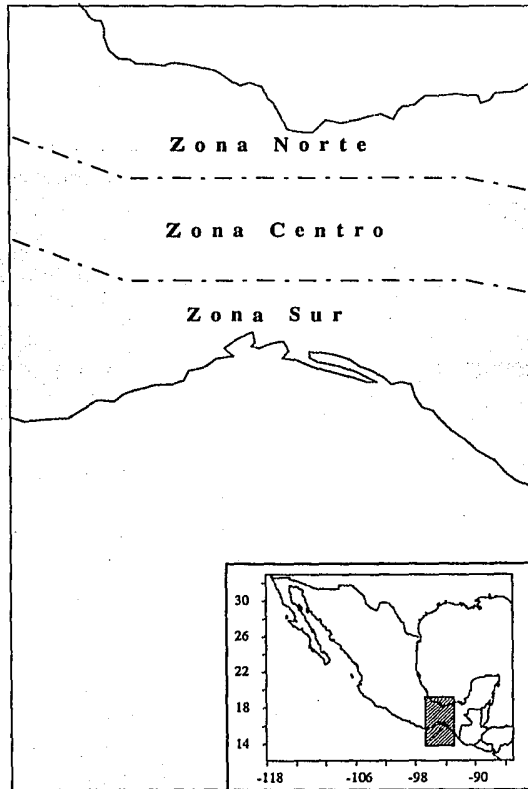


Figura 12. División del área de estudio en tres zonas: Norte, Centro y Sur.

III. NEOTECTÓNICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC.

III.1. ANÁLISIS DE LAS DEFORMACIONES DE RUPTURA.

III.1.A. La aproximación Neotectónica y objetivos del estudio

El estudio neotectónico parte de una definición aplicable a un período en el cual han prevalecido los mismos mecanismos tectónicos. Es decir, la neotectónica abarca un lapso de tiempo durante el cual los mecanismos tectónicos actuales pueden ser cuantificables (si existen interrupciones, entonces es importante establecer de antemano un punto de partida de la neotectónica, Angelier, 1979). De acuerdo a lo anterior, la neotectónica comprende el estudio del último episodio tectónico activo de una región de estudio en particular. El principal objetivo de la neotectónica es determinar el campo de esfuerzos responsable, en una época y en un lugar dado, de una población de fallas de las cuales las huellas están presentes (estrías) y pueden cuantificarse en el terreno, por ejemplo mediante la técnica de la microtectónica, con la finalidad de conocer su posible evolución en el tiempo y en el espacio. Esta técnica se basa en los métodos de reconstrucción de paleoesfuerzos por inversión de datos de deslizamientos de fallas (poblaciones de fallas y estrías).

Otra forma de conocer si una falla o región es tectónicamente activa es mediante estudios de sismotectónica, la cual se puede definir como la relación que existe entre la sismicidad natural y la actividad tectónica de una falla o región. La técnica que permite conocer la relación anterior es la solución de mecanismos focales de sismos ocurridos en dicha falla o región.

Con la finalidad primordial de establecer la neotectónica del Centro-Sur de México y su posible impacto en la estimación del riesgo sísmico, de sitios localizados en esta región, en este capítulo se describe la aplicación de la aproximación neotectónica para tales fines.

El trabajo se efectuó de la siguiente manera: se realizaron tres campañas de mediciones y una campaña de verificación de datos estructurales (microtectónica), en los Estados de Veracruz, Oaxaca y Chiapas (Fig. 1). Con los datos recabados en el campo se aplicaron las técnicas de inversión propuestas por Angelier (1990), con la finalidad de determinar las direcciones de los

esfuerzos principales máximos (σ_1 , σ_2 , σ_3) y proponer un posible campo de esfuerzos representativo de la región de interés.

III.1.B. Reconstrucción de los sistemas de paleoesfuerzos.

III.1.B.1 Bases teóricas

Un problema de gran interés en el análisis estructural y la tectónica es el del estudio de volúmenes de rocas fracturadas que están sujetas a un campo de esfuerzos diferente del que generó las fallas. En su forma más general la solución de este problema requiere la determinación de varios parámetros, como por ejemplo la cantidad de deformación, peso propio, los coeficientes de fricción de las rocas involucradas, la relación de Poisson, entre otros. Sin embargo, si se supone que el fenómeno descrito involucra dos bloques rígidos separados por un plano de falla y que el movimiento de los bloques se puede representar mediante un desplazamiento relativo (\vec{u}) entre los bloques sobre el plano de falla (es decir, sin rotación de dicho plano durante la deformación) es posible estimar la dirección y el sentido del desplazamiento así como cuantificar (en ocasiones) la magnitud del deslizamiento relativo, a partir de las estrías de deslizamiento de la superficie de la falla.

Es importante señalar, que una de las hipótesis que se considera en microtectónica consiste en asumir que la dirección del desplazamiento $\frac{\vec{u}}{u}$ observado en las estrías de las fallas es paralelo a la dirección de cortante $\frac{\vec{\tau}}{\tau}$ (tensor tangencial); es decir, que la obtención de las orientaciones de los planos de fallas y estrías proporcionan información acerca de la forma del tensor pero no de su tamaño.

Por otra parte, el cortante $\vec{\tau}$ se expresa en términos de la normal al plano de falla (a través de los cosenos directores l , m , n) y del factor $R = (\sigma_3 - \sigma_1) / (\sigma_2 - \sigma_1)$, donde σ_1 , σ_2 y σ_3 son los eigenvalores del tensor de esfuerzos.

Para esto consideramos el problema directo en que la parte desviatoria del tensor de esfuerzos, referido a un sistema de coordenadas formado por los ejes principales esta dado por

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}, \text{ los signos positivos indican compresi3n.}$$

Para un plano de falla cuyo vector normal unitario es $n=(l,m,n)^T$ (el superíndice T indica que es la transpuesta del vector, este es el vector columna con componentes l, m y n), el vector de esfuerzos que actúan en el plano de falla esta dado por el producto escalar

$$S = \Sigma \cdot n, \text{ o } S = (l\sigma_1, m\sigma_2, n\sigma_3) = \tau + \sigma_n$$

donde τ es el esfuerzo tangencial y σ_n es el esfuerzo normal.

Esto es fácil de calcular al resolver el esfuerzo tangencial τ , puesto que es paralelo al plano de falla.

Ya que: $\sigma_n = ((\Sigma \cdot n) \cdot n)n$, $\tau = S - \sigma_n = \{\Sigma \cdot n - ((\Sigma \cdot n) \cdot n)n\}$, entonces

$$\tau = (\sigma_2 - \sigma_1)[-Kl, (1-K)m, (R-K)n]^T \tag{3.1}$$

donde $K = m^2 + n^2R$ y R se definió previamente, con $\sigma_2 > \sigma_1$. Entonce $\frac{\vec{u}}{u} = [-Kl, (1-K)m, (R-K)n]^T$ tendra el mismo sentido de $\frac{\vec{\tau}}{\tau}$. \vec{u} es el desplazamiento, R es llamado "relaci3n de esfuerzos" o "factor de forma" del tensor de esfuerzos. Es importante mencionar que los valores de R varían de $-\infty$ a 0 para compresiones, de 0 a 1 para "strike-slip" y de 1 a ∞ para extensiones. En una representaci3n gráfica simple se selecciona la transformaci3n $\theta = \tan^{-1}[(2R-1)/\sqrt{3}]$. Por lo tanto, la transici3n entre compresiones y "strike-slip" esta dado por $\theta = -30^\circ$ y entre "strike-slip" y extensiones por $\theta = 30^\circ$ (Armijo *et al*, 1982).

De acuerdo a la hip3tesis anterior es posible determinar la forma y la orientaci3n del esfuerzo desviador en la roca a partir de las mediciones de las estrías de deslizamiento asociadas a una poblaci3n de fallas (Carey y Brunier, 1974; Armijo *et al*, 1982). Es decir, se pueden calcular cuatro parámetros: los tres ángulos de Euler que proporcionan las direcciones de los ejes de los esfuerzos principales, y la relaci3n R definida previamente, donde σ_1, σ_2 y σ_3 son los eigenvalores del tensor de esfuerzos.

La formulación del problema inverso que es el lo que nos interesa en este estudio (dado que en el campo se obtendrán las direcciones de las planos de una población de fallas y de los desplazamientos con sus respectivas estrías) consiste en definir un vector unitario f en la dirección del esfuerzo tangencial en cualquier plano de falla, de tal forma que sea igual al vector unitario s en la dirección de la estría sobre la superficie de pulimiento. Si $f = \tau / |\tau|$ entonces para las N mediciones en la región:

$$f_i = s_i; \text{ con } i=1, N \quad (3.2)$$

Pero como en el problema planteado se tiene que vincular las coordenadas de campo (N-S, E-W, hacia abajo) utilizado por los geólogos con el sistema de los ejes principales del tensor de esfuerzos (α, β, γ) (ángulos de *Euler*), entonces las componentes de f_i se deben de transformar a un sistema equivalente al de la ecuación (3.1), lo cual permitirá trabajar en función del factor de forma R y de los ángulos de *Euler*.

Como la ecuación (3.2) es no lineal es conveniente linealizarla, ya linealizada se puede resolver el problema inverso mediante un proceso iterativo de mínimos cuadrados (Armijo *et al*, 1982), el cual consiste en proponer una terna de valores $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, R_0)$ para los ángulos de los ejes principales de esfuerzos y la relación de forma del tensor con esto se define f . Dichos valores son utilizados en la ecuación (3.2) y si esta relación no se cumple bajo el criterio de minimización, se cambia la terna de valores con un grado de aproximación superior de la ecuación (3.2), y se calcula una nueva estimación. Este procedimiento continúa hasta satisfacer el criterio.

Por otro lado, Angelier (1977, 1984, 1991, 1992) propuso varios métodos de inversión de datos de deslizamiento (estrías sobre las fallas), los cuales consisten en calcular un tensor de esfuerzos medio, reducido a cuatro incógnitas que caracterizan la orientación de los ejes principales y la relación entre las magnitudes de los esfuerzos principales. Angelier (1977) define el factor de forma como:

$$\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3), \text{ donde } \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \text{ y } 0 \leq \phi \leq 1.$$

A continuación se presenta una síntesis de los procedimientos propuestos por Angelier (1990a) y que serán utilizados en este trabajo.

Para esto es importante observar que la Fig. 13, muestra que para el k -ésimo plano de falla, llamado F_k , σ_k , σ_{nk} , τ_k y s_k , representan el vector de esfuerzos que actúa en el plano de

falla (llamado s en el apartado anterior); el esfuerzo normal σ_{Nk} , equivalente a σ_n ; el cortante τ_k y s_k que representa la dirección de la estría. Donde el criterio a satisfacer esta dado por:

$$s_k \cdot \tau_k = 0 \quad (3.3)$$

y adoptando la hipótesis anteriormente mencionada $\left(\frac{\bar{u}}{u} = \frac{\bar{\tau}}{\tau}\right)$, el mejor ajuste del tensor de esfuerzos para un conjunto de datos de poblaciones de fallas (estrías) se obtiene mediante la minimización de la función S_1 :

$$S_1 = \sum_{k=1}^{k=N} (s_k, \tau_k)^2 \quad (3.4)$$

donde N es el número de planos de fallas.

Otra forma de obtener el mejor ajuste del tensor de esfuerzos para un conjunto de datos es mediante la minimización de la función S_2 :

$$S_2 = \sum_{k=1}^{k=N} \frac{\text{sen}^2 (s_k, \tau_k)}{2} \quad (3.5)$$

Nótese que el seno del ángulo medio entre (s_k, τ_k) varia continuamente de 0 a 1 debido a que el ángulo varia de 0 a π .

La Ecuación (3.5) puede escribirse de la siguiente forma:

$$S_2 = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{k=N} v_k^2 \quad (3.6)$$

donde v_k^2 describe el módulo de un vector v_k que se muestra en la Fig. 14a y definida por la siguiente ecuación que incluye τ_{uk} , el vector unitario a lo largo de τ_k :

$$s_k = \tau_{uk} + v_k \quad (3.7)$$

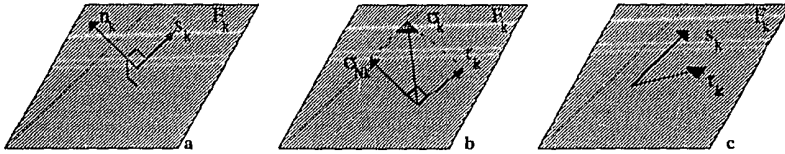


Figura 13. Datos de planos de fallas y esfuerzo calculado. El subíndice describe el número de datos mencionado en el texto. (a) Datos observados de las poblaciones de fallas: F_k es el plano de falla; n_k normal unitaria del plano de falla; s_k es el vector unitario de deslizamiento (paralelo a la estria). (b) Componentes del esfuerzo calculado: σ_k , esfuerzo aplicado; σ_{Nk} , esfuerzo normal; τ_k , esfuerzo tangencial. (c) Ángulo estria-cizallamiento: s_k , deslizamiento observado; τ_k , cizallamiento calculado. Angelier (1990).

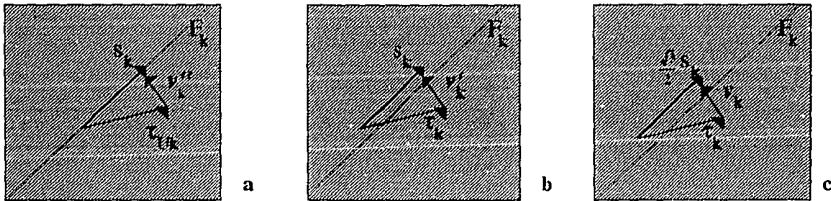


Figura 14. El subíndice k describe el número de datos mencionado en el texto F_k es el plano de falla; s_k es el vector unitario de deslizamiento; τ_k es el esfuerzo tangencial (como en la figura 13). (a) Definición de v^k (ecuaciones 3.6 y 3.7); τ_{T_k} , vector unitario a lo largo del esfuerzo tangencial. (b) Definición de v^k . (c) Criterio adoptado: definición de v^k (ecuaciones 3.4 y 3.5). Angelier (1990).

Otro criterio propuesto por Angelier utiliza el vector v_k mostrado en la Fig. 14c. Este criterio se basa en lo siguiente:

Si se define a λ como el valor más grande posible de la magnitud del esfuerzo tangencial τ asociado a una forma particular del tensor Σ (el que corresponde a las orientaciones específicas de n_k y s_k con respecto a los ejes de esfuerzos), se puede establecer la siguiente expresión:

$$\lambda s_k = \tau_k + v_k \tag{3.8}$$

Donde el valor más adecuado para λ es $\frac{\sqrt{3}}{2}$ de acuerdo con Angelier (1990a). Dicho valor resulta de considerar que el valor máximo posible del esfuerzo tangencial es igual a un medio de la diferencia entre los esfuerzos principales mínimo y máximo, para una forma específica del tensor Σ .

Finalmente en este caso la sumatoria S_4 de minimización es:

$$S_4 = \sum_{k=1}^{k=N} v_k^2 \quad (3.9)$$

III.1.B.2 Consideraciones prácticas.

Las características que se pueden cuantificar de una falla, se reducen a su más simple expresión: estas son las orientaciones de un plano y de sus estrías de deslizamiento que representa la dirección y el sentido del movimiento relativo de los bloques, de tal forma que la magnitud del deslizamiento determina la amplitud de este desplazamiento (Fig. 15).

El objetivo principal del estudio de la población de fallas, es tratar de determinar los paleoesfuerzos principales medios responsables, en una época y un lugar determinado, de una serie de juegos de fallas cuyas evidencias pueden medirse en el terreno con una brújula (orientación de los planos y estrías, sentido de los juegos y la magnitud del deslizamiento, si es posible).

Este análisis no presenta muchas dificultades cuando el episodio tectónico estudiado es responsable no sólo de la aparición del juego de fallas (fallas *neoformes*, Fig. 16), sino también de planos de debilidad (Angelier, 1989). El estudio se complica cuando existen planos de debilidad previos, por ejemplo de fallas antiguas (fallas *heredadas*) o de juntas, las cuales nuevamente son retomadas en un episodio dinámico reciente. Por lo consiguiente, la distribución de los planos de fallas son independientes de la orientación de los esfuerzos principales, de tal forma que solamente las estrías (sobre los espejos de fallas) permiten reconstruir los ejes principales para este conjunto de planos en particular (Angelier, 1979).

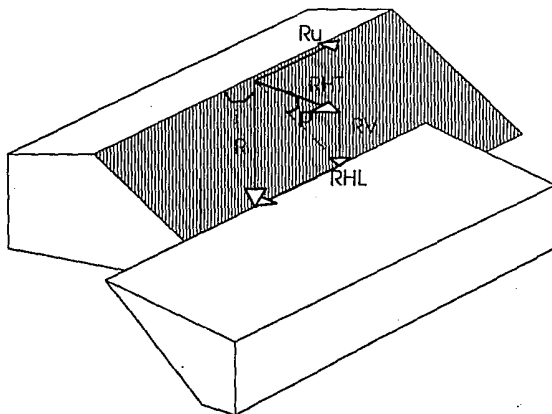


Figura 15. Características Geométricas elementales de una falla (ejemplo de una falla normal).
Ru rumbo del plano de falla; **p**, inclinación del plano de falla; **i** ángulo de la estría ("pitch", ángulo agudo con respecto a la horizontal del plano); **R** magnitud del desplazamiento; **RHT** desplazamiento horizontal transversal; **RHL** desplazamiento horizontal; **RV** desplazamiento vertical.

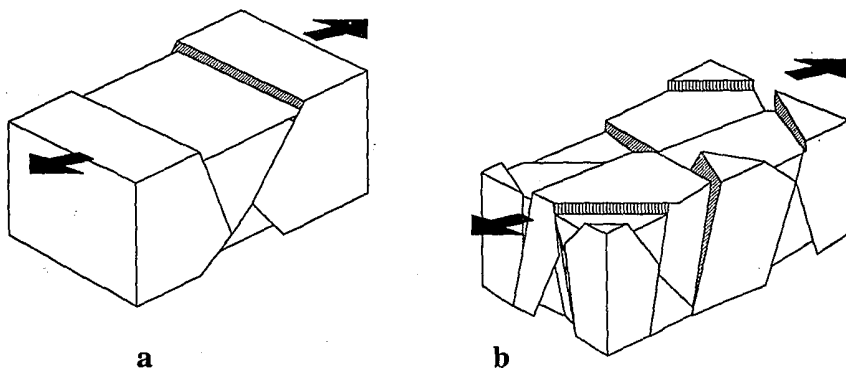


Figura 16. Ilustración del caso de un juego de fallas normales. a, fallas neoformas conjugadas. b, fallas heredadas
 Las flechas indican al dirección de extensión. (Angelier. 1989)

En base a lo expuesto anteriormente, es necesario examinar como se comporta una discontinuidad cualquiera en un campo de esfuerzos dado. Apareciendo en tal caso, la relación entre los valores de los tres esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3) así como su orientación, y no existe una construcción geométrica simple que vincule la orientación del juego de falla con el elipsoide de esfuerzos. No obstante, en un contexto dinámico en parte conocido, puede ser posible interpretar el juego de fallas aisladas limitando las direcciones posibles de los esfuerzos principales (Fig. 17).

El estudio de las deformaciones de ruptura cuidando su orientación (fallas normales, inversas y de desplazamiento lateral) permiten introducir simplemente el razonamiento en términos de esfuerzos; lo anterior, es de gran importancia práctica, porque generalmente las poblaciones de fallas contienen cizallamientos conjugados o características similares (Fig. 17).

El siguiente paso es la búsqueda del estado de esfuerzos, responsable del juego de varias fallas de las cuales la orientación de los planos es *a priori* cualquiera. Entonces, no se puede pasar por alto la noción el estado de esfuerzos medio, responsable del juego de cada falla y el cual es el mismo para todos los juegos; se trata evidentemente de una aproximación, pero la coherencia de los resultados obtenidos en diversas aplicaciones (diferentes ambientes geológicos) están bien fundamentados (Angelier, 1987, 1993)

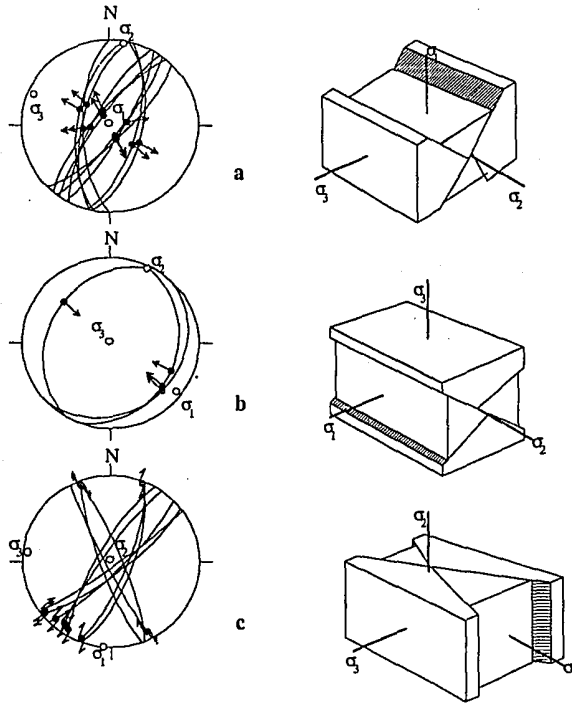


Figura 17. Sistemas de Fallas conjugadas. A la izquierda, los planos de fallas y estrías en proyecciones de Schmidt, hemisferio inferior. A la derecha, los bloques diagramáticos correspondientes. Los ejes de los esfuerzos principales, σ_1 , σ_2 y σ_3 están indicados en los tres casos. a, Fallas normales; b, fallas inversas y c, fallas de desplazamiento lateral (transcurrentes) (Angelier, 1989).

III.1.B.3 Algoritmos utilizados en el estudio

Con base a lo mencionado en III.1.B.1 y III.1.B.2, a continuación se describirá brevemente los dos algoritmos de inversión de datos de campo empleados en el procesamiento de la información del presente estudio (Angelier, 1991).

El método más trivial consiste en ensayar un gran número de tensores Σ . Este es el caso del algoritmo R4DT (Fig. 18a), el cual se basa en la siguiente ecuación:

$$S_2 = \sum_{k=1}^K p_k \operatorname{sen}^2 \frac{\alpha_k}{2} \quad (3.10)$$

donde α_k es el ángulo entre la estria (observada) y el cizallamiento calculado para el juego de falla k de peso p_k (Fig. 18a), siendo K el número de datos. Este criterio angular tiene implícito la suposición de la ausencia de fricción (como si todos los planos estuvieran perfectamente lubricados) y pierde su significado cuando el esfuerzo tangencial es muy pequeño.

Por otra parte, el algoritmo INVD (Fig. 18b) consiste en buscar el mínimo de la función utilizada resolviendo analíticamente un sistema de ecuaciones, lo cual se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$S_4 = \sum_{k=1}^K p_k v_k^2, \text{ o } S_4 = \sum_{k=1}^K p_k (\lambda^2 + \tau^2 - 2\lambda\tau_k \cos \alpha_k) \quad (3.11)$$

donde v_k es el módulo de un vector definido en la figura 18b, función del esfuerzo tangencial τ_k , de ángulo α_k y del parámetro λ (definido en la ecuación 3.8). Este criterio permite una solución analítica inmediata (Angelier, 1991).

En la Fig. 18, se resume la comparación de los dos métodos, que dependen del ángulo α para R4DT, y del ángulo α y de la amplitud del módulo de v para INVD. Conviene mencionar que de acuerdo a Angelier (1990), los dos métodos conducen a resultados compatibles.

Para una falla bien definida, se puede ilustrar las diferencias de orden físico, es decir, el método R4DT conduce a una solución múltiple (Fig. 19a), mientras que el método INVD conduce a una solución única (Fig. 19b), esto se debe a que este método calcula el cizallamiento máximo. En resumen, el método de INVD satisface la siguiente condición: obtener un esfuerzo tangencial máximo, de tal forma que permita el deslizamiento de los bloques de una falla a pesar de la cohesión y de la fricción de la roca. Esta condición refleja de modo aproximado pero realista los criterios de ruptura-fricción, los cuales al introducirlos estrictamente impiden la posibilidad de la inversión analítica, ya que dichos criterios conducen a soluciones numéricas absurdas sin aportar finalmente cambios significativos en los resultados.

De acuerdo con Angelier (1991) el método R4DT es adecuado para fallas heredadas sin fricción, mientras que el método INVD está idealmente adaptado para fallas neoformes.

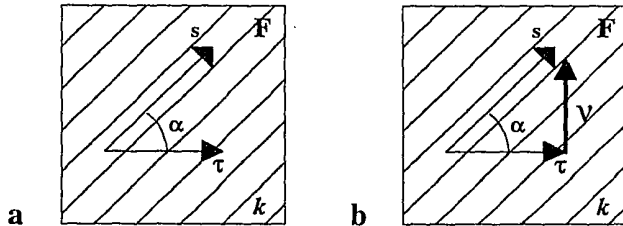


Figura 18. Comparación de los dos criterios simples en el plano de falla F: s , vector estría de módulo λ ; τ , tensión (contrainte) tangencial impuesto por el tensor de esfuerzos, α , criterio angular (método R4DT, α mínimo). b , criterio mixto (método INVD, v mínimo; el vector de λ depende de la forma adoptada para el deviator). (Angelier 1991).

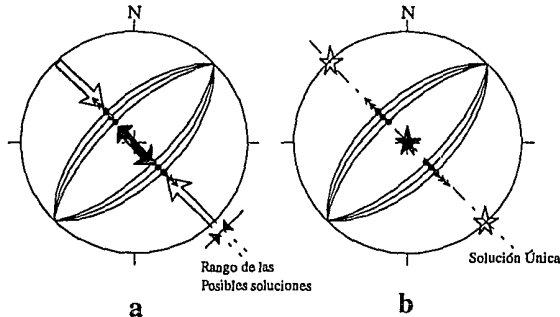


Figura 19. Diferencias de los métodos: fallas normales conjugadas (proyección de Schmidt, hemisferio inferior). Las pequeñas flechas: deslizamientos (estrias). a , método R4DT: los ejes calculados varían siguiendo las flechas gruesas (blanca para σ_3 , negra para σ_2). b , método INVD: solución única para los ejes σ_3 (estrella blanca) y σ_1 (estrella negra). (Angelier 1991).

La aplicación de los dos métodos (INVD y R4DT), permitió aplicar un criterio para seleccionar la mejor solución, el cual consistió en seleccionar los resultados para los cuales el ángulo α fuera mínimo. No obstante, si la diferencia entre las dos soluciones era despreciable, se optaría por los resultados donde los valores de inclinación de σ_2 y σ_3 estuvieran próximos a 0° y el de σ_1 próximo a 90° para el caso de fallas normales; si los valores de inclinación de σ_1 y σ_2 son próximos a 0° y el de σ_3 próximo a 90° se asocian a fallas inversas; finalmente si los valores de

inclinación de σ_1 y σ_3 son próximos a 0° y el de σ_2 próximo a 90° se asocian a fallas de transcurrancia.

III.1.B.4 Trabajo de campo

Partiendo de los conceptos expuestos anteriormente, el trabajo de campo consistió en obtener el mayor número de datos estructurales de fallas localizadas en el Istmo de Tehuantepec tratando de establecer el tipo de desplazamiento asociado, es decir, definir las fallas dentro de la siguiente clasificación: normal, inversa y de desplazamiento lateral (de sentido sinistral o dextral).

El plan general de trabajo desarrollado en tres campañas de mediciones de campo fue el siguiente:

1. Verificar las conclusiones descritas en el capítulo II (secciones 2 y 3), relacionados con la evolución tectónica regional para fines del estudio neotectónico de la zona de interés.
2. Obtener el mayor número de datos de microtectónica en el terreno, que permitan establecer el posible campo de esfuerzos asociado a los rasgos tectónicos medidos (principalmente fallamientos).
3. Realizar encuestas de los daños a construcciones civiles de la región de interés (puentes, carreteras, casas habitación, etc.) que probablemente estén asociados a eventos sísmicos recientes. Esto con la finalidad de tratar de establecer si dichas zonas se encuentran dentro de una posible región tectónicamente activa (zona de subducción u otras).

El procedimiento aplicado para llevar a cabo los puntos 1 y 2 considera los siguientes aspectos:

- i. Identificación a grandes rasgos de la edad de la formación.
- ii. Identificación y descripción de la formación geológica.
- iii. Delimitación la estructura geológica (fallas).

- iv. Asignación de la posible dirección del desplazamiento de la falla y la clasificación de la misma.
- v. Obtención de los datos de microtectónica, tales como, *azimut* del espejo (plano) de falla, el cual se define como el ángulo horizontal con respecto al norte magnético, de 0 a 180 grados; la *inclinación* del espejo de falla, definido por el ángulo vertical de 0 a 90 grados con respecto al plano horizontal imaginario del azimut; y la *inclinación de las estrías*, definida como el ángulo de 0 a 90 grados del espejo de falla y un plano auxiliar que contiene a la estría (Fig. 15).
- vi. Graficación, de todos los datos de campo en un diagrama de Schmidt (áreas iguales), y análisis de la información con la finalidad de detectar posibles ambigüedades o errores de medición y su posterior corrección en el campo.
- vii. Proponer una interpretación cualitativa de la dirección de máximo esfuerzo compresivo (σ_1) asociado al campo de esfuerzos del sitio que provocó la falla, con el objeto de tener un panorama a nivel de terreno del estado de esfuerzos de las zonas o sitios de medición cuando se formó la falla, lo cual puede permitir más adelante proponer un posible cuadro neotectónico para la zona de estudio, donde existen eventos polifásicos.

El procesamiento descrito fue aplicado en aproximadamente 90 estaciones de la región de interés, de las cuales en la figura 20 se muestra la localización de 50 de ellas (de las cuales se obtuvieron las direcciones principales del tensor medio de esfuerzos, y finalmente se utilizaron en el estudio). Nótese que la densidad de las estaciones es diferente dependiendo de la zona (Norte, Centro y Sur; Fig. 12) en el que estas se localizaban. Dicha densidad refleja las características geológicas (y de acceso) de la zona estudiada.

En las figuras 21 a 23 se presentan ejemplos de estaciones típicas de las zonas Norte, Centro y Sur, respectivamente. En dichas figuras se muestra la falla estudiada y por ejemplo de las estrías a las que se les aplicaron los pasos v a vii descritas anteriormente.

La nomenclatura utilizada para identificar cada estación tiene la siguiente estructura: por ejemplo la estación CATE9301, donde las primeras letras (CATE) se refiere a la zona donde se encuentra ubicada la estación (Fig. 12), 93 indica el año de 1993 en el cual se realizó el procesamiento de la información y los últimos dos dígitos indican el número de la estación.

NEOTECTONICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC

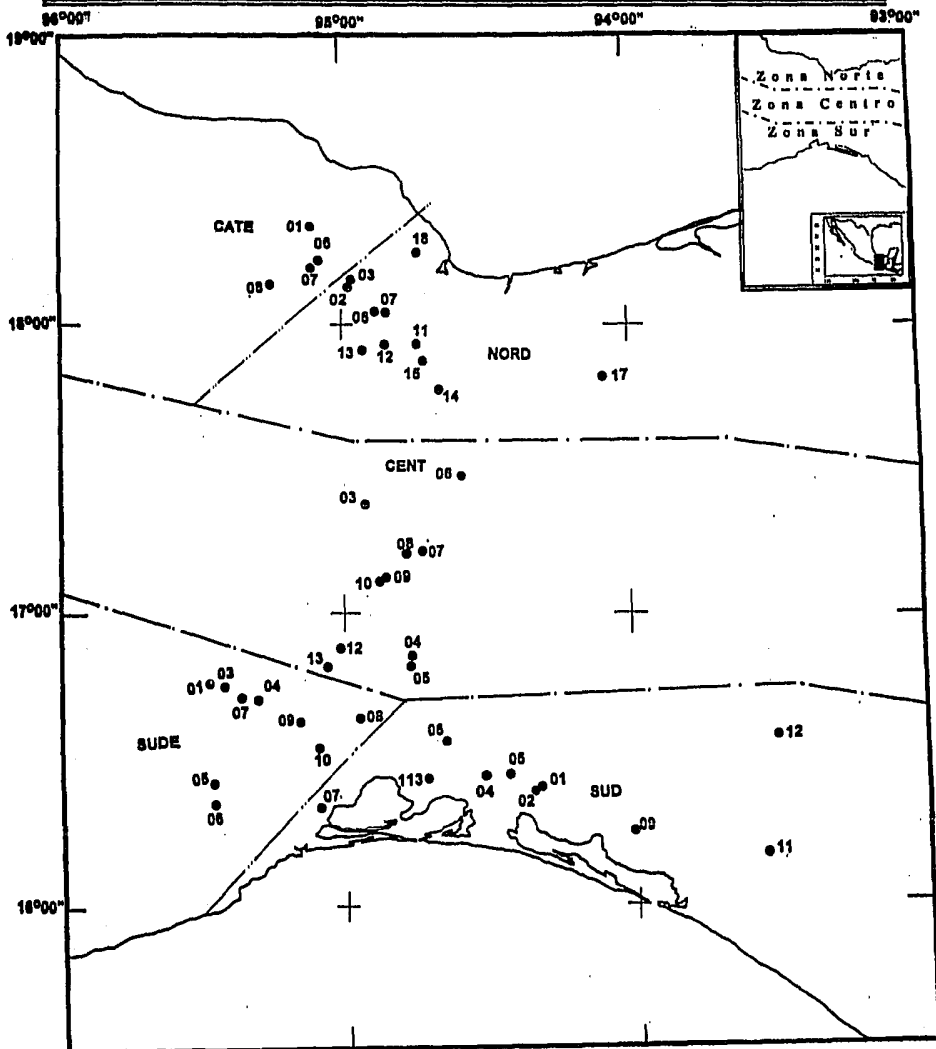


Figura 20. Plano de localización de las estaciones de campo del presente estudio.

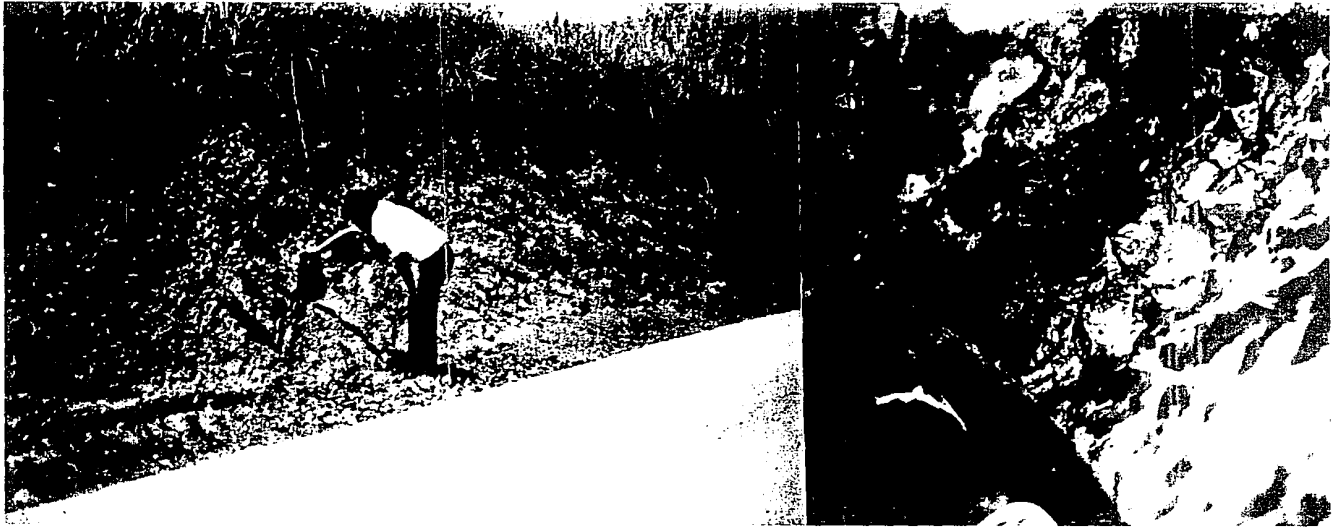


Figura 21. Foto de una estación (NORD9302) de la zona Norte, en la cual se puede observar un plano de una falla normal con dirección NNE-SSW y las estrias sobre la población de planos de falla. El afloramiento consiste de material volcánico muy tectonizado intemperizado de color rojo al intemperismo de edad Cuaternario, para mayor información ver Apéndice 2.



Figura 22. Foto de una estación (CENT9310) de la zona Centro, en la cual se puede observar un plano de una falla normal con dirección prácticamente Norte-Sur y las estrias sobre la población de planos de falla. El afloramiento consiste de material sedimentario intemperizado de color rojo, de ambiente marino (Plio-Cuaternario marino(?)), para mayor información ver Apéndice 2.

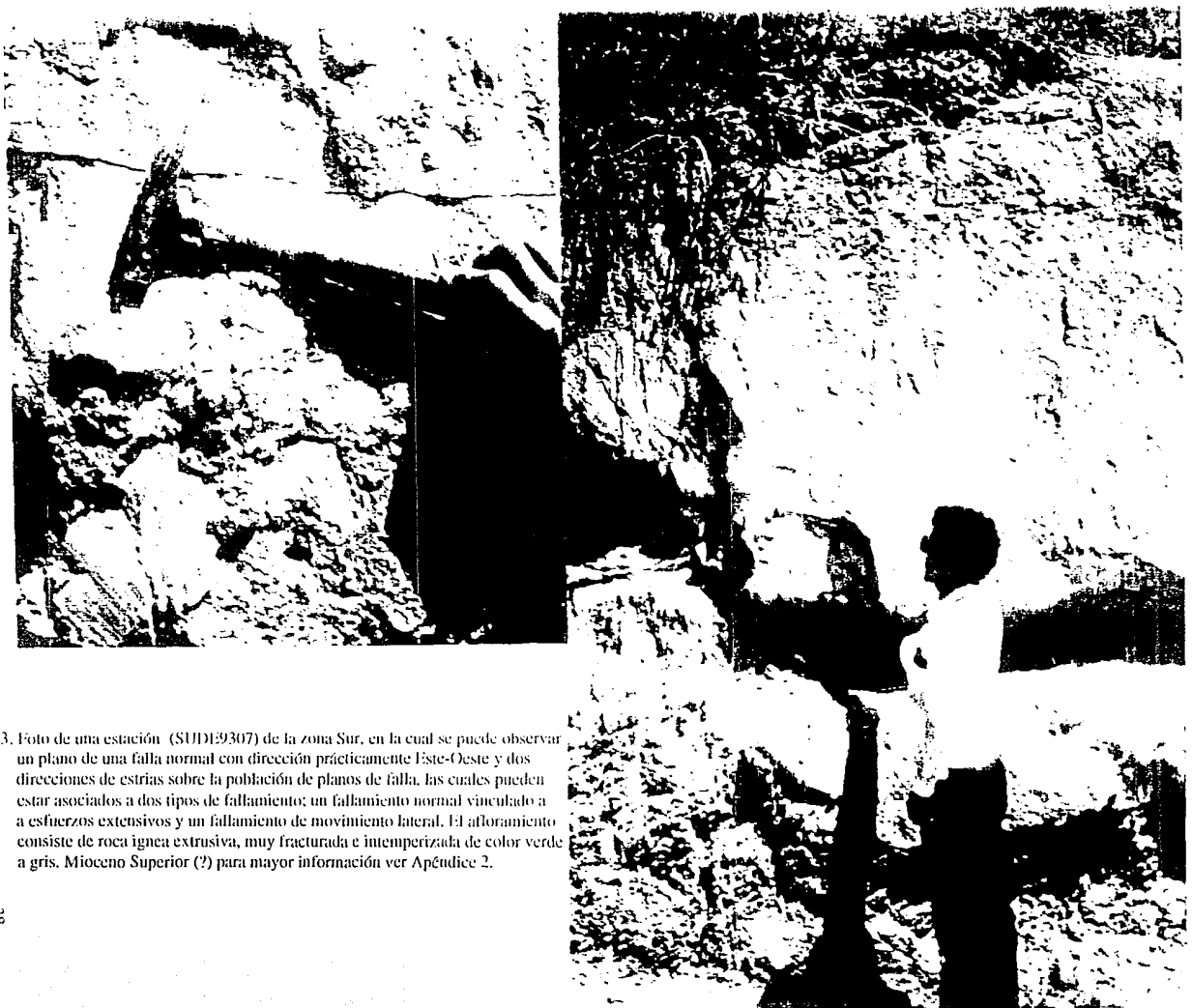


Figura 23. Foto de una estación (SUDI:9307) de la zona Sur, en la cual se puede observar un plano de una falla normal con dirección prácticamente Este-Oeste y dos direcciones de estrias sobre la población de planos de falla, las cuales pueden estar asociados a dos tipos de fallamiento: un fallamiento normal vinculado a esfuerzos extensivos y un fallamiento de movimiento lateral. El afloramiento consiste de roca ígnea extrusiva, muy fracturada e intemperizada de color verde a gris. Mioceno Superior (?) para mayor información ver Apéndice 2.

III.1.B.5 Procesamiento de la información de campo

Los datos obtenidos de las campañas de campo fueron procesadas con los algoritmos INVD y R4DT descritos en III.1.B.3. De acuerdo con los criterios que se aplicaron finalmente se seleccionaron los resultados correspondientes a 50 estaciones. Dichos resultados se incluyen en el apéndice 2. En la Fig. 24 se incluye un ejemplo típico de los resultados obtenidos.

En esta figura se presenta el diagrama de Schmidt (hemisferio inferior) que incluye las direcciones de los esfuerzos principales (σ_1, σ_2 y σ_3) del tensor medio de esfuerzos, el cual es la solución del método de inversión al aplicar los algoritmos INVD y R4DT a los resultados recabados en la estación NORD9302.

En el siguiente capítulo se discutirán los resultados obtenidos para las estaciones de la Fig. 20, que como se mencionó se presentan en el Apéndice 2.

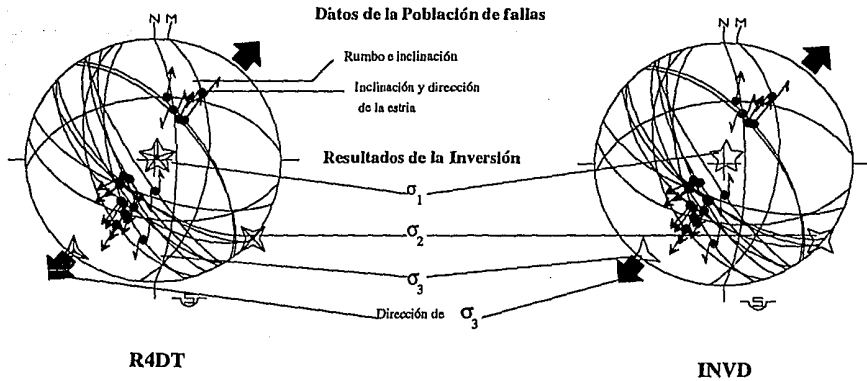


Figura 24. Nomenclatura de los resultados obtenidos mediante los algoritmos de R4DT y INVD, de la estación NORD9302. En este caso se puede observar que los resultados obtenidos mediante los dos algoritmos son muy similares. Los símbolos aquí mostrados se asocian a los esfuerzos de la siguiente manera: la estrella de cinco picos (☆ para INVD, ☆ para R4DT) al esfuerzo σ_1 , la de cuatro picos (☆ para INVD, ☆ para R4DT) al esfuerzo σ_2 y la de tres picos (△ para INVD, △ para R4DT) al esfuerzo σ_3 . Lo anterior de acuerdo con las ecuaciones (3.10 y 3.11) de III.1.B.3. La dirección del esfuerzo principal σ_3 se representa por la flechas negras (← →) que en el caso que nos ocupa corresponde a un campo de esfuerzos extensional.

III.2. ESTUDIO REGIONAL

III.2.A. Generalidades

Como se ha mencionado el trabajo de campo se efectuó durante las campañas llevadas a cabo en el Centro-Sur de México en 1991, 1992 y 1993, con la finalidad de establecer un posible cuadro neotectónico y su impacto en el riesgo sísmico, así como comprobar las conclusiones del capítulo II (secciones 2, 3 y 4). De acuerdo a las conclusiones arriba mencionadas, para realizar el estudio neotectónico del Centro-Sur de México se dividió la región en tres zonas: la Zona Norte, Zona Centro y Zona Sur (Fig. 12).

En base a lo anterior y a los trabajos de geología superficial (PEMEX, informes inéditos; plano III) tenemos que para la Zona Norte los afloramientos del Plio-Cuaternario están representados por rocas sedimentarias marinas y rocas volcánicas con algunos afloramientos marinos del Mioceno. En la Zona Centro, predominan las rocas sedimentarias del Plio-Cuaternario y en menor proporción el Jurásico, Cretácico, Mioceno marino y Paleoceno (?). Por último, para la Zona Sur el estudio se concentro en afloramientos del Mioceno principalmente representados por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, concentradas en la Planicie Costera y Sierra de Juárez, esto debido a la ausencia o escasez de afloramientos del Plio-Cuaternario. A continuación se describirá cada una de las zonas.

III.2.B. Zona Norte

III.2.B.1. Presentación general.

La Zona Norte (Fig. 12) esta comprendida dentro de las Cuencas Terciarias del Sureste de México (ver Cap. II.3), incluyendo la Zona Volcánica de los Tuxtlas al NE de esta región.

La Zona Volcánica de los Tuxtlas representa el área topográfica más elevada, lo cual explica la presencia de un bosque de montaña y un clima de semihúmedo en las partes bajas a húmedo en las partes altas. Al SW de esta zona en el límite entre la zona volcánica y las Cuencas Terciarias, el drenaje esta representado por los ríos San Juan y Tesechoacan, los cuales son afluentes del Papaloapan, el cual desemboca en el Golfo de México. Otro rasgo hidrológico importante son las lagunas de Catemaco y Sontecomapan, las cuales se encuentran dentro del área de los volcanes. Por otro lado, al oriente los principales ríos que dominan el drenaje de la zona son: Coatzacoalcos, Cahuapan, Chuichapa, Uzpanapa y Tonalá.

III.2.B.2. Geología

Dentro de la Zona Norte se encuentra la zona volcánica de los Tuxtlas y la subprovincia de Cuencas Terciarias (ver. cap. II.3), las cuales se describirán sintéticamente a continuación:

La Zona Volcánica de Los Tuxtlas se localiza en el borde del Golfo de México, al NE del Istmo de Tehuantepec, los afloramientos volcánicos están constituidos por productos piroclásticos, derrames de basaltos alcalinos y traquibasaltos (Robin, 1976) de edad Plio-Cuaternario (Cantagrel *et al*, 1976); observadas en las estaciones CATE9301, CATE9306, CATE9307, NORD9302, NORD9303 y NORD9318, (apéndice 2).

Por su parte, los afloramientos de las formaciones terciarias plegadas dominan en la subprovincia geológica de Cuencas Terciarias. En general el espesor de los sedimentos aumenta en dirección al Golfo. Paralelamente, las series predominantemente arenosas o areno-carbonatadas de la Sierra de Chiapas dieron lugar a formaciones predominantemente arcillosas, desarrollándose intercalaciones continentales, y al parecer no hay un hiatus sedimentario del Paleoceno al Mioceno medio (Carfantán, 1986). Algunas de las anteriores formaciones se observaron en las estaciones CATE9308, NORD9306, NORD9307, NORD9311, NORD9313, NORD9314 y NORD9317 (ver apéndice 2).

III.2.B.3. Tectónica de Ruptura.

Durante el Paleoceno en la región occidental del Dominio Chiapaneco, se desarrollo la red de fallas verticales más importantes de la región, y las formaciones de esta edad se encuentran ya sea en contacto por fallas con las calizas de edad Cretácico, o ya sea concordantes sobre estas mismas calizas. La existencia de fallas sin-sedimentarias, de brechas calcáreas del Cretácico superior, muestran la inestabilidad de esta región al final del Cretácico y durante el Paleoceno (Carfantan 1986).

Observando las fallas interpretadas por configuración del basamento (PEMEX) y sismología de reflexión, la Zona Norte presenta por un lado, una tectónica con patrones vinculados a mecanismos transcurrentes, como lo indican las fallas transcurrentes NW-SE inferidas por gradientes de Basamento (Plano I). Por otro lado, las fallas normales lístricas inferidas por sismología de reflexión y gradientes de basamento (Figs. 25, 26 y 27, respectivamente), presentan direcciones NE-SW y N-S, estableciendo un patrón estructural asociado a un proceso de apertura con una tectónica de bloques de extensión con fosas y pilares (Plano I), cuyas profundidades fluctúan alrededor de los 10 Km (Fig. 27).

Finalmente, como veremos en la siguiente sección, algunas de las fallas interpretadas por configuración del basamento y sismología de reflexión, se manifiestan en las formaciones del Plió-Cuatemario, de acuerdo a los datos de microtectónica recabados dentro de esta zona.

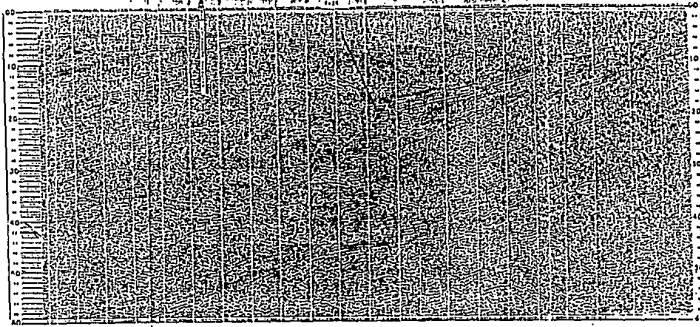


Figura 25. Fallas normales interpretadas por sismología de reflexión, línea 101 (PEMEX, inédito). Lámina 3, Poster

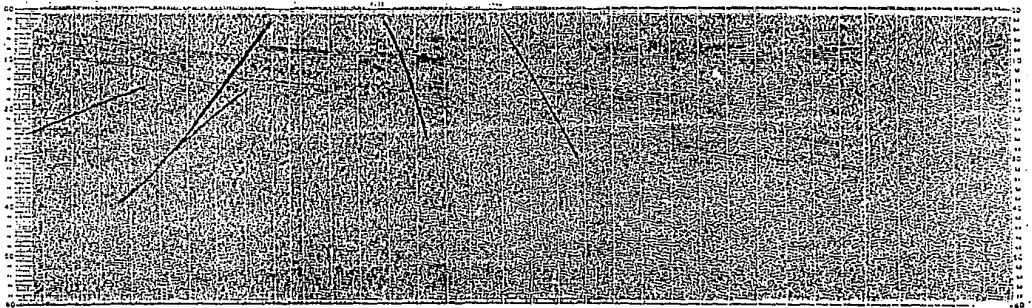


Figura 26. Fallas normales interpretadas por sismología de reflexión, línea 108 (PEMEX, inédito). Lámina 3, Poster

NEOTECTONICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC

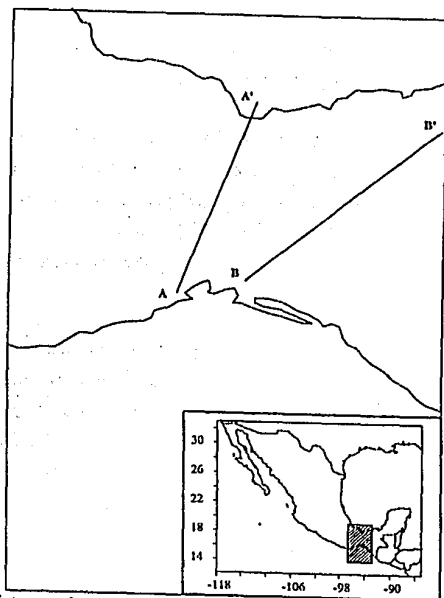
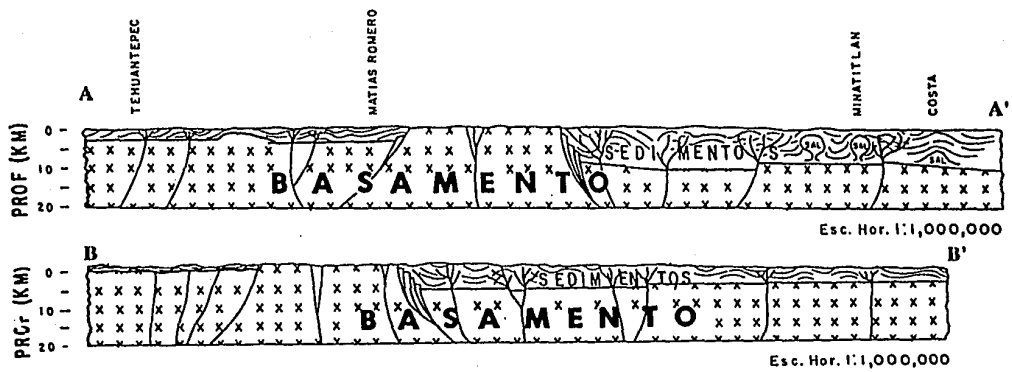


Figura 27. Perfiles interpretados por configuración magnetométrica del Basamento (PEMEX, inédito), secciones A-A' y B-B'.

III.2.B.4. Evolución Neotectónica

Analizando las direcciones de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 (resultados del cálculo del tensor medio de esfuerzos) de la zona Norte, se tiene que para los afloramientos de rocas volcánicas (Plio-Cuaternario) la dirección de σ_3 fluctúa de NW-SE a NE-SW (Fig. 28) (estaciones CATE9301, CATE9306, CATE9307, NORD9302, NORD9303 y NORD9318; ver apéndice 2 y plano ID); dichas orientaciones de σ_3 están vinculadas a planos de fallamiento conjugado orientados N-S, preferentemente, excepto en la estación NORD9318 cuyos planos de falla se encuentran orientados prácticamente E-W. Así mismo, los afloramientos de rocas sedimentarias (Plio-Cuaternario), presentan las mismas direcciones de σ_3 y el mismo patrón de fallamiento conjugado (estaciones CATE9308, NORD9306, NORD9307, NORD9312, NORD9314, NORD9315 y NORD9317; ver apéndice 2 y plano II). Sin embargo, es importante señalar que en las estaciones NORD9306, NORD9312, NORD9314 y NORD9317 se observó los planos de fallamiento presentaban una orientación preferencial que fluctúa entre NW-SE y NE-SW; mientras que en las estaciones CATE9308, NORD9307 y NORD9315 las orientaciones de los planos son varían de ENE-WSW a ESE-WNW.

Con base en lo descrito anteriormente y el antecedente que durante la etapa de deformación del Mioceno (Carfentan, 1986) las estructuras tectónicas jugarían con desplazamientos sinestrales. Podemos decir, que actualmente se tiene probablemente una tectónica extensiva con dirección preferencial de NW-SE a NE-SW (orientaciones de σ_3), asociada quizá a la subducción en la cual estas fallas juegan como normales, principalmente para las fallas con direcciones E-W.

Es importante, resaltar por un lado, el problema que existe en la datación de las formaciones del Neógeno, ya que diferentes autores manejan intervalos de tiempo geológico distintos para una misma formación, lo cual nos conlleva a considerar la mayor parte de las formaciones y eventos neotectónicos con edades del Plio-Cuaternario. Por otro lado, las intrusiones salinas que se presentan en la parte Norte del Istmo vienen a complicar aún más la neotectónica de esta región (Fig. 27).

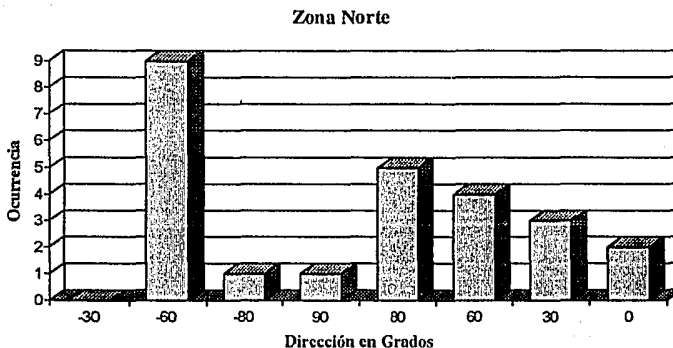


Figura 28. Direcciones preferenciales de σ_1 , para la zona Norte. 0 indica el rango de N-S (-10° a 10°), 30 el rango de NNE-SSW (11° a 30°), 60 el rango de NE-SW (31° a 60°), 80 el rango de ENE-WSW (61° a 80°), 90 el rango de N-S (-81° a -90° y 81° a 90°), -80 el rango de WNW-ESE (-61° a -80°), -60 el rango de NW-SE (-31° a -60°), -30 el rango de NNW-SSE (-11° a -30°). En esta figura, se observa una dirección preferencial de σ_1 , de NW-SE, explicación en el texto.

Los signos positivo (+) y negativo (-), indican que los grados se miden en el sentido horario y antihorario, respectivamente, a partir del Norte.

En resumen, podemos concluir que el patrón de deformación se caracteriza con direcciones del esfuerzo mínimo horizontal de NW-SE a NE-SW con fallamiento preponderante dentro de esta zona corresponde en fallas normales N-S, similar al sistema secundario que se presenta en la región vecina al Noroccidente de Chiapas. Entonces, estos planos de fallas pueden representar estructuras preexistentes. Las poblaciones de fallas descritas, se observaron tanto en terrazas aluviales (al NE de Acayúcan y al NW de las Choapas, Ver.), como en formaciones de ambiente marino somero (áreas cercanas a los poblados de Jaltipan, Acayúcan), así como en formaciones volcánicas cuaternarias (NW de Acayúcan, Ver.). El resultado anterior concuerda con las conclusiones de Suter (1991) para la zona Norte, los cuales fueron obtenidos de datos de elongación de pozos y alineamientos estructurales volcánicos (Fig. 29). Por otro lado, del estudio de reflexión sísmica efectuados por PEMEX (informes inéditos; Figs. 25 y 26) muestran la existencia de fallas normales con longitudes alrededor de 10 y 21 Km y direcciones N-S y NE-SW. Estos resultados también coinciden con las conclusiones de presente estudio.

Conviene mencionar que la solución del mecanismo focal para el sismo de Jaltipan de 1959 de magnitud 6.5 y profundidad local de 21 Km (Fig. 30), propuesta por Suárez (1994, sometido a

Geology), corresponde a un fallamiento inverso vinculado a esfuerzos compresivos, posiblemente ligado a la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa de Nortamérica.

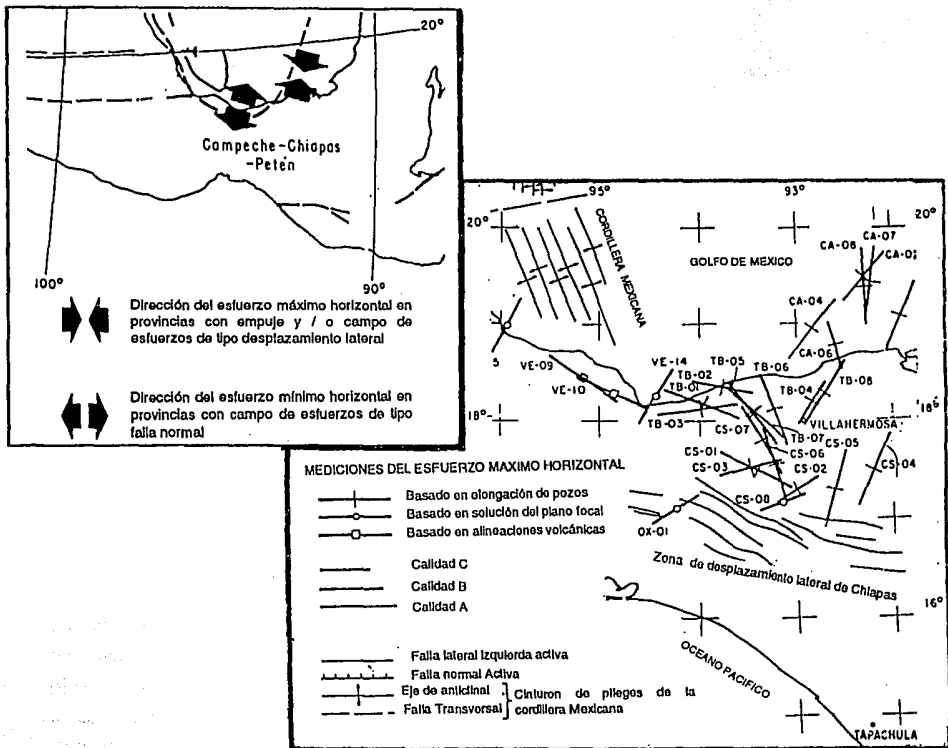


Figura 29. Orientación de los esfuerzos máximos horizontales y fallas del Cenozoico Tardío en el Sureste de México. a. Resultados basados en información de elongación de pozos, solución de planos focales y alineamientos volcánicos. b. Dirección del esfuerzo máximo horizontal asociado a una falla de tipo normal. (Suter, 1991).

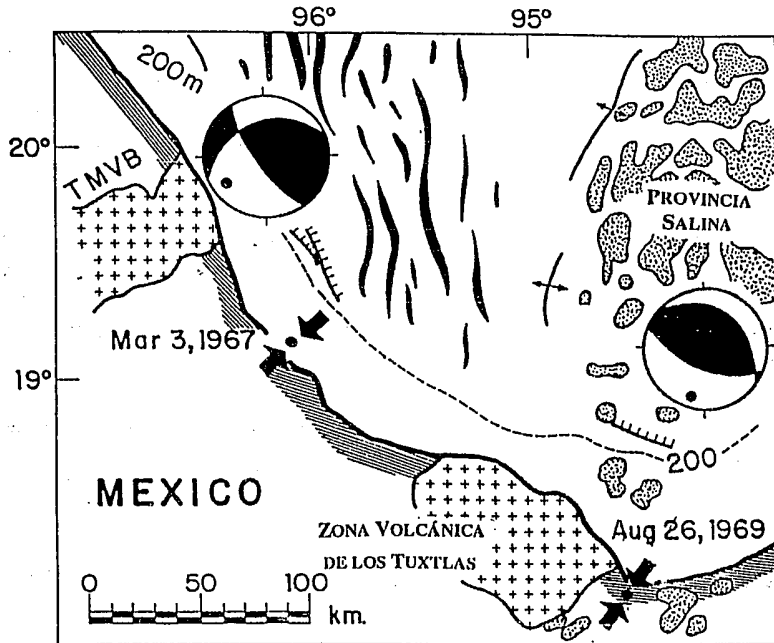


Figura 30. Solución del mecanismo focal para el sismo de Jaltipan de 1959. (Suárez, 1994)

III.2.C. ZONA CENTRO

III.2.C.1. Presentación general.

La zona Centro (Fig. 12) se encuentra limitada al poniente por la Sierra de Juárez, al oriente por la Sierra de Chiapas, al norte por la Planicie Costera del Golfo de México y al sur por la Sierra Atravesada, que es el prolongamiento de la Sierra de Chiapas, dentro de la cual se observa la parte topográfica más alta de esta región con 2250 m.s.n.m al norte de Reforma Pineda.

El clima en las áreas de la sierras es de húmedo a templado con bosque de montaña, el cual cambia a bosque tropical conforme se aproxima a la Planicie Costera del Golfo. En la parte sur de la región existe un importante parteaguas formado por la Sierra de Juárez al poniente y la Sierra de Chiapas al oriente, cuya manifestación hidrológica más importante esta representada por los ríos Coatzacoalcos, Uzpanapa y Grijalva (Sierra de Chiapas); ríos Sarabia, Trinidad, La Lana, Jaltepec (Sierra de Juárez), los cuales atraviesan toda esta región.

Al oriente de esta zona se encuentran las presas de Malpaso y Chicoasen dentro de las cuales se encuentran dos de las plantas hidroeléctricas más importantes de México.

III.2.C.2. Geología

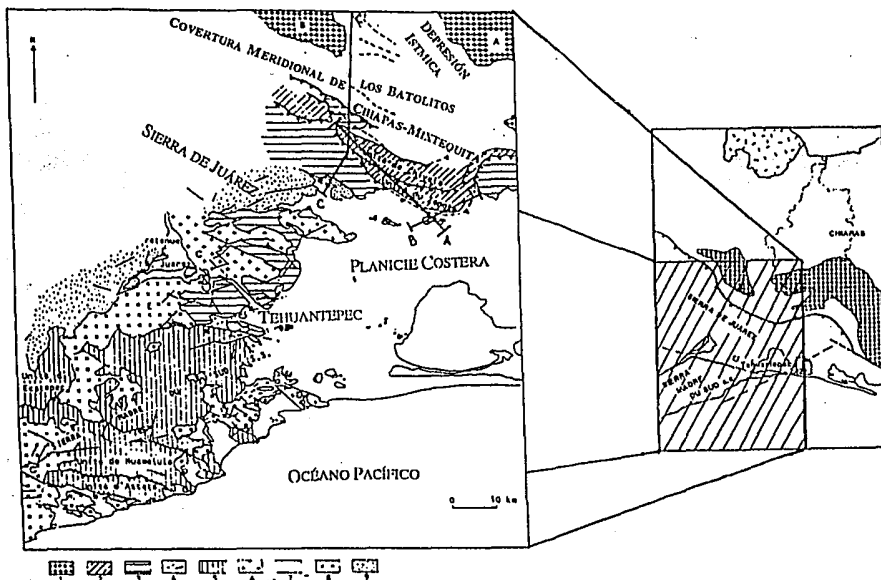
La Zona Centro se encuentra comprendida dentro de las subprovincias geológicas Sierra Madre de Chiapas y Macizo de Chiapas (Cap. II y apéndice 1) y parte de la extremidad meridional de la Sierra de Juárez. Los depósitos del Cenozoico en estas subprovincias son menos representativa con respecto a la Región Norte, por lo consiguiente, a continuación se describirá a grandes rasgos las formaciones más importantes de esta zona.

La extremidad septentrional de Chiapas y la extremidad meridional de la Sierra de Juárez, están caracterizada por:

- a. Un Batolito Permo-Triásico.
- b. La Molasa Continental (Todos Santos).
- c. Depósitos marinos del Jurásico y Cretácico en las zonas axiales y meridionales del Batolito.
- d. Formaciones Terciarias Discordantes.

Los cuales se describirán a continuación:

El Batolito Permo-Triásico, al Este del eje de la depresión Istmica (Fig. 31), se sitúa en el prolongamiento NW del Batolito de Chiapas, y sin diferencia lateral apreciable. Se conoce con el nombre de Batolito de Mixtequita (extremidad meridional de la Sierra de Juárez).

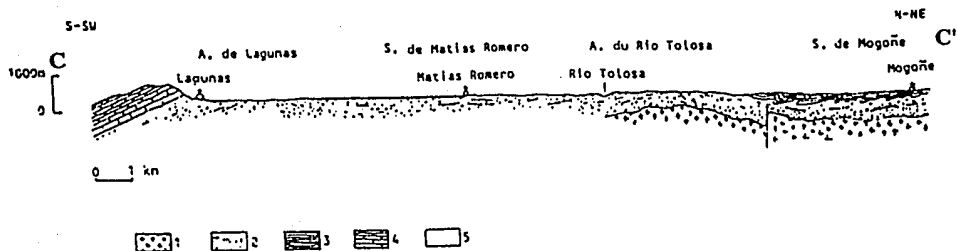


A

Figura 31. A. Esquema estructural de los regiones centrales y meridionales del Istmo de Tehuantepec.

B y C. Cortes geológicas (Carfanta, 1986).

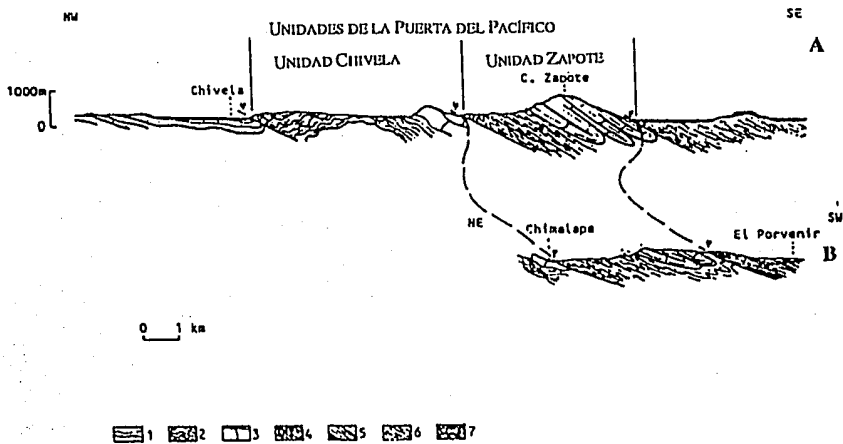
A.: 1. Batolitos Permo-Triásicos del basamento Chiapaneco-Olmeca, con A. Batolito de Chiapas; B. Batolito de Mixtequita; 2. Unidades frontales epimetamórficas de la Sierra de Juárez; 3. Formaciones epimetamórficas a ofiolíticas de la Cuenca Cuicateca y molasas continentales Campano-Maestrichtiano; 4. Migmatitas (Complejo Xolapa); 5. formaciones epimetamórficas del Arco Chontal y molasas marinas del Senoniano; 6. Batolitos del Cretácico superior de los cuales C. Batolito de Jalapa del Marqués y D. Batolito de Salina Cruz; 7. Molasas continentales del Eoceno-Oligoceno; 8. Batolitos del Mioceno; a y b indican sistemas transcurrentes sinistralces, Sistema del Rfo de Las Tejas y Sistema de Astata, respectivamente.



B

Figura 31.B Corte de la Vertiente Pacífica Chiapanca a la altura del Istmo de Tehuantepec. (Carfantan, 1986)

1. Batolito Permo-Triásico Chiapas Mixtequita;
2. Molasa continental post-Apalachiana;
3. Jurásico superior, Pelitas y calizas negras;
4. Albiano-Turoniano, Calizas claras.



C

Figura 31.C. Cortes de las Unidades Frontales de la Sierra de Juárez, a nivel del Istmo de Tehuantepec.

- X. Corte de la Carretera Transmésica; Y. Corte de la terracería El Porvenir-Chimalapa;
1. Areniscas y pelitas rojas, Formación Todos Santos de la cobertura meridional de Chiapas;
- 2 y 3. Unidad Chivela con 2. metareniscas; 3. mármoles macizos; 4 y 5. Unidad Zapote con, 4. metareniscas y metapelitas, 5. mármoles con estratos sílficos; 6 y 7 Cuenca Cuicateca con, 6. esquistos y cuarcitas con cericitas y cloritas; 7. esquistos de hornblenda. (Carfantan, 1986)

Los afloramientos del Batolito de Mixtequita se localizan principalmente en el río Jaltepec, y en la rivera izquierda del río Coatzacoalcos, donde se observa un granito de grano medio con biotitas y anfíboles.

Tanto el Batolito de Chiapas (extremidad meridional de la Sierra de Chiapas), como el Batolito de Mixtequita (extremidad meridional de la Sierra de Juárez) están envueltos por la molasa continental *Todos Santos*. Cuyo contacto se puede observar, en la rivera derecha del río Jaltepec a lo largo de la carretera Tuxtepec-Palomares, donde las capas rojas inician con conglomerados y arenas de elementos graníticos (Carfantán, 1986). El Batolito de Mixtequita desaparece del mismo modo que el Batolito de Chiapas, a la altura del río Jaltepec (área de la depresión Istmica).

La molasa roja continental post-Apalachiana del Jurásico Tardío-Neocomiano (*Todos Santos*) que se observa al Sur del Batolito de Chiapas. La molasa se extiende a lo largo de una gran superficie en las regiones septentrionales y centrales Istmicas (Fig. 31). Los afloramientos se encuentran bordeando a los Batolitos de Chiapas, Mixtequita y en el corazón de la depresión Istmica.

El espesor de la Formación *Todos Santos* es del orden de 500 m entre las formaciones sedimentarias mesozoicas marinas y el Batolito de Mixtequita (Carfantán 1986).

El material sedimentario que constituye la Formación *Todos Santos*, esta formado principalmente por areniscas (arcosas) y conglomerados; estos últimos constituidos esencialmente de material granítico y granos de cuarzo los cuales representan una buena parte del espesor total; no obstante, se han identificado algunos derrames volcánicos dentro de esta formación (Carfantán, 1986).

Por su parte las formaciones del Jurásico superior afloran en el corazón de la Depresión Istmica entre el Batolito de Chiapas y Mixtequita, principalmente en el poblado Mogofié (del cual toma su nombre), localizado sobre la vía de ferrocarril a 5 kilómetros al este de la carretera Transísmica. La Formación Mogofié se caracteriza por una alternancia de lutitas negras, areniscas finas arcillosas, calizas y calizas arcillosas negras; lo cual refleja condiciones litorales, ricas en materia orgánica con aportaciones de terrígenos arcillo-detriticos.

El contenido faunístico permite situar a la Formación Mogoñe en el Jurásico Tardío, quizá Oxfordiano para sus niveles inferiores, y tal vez de edad Kimmeridgiano-Portlangiano, como los afloramientos Jurásicos de las regiones NW de Chiapas.

En cuanto a las formaciones del Cretácico se tienen afloramientos simétricamente de un lado y otro del basamento Permo-Triásico Chiapas-Mixtequita, según una inclinación general hacia el Golfo, al Norte; hacia el Pacífico, al Sur.

Al Noreste del Batolito de Mixtequita, los afloramientos Cretácicos están localizados en las riveras del río Jaltepec, cercanas al Paso de Buque formando una serie de colinas escarpadas. Inicia con algunas decenas de metros de mármoles y pequeños bancos de calizas arcillosas del Neocomiano (Quezada, 1978). Son sobre montadas por calizas de color gris, bancos gruesos de rudistas, corales y radiolarios.

Las calizas y calizas dolomíticas con rudistas aparentemente pertenecen a la *Formación Sierra Madre* extremidad septentrional de Chiapas, se correlacionan en edad a las calizas con grado de marmolización pertenecientes a la Unidad Chivela en la extremidad meridional de la Sierra de Juárez, las cuales son de edad Albiano-Turoniano, mientras que calizas líticas marmolizadas de la Unidad Zapote pertenecen al Albiano-Cenomaniano.

La continuidad de Formación Sierra Madre esta enmascarada a la altura de la Depresión Istmica por los depósitos horizontales discordantes de areniscas y conglomerados del Plioceno medio (Carfanta 1986).

Las evaporitas, series arcillo-detríticas negras del Jurásico superior y los Mármoles del Neocomiano son escasos. Lo anterior se presenta como una regla general para la cobertura meridional del basamento de Chiapas-Mixtequita. Mientras que la serie transgresiva inicia directamente con calizas grises.

Finalmente, entre el basamento de Chiapas y el frente de la Sierra de Juárez, no existe ninguna formación que pueda ser asociada al Senoniano o Paleoceno. Sin embargo, los sedimentos discordantes más antiguos son los fragmentos mal cementados, de arenas y arcillas de color amarillo. Estos depósitos se observan particularmente en pequeñas planicies situadas a los alrededores de Matías Romero y Chivela. Estos son depósitos aluviales de ambiente fluvio-lacustre, alimentados por antiguos ríos de la Sierra de Juárez, o depositados en los lagos a niveles

de las Planicies. Se puede considerar sincronos los depósitos del mismo tipo, datados del Plioceno medio y superior, de Chiapas.

III.2.C.3. Tectónica de Ruptura.

Considerando que la parte septentrional de la Zona Centro se encuentra dentro del mismo marco neotectónico ya descrito en la zona Norte, nos concentraremos en describir la neotectónica de la parte meridional de esta zona.

Respecto las fallas inferidas por gradientes del basamento, las fallas cartografiadas por geología superficial (plano I y III, respectivamente) y las direcciones de los esfuerzos distensivos (estaciones CENT9307, CENT9308 y CENT9309; plano II), podemos inferir que la Depresión Istmica probablemente se formó por una tectónica distensiva de tipo *horst-graben* (plano I) con una serie de fallas normales escalonadas en el flanco oriente del Batolito Mixtequita (Plano III); dichas fallas concuerdan con los resultados de la interpretación de las líneas sísmicas (PEMEX, líneas 306, 308 y 310, informes inéditos; Plano III). Por lo tanto, podemos decir que probablemente la Depresión Istmica (Fig. 31) se encuentra dentro del marco neotectónico distensivo del Plio-Cuaternario, caracterizado por fallas con direcciones preferenciales NW-SE (Plano III).

III.2.C.4. Evolución Neotectónica

Analizando las direcciones de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 (resultados del cálculo del tensor medio de esfuerzos, plano II y Fig. 32) de la Zona Centro, se observó que para los afloramientos de rocas sedimentarias (Plio-Cuaternario), se definen dos campos de esfuerzos con σ_3 en dirección prácticamente E-W y de NW-SE a NE-SW (estaciones CENT9309 y CENT9310; CENT9303, CENT9307, CENT9308, CENT9312, respectivamente. Fig. 32, apéndice 2, plano II y plano III) y un probable patrón de fallamiento con direcciones preferenciales prácticamente NW-SE y E-W.

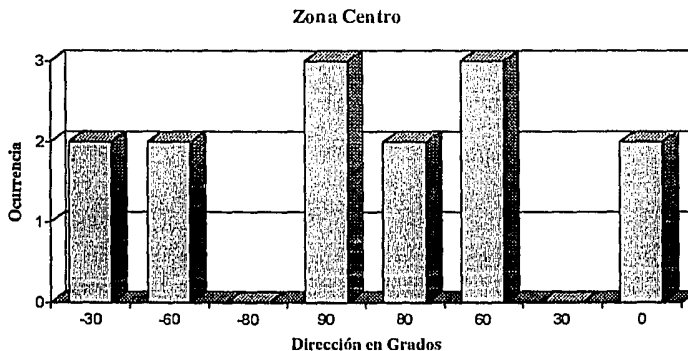


Figura 32. Direcciones preferenciales de σ_3 , para la zona Centro, 0 indica el rango de N-S (-10° a 10°). 30 el rango de NNE-SSW (11° a 30°). 60 el rango de NE-SW (31° a 60°). 80 el rango de ENE-WSW (61° a 80°). 90 el rango de N-S (-81° a -90° y 81° a 90°). -80 el rango de WNW-ESE (-61° a -80°). -60 el rango de NW-SE (-31° a -60°). -30 el rango de NNW-SSE (-11° a -30°). En esta figura, se observan dos direcciones preferenciales de σ_3 , E-W y NE-SW, explicación en el texto.

Los signos positivo (+) y negativo (-), indican que los grados se miden en el sentido horario y antihorario, respectivamente, a partir del Norte.

Por otra parte, los afloramientos más antiguos (Mesozoico (?)), presentan una orientación de σ_3 en dirección de NNW-SSE a NE-SW (Fig. 32, estaciones CENT9304, CENT9305 y CENT9313, ver apéndice 2 y plano II).

Es importante señalar que la orientación de σ_3 prácticamente N-S (estaciones CENT9304, CENT9303 y CENT9308) y fallas E-W, coincide con los resultados obtenidos de la interpretación de líneas sísmicas de PEMEX (informes inéditos), obtenidas dentro del área de estudio. Es decir, para los horizontes del Jurásico, Cretácico inferior y medio se identificaron fallas normales con caída hacia el Norte y con una orientación E-W (Informe Sismológico, P. AMATAL, PEMEX; inédito); existiendo la posibilidad de más fallas normales con caída hacia el NW.

En resumen, del análisis de las poblaciones de fallas y de la interpretación de líneas sísmicas, podemos decir que dentro de la zona Centro observamos dos etapas de deformación dominantes. Por un lado, la más antigua, regida por un campo de esfuerzos caracterizado por σ_3 en la dirección NNW-SSE a NE-SW el cual afecta a formaciones del Mesozoico (CENT9304, CENT9305 y CENT9313) asociadas a fallas prácticamente E-W. Por el otro, una reciente

asociada a un campo de esfuerzos con σ_3 en la dirección E-W (CENT9309 y CENT9310, apéndice 2) asociado a fallas que fluctúan N-S a NW-SE y NE-SW (formaciones del Plio-Cuaternario), similares a las fallas dominantes en la zona Norte .

III.2.D. ZONA SUR

III.2.D.1. Presentación general.

La Zona Sur (Fig. 12) se encuentra limitada al NE por la Sierra de Chiapas y al NW por la Sierra de Juárez, esta zona se encuentra dentro de la Planicie Costera de Chiapas.

En las zonas de las Sierras y sobre todo en las partes topográficas más altas se presenta un clima de húmedo a tropical (Sierra de Chiapas) caracterizada por un bosque de montaña, este clima cambia radicalmente dentro de la Planicie Costera, el cual presenta un clima semihúmedo a seco y bosque espinoso predominando dentro del área que comprende estado de Oaxaca.

Los rasgos hidrológicos no son tan abundantes como en las zonas Norte y Centro, sin embargo, los ríos que se pueden considerar importantes dentro de esta zona son el Río La Blanca, Los Perros y Tehuantepec, este último es el desagüe de la Presa Juárez al NE de Santo Domingo Tehuantepec.

III.2.D.2. Geología

La zona Sur se encuentra dentro de la subprovincia geológica Planicie Costera de Chiapas (ver Cap. II y apéndice 1), la cual se caracteriza por la escasez o nula presencia de depósitos sedimentarios del Terciario. Esta región comprende a su vez parte de la extremidad meridional de la Sierra de Juárez, ya descrita en la zona Centro.

Las formaciones del Jurásico(?) afloran cerca del Poblado de Zanatepec, caracterizadas por rocas graníticas intrusivas en Capas Rojas de edad Triásico-Jurásico, estas se observan también en el Valle de Cintalapa, en donde aparecen como masas aisladas sentadas sobre los granitos en forma de anticlinales. Considerando que a varios kilómetros al NE aparecen intercalaciones rojizas en la parte más baja de la serie Cretácica, permite suponer que estas capas pueden ser de edad Jurásico.

En la parte de la vertiente del Pacífico se observan afloramientos aislados de calizas de edad Cretácico medio, por ejemplo a 2 Km del poblado de Arriaga (Cerro de la Cal), las cuales pueden considerarse como calizas neríticas fosilíferas que forman un cerro, en cuya base aparecen rocas verdes arenosas y margosas algo metamorfizadas. Otro de estos afloramientos se observan cerca de la Estación "Los Patos" a 70 Km al ESE de Arriaga, cuyas calizas están bien estratificadas prácticamente en posición vertical, metamorfizadas y tectonizadas. Todos los afloramientos de este tipo, forman parte de un tren o una zona de calizas del Cretácico con dirección WNW-ESE que da vuelta al Norte cerca de Zanatepec para internarse en la Sierra Alta donde gira de nuevo al Oeste rumbo al Parteaguas del Istmo de Tehuantepec.

III.2.D.3. Tectónica de Ruptura.

La zona Sur se encuentra influenciada principalmente por el proceso de subducción oblicua de la Placa de Cocos y en especial la Dorsal de Tehuantepec debajo de la Placa de Norteamérica, la cual viene a complicar la tectónica de ruptura de esta zona, dentro de la cual los campos de esfuerzos extensivos que predominan presentan dos orientaciones preferenciales (N-S y E-W) ocasionando fallas normales E-W y N-S, respectivamente.

El rasgo más importante dentro de esta zona, es la Planicie Costera de Chiapas, la cual esta vinculada a un fallamiento escalonado E-W que se interna hacia el Golfo de Tehuantepec, cuya dirección de esfuerzos distensivos (σ_3) fluctúan de NNW-SSE a NNE-SSW (plano II).

Con base en la información de perfiles sísmicos (PEMEX) de la Planicie Costera y Golfo de Tehuantepec, se puede explicar la presencia de una cuenca de sedimentación de forma alargada cuyo eje mayor es paralelo a la línea de la costa del Golfo de Tehuantepec y cuyo limite al sur es la Trincheras de Centro-América. Esto último es consistente con lo descrito en el párrafo anterior.

III.2.D.4. Evolución Neotectónica

Analizando los resultados del cálculo del tensor medio de esfuerzos (dirección de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 , Fig. 33) para la zona Sur, y en particular las estaciones SUDE9303, SUDE9304, SUDE9305, SUDE9306, SUDE9307, SUDE9309, SUDE9310, SUD9304 y SUD9313 (apéndice 2 y plano II), cuyos afloramientos son principalmente de rocas volcánicas del Mioceno superior, se puede observar que se define un patrón de fallamiento conjugado normal que varía ligeramente de NNW-SSE, N-S a NNE-SSW en esta zona.

Lo anterior, explica la presencia de una zona de fallas de considerable dimensión, la cual parte de Salina Cruz Oax., y se interna en el Istmo de Tehuantepec con una dirección N-S. La presencia de esta zona de falla de alguna forma influye en el comportamiento estructural y estratigráfico de la Planicie Costera de Chiapas y en el propio Macizo de Chiapas, siendo probable que las fuertes intrusiones ígneas detectadas por métodos geofísicos, precisamente en el Puerto de Salina Cruz, ocasionaron esfuerzos que dieron origen a esta zona de fallas, lo cual concuerda con la descripción hecha por Acevedo y Morales (1978(?)). No obstante, dentro de esta misma zona se presentan fallamientos conjugados prácticamente E-W (estaciones SUDE9306 y SUD9307), indicándonos posiblemente que este patrón antecede al campo de esfuerzos N-S. Lo anterior se pudo establecer en base a las observaciones de campo en las estaciones SUD9301 y SUD9309 (Paleozoico (?)) y Mioceno superior, respectivamente), las cuales presentan un fallamiento E-W.

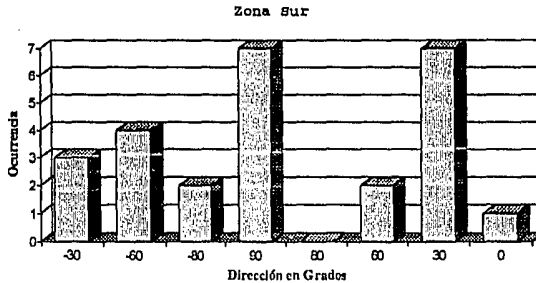


Figura 33. Direcciones preferenciales de σ_3 , para la zona Sur. 0 indica el rango de N-S (-10° a 10°). 30 el rango de NNE-SSW (11° a 30°). 60 el rango de NE-SW (31° a 60°). 80 el rango de ENE-WSW (61° a 80°). 90 el rango de N-S (-81° a -90° y 81 a 90). -80 el rango de WNW-ESE (-61° a -80°). -60 el rango de NW-SE (-31° a -60°). -30 el rango de NNW-SSE (-11° a -30°). En esta figura, se observan dos direcciones preferenciales de σ_3 , E-W y NNE-SSW, explicación en el texto.

Los signos positivo (+) y negativo (-), indican que los grados se miden en el sentido horario y antihorario, respectivamente, a partir del Norte.

En resumen, del análisis de las poblaciones de fallas con estrías de la Zona Sur, permite establecer dos patrones de fallamiento normal. Por una parte, fallas normales con orientaciones que fluctúan de E-W, ENE-WSW, vinculadas a un campo de esfuerzos orientado extensivo de N-S a NNE-SSW (Fig. 33); afectando principalmente a los afloramientos de rocas volcánicas intrusivas del Mioceno tardío. Esta distensión probablemente originó la Planicie Costera Pacífica del Golfo de Tehuantepec. Por otra parte, fallas normales con orientaciones prácticamente N-S, vinculadas a un campo de esfuerzos extensivo con una dirección E-W (Fig. 33).

Es importante señalar que dentro de la zona Sur se observaron posibles episodios tectónicos recientes, que afectan a las poblaciones de Guevea de Humbolt, localizada al oeste de la Depresión Istmica (NW de Juchitán de Zaragoza, Oax.), al Poblado de Andrés Quintana Roo, Chis., localizada al NW de la Depresión Central de Chiapas (SE de Cintalapa, Chis.), y el Puente Arriaga (a 10 kilómetros al W del Poblado Arriaga, Chis). Las hipótesis sobre el origen de estas deformaciones se expondrá a continuación.

Para la población de Guevea de Humbolt, las deformaciones se desarrollaron regularmente a partir de 1981. Los testimonios de los habitantes indican que la primera deformación estuvo acompañada por un sismo, posterior a un periodo de lluvias en ese mismo año. Debido a la ubicación del poblado (parte alta de una ladera, erosionada por el arroyo Nizavea), la interpretación se complica. Sin embargo, se observaron desplazamientos laterales sinistral, lo cual permite proponer dos posibles soluciones: por una parte, la existencia de una falla lateral sinistral activa, con deslizamientos como efectos secundarios; y por otro lado, un derrumbe de la ladera oriental de la barranca Nizavea, sobre la cual se asienta la población. Esta última posible solución coincide con la interpretación propuesta por Ortega (1993, comunicación escrita), la cual la describe como un derrumbe debido a la rápida erosión causada por el arroyo Nizavea, descartando la posibilidad de fracturamientos tectónicos regionales o volcánicos.

Por su parte en la población de Andrés Quintana Roo, no se logró establecer con precisión a partir de cuando se iniciaron las deformaciones que afectan algunas casas. Testimonios de los habitantes indican que la primera deformación estuvo acompañada por una serie de "pequeños" sismos. Al realizar un reconocimiento por las casas afectadas se logró observar desplazamientos laterales sinistral sobre muros y pisos. Una de la hipótesis que podemos plantear, es que los desplazamientos estén asociados probablemente a una falla lateral sinistral activa, No obstante, un estudio más a fondo es necesario para reforzar dicha hipótesis.

Finalmente, el puente Arriaga de la carretera Transísmica (10 Km al W de Arriaga, Chis), se ve afectado por un defasamiento sinistral de las partes que conforman dicho puente. Al realizar un reconocimiento en las áreas aledañas se logro observar posibles movimientos laterales sinestrales en algunas rocas volcánicas, sin embargo no se recabo la información suficiente para vincular estos movimientos con los observados en el puente.

III.3. SÍNTESIS DE LA EVOLUCIÓN NEOTECTÓNICA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC

A continuación se presenta una breve síntesis de las deformaciones activas englobadas dentro de la evolución tectónica de la región del Istmo de Tehuantepec.

En cuanto a las deformaciones activas, se observó que estas afectan algunas de las formaciones recientes, las cuales se manifiestan en las zonas Norte, Centro y Sur del Istmo de Tehuantepec. La mayoría de las fallas estudiadas en las zonas mencionadas son normales (también se observaron algunas fallas inversas o de transcurrencia en las zonas de estudio como por ejemplo las correspondientes a las estaciones NORD9311, NORD9315 Y CENT9306, Apéndice 2).

En la zona Norte del Istmo, el patrón de fallamiento preponderante corresponde a fallas normales preexistentes con orientaciones N-S y un campo de esfuerzos extensional con una orientación de σ_3 que fluctua de NW-SE a NE-SW, las cuales afectan a los depósitos de terrazas aluviales del Plio-Cuaternario, depósitos de ambiente marino somero del Mioceno (?), así como a formaciones volcánicas del Néogeno-Cuaternario. La existencia de fallas normales concuerdan con los resultados obtenidos por PEMEX (con longitudes de 20, 33, 33, 29 y 16 Km, fallas de 1 a 5, respectivamente; plano III).

En cuanto a la existencia de un campo de esfuerzos extensional en la zona Norte, Suter (1991) llegó a la misma conclusión, aunque en su caso apoyado en observaciones de las elongaciones de las secciones transversales de pozos con profundidades de hasta 6 Km, y alineamientos de estructuras volcánicas, Fig. 29.

Por otro lado Suárez (1994), propone que el campo de esfuerzos dominante en la zona Norte es principalmente compresivo. Esto se sustenta en la solución del mecanismo focal del sismo de Jaltipan de 1959, de magnitud 6.5 y profundidad de 21 Km (Fig. 30). Dicho mecanismo corresponde a un fallamiento inverso vinculado a esfuerzos compresivos, posiblemente ligado a la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa de Norteamérica. No obstante, Guzmán-Speziale (1989) y Ponce *et al* (1992) propusieron soluciones de mecanismos focales (para sismos con profundidades ≤ 50 Km y > 50 Km) que concuerdan con el campo de esfuerzos extensional encontrado en el presente estudio, dichas soluciones se localizan dentro de las zonas Norte y Centro (plano III).

En la zona Centro existen dos campos de esfuerzos dominantes: por un lado, un campo de esfuerzos con σ_3 en la dirección NNW-SSE a NE-SW (Fig. 33) el cual afecta a formaciones más antiguas (CENT9304, CENT9305 y CENT9313, Mesozoico) asociadas a fallas E-W; por otro lado, un campo de esfuerzos con σ_3 en la dirección E-W asociado fallas que fluctúan N-S a NW-SE y NE-SW (formaciones del Plio-Cuaternario), similares a las fallas dominantes en la zona Norte. Estos resultados están sustentados del análisis de las poblaciones de fallas estudiadas en este trabajo y de la interpretación de líneas sísmicas (PEMEX, informes inéditos; Figs. 25 y 26).

En la zona Sur, al igual que la zona Centro se presentan dos campos de esfuerzos (σ_3) dominantes asociados al los siguientes patrones de fallamiento normal: por un lado tenemos un patrón de fallas normales con orientaciones que fluctúan de E-W, ENE-WSW, vinculadas a un campo de esfuerzos extensivo con una dirección de σ_3 de N-S a NNE-SSW; afectando principalmente a los afloramientos de rocas volcánicas intrusivas del Mioceno tardío. Esta distensión probablemente originó la Planicie Costera Pacífica del Golfo de Tehuantepec. Por otra parte, fallas normales con orientaciones prácticamente N-S, estan vinculadas a un campo de esfuerzos extensivo con una dirección E-W.

Las observaciones de campo indican que el campo de esfuerzos extensivo que afecta principalmente a los afloramientos de rocas volcánicas del Mioceno tardío, debió de ser posterior al último episodio orogénico del Mioceno superior. Afectando de la misma manera, en la Planicie Costera las formaciones Plio-Cuaternarias continentales, así como a las marinas en el Centro del Istmo. Este evento distensivo, posiblemente del orden neotectónico, es el último evento tectónico asociado a las deformaciones importantes dentro de las zonas Centro y Sur principalmente.

Finalmente, los escasos índices de compresión, vinculados a poblaciones de fallas inversas y a fallas transcurrentes fueron observaron en la región del Istmo (NORD9311, NORD9315 Y

CENT9306, apéndice 2). Estas últimas no nos permitieron establecer si los desplazamientos laterales están en relación con un episodio compresivo, o con las permutaciones entre los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_2 dentro del contexto distensivo.

IV. APLICACIÓN DE MODELOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS.

Un importante problema en la estimación del potencial sísmico así como en otras áreas afines, es la estimación del movimiento del terreno ante futuros terremotos. Con el fin de estudiar la generación y propagación de las ondas sísmicas, diversos investigadores han propuesto modelos teóricos que permiten simular el movimiento del terreno correspondiente a sismos específicos (Aki, 1967, Brune, 1970, Boore, 1983, Irikura, 1983).

En la región del Istmo de Tehuantepec prácticamente no se cuenta con registros de temblores con magnitudes de interés ingenieril, por lo que en este trabajo para estimar el potencial sísmico en sitios de la región se generaran sismogramas sintéticos que sean representativos de los sismogramas que se esperan en el futuro, es decir registros que nos proporcionen las aceleraciones máximas esperadas en dichos sitios, sismos de la región.

Tomando en cuenta lo anterior, el objetivo de este capítulo es la evaluación de un modelo matemático para la generación de sismogramas sintéticos en sitios localizados en el Istmo de Tehuantepec. El modelo que se utilizará es el de las Funciones de Green Empíricas en el cual se hace uso de registros de temblores pequeños como funciones de Green empíricas.

IV.1 MÉTODO DE LAS FUNCIONES DE GREEN EMPÍRICAS EN LA VERSIÓN DE IRIKURA.

El método de simulación denominado de las funciones de Green empíricas, permite simular movimientos fuertes del terreno, asociados a temblores de gran magnitud en un sitio específico, a partir de registros de temblores pequeños observados en el mismo sitio. La información fundamental que se emplea en este método es el registro de un sismo de pequeña magnitud observado en un sitio, así como información sobre las dimensiones de la fuente, mecanismo y la localización del sismo pequeño y de gran magnitud.

En este trabajo se emplea el método propuesto por Irikura (1983,1992). Este método acepta la ley de similitud de eventos sísmicos (Aki, 1967), así como la ley de escalamiento espectral ω^{-2} propuesto por Aki (1967) y Brune (1970). Además se acepta que el comportamiento del medio es elástico lineal, y depende en gran medida del registro utilizado como función de Green empírica. A continuación se presenta una breve síntesis del método recién descrito (Irikura, 1983, 1992; Padilla, 1992).

Si se tiene un medio seminfinito homogéneo y elástico en el cual se presenta una dislocación $\Delta u(\xi, \eta, t)$ sobre el plano de falla Σ (Fig. 34), el desplazamiento en el campo lejano en un punto en la superficie del medio $u(x, t)$ se puede expresar como (Aki-Richards, 1980):

$$\begin{aligned}
 u(x, t) = & \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} A^c \frac{1}{r^4} \int_{r/\alpha}^{r/\beta} \tau M_o(t-\tau) d\tau + \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} A^{IP} \frac{1}{r^2} M_o(t-\frac{r}{\alpha}) \\
 & + \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} A^{IS} \frac{1}{r^2} M_o(t-\frac{r}{\beta}) + \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} A^{LP} \frac{1}{r} \dot{M}_o(t-\frac{r}{\alpha}) \\
 & + \frac{1}{4\pi\rho\beta^3} A^{LS} \frac{1}{r} \dot{M}_o(t-\frac{r}{\beta})
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

donde $A^c, A^{IP}, A^{IS}, A^{LP}$ y A^{LS} son patrones de radiación que se definen como:

$$\begin{aligned}
 A^c &= 9 \operatorname{sen} 2\theta \cos \phi \hat{r} - 6(\cos 2\theta \cos \phi \hat{\theta} - \cos \theta \operatorname{sen} \phi \hat{\phi}) && \text{(campo cercano)} \\
 A^{IP} &= 4 \operatorname{sen} 2\theta \cos \phi \hat{r} - 2(\cos 2\theta \cos \phi \hat{\theta} - \cos \theta \operatorname{sen} \phi \hat{\phi}) && \text{(campo intermedio P)} \\
 A^{IS} &= -3 \operatorname{sen} 2\theta \cos \phi \hat{r} + 3(\cos 2\theta \cos \phi \hat{\theta} - \cos \theta \operatorname{sen} \phi \hat{\phi}) && \text{(campo intermedio S)} \\
 A^{LP} &= \operatorname{sen} 2\theta \cos \phi \hat{r} && \text{(campo lejano P)} \\
 A^{LS} &= \cos 2\theta \cos \phi \hat{\theta} - \cos \theta \operatorname{sen} \phi \hat{\phi} && \text{(campo lejano S)} \tag{4.2} \\
 r &\Rightarrow \text{distancia entre el plano de falla } \Sigma \text{ y el punto Q.}
 \end{aligned}$$

Considerando un modelo de ruptura del tipo Haskell (1964) con una velocidad de propagación de ruptura v_r constante, podemos expresar la ecuación (4.1) como una integral en términos de dislocaciones diferenciales sobre el área de falla:

$$u_c(x, t) = \left[\frac{R_c(\theta, \phi)}{4\pi\rho v_r^3 r} \right] \cdot \mu \int_0^{L_c} \int_0^{W_c} \Delta u(\xi, \eta, t-t_c) d\xi d\eta \tag{4.3}$$

donde la función temporal de fuente se expresa como:

$$S(x, t) = \mu \int_0^L \int_0^W \Delta \dot{u}(\xi, \eta, t - t_c) d\xi d\eta \quad (4.4)$$

y t_c se define mediante la siguiente relación:

$$t_c = \frac{r}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{v_r}$$

$\mu \Rightarrow$ módulo de rigidez al cortante.

$v_c \Rightarrow$ velocidad de propagación de las ondas (el subíndice indica el tipo de onda que se propaga).

$r \Rightarrow$ distancia entre el plano de falla Σ y el punto Q.

$R_c \Rightarrow$ coeficiente de radiación.

$v_r \Rightarrow$ velocidad de ruptura.

$\Delta \dot{u} \Rightarrow$ dislocación en el área de falla.

$\alpha \Rightarrow$ velocidad de la onda P.

$\beta \Rightarrow$ velocidad de la onda S.

$L \Rightarrow$ longitud del área de falla del evento principal.

$W \Rightarrow$ ancho del área de falla del evento principal.

el subíndice c indica el tipo de onda que se propaga (P o S).

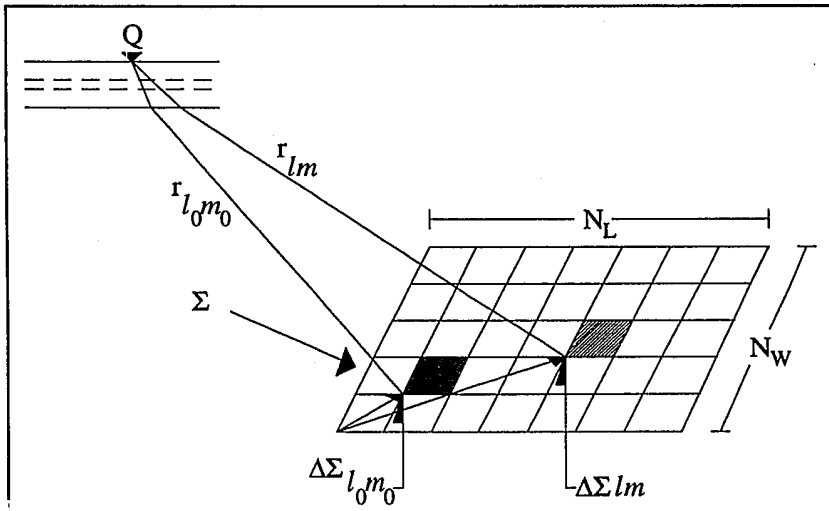


Figura 34. Relación geométrica entre los elementos que componen la falla en el punto Q.

Si se divide plano de falla del gran evento en $N_L \times N_W$ segmentos de iguales dimensiones que corresponden a las dimensiones de cada evento pequeño como se muestra en la (Fig. 34). La ecuación anterior se puede expresar como:

$$S(x,t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_W} \mu \int_{\xi_l}^{\xi_l+L_e} \int_{\eta_m}^{\eta_m+W_e} \Delta u(\xi_l, \eta_m, t - t_{clm}) d\xi d\eta \quad (4.5)$$

L_e y W_e representan el largo y ancho de la fuente elemental (Fig. 4.2).

La función de dislocación $\Delta u(\xi, \eta, t)$ (Fig. 35) se define como:

$$\Delta u(\xi, \eta, t) = \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots t < 0 \\ \frac{Dt}{\tau} & \dots \dots \dots 0 < t < \tau \\ D & \dots \dots \dots t > \tau \end{cases}$$

donde

$D \Rightarrow$ desplazamiento en el plano de falla del evento principal.

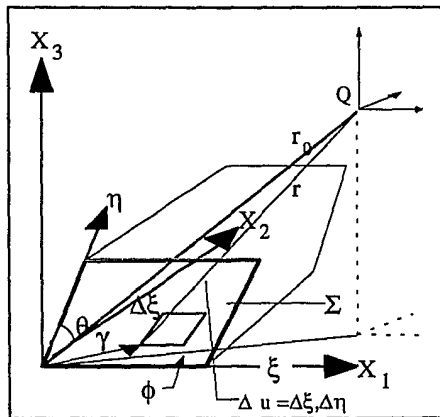


Figura 35. Sistema coordinado referido a la falla.

En un punto sobre el plano de falla Σ , se considera el mismo tipo de función de dislocación para cada evento pequeño.

Los valores para N_L , N_W y N_D se encuentran a partir de la raíz cúbica del cociente de momentos sísmicos entre los dos eventos, es decir:

$$\sqrt[3]{\frac{M_o}{M_{oe}}}$$

Mediante las condiciones de similitud la velocidad de deslizamiento puede considerarse como una constante definida como:

$$v_o = \frac{D}{\tau} = \frac{D_e}{\tau_e}$$

$$\frac{D}{D_e} = \frac{\tau}{\tau_e} = \text{constante} = N_D$$

donde D , τ y D_e , τ_e representan el deslizamiento y tiempo de ascenso del evento objetivo y la función de Green, respectivamente. Cuando la relación anterior se aproxima a N_D entero, $\Delta u(\xi, \eta, t)$ puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta u(\xi, \eta, t) = \sum_{k=1}^{N_D} \Delta u_e[\xi, \eta, t - (k-1)\tau_e] \quad (4.6)$$

y

$$\Delta \dot{u}(\xi, \eta, t) = \sum_{k=1}^{N_D} \Delta \dot{u}_e[\xi, \eta, t - (k-1)\tau_e] \quad (4.7)$$

Sustituyendo la expresión anterior en la ecuación (4.5), se obtiene:

$$S(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{N_D} \mu \int_{\xi_1}^{\xi_1+L_e} \int_{\eta_m}^{\eta_m+W_e} \Delta \dot{u}(\xi, \eta, t - (k-1)\tau_e) d\xi d\eta \quad (4.8)$$

si el punto de inicio del gran evento se localiza en (0,0) (Fig. 36) la ecuación anterior se reduce a la siguiente expresión:

$$S(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{N_D} S_{elm}(x, t - t_{dklm}) \quad (4.9)$$

donde, $S_{elm}(x, t) \Rightarrow$ función temporal del evento pequeño

$$t_{dklm} = \frac{r_{lm}}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi_1^2 + \eta_m^2}}{v_r} + (k-1)\tau_{elm}$$

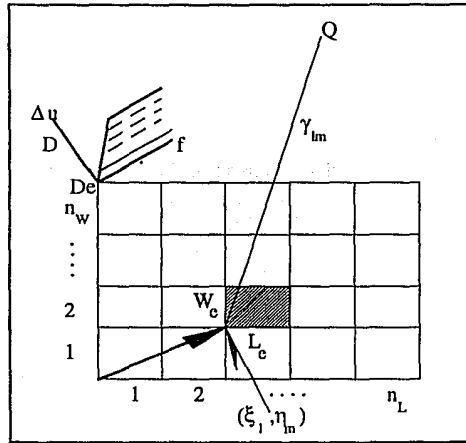


Figura 36. Contribución de un elemento al registro del gran evento en el punto Q.

De acuerdo con la ecuación (4.3) el desplazamiento U_e en un campo lejano originado por una subfalla $\Delta\Sigma$ en un medio infinito homogéneo y elástico es:

$$u_e(x, t) = \left[\frac{R_c(\theta, \phi)}{4\pi\rho v_c^3 r} \right] \cdot \mu \int_0^{L_e} \int_0^{W_c} \Delta \dot{u}(\xi, \eta, t - t_e) d\xi d\eta \quad (4.10)$$

Los movimientos $G_e(x, t)$ en la superficie se obtienen mediante la convolución de $U_e(x, t)$ con $T(x, t)$, donde $T(x, t)$ es una función de transmisión que considera los efectos de trayectoria y de sitio, es decir:

$$G_e(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} T(x, t - t') U_e(x, t') dt \quad (4.11)$$

Los movimientos del terreno G_{elm} producto de la dislocación ΔU_{elm} de un evento pequeño ocurrido en el elemento $\Delta\Sigma_{lm}$ localizado en (ξ_l, η_m) (Fig. 35) se representan como:

$$G_{elm}(x, t) = T_{lm}(x, t) * c_{lm} \mu \int_{\xi_l}^{\xi_l + L_e} \int_{\eta_m}^{\eta_m + W_e} \Delta \dot{u}_{elm}(\xi, \eta, t - t_{clm}) d\xi d\eta \quad (4.12)$$

donde

$$t_c = \frac{r_{lm}}{v_c} + \frac{\sqrt{(\xi - \xi_l)^2 + (\eta - \eta_m)^2}}{v_r}$$

$$c_{lm} = \left[\frac{1}{4\pi\rho v_c^3} \right] \left[\frac{R_{clm}(\theta_{lm}, \phi_{lm})}{r_{lm}} \right]$$

La contribución a los movimientos del evento principal, G_{lm} producto de la dislocación ΔU_{lm} ocurrida en el elemento ΔU_{lm} (Fig. 34), durante el movimiento fuerte se expresan como sigue:

$$G_{lm}(x, t) = \sum_{k=1}^{N_e} G_{elm}(x, t - (k-1)\tau_{elm}) \quad (4.13)$$

Entonces, los movimientos en la superficie producto de las funciones de Green $G(x, t)$ del evento principal están dados por la suma con tiempos retrasados de las funciones de Green G_{lm} sobre el plano de falla, esto es:

$$G(x, t) = \sum_{l=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} G_{lm}(x, t - (k-1)t_{clm}) = \sum_{l=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_z} G_{elm}(x, t - t_{dklm}) \quad (4.14)$$

donde

$$t_{dklm} = \frac{r_{lm}}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi_l^2 + \eta_m^2}}{v_r} + (k-1)\tau_{elm}$$

Debido a que no es posible obtener todos los registros en un sitio dado para cada evento correspondiente a cada elemento para el cálculo de movimientos del terreno $G(x, t)$ para el evento principal, resulta necesario hacer una simplificación para considerar el caso para el que solo se tengan sismogramas de algunos eventos pequeños que ocurren dentro del área de falla del evento principal.

El caso más sencillo que se puede tratar con este método es el de generar el sismograma del evento principal a partir de un solo evento pequeño correspondiente a una subfalla $\Delta\Sigma_{l_0m_0}$ (Fig. 34). Si el efecto de propagación T_{lm} es aproximadamente igual al efecto de propagación del movimiento observado $T_{l_0m_0}$, entonces los movimientos del terreno G_{elm} que se producen por un

elemento arbitrario, pueden estimarse a partir de los movimientos G_{el,m_0} mediante la siguiente expresión:

$$G(x, t) = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{N_k} \left[\frac{R_c(\theta_{lm}, \varphi_{lm})}{R_c(\theta_{l_0}, \varphi_{l_0, m_0})} \right] \left[\frac{r_{l_0, m_0}}{r_{lm}} \right] G_{el, m_0}(x, t - t_{elm} - t_{dklm}) \quad (4.15)$$

donde

$$t_{dklm} = \frac{(r_{lm} - r_{l_0, m_0})}{v_c}$$

cuando el punto de inicio de la falla se localiza en un punto arbitrario (ξ_0, η_0) , es necesario tomar la expresión de t_{dklm} como sigue:

$$t_{dklm} = \frac{r_{lm}}{v_c} + \sqrt{\frac{(\xi_l - \xi_0)^2 + (\eta_l - \eta_0)^2}{v_r}} + (k-1)\tau_{elm}$$

Es conveniente hacer notar que esta formulación es válida cuando la longitud de onda observada es mucho mayor que las dimensiones espaciales de la fuente, es decir:

$$L_e^2 \ll \frac{\lambda r}{2}$$

donde

- $L_e \Rightarrow$ es la longitud de la fuente elemental.
- $\lambda \Rightarrow$ longitud de onda.
- $r \Rightarrow$ distancia entre el receptor y la fuente.

Así, si se utilizan registros de eventos pequeños con dimensiones de falla pequeñas, el método es válido por arriba de las longitudes de onda más cortas y para distancias mayores a la distancia más corta a la falla.

Es necesario hacer notar que debido al tipo de discretización del área de falla, existe un problema de periodicidad en la ecuación (4.15). Esto es producto del intervalo de tiempo uniforme utilizado para el defasamiento de las señales sumadas. Irikura y Aki (1988) proponen trasladar tal periodicidad a un rango de frecuencias más altas, fuera del rango de interés ingenieril. Para ello, se subdivide los intervalos de tiempo en otros más pequeños, cada uno de ellos de duración λ/n . Existe otra forma de eliminar esta periodicidad, también conocida como frecuencias espurias, la cual consiste en añadir una variable aleatoria en el cálculo del tiempo de defasamiento t_{dklm}

Una vez seleccionada la función de Green empírica, los parámetros requeridos por el método son: mecanismo (rumbo, echado, y deslizamiento), distancia epicentral, azimut y profundidad, tanto de la función de Green, como del evento a ser simulado; el largo y el ancho del evento pequeño (Fig. 34), el número de elementos en que se va a discretizar el área de ruptura del evento de mayor magnitud, el punto de inicio de la ruptura, las velocidades de propagación de las ondas S y de ruptura de la falla, así como el tiempo de ascenso (*rise time*) de la ruptura.

IV.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE FUNCIONES DE GREEN EMPÍRICAS EN LA VERSIÓN DE IRIKURA, PARA SISMOS LOCALIZADOS EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

El método de funciones de Green empíricas en la versión de Irikura ha sido aplicada con éxito, en la obtención de sintéticos de sismos ocurridos en Japón (Irikura, 1983, 1989, 1992) y en México (Aguirre, 1990, Padilla 1992).

Tomando en cuenta lo anterior, se decidió analizar la bondad del mismo al aplicarlo a sismos registrados durante la campaña de 1986 en el Istmo de Tehuantepec (Ponce, *et al*, 1992). La prueba consistió en obtener el sintético de un evento observado en la estación CIN (CIN81) Fig. 37. La función de Green necesaria para aplicar el método fue el sismograma CIN48 (componentes norte-sur) Fig. 37.

Los parámetros del evento a simular y su correspondiente función de Green se muestran en la tabla I. Dichos parámetros se calcularon mediante las expresiones siguientes que fueron propuestas en Padilla (1992). Para el cálculo de r se emplearon las expresiones 4.16 y 4.17 para eventos de subducción superficiales y profundidad intermedia, respectivamente; este valor estimado de r se utilizó para la obtención del valor de τ mediante la expresión 4.18. La estimación del valor de M_0 correspondiente se calculó con las expresiones 4.19, 4.20 y 4.21. Los mecanismos utilizados se tomaron del trabajo de Guzmán (1989) y Chávez *et al* (1993).

$$r = 19.78M_L + 109.1 \quad 50 \leq H \quad (4.16)$$

$$r = 17.27M_L - 118.4 \quad 50 > H \quad (4.17)$$

$$\tau = \frac{16r}{7\pi\beta} \quad (4.18)$$

$$\log M_o = 1.02M_L + 17.85 \quad M_L < 4 \quad (4.19)$$

$$\log M_o = 1.18M_L + 17.96 \quad 4 \leq M_L \leq 6 \quad (4.20)$$

$$\log M_o = 1.30M_L + 17.57 \quad M_L > 6 \quad (4.21)$$

Los resultados de la prueba se presentan en la figura 37, donde se muestran tres series de tiempo (la función de Green empírica, el evento observado, y el sintético), y el espectro de amplitudes de Fourier de los dos últimos. En las figuras mencionadas se puede observar que las amplitudes de las series de tiempo de los sintéticos comparan aceptablemente con las observaciones, tanto en las fases S, como en las fases de coda. En particular, las amplitudes máximas de ambas series de tiempo son muy similares. En cuanto a los espectros de amplitudes de Fourier del sintético (Fig. 37), se observa lo siguiente: en el caso del evento CIN812 las amplitudes del sintético son comparables a las del observado para la banda de frecuencias de 3 a 50 Hz. En la banda de 0.2 a 3 Hz se presentan algunas diferencias que posiblemente se asocien al sistema de registro utilizado, así como a la pequeña diferencia en las magnitudes del evento observado $M_s=3.30$ y del correspondiente a la función Green $M_s=3.20$. Sin embargo se considera que para fines del capítulo V (la estimación del potencial sísmico), el resultado se considera aceptable. Algunas disminuciones en los valores de las amplitudes de los espectros de Fourier del sintético de CIN812 en 4 y 8 Hz (Fig. 37) se deben a un efecto de periodicidad ligado a las dimensiones de las fuentes elementales, al ángulo formado por la línea que une la estación y la fuente elemental (Fig. 38) y la velocidad de ruptura de la fuente que se considera uniforme en este modelo (Irikura comunicación personal, Aguirre, 1990).

Con base en esta discusión se decidió utilizar el método de las funciones de Green empíricas en la versión de Irikura para el cálculo de los sismogramas sintéticos requeridos en el capítulo V para fines de riesgo sísmico.

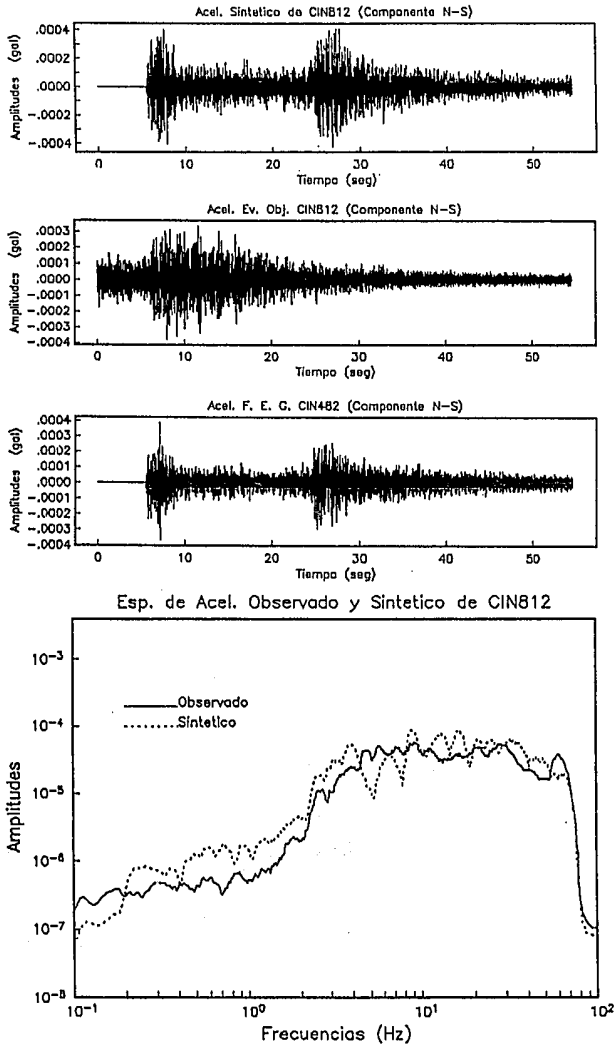


Figura 37. Función de Green empírica, registro observado y sintético obtenido con el método de Funciones de Green Empíricas (Irikura 1983, 1992). Espectros del evento observado (línea continua) y sintético (línea discontinua).

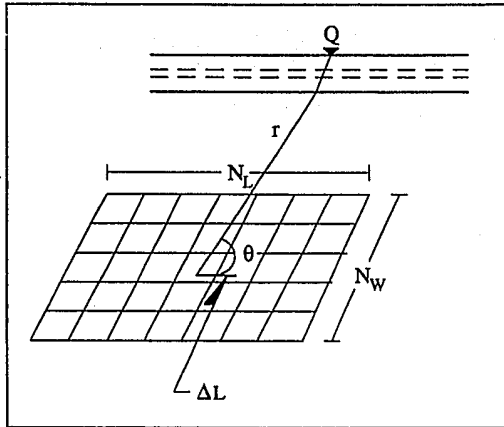


Figura 38. Parámetros ligados al efecto de periodicidad

Evento Objetivo	Función de Green	DT	STR DIP RAK	STRA DIPA RAKA	RM PM Z	RA PA ZA	DX DW	NX NW	NSX NSW	TRA NT NTT
CIN812	CIN482	0.0066	297 24 73	287 19 98	159 144 24	82 36 24	0.344 0.344	2 2	2 1	0.041 2 2

Tabla I Parámetros empleados en la obtención de sismogramas sintéticos con el método de las Funciones de Green Empíricas.

Simbología empleada en el método de las Funciones Empíricas de Green (Irikura, 1983, 1992).

- STR, DIP, RAK ⇒ Rumbo, echado y ángulo de deslizamiento del evento objetivo.
- STRA, DIPA, RAKA ⇒ Rumbo, echado y ángulo de deslizamiento del subevento.
- RM, PM, Z ⇒ Distancia epicentral, azimut y profundidad del evento objetivo.
- RMA, PMA, ZA ⇒ Distancia epicentral, azimut y profundidad del subevento.
- M_{fg} ⇒ Magnitud del subevento (Función Empírica de Green).
- M_{∞} ⇒ Magnitud del evento objetivo.
- DX, DW ⇒ Largo y ancho del subevento.

APLICACIÓN DE MODELOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS

NX, NW	⇒ Número de elementos a lo largo y ancho de la falla.
NSX, NSW	⇒ Coordenadas x y y del evento donde se inicia la ruptura.
V_s	⇒ Velocidad de las ondas S (3.09 Km/s^2).
V_r	⇒ Velocidad de Ruptura (2.33 Km/s^2).
IRD	⇒ Modo de propagación, (1) unilateral, (2) radial.
IPFM	⇒ Corrección del patrón de propagación, (1) no, (2) si, (3) considerando el signo.
CMP	⇒ Componente azimutal medida a partir del norte en sentido antihorario.
TRA	⇒ <i>rise time</i> del subevento.
NT	⇒ Sumatoria en el tiempo (número de celdas elementales).
NTT	⇒ Número de redivisiones en el tiempo para suavizamiento.
IMDL	⇒ Tipo de suavizamiento.

V. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

V.1 MODELO DE RIESGO SÍSMICO APLICADO.

Para estimar el riesgo sísmico de un sitio o una región se requiere contar con una descripción de la geología (en particular de las fallas neotectónicas), la tectónica y la sismicidad regional, así como de las características de propagación de la señal sísmica en el trayecto fuente-receptor. Dicha información se utiliza como entrada para modelos de riesgo sísmico, con los cuales se representa el proceso de ocurrencia, y de propagación de los sismos. Los resultados de estos modelos se expresan por medio de parámetros característicos del movimiento del suelo en el sitio de estudio (Chávez *et al*, 1987).

El modelo sísmico utilizado en este trabajo se describe a continuación (Chávez, 1987):

El potencial de actividad sísmica de una región, o en un sitio específico, puede estimarse en términos del número de temblores de magnitud igual o mayor que una magnitud M , generados en promedio por unidad de volumen y por año en las fuentes sísmicas pertenecientes a la región, dicho número se denomina λ . La expresión con que se puede evaluar ese potencial sísmico es la siguiente:

$$v_c(y) = \int_v \lambda \{M(y, D)\} d v \quad (5.1)$$

donde $v_c(y)$ es el número medio anual de temblores con intensidades (parámetro de movimiento del suelo) mayores que "y" registrados en el sitio de interés y generados por las fuentes sísmicas. $\lambda \{M(y, D)\}$ es la λ asociada a una magnitud M que produce una intensidad "y" a la distancia D del sitio. El subíndice c significa que las "y" son calculadas a partir de las M y las D provenientes de catálogos.

La forma explícita de $v_c(y)$ utilizada en el presente estudio es:

$$v_c(y) = ky^{-r} \left(1 - \left(\frac{y}{y_1} \right)^s \right) \dots v(y) < y_1 \quad (5.2)$$

$$= 0 \dots v(y) > y_1$$

donde k , r , s y y son parámetros que se pueden estimar a partir de información estadística de los temblores y de las características sismotectónicas de las fuentes sísmicas vecinas al sitio de interés; y es el valor máximo del "y" esperado para las diferentes fuentes sísmicas consideradas (Chávez, 1987).

Se supone que la ocurrencia de los temblores en la zona de interés constituye un proceso de Poisson (Benjamin y Cornell, 1970), es decir, que la distribución de los tiempos de ocurrencia de temblores en la región es independiente de la historia previa, e independiente también de la distribución espacial de las fuentes sísmicas.

V.2 ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN CINTALAPA, CHIAPAS.

En un estudio previo, Padilla (1992), se estimó el potencial sísmico en Cintalapa. Las fuentes sísmicas consideradas en ese trabajo se encuentran en el volumen generado por el rectángulo formado por las coordenadas 15-19° N, 93-96° W y una profundidad de 300 Km. Las fuentes sísmicas consideradas en dicho trabajo las constituyen los focos de los sismos ocurridos en el volumen mencionado de 1900 a 1986 (Chávez, 1987), en particular los de magnitud $M_s \geq 6$.

En el presente trabajo a los resultados obtenidos por Padilla (1992), se les adicionarán los que resulten de considerar la posible actividad de las cinco fallas neotectónicas que se muestran en el plano III. Es decir se pretende analizar el impacto de dichas fallas en el potencial sísmico estimado para Cintalapa. Las fallas seleccionadas corresponden a la expresión superficial de fallas normales detectadas en el basamento (Figs. 25, 26, 27 y plano III) en un estudio de PEMEX, que se mencionó en los cap. II y III. Las fallas de 1 a 5 se localizan en las estaciones 17, 06, 07, 09, y 10 de la figura 20, sus longitudes estimadas a partir del plano III fueron: 20, 33, 33, 29 y 16 Km, respectivamente; y el ancho se supuso de 10 Km, que es donde terminan los sedimentos, Fig. 27.

En lo que sigue se sintetizarán los aspectos más relevantes de los resultados del estudio previo, Padilla (1992), y luego se presentarán los aspectos relacionados con la cuantificación de una posible actividad de las fallas mencionadas.

De acuerdo con Padilla (1992), los eventos del catálogo se dividen en superficiales ($H \leq 50$ Km) y de profundidad intermedia ($H > 50$ Km). En las Figs. 39 y 40 se identifican con números arábigos los epicentros de profundidad intermedia y subducción, respectivamente. En dichas figuras se les denomina eventos de catálogo porque fueron obtenidos de un catálogo de eventos ocurridos en México durante un lapso de 87 años señalado arriba, también se incluye en estas figuras la localización del sitio de interés, es decir la estación CIN.

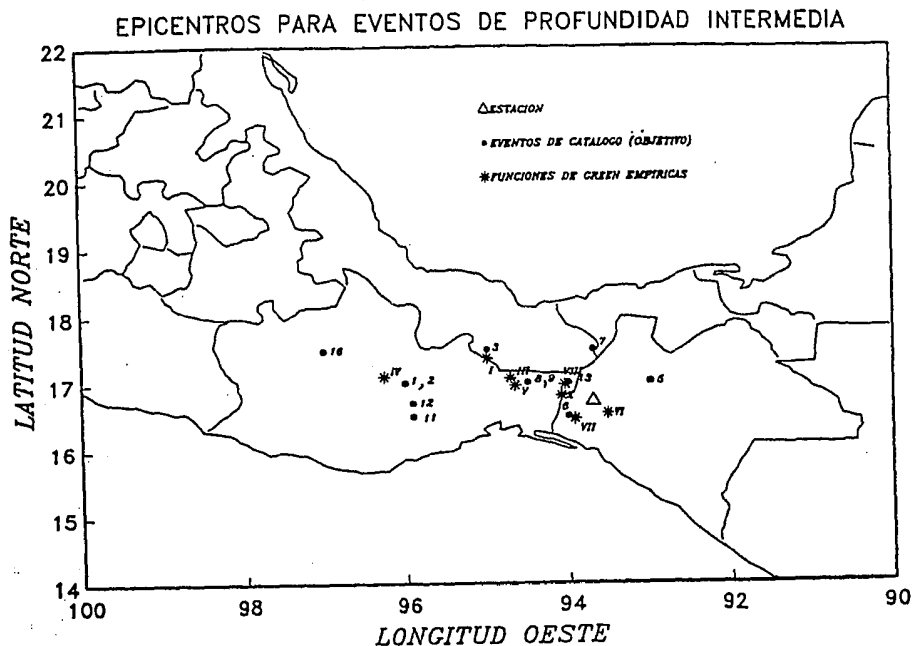


Figura 39. Localización de los epicentros para eventos de profundidad intermedia correspondientes a las Funciones de Green Empíricas y eventos de catálogo (objetivos). Padilla (1992).

En la tabla II se proporciona la fecha de ocurrencia, la localización, la magnitud de onda superficial, y el momento sísmico de cada uno de los eventos que se muestran en las Figs. 39 y 40. Los momentos sísmicos incluidos en la tabla II fueron calculados con las expresiones 5.3 y 4.20, según la profundidad del evento. De la tabla II se puede concluir que las M_s de los eventos considerados varían de 6 a 7.1, y según su profundidad se tienen 6 eventos superficiales (sismos 4,

10, 14, 15, 17 y 18) y 12 de profundidad intermedia (eventos 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13 y 16).

$$\log M_o = 0.89 M_s + 20.21 \quad H > 50 \text{ Km} \quad (5.3)$$

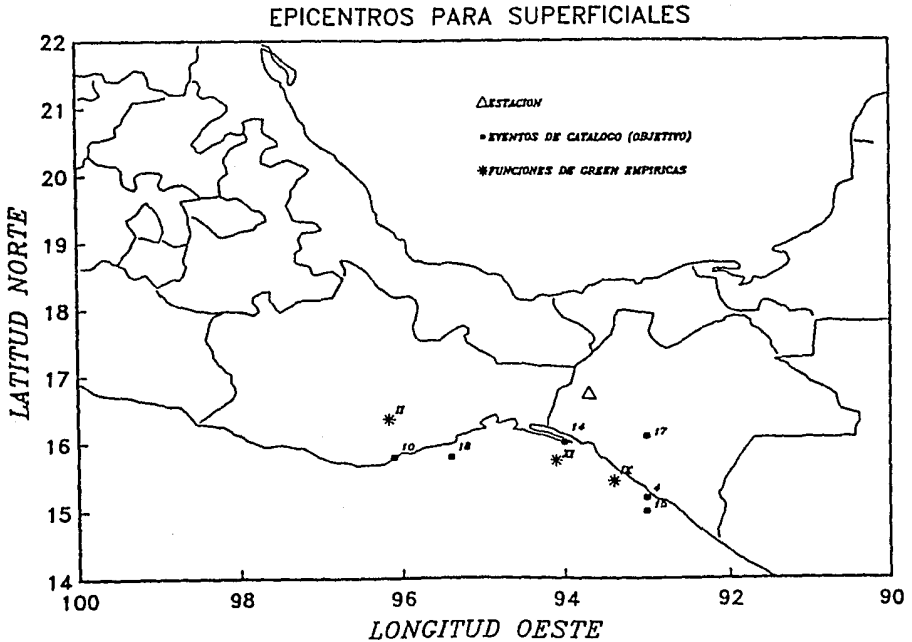


Figura 40. Localización de los epicentros para eventos superficiales correspondientes a las Funciones de Green Empíricas y eventos de catálogo (objetivos). Padilla (1992).

El parámetro de movimiento del suelo "y" (ecuación 5.1) de interés en esta aplicación es la aceleración máxima del terreno. Los valores de "y" correspondientes a cada uno de los eventos del catálogo (tabla II) serán obtenidos de la aplicación, con fines predictivos, del método de funciones de Green empíricas en la versión de Irikura (1983). Este método fue evaluado en el capítulo IV para la obtención de acelerogramas sintéticos en la región de interés. En ese capítulo se concluyó que dicho método proporciona resultados aceptables, para los fines de este trabajo.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

EVENTO	FECHA A A N M D D	HORA H H M N	LOCALIZACIÓN LAT N° LONG W°	PROF (km)	M _o	M _o (dinas-cm) ^{10²⁴}
1	100924	03:32	17 - 96	88	6.1	31.62
2	110827	10:59	17 - 96	100	6.7	190.54
3	160602	13:59	17.5 - 95	150	7.1	630.95
4	350424	18:51	15.2 - 93	50	6.2	42.65
5	370528	15:35	17 - 93	150	6.5	104.71
6	460607	04:13	16.5 - 94	100	7.1	630.95
7	460711	04:46	17.5 - 93.7	100	7.0	467.73
8	511212	01:37	17 - 94.5	100	7.0	467.73
9	511212	15:44	17 - 94.5	100	7.0	467.73
10	531016	09:53	15.8 - 96.1	11	6.0	35.48
11	540513	14:46	16.5 - 95.9	80	6.0	23.44
12	540513	15:12	16.7 - 95.9	80	6.0	23.44
13	561109	13:06	17 - 94	150	6.3	57.54
14	570622	06:19	16 - 94	18	6.5	98.85
15	590428	11:09	15 - 93	10	6.6	121.33
16	590524	19:17	17.5 - 97	100	6.8	257.03
17	620422	04:45	16.1 - 93	13	6.0	35.48
18	830124	08:17	15.8 - 95.4	33	6.3	65.61

Tabla II. Localización de los eventos de catálogo para la región de estudio. Padilla (1992).

Como funciones de Green empíricas se seleccionaron 11 componentes horizontales (las que incluían las ordenadas máximas) de las señales registradas en CIN durante la campaña de 1986 (Ponce et al, 1992). En la tabla III se incluyen la fecha, la localización, la magnitud local, el momento sísmico, la dimensión característica y el tiempo de ascenso (*rise time*) de las fuentes sísmicas, de los sismos que generaron las señales mencionadas. En este caso se les identificó con números romanos del I al XI y la localización de sus epicentros se muestran en las Figs. 39 y 40.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

EVENTO	FECHA A A N M D D	HORA H H H H	LOCALIZACIÓN LAT ° N LONG ° W	PROFUNDIDAD (km)	HL	DISTANCIA (km)	Mo (dinas-cm) 10 ²¹	r (m)	τ (seg)
CIN17 (I)	860401	22:46	17.37-95.00	128	3.72	157	4.409	169	0.039
CIN18 (II)	860401	04:33	16.36-96.16	19	3.90	208	6.729	188	0.040
CIN33 (III)	860407	02:02	17.07-94.70	123	3.61	114	3.405	160	0.037
CIN34 (IV)	860407	06:16	17.10-96.26	72	3.99	276	8.313	190	0.044
CIN40 (V)	860408	06:03	16.96-94.65	117	3.27	105	1.532	150	0.035
CIN47 (VI)	860412	07:59	16.53-93.52	160	3.30	27	1.644	136	0.032
CIN50 (VII)	860413	09:16	16.46-93.92	115	3.29	36	1.606	239	0.031
CIN67 (VIII)	860420	07:13	16.97-94.04	147	3.70	46	4.207	167	0.039
CIN69 (IX)	860420	14:57	15.44-93.40	29	3.86	148	1.052	151	0.035
CIN78 (X)	860424	15:24	16.80-94.08	129	3.25	42	1.462	132	0.031
CIN93 (XI)	860425	17:15	15.74-94.10	3	3.59	79	3.249	170	0.040

Tabla III. Localización de eventos empleados como Funciones de Green Empricas. Padilla (1992).

La selección de las funciones de Green se efectuó procurando que los epicentros y las profundidades de los sismos que las generaron, correspondieran lo más posible a las localizaciones de los eventos del catálogo.

De la tabla III se puede observar que tres eventos son superficiales (eventos II, IX, XI) y ocho de profundidad intermedia (eventos I, III, IV, V, VI, VII, VIII, y X), sus magnitudes varían de 3.25 a 3.99, su dimensión característica (r) varía de 132 a 239 m, y el tiempo de ascenso (τ) de las superficies de ruptura varía entre 0.031 y 0.044 seg. El cálculo de los parámetros r y τ se efectuó con las expresiones 4.16 (eventos de subducción superficiales), 4.17 (eventos de profundidad intermedia) y 4.18, respectivamente.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

En las tablas IV y V se presentan los parámetros requeridos para obtener los sintéticos con el método de las funciones de Green empíricas en la versión de Irikura (1983). En las primeras columnas de dicha tabla se incluye la fecha del evento de catálogo (denominado evento objetivo) y de la función de Green correspondiente, el significado de cada uno de los parámetros se indica al final de la tabla I.

EVENTO OBJETIVO	FUNCION DE GREEN	DT	STR DIP RAK	STRA DIPA RAKA	RM FM Z	RA PA ZA	PASO 1					PASO 2				
							Mrg-Moo	DX DW	NX NW	NSX NSW	TRA NT NIT	Mrg-Moo	DX DW	NX NW	NSX NSW	TRA NT NIT
531016 (10)	CIN18 (11)	0.0066	291 22 90	28 80 72	288 243 11	208 243 19	3.90-4.9	0.333 0.333	4 4	2 2	0.040 4 5	4.90-6.0	3.0 3.0	4 4	2 2	0.41 4 7
830124 (18)	CIN18 (11)	0.0066	282 80 72	282 80 72	208 243 33	208 243 19	3.90-5.0	0.333 0.333	5 5	3 3	0.040 5 6	5.0-6.3	3.5 3.5	5 5	3 3	0.46 5 69
350424 (4)	CIN69 (X)	0.0066	326 0 90	281 19 98	177 347 50	148 347 29	3.86-5.0	0.373 0.373	3 3	2 2	0.049 3 5	5.0-6.2	5.0 5.0	3 3	2 2	0.65 3 60
590428 (16)	CIN69 (X)	0.0066	302 30 110	281 19 98	204 347 10	148 347 29	3.86-5.0	0.373 0.373	3 3	2 2	0.049 3 5	5.0-6.6	5.0 5.0	4 4	2 2	0.65 4 80
570622 (14)	CIN83 (X11)	0.0066	281 19 98	302 30 110	86 188 18	79 188 3	3.59-5.0	0.501 0.301	6 6	3 3	0.040 6 7	5.0-6.5	3.5 3.5	5 5	3 3	0.46 5 69
620422 (17)	CIN83 (X11)	0.0066	302 30 110	302 30 110	101 188 13	79 188 3	3.59-5.0	0.501 0.301	6 6	3 3	0.040 6 7	5.0-6.0	3.5 3.5	4 4	2 2	0.46 4 55

Tabla IV. Parámetros empleados por el método de Irikura (1983) para la obtención de sintéticos correspondientes a eventos superficiales (ver simbología en la tabla I). Padilla (1992).

En las figuras 41 y 42 se presenta un ejemplo del tipo de resultados de la aplicación del método de las funciones de Green empíricas, en la versión de Irikura (1983) que realizó Padilla (1992). En cada una de esas figuras se muestra la función de Green empírica, el sintético del paso 1, el sintético del paso 2, y los espectros de amplitudes de Fourier de las tres señales, para sismos superficiales y de profundidad intermedia. Para la aceleración máxima del terreno, "y", correspondientes a los eventos del catálogo (tabla II) se obtuvieron del sintético del paso 2. En la tabla VI se presentan los valores de "y" de cada uno de los eventos del catálogo (tabla II). De dicha tabla se concluyó que las aceleraciones máximas de los eventos superficiales fluctuaron de 0.04 a 40 cm/s², y para los sismos de profundidad intermedia de 0.04 a 100 cm/s².

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

EVENTO OBJETIVO	FUNCION DE GREEN	DT	STR DIP RAK	STRA DIPA RAKA	RM PM Z	RA PA ZA	PASO 1				PASO 2					
							Mrg-Meo DW	DX DW	NX NW	NSX NSW	TRA NT NTT	Mrg-Meo DW	DX DW	NX NW	NSX NSW	TRA NT NTT
160602 (3)	CIN17 (1)	0.0066	314 69 23	222 61 25	169 298 150	157 298 128	3.72-5.2	0.299 0.299	7 7 4	4 4 4	0.039 7 8	5.20-7.1	4.5 4.5	8 8 4	4 4 4	0.6 8 145
511212 (8)	CIN33 (111)	0.0066	284 80 204	309 61 90	95 290 100	114 290 123	3.61-5.0	0.283 0.283	6 6 3	3 3 3	0.037 6 7	5.0-7.0	3.5 3.5	9 9 5	5 5 5	0.46 9 125
100924 (1)	CIN34 (1V)	0.0066	324 61 29	324 61 29	258 279 80	258 279 72	3.99-4.9	0.334 0.334	5 5 3	3 3 3	0.044 5 7	4.90-6.1	3.5 3.5	4 4 2	2 2 2	0.45 4 54
110827 (2)	CIN34 (1V)	0.0066	324 61 29	324 61 29	258 279 100	277 279 72	3.99-5.0	0.334 0.334	5 5 3	3 3 3	0.044 5 7	5.0-6.7	3.5 3.5	6 6 3	3 3 3	0.46 6 83
540513 (11)	CIN34 (1V)	0.0066	324 61 29	324 61 29	245 279 80	277 279 72	3.99-4.5	0.334 0.334	3 3 2	2 2 2	0.044 3 4	4.50-6.0	1.94 1.94	5 5 3	3 3 3	0.25 5 38
540513 (12)	CIN34 (1V)	0.0066	295 81 252	324 61 29	246 279 80	277 279 72	3.99-4.5	0.334 0.334	3 3 2	2 2 2	0.044 3 4	4.50-6.0	1.94 1.94	5 5 3	3 3 3	0.25 5 38
590524 (16)	CIN34 (1V)	0.0066	324 61 29	324 61 29	377 279 100	277 279 72	3.99-5.0	0.334 0.334	5 5 3	3 3 3	0.044 5 7	5.0-6.8	3.5 3.5	7 7 4	4 4 4	0.46 7 97
511212 (9)	CIN40 (V)	0.0066	309 67 29	284 80 156	95 286 100	105 286 117	3.27-5.0	0.237 0.237	8 8 4	4 4 4	0.032 8 8	5.0-7.0	3.5 3.5	9 9 4	4 4 4	0.46 9 125
370528 (5)	CIN47 (V1)	0.0066	309 67 29	48 73 17	83 316 150	27 316 160	3.30-5.0	0.136 0.136	8 8 4	4 4 4	0.032 8 8	5.0-6.5	1.97 1.97	5 5 3	3 3 3	0.46 5 69
460607 (6)	CIN50 (V11)	0.0066	48 73 45	300 53 38	41 222 100	36 222 115	3.29-5.0	0.135 0.135	8 8 4	4 4 4	0.031 8 8	5.0-7.1	1.97 1.97	10 10 5	5 5 5	0.46 10 139
561109 (13)	CIN67 (V111)	0.0066	352 61 32	309 17 90	47 308 150	46 308 147	3.70-5.0	0.167 0.167	6 6 3	3 3 3	0.039 6 7	5.0-6.3	3.5 3.5	4 4 2	2 2 2	0.46 4 55
460711 (7)	CIN78 (X)	0.0066	295 81 252	309 17 90	87 284 100	42 284 129	3.25-5.0	0.132 0.132	8 8 4	4 4 4	0.031 8 8	5.0-7.1	3.5 3.5	9 9 4	4 4 4	0.46 9 125

Tabla V. Parámetros empleados por el método de Irikura (1983) para la obtención sismogramas sintéticos, correspondientes a eventos de profundidad intermedia (ver simbología en la tabla I).

Para estimar el parámetro y_1 , de la ecuación 5.2, se supuso que se tendría un sismo superficial con una $M_s=8.4$ y una $D=79$ Km, así como un temblor de profundidad intermedia con una $M_s=7.5$ y una $D=20$ Km. Los valores de M_s y D adoptados se propusieron de acuerdo a Chávez (1987), los " y_1 " correspondientes a ambos tipos de eventos son $y_{1c}=200$ cm/s^2 y $y_{1pl}=300$ cm/s^2 , respectivamente.

Para incluir la posible actividad de las cinco fallas neotectónicas que se muestran en la figura 43, se aplicó también el método de las funciones de Green empíricas versión de Iríkura. Los parámetros que se utilizaron se presentan en la tabla VII, y los resultados de las simulaciones se muestran en las figuras 44 a 48 y tabla VIII. Se consideró que los eventos son superficiales.

A continuación se procedió a calcular la tasa media anual de excedencia de las intensidades observadas, $v_c(y)$. Para ello se ordenaron en forma ascendente las y 's, y para calcular las $v_c(y)$ correspondientes se dividió el número de intensidades mayores o iguales a la intensidad de interés entre el lapso de observación, que para el caso que nos ocupa fue de 87 años (Tabla IXc).

En la figura 49 se presenta los valores de v_c calculadas para las aceleraciones máximas del terreno asociadas a las fallas neotectónicas potencialmente activas.

De acuerdo con Chávez (1987) la estimación de los valores esperados de los parámetros k , r y s de la expresión (5.2) se efectúa aplicando técnicas de la estadística bayesiana, Chávez *et al* (1987), sin embargo dado que el número de datos con que se cuenta en esta aplicación es reducido, se decidió estimarlos mediante un ajuste por mínimos cuadrados. En dicho ajuste se le dio mayor peso a los valores de $v(y)$ asociados a las máximas aceleraciones del terreno; la expresión resultante para $v(y)$ de las fallas neotectónicas corresponde a la ecuación 5.4.

$$v(y) = 0.4y^{-0.75} \left(1 - \left(\frac{y}{200} \right)^{2.5} \right) \quad (5.4)$$

Con fines comparativos se presentan curvas para sismos superficiales, los que obtuvo Padilla (1992) en línea llena y la que se obtuvo en este trabajo en línea punteada (Fig. 49). Nótese que el riesgo sísmico en Cintalapa se incrementa significativamente cuando las fallas neotectónicas son incluidas en el estudio. Así para un $v(y)$ de 0.01 (periodo de recurrencia de 100 años) el valor esperado de " y " es 200 cm/s^2 (falla neotectónicas) mientras que el obtenido por Padilla (1992) era de 50 cm/s^2 (sismos superficiales).

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

EVENTO AANKDD	MAGNITUD (M _s)	DISTANCIA (km)	PROFUNDIDAD (km)	ACELERACION MAXIMA (g _{los})
100924 (1)	6.4	258	80	0.1
110827 (2)	6.7	258	100	0.4
160602 (3)	7.0	169	150	0.4
350424 (4)	6.2	177	50	0.08
370528 (5)	6.5	83	150	1.0
460607 (6)	7.1	36	115	100.0
460711 (7)	7.0	42	129	2.0
511212 (8)	7.0	95	100	2.0
511212 (9)	7.0	95	117	20.0
531016 (10)	6.0	288	11	0.4
540513 (11)	6.0	245	80	0.04
540513 (12)	6.0	246	80	0.04
561109 (13)	6.3	46	147	8.0
570622 (14)	6.5	86	18	40.0
590428 (15)	6.6	204	10	0.04
590524 (16)	6.8	377	100	0.4
620422 (17)	6.0	101	13	20.0
830124 (18)	6.3	208	33	1.0

Tabla VI. Aceleraciones máximas de los sintéticos obtenidos con el método de Irikura (1983,1992)

Evento Objetivo	Funcion de Green	DT	STR DIP RAK	STRA DIPA RAKA	RM PM Z	RA PA ZA	PASO 1				PASO 2				FALLA No.-Long.		
							M _g -M _{oo}	DX DW	NX NW	NSX NSW	TRA NT NTT	M _g -M _{oo}	DX DW	NX NW		NSX NSW	TRA NT NTT
Falla 1	TON74	0.0066	232 36 80	232 36 80	129 18 10	129 162 10	3.75-5.0	0.366 0.366	5 5	1 1	0.043 5 7	5.0-6.48	1.830 1.830	5 5	1 1	0.216 5 32	1-20 Km
Falla 2	TON48	0.0066	184 54 88	184 54 88	129 69 16.5	129 111 5	3.81-5.7	0.369 0.369	12 12	12 12	0.043 12 18	5.7-6.91	4.428 4.428	4 4	4 4	0.521 4 65	2-33 Km
Falla 3	NAN04	0.0066	210 52 88	210 52 88	121 62 16.5	121 118 16.5	3.13-5.4	0.342 0.342	12 12	12 12	0.040 12 15	5.4-6.91	3.078 3.078	6 6	6 6	0.483 6 87	3-33 Km
Falla 4	TON79	0.0066	256 44 90	256 44 90	126 48 14.5	126 132 14	3.54-5.0	0.358 0.358	6 6	1 1	0.042 6 8	5.0-6.8	2.148 2.148	7 7	1 1	0.253 7 53	4-28 Km
Falla 5	TON98	0.0066	184 56 84	184 56 84	146 72 8	146 108 27	3.35-5.0	0.351 0.351	7 7	3 3	0.041 7 9	5.0-6.29	2.457 2.457	4 4	2 2	0.289 4 37	5-16 Km

Tabla VII. Parámetros empleados en el método de Irikura (1983) para obtención de sismogramas sintéticos, correspondientes a Fallas neotectónicas potencialmente activas en el Istmo de Tehuantepec (ver. plano 6).

Evento	Magnitud (Ms)	Distancia (Km)	Profundidad (Km)	Aceleración Máxima (gales)
Falla 1	6.48	129	10.0	6.35
Falla 2	6.91	129	16.5	7.30
Falla 3	6.91	121	16.5	18.36
Falla 4	6.80	126	14.5	1.46
Falla 5	6.29	146	8.00	59.41

Tabla VIII. Aceleraciones máximas de los sintéticos obtenidos con el método de Irikura (1983,1992), considerando las fallas neotectónicas

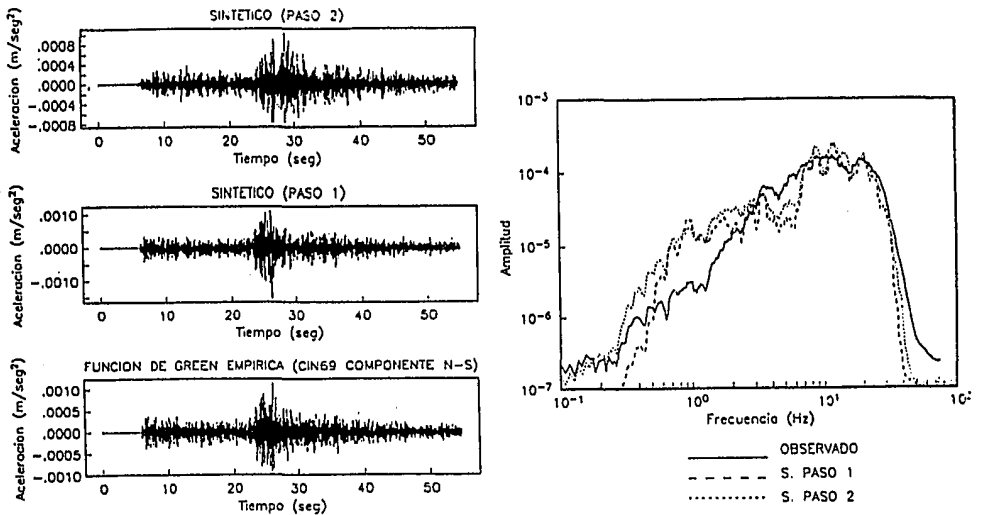


Figura 41. Función de Green empírica empleada y el sismograma sintético obtenido para el evento de catálogo 350424 (4).

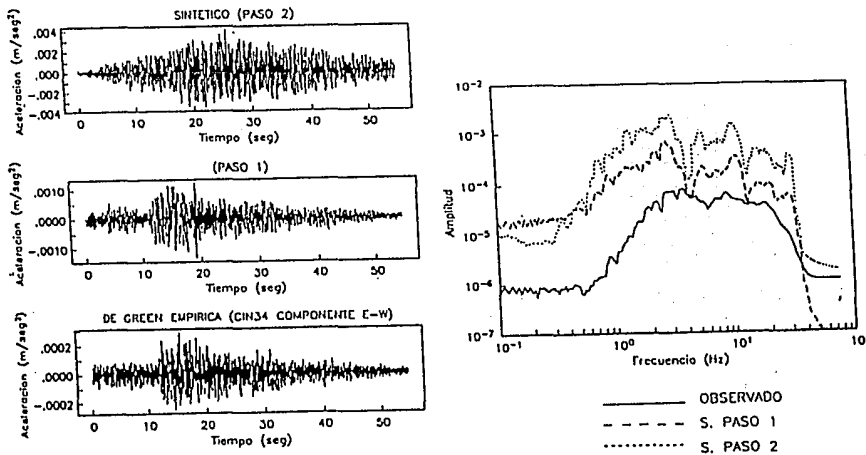


Figura 42. Función de Green empírica empleada y el sismograma sintético obtenido para el evento de catálogo 590524 (16).

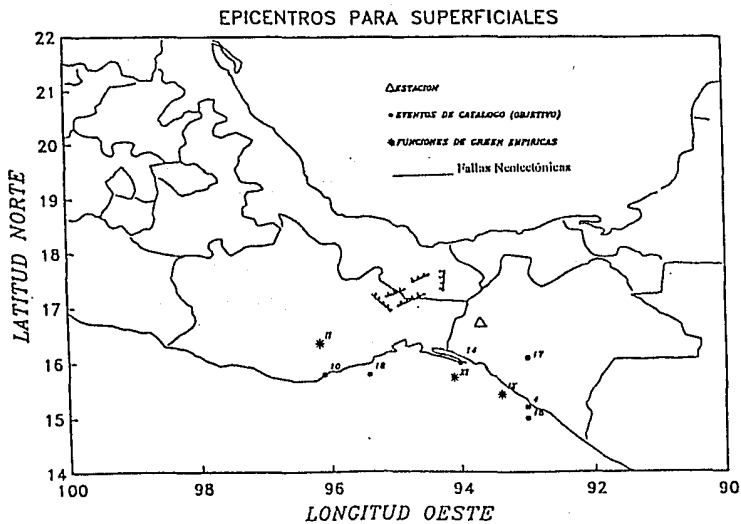


Figura 43. Localización de: Epicentros de temblores históricos superficiales ($M_s > 6$, de 1900 a 1986); epicentros de las funciones de Green empíricas utilizadas; Fallas neotectónicas.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

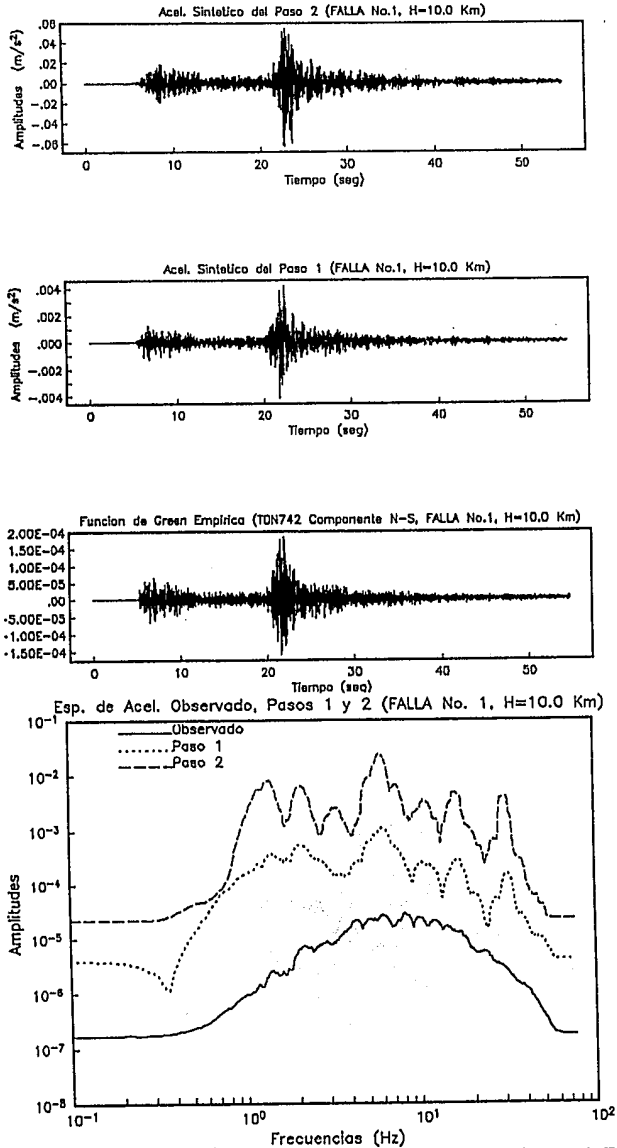


Figura 44. Función de Green empírica empleada y sintético obtenido para la Falla 1.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

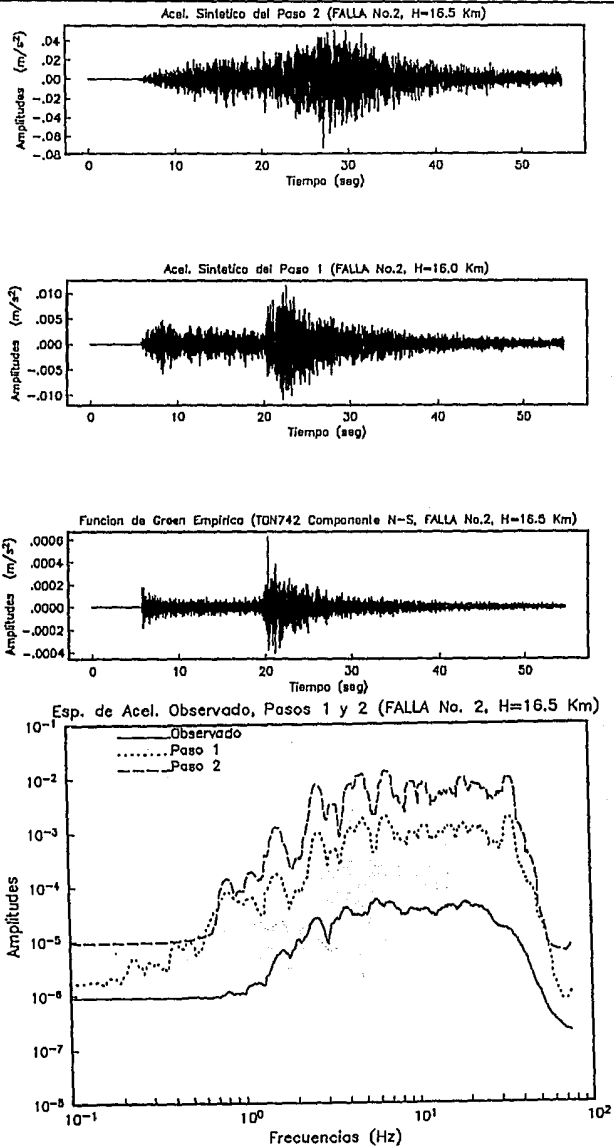


Figura 45. Función de Green empírica empleada y sintético obtenido para la Falla 2.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

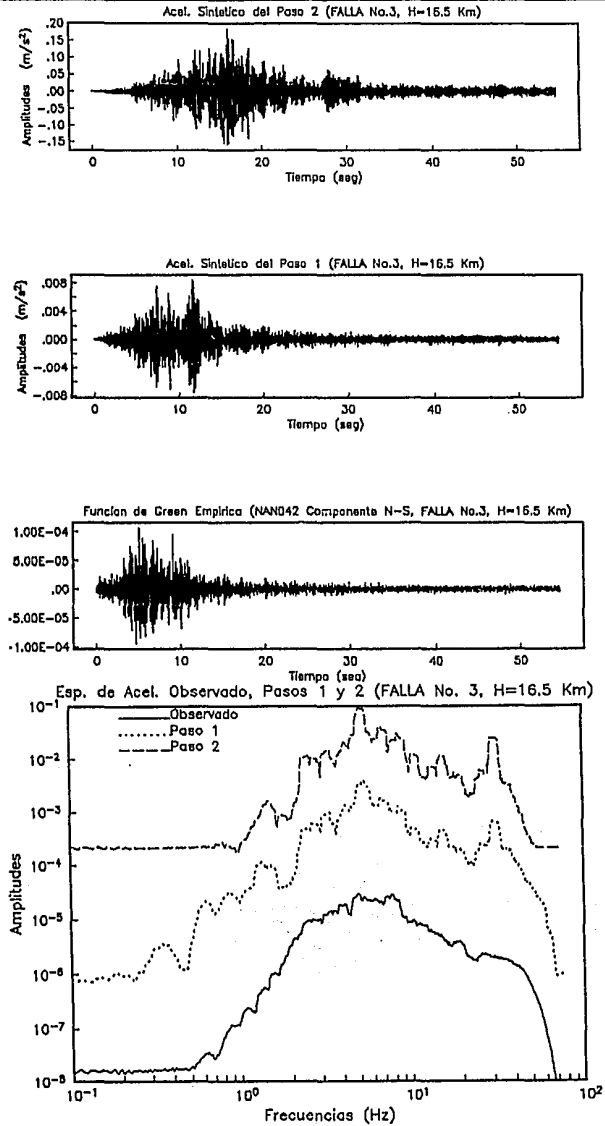


Figura 46. Función de Green empírica empleada y sintético obtenido para la Falla 3.

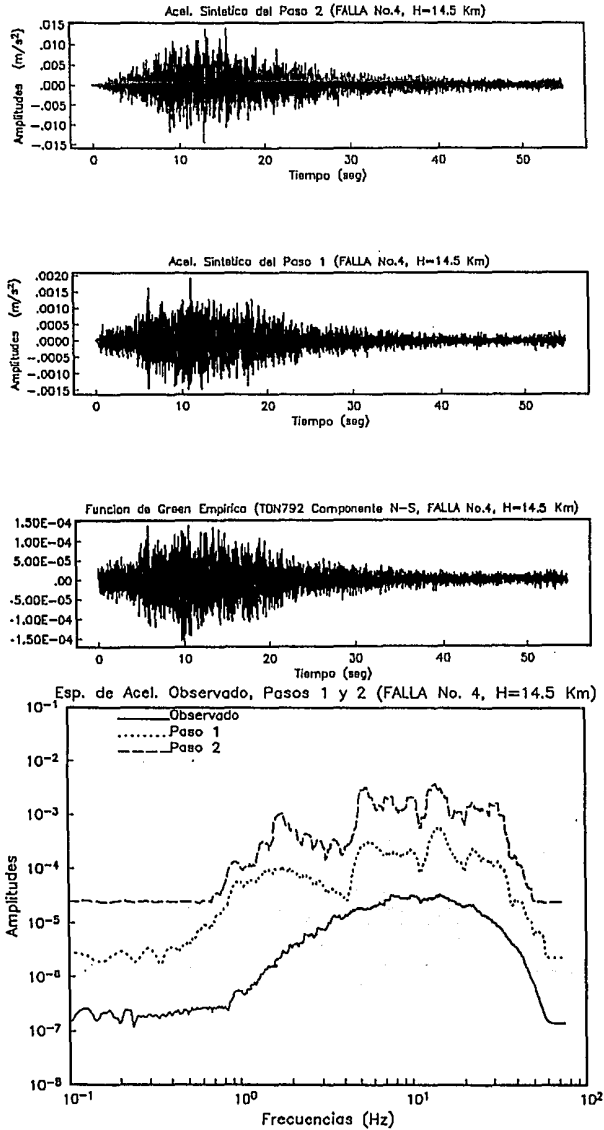


Figura 47. Función de Green empírica empleada y sintético obtenido para la Falla 4.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

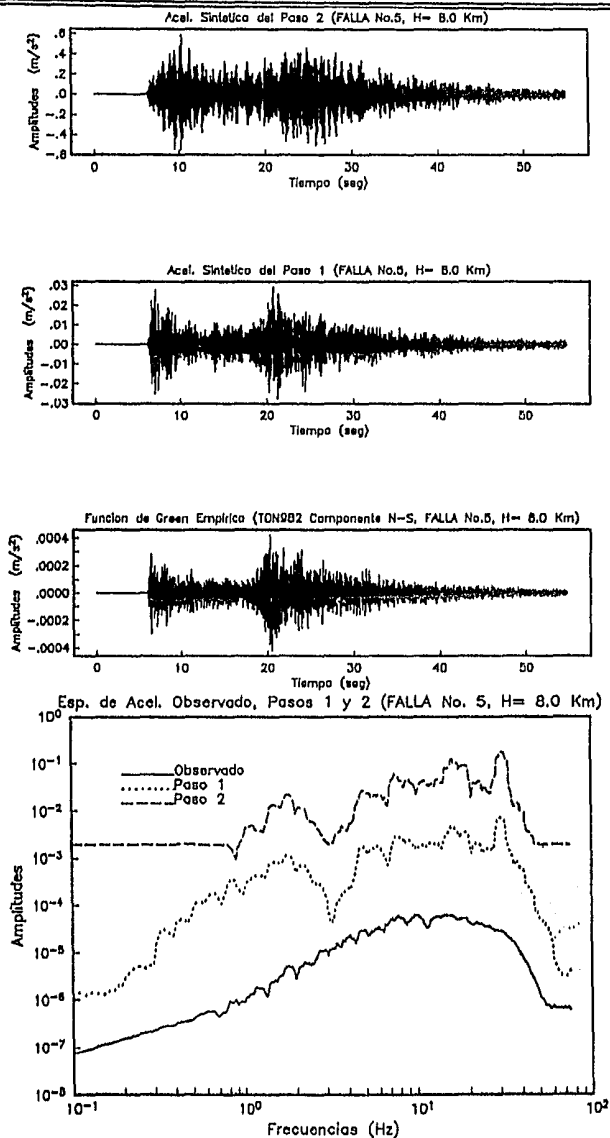


Figura 48. Función de Green empírica empleada y sintético obtenido para la Falla 5.

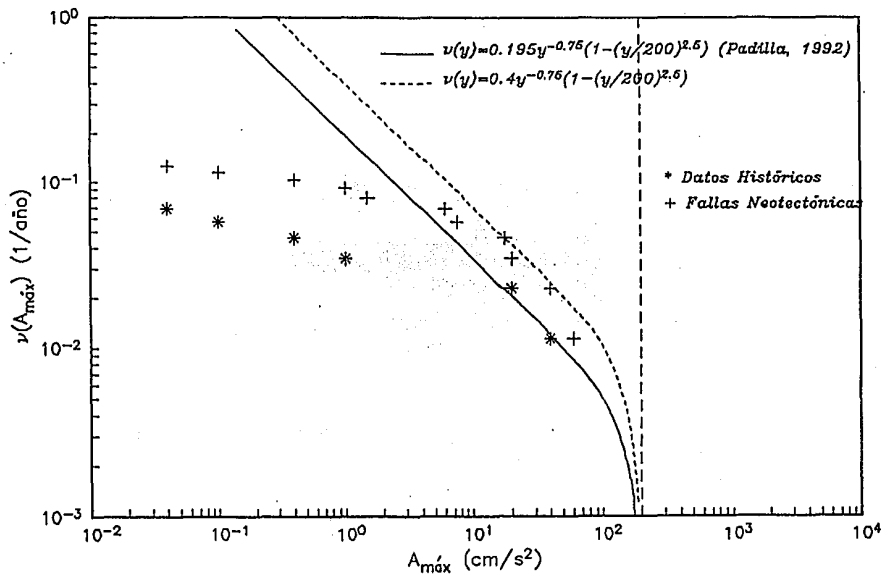


Figura 49. Riesgo sísmico *Bayesiano*, expresado en función de la aceleración máxima del terreno en el sitio de interés, para sismos superficiales con (línea punteada) y sin (línea continua) la contribución de posibles temblores asociados a las fallas neotectónicas. Los parámetros empleados para el cálculo de la expresión I se muestran en la tabla IXa, b y c.

Falla No.	Longitud (Km)	M _l	D (Km)	H (Km)	A _{máx} (cm/s²)
1	20	6.48	129	10.0	6.0
2	33	6.91	129	16.5	7.5
3	33	6.91	121	16.5	18.0
4	28	6.80	126	14.5	1.5
5	16	6.29	146	8.00	60.0

Tabla IXa. Aceleraciones máximas esperadas (A_{máx}) para las fallas neotectónicas.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

Foco No.	M_S	D (Km)	H (Km)	$A_{m\acute{a}x}$ (cm/s^2)
1	6.2	177	50	0.1
2	6.0	288	11	0.4
3	6.5	86	18	40.0
4	6.6	204	10	0.04
5	6.0	101	13	20.0
6	6.3	208	33	1.0

Tabla IXb. Aceleraciones máximas esperadas ($A_{m\acute{a}x}$) para eventos superficiales.

i	$A_{m\acute{a}x}$ (cm/s^2)	v_i
1	0.04	0.126
2	0.10	0.115
3	0.40	0.103
4	1.00	0.092
5	1.50	0.080
6	6.00	0.069
7	7.50	0.057
8	18.0	0.046
9	20.0	0.034
10	40.0	0.023
11	60.0	0.011

Tabla IXc. Tasa de ecedencia v_i para $T_0=87$ años. Se consideraron tanto las aceleraciones máximas de la fallas neotectónicas como de los eventos superficiales.

VI. CONCLUSIONES

1.- Se obtuvieron datos de deslizamiento de estrías en fallas (neotectónicas) en 50 sitios del Istmo de Tehuantepec (IT).

2.- A partir de inversión de los datos, utilizando códigos de Angelier (1984, 1990), se determinó que las partes Norte se tiene un campo de esfuerzos extensional con una orientación de σ_3 que fluctúa de NW-SE a NE-SW, las cuales afectan a los depósitos de terrazas aluviales del Plio-Cuaternario, depósitos de ambiente marino somero del Mioceno (?), así como a formaciones volcánicas del Néogeno-Cuaternario. Dicho campo de esfuerzos esta vinculado a fallas normales preexistentes, las cuales concuerdan con los resultados obtenidos por PEMEX (con longitudes de 20, 33, 33, 29 y 16 Km, fallas de 1 a 5, respectivamente) y por Suter (1991), aunque en su caso apoyado en observaciones de las elongaciones de las secciones transversales de pozos con profundidades de hasta 6 Km, y alineamientos de estructuras volcánicas.

Por otro lado Suárez (1994), propone que el campo de esfuerzos dominante en la zona Norte es principalmente compresivo, sustentado en la solución del mecanismo focal del sismo de Jalípan de 1959. Dicho mecanismo corresponde a un fallamiento inverso vinculado a esfuerzos compresivos. No obstante, Guzmán-Speziale (1989) y Ponce *et al* (1992) propusieron soluciones de mecanismos focales (para sismos con profundidades ≤ 50 Km y > 50 Km) que concuerdan con el campo de esfuerzos extensional encontrado en el presente estudio, dichas soluciones se localizan dentro de las zonas Norte y Centro.

3.- La zona Centro presenta dos campos de esfuerzos dominantes: por un lado, un campo de esfuerzos con σ_3 en la dirección NNW-SSE a NE-SW el cual afecta a formaciones más antiguas (Mesozoico (?)) asociadas a fallas E-W; por otro lado, un campo de esfuerzos con σ_3 en la dirección E-W asociado fallas que fluctúan N-S a NW-SE y NE-SW (formaciones del Plio-Cuaternario), similares a las fallas dominantes en la zona Norte. Estos resultados están sustentados del análisis de las poblaciones de fallas estudiadas en este trabajo y de la interpretación de líneas sísmicas (PEMEX, informes inéditos).

4.- La zona Sur al igual que la zona Centro, presenta dos campos de esfuerzos (σ_3) dominantes asociados al los siguientes patrones de fallamiento normal: por un lado tenemos un patrón de fallas normales con orientaciones que fluctúan de E-W, ENE-WSW, vinculadas a un

campo de esfuerzos extensivo con una dirección de σ_3 de N-S a NNE-SSW; afectando principalmente a los afloramientos de rocas volcánicas intrusivas del Mioceno tardío. Esta distensión probablemente originó la Planicie Costera Pacífica del Golfo de Tehuantepec. Por otra parte, fallas normales con orientaciones prácticamente N-S, están vinculadas a un campo de esfuerzos extensivo con una dirección E-W.

5.- Las observaciones de campo indican que el campo de esfuerzos extensivo que afecta principalmente a los afloramientos de rocas volcánicas del Mioceno tardío, debió de ser posterior al último episodio orogénico del Mioceno superior. Afectando de la misma manera, en la Planicie Costera las formaciones Plio-Cuaternarias continentales, así como a las marinas en el Centro del Istmo. Este evento distensivo, posiblemente del orden neotectónico, es el último evento tectónico asociado a las deformaciones importantes dentro de las zonas Centro y Sur principalmente.

6.- Los escasos índices de compresión, vinculados a poblaciones de fallas inversas y a fallas transcurrentes. En estas últimas no se logró establecer si los desplazamientos laterales están relacionados con un episodio compresivo, o con las permutaciones entre los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_2 dentro del contexto distensivo.

7.- Se propusieron cinco fallas neotectónicas potencialmente activas dentro de la zona Centro-Sur de México.

8.- Para la zona de interés y con la información neotectónica disponible, el método de las funciones de Green empíricas en la versión de Irikura proporcionó sismogramas sintéticos adecuados para fines de predicción.

9.- Se aplicaron expresiones para estimar el momento sísmico (M_0) y la dimensión característica de la superficie de ruptura (r) en función de M_S y M_L , y el tiempo de ascenso (*rise time*) en función de r para sismos asociados a fallas neotectónicas potencialmente activas.

10.- Se aplicó el método de las funciones de Green empíricas en la versión de Irikura para obtener sismogramas sintéticos asociados a cinco fallas neotectónicas potencialmente activas dentro del Istmo de Tehuantepec, las funciones de Green provienen de la campaña de microsismicidad de 1986 (Ponce, et al, 1992).

11.- Se estimó el potencial sísmico en la estación CINTALAPA localizada al sur del Istmo de Tehuantepec en términos de las aceleraciones máximas del terreno considerando la información

neotectónica de la zona. Se compararon los resultados obtenidos por Padilla (1992, eventos superficiales) y los del presente estudio, observándose que para el mismo periodo de recurrencia, las aceleraciones máximas esperadas para eventos superficiales con la contribución de fallas neotectónicas fueron mayores con respecto a los eventos superficiales con la contribución de dichas fallas. Es decir, el potencial sísmico se incrementa al considerar las fallas neotectónicas.

12.- El incluir la neotectónica de una región de interés puede ser una alternativa más para estimar el potencial sísmico en sitios localizados en regiones donde se cuente con información microtectónica (poblaciones de fallas) y de un número de registros sísmicos.

BIBLIOGRAFÍA

- AKI, K., (1967). Scaling law of seismic spectrum. *J. Geophys. Res.*, 72, pp.1217-1231.
- ANGELIER, J., 1992, Un élément nouveau dans la détermination des états de contrainte en tectonique cassante. Les plans de défaut non-cisailants, ou <<non-failles>>. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 314, Série II (Tectonique), pp. 381-386.
- _____, Sur l'incorporation des structures de pression et de tension dans la détermination des états de contrainte en tectonique cassante: un élargissement des méthodes d'inversion. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 314, Série II (Tectonique), pp. 1233-1238.
- _____, 1991, Analyse chronologique matricielle et succession régionale des événements tectoniques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 312, Série II (Tectonique), pp. 1633-1638.
- _____, 1990, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. *Geophys. J. Int.* No. 103, pp. 363-376.
- _____, 1989, From orientation to magnitudes in palcostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, v. 11, No. 1/2, pp. 37-50
- _____, Tectonique cassante et neotectonique. *Annales de la Société Géologique de Belgique*. t. 112, fascicule 2, pp. 283-307.
- _____, 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets. *J. Geophys. Res.* v. 86, No. B3, pp. 1829-1840.
- _____, 1983, Analyses qualitative et quantitative des populations de jeux de failles. *Bull. Soc. Géol. France*, v. 7, t. XXV, No. 5, pp. 661-672.
- ANGELIER, J., MECHLER, P., 1977, Sur une méthode graphique de recherche de contraintes principales également utilisable en tectonique et séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. France*, v. 7, t. XIX, No. 6, pp. 1309-1318.
- ARMUO, R., CAREY, E., CISTERNAS, A. 1982, The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonics phases. *Tectonophysics*, No. 1982, pp. 145-160.

- ATWATER, T., 1970, Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol. Soc. America Bull.*, v. 81, pp. 3513-3536
- BOORE, D., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 73, pp.1865-1894.
- BORN, M., Y WOLF, E., 1965, *Principles of optics*. 3rd edn. (Pergamon Press, Oxford).
- BRUNE, J., 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 4997-5009.
- BURKART, B., 1983, Neogene North America-Caribbean plate boundary across northern Central America-Offset along the Polochic fault. *Tectonophysics*, v. 99, pp. 251-270.
- BURKART, B., DEATON, B. C., DENG C., AND MORENO G., 1987. Tectonic wedges and offset Laramide structures along the Polochic Fault of Guatemala and Chiapas, Mexico. Reaffirmation of large Neogene displacement. v. 6, No. 4, pp. 411-422.
- CARFANTAN, J. C., 1986, Du Systeme Cordillerain Nord-Americain au Domaine Caribe. Mémoire de thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Université de Savoie. v. I et II.
- CASTRO-ESCAMILLA, R., 1980, Un modelo de la corteza terrestre para el sur de México mediante el uso de sismos profundos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- CHÁVEZ, M., 1989, Caractéristiques vibratoires d'un sol stratifié, estimées d'après un modèle mathématique de sol et des enregistrements de mouvements réels. 2ième Colloque National de Génie Parasismique, Saint-Remy les Chevreuses, Francia, pp. 1-10.
- CHÁVEZ, M., CASTRO, R., (1988). Attenuation of modified Mercalli Intensity with distance in Mexico. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 78, pp. 1875-1884.
- CHÁVEZ, M., GAULON, R., PADILLA, G., VELASQUILLO, L. G., COVARRUVIAS, J. M., (1992). Estimación del riesgo sísmico en el Centro-Sur de México y el oeste de Francia, parte III. Instituto de Ingeniería, UNAM.

- CHÁVEZ, M., JIMÉNEZ, G., VEGA, R., 1987a. Riesgo sísmico en un sitio considerando las características de atenuación de las ondas sísmicas generadas en fuentes sismo-tectónicamente diferentes. VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro, Qro., A-121-134.
- COUCH, R., AND WOODCOCK S., 1981, Gravity and Structure of the Continental Margins of Southwestern Mexico and Northwestern Guatemala. *J. Geophys. Res.* v. 86, No. B3, pp. 1829-1840.
- DEAN, B. W., AND DRAKE, C. L., 1978 Focal mechanism solutions and tectonics of the Middle America Arc. *J. of Geology*, v. 86, pp. 111-128
- DEATON, B. C., AND BURKART, B., 1984, Time of sinistral slip along the Polochic fault of Guatemala. *Tectonophysics*, v. 102, pp. 297-313
- DELGADO-ARGOTE, L. A., Y CARBALLIDO-SÁNCHEZ, E. A., 1990, Análisis tectónico del Sistema Transpresivo Neogénico entre Macuspana, Tabasco, y Puerto Ángel, Oaxaca, México. *Rev. Inst. Geología, UNAM*, v. 9, No. 1, pp. 21-32
- DEMANT, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Rev. Inst. Geología, UNAM*, v. 2, No. 2, pp. 172-187
- GONZÁLEZ-RUIZ, J., 1986, Earthquake source mechanics and tectonophysics of the Middle America Subduction Zone in Mexico. Ph. D. thesis, University of California Santa Cruz.
- HASKELL, N., 1964, Radiation patterns of surface waves from point sources in a multi-layered medium. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 54, pp. 377-393.
- HAVSKOV, J., SINGH, S. K., Y NOVELO, D., 1982, Geometry of the Benioff zone in the Tehuantepec area in southern Mexico. *Geofísica Internacional (México)*, 21, pp. 325-330.
- HEY, R. N., DEFFEYES, K. S., LEONARD, G., AND LOWRIE, A., 1972, The Galapagos triple junction and plate motions in the east Pacific. *Nature*, v. 237, pp. 20-22.
- IRIKURA, K., 1992, The construction of large earthquake by a superposition of small events. IOWCEE, Madrid.

- IRIKURA, K., 1983,. Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquake using observed seismograms of small events. Proc. 3rd International Microzonation Conference, Seattle, v. 1, pp. 447-458.
- IRIKURA, K., Y AKI, K., 1988, A procedure for synthesizing strong ground motion from large earthquake using small earthquakes records. *Sometido a Bull. Seism. Soc. Am.*
- JORDAN, T. H., 1975, The present day motions of the Caribbean plate. *J. Geophys. Res.*, v. 83, pp. 3427-3434.
- LÓPEZ-RAMOS, E., 1979, *Geología de México*, 2da. Edición, Tomo III, pp. 157-262.
- LYNN, W. S., AND LEWIS, B. T. R., 1976, Tectonic evolution of the northern Cocos plate. *Geology*, v. 4, No. 12, pp. 718-722.
- MINSTER, J. B., JORDAN T. H., MOLNAR P., AND HAINES E., Numerical modeling of instantaneous plate tectonics. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, v. 36, pp. 541-576.
- MCDOWELL, F. W., Y CLABAUGH, S. E., 1972, Edades potasio-argón de rocas volcánicas en la Sierra Madre Occidental al noreste de Mazatlán; Mazatlán. *Soc. Geol. Mexicana, Convención Nal.*, v. 2, Resúmenes, pp. 182-185 (resumen).
- MCDOWELL, F. W., AND KEIZER, R. P., Timing of mid-Tertiary vulcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico. *Geol. Soc. America Bull.*, v. 88, pp. 1479-1487.
- MCKENZIE, D. P., MORGAN, W. J., 1969, Evolution of Triple Juntions. *Nature*, 224, pp. 125-133.
- MORÁN-ZENTENO, D. J., 1984, *Geología de la República Mexicana*. INEGI, UNAM. México. pp. 77-85
- Ortega, F., Fracturamiento y deslizamiento del terreno en Guevea de Humbolt, Municipio de Juchitán, Oaxaca. *Comunicación Escrita*.
- PADILLA, G., 1992, Propagación de ondas sísmicas en el Istmo de Tehuantepec y su impacto en la estimación del riesgo sísmico en sitios localizados en esa región. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.

- PONCE, L., GAULON, R., SUÁREZ, G., AND LOMAS, E., 1992, Geometry and state of stress of the Downgoing Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec, Mexico. *Geophy. Res. Let.* v. 19, No. 8, pp. 773-776.
- RIVERA, L., CISTERNAS, A., Stress tensor and fault plane solutions for a populations of earthquakes. *Bull. Seis. Soc. Ame.*, v. 80, No. 3, pp. 600-614.
- RUFF, L., KANAMORI, H., 1980, Seismicity and the Subduction Process. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, No. 23, pp. 240-252
- SUÁREZ, G. Reverse faulting in the Isthmus of Tehuantepec: Backarc deformation induced by the subduction of the Tehuantepec Ridge. *Submitted to Geology*.
- SUTER, M., 1991, State of stress and active deformation in Mexico and western Central America. *The Geology of North America Decade Map Volume 1*, pp. 401-421.
- THATCHER, W., HILL, D. P., 1991, Fault orientations in extensional and conjugate strike-slip environments and their implications. *Geology*, v. 19, pp. 1116-1120.
- VÁZQUEZ, M. M. E., VILLASEÑOR, R. P. E., SÁNCHEZ, Q. R., Y ISLAS, C. M. A., 1990, Integración Tectónica-Estructural en el Prospecto "Sierra de Chiapas". Informe Inédito IMP, México. pp. 1-65
- VERGELY, P., SASSI, W., CARBY-GAILHARDIS, E., 1987, Analyse graphique des failles à l'aide des focalisations de stries. *Bull. Soc. Géol. France*, v. 8, tome III, No. 2, pp. 395-402.

A P E N D I C E 1

GEOLOGÍA DEL CENTRO-SUR DE MÉXICO

C O N T E N I D O

1. INTRODUCCIÓN	1-1
1.1. MORFOLOGÍA	1-1
1.1.A. Planicie Costera del Golfo	1-1
1.1.B. Cinturón Plegado de Chiapas y Guatemala	1-2
1.1.C. Sierra Madre de Chiapas	1-2
1.1.D. Planicie Costera del Pacífico	1-3
1.2. GEODINÁMICA REGIONAL	1-3
1.2.A. Las tres grandes placas	1-4
1.2.A.1. Placa de Norteamérica	1-4
1.2.A.2. Placa de Cocos	1-6
1.2.A.3. Placa del Caribe	1-6
1.2.B. Las fronteras Mayores	1-7
1.2.B.1. La Trinchera de Centro-América	1-7
1.2.B.2. El Sistema Motagua-Polochic	1-9
1.2.B.3. La Junta Triple	1-10
1.3 ESQUEMA GEOLÓGICO	1-12
1.3.A. Cuadro General: El Centro-Sur de México	1-13
1.3.A.1. El Antepaís Maya	1-13
1.3.A.2. El dominio Olmeca, Chiapaneco y Quiche	1-13
1.3.A.3. La Sierra de Juárez	1-15
1.3.A.4. El Dominio Oaxaqueño o Bloque de Oaxaca	1-16
1.3.B. Geología del Istmo de Tehuantepec	1-18
1.3.B.1. <u>Estratigrafía del sector Noroccidental de Chiapas (Dominios Olmeca, Chiapaneco y Quiche)</u>	1-18
1.3.B.2. <u>Regiones Centrales y Meridionales del Istmo de Tehuantepec</u>	1-20
BIBLIOGRAFÍA.	1-23

1. INTRODUCCIÓN

En este apéndice se efectuará la revisión bibliográfica de los trabajos sobre la morfología, marco geodinámico y esquema geológico del Centro-Sur de México y zonas aledañas con el fin de detallar los conceptos ya mencionados en el capítulo II.

1.1. MORFOLOGÍA

Las provincias fisiográficas involucradas dentro de la zona de estudio según E. Raisz (1959; citado por Carfantan, 1986), son las siguientes (Fig. 2, Cap. II): la Planicie Costera del Golfo, el Cinturón Plegado de Chiapas y Guatemala, la Sierra Madre de Chiapas, la Planicie Costera del Pacífico, la Cordillera Oriental o Sierra de Juárez y la Sierra Madre del Sur.

Las anteriores provincias fisiográficas se consideran las más apropiadas desde el punto de vista fisiográfico y geológico de la región (Carfantan 1986).

1.1.A. Planicie Costera del Golfo

A grandes rasgos la Planicie Costera del Golfo que se localiza al Norte del Istmo de Tehuantepec, entre el Golfo de México (al Norte), La Cordillera Oriental y el Cinturón Plegado de Chiapas (al Sur). La singularidad fisiográfica dentro de esta provincia es la Zona Volcánica de los Tuxtlas (Fig. 2, Cap. II), los cuales representan la zona topográfica más alta con 1700 m.s.n.m en el Cerro Santa Martha.

Esta provincia se caracteriza por un clima de caliente a húmedo (zona de los volcanes); la vegetación esta conformada por bosque tropical, con algunas zonas de pastizales y matorrales ocasionados principalmente por la actividad ganadera y agrícola; en la zona de los volcanes se caracteriza por bosque de montaña (coníferas).

La hidrología dentro de la zona esta representada principalmente por los ríos Coatzacoalcos, Uzpanapa, Grijalva y Usumacinta, los cuales desembocan en el Golfo de México; y las lagunas Catemaco, Ostión, Mezcalpa, El Rosario y Mecoaca.

1.1.B. Cinturón Plegado de Chiapas y Guatemala

El Cinturón Plegado de Chiapas, esta situado entre la Planicie Costera del Golfo (al Norte) y la Sierra Madre de Chiapas (al Sur); y sus límites son el sistema Motagua-Polochic al SE y la Plataforma de Yucatán al NE (Fig. 2, Cap. II). En esta provincia se tiene clima templado y húmedo con bosque tropical en las partes bajas, mientras que en las partes altas se observa un bosque de montaña (coníferas).

La parte centro-meridional de la cadena es la parte topográfica más elevada con 2200 m.s.n.m., en el Poblado de San Cristóbal de las Casas. El drenaje esta representado principalmente por los ríos Grijalva y Usumacinta.

1.1.C. Sierra Madre de Chiapas

La Sierra Madre de Chiapas se extiende paralelamente al Océano Pacífico, del Istmo de Tehuantepec hasta al sistema Motagua-Polochic, bordeando a su vez la Planicie Costera Pacífica (Fig. 2, Cap. II). Las altitudes varían de 900 metros al Este del Istmo a más de 3200 m.s.n.m-al Norte del Sistema Polochic (Cerro Paisthal).

La línea topográficamente más elevada constituye el parteaguas con corrientes que desembocan tanto al Golfo de México (al Norte, a través del río Grijalva) y al Océano Pacífico (al Sur, a través de diversos afluentes).

El perfil de la cadena es asimétrica. Es decir, hacia el Pacífico presenta un fuerte escarpe (Fig. 3a, Cap. II; parte derecha), cubierta por una vegetación de arbustos a bosque tropical exuberante hacia Guatemala. Mientras que al Norte descende gradualmente (Fig. 3a, Cap. II; parte izquierda) y su vegetación es menos densa con clima húmedo a semiárido

1.1.D. Planicie Costera del Pacífico

La Planicie Costera Pacífica, se caracteriza por un clima caliente y húmedo con bosque tropical hacia Chiapas, mientras que la porción Sur del Istmo de Tehuantepec (poblados de Juchitán, Tehuantepec, Salina Cruz entre otros) es de clima cálido a semiseco caracterizada por un bosque espinoso.

La característica morfológica principal de la región del Istmo de Tehuantepec, es una doble asimetría en las direcciones N-S (Fig. 3a, Cap. II) y E-W (Fig. 3b, Cap. II).

Según el eje N-S, el Istmo presenta un ligero basculamiento hacia el Norte, observado principalmente a lo largo de la carretera Minatitlán-Villahermosa, en material sedimentario representado por gravas y arenas de color amarillo-rojo sin cementación y poca compactación, de ambiente continental del .

La parte Central y Septentrional están caracterizadas por una superficie de material sedimentario (Plio-Cuaternario) que disminuye regularmente de la Costa del Golfo de México al borde septentrional de la Planicie Costera.

Finalmente, la parte Meridional se distingue por un hundimiento repentino (Fig. 3a, Cap. II; parte derecha) ocasionando la Planicie Costera Pacífica.

1.2. GEODINÁMICA REGIONAL

El Centro-Sur de México esta comprendido entre el Eje Neovolcánico Transmexicano al NE, y al SE por el Sistema de Fallas Trancurrentes que limitan las placas de Norteamérica y el Caribe. Estas regiones están bordeadas al Norte por el Golfo de México y al Sur por la Trinchera de Centro-América en el Océano Pacífico (Fig. 5, Cap. II).

Los conjuntos tectónicos involucrados dentro de la zona de estudio son las tres grandes placas: de Norteamérica, la de Cocos y la Caribe; y las fronteras mayores: la Trinchera de Centro-América, el Sistema Motagua-Polochic y la Junta Triple.

A continuación se presentará un resumen de los conjuntos tectónicos arriba mencionados.

1.2.A. Las tres grandes placas

Partiendo de la definición de una junta triple, como una zona donde convergen tres límites de placas y en el caso de que ésta sea inestable (según Mackenzie y Morgan, 1969), evolucionan a lo largo de una de las fronteras. Bajo estas consideraciones, y observando que el Istmo de Tehuantepec presenta la convergencia de tres placas (América del Norte, Placa de Cocos y Caribe) a la altura del Golfo de Tehuantepec, la definición propia de esta zona es una junta triple de tipo Trinchera-Trinchera-Falla (TTF) (Guzmán-Speziale, 1989; Delgado y Carballido, 1990; Vázquez y Villaseñor, 1990), como se muestra en la figura 5 (Cap. II). Es importante notar, el hecho de que la junta triple que menciona Guzmán-Speziale (1989), no es puntual, sino más bien difusa, esto con respecto a la definición de los otros autores anteriormente citados.

1.2.A.1. Placa de Norteamérica

La placa de Norteamérica está limitada al oeste por el Sistema de Fracturas de San Andrés-Golfo de California y la Trinchera de Centro-América; al este por la Cordillera Atlántica; al Sur por el Sistema de Fallas Motagua-Polochic (Fig. 4; Cap. II). La Placa de Norteamérica presenta una rotación hacia el oeste, ocasionada por el movimiento que proviene del Atlántico, por la generación de nueva corteza oceánica a lo largo de la cordillera meso-oceánica (Demant, 1978).

Dentro de la gran Placa de Norteamérica, y en las proximidades de nuestra zona de estudio, se encuentra el Eje Neovolcánico Transmexicano, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental.

El Eje Neovolcánico Transmexicano, es una cadena andesítica de más de 1000 Km de extensión, orientada a grandes rasgos E-W (Fig. 5, Cap. II), comprendiendo varios aparatos volcánicos con altitudes de hasta 5,594 m.s.n.m (Pico de Orizaba).

APÉNDICE 1, GEOLOGÍA DEL CENTRO-SUR DE MÉXICO

Demant (1978), establece que el Eje Transmexicano no es homogéneo, pero constituido por cinco distritos volcánicos con límites geográficos y características petrográficas diferentes. Es decir, en general, la actividad volcánica tal vez tenga alguna relación con la subducción del fondo Oceánico Pacífico (placa de Cocos), que se sumerge debajo de la placa de Norteamérica a la derecha de la Trinchera de Acapulco; la orientación oblicua de la cadena con respecto a la Trinchera y la existencia de varias provincias petrográficas pueden ser debido a las variaciones de las condiciones de convergencia entre estas dos placas, vinculadas a la historia reciente del Pacífico Oriental. No obstante, el vulcanismo del Eje Transmexicano data del Cuaternario y se sobrepone oblicuamente a los edificios antiguos de México Septentrional, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental (Carfantan 1986).

La Sierra Madre Oriental, se extiende del Eje Transmexicano a las Montañas Rocallosas según una dirección NNW-SSE (Fig. 5, Cap. II). A grandes rasgos, la Sierra Madre Oriental es una cadena plegada, constituida principalmente de formaciones sedimentarias marinas mesozoicas inicialmente carbonatos, después terrigenos. Estas descansan sobre una molasa continental roja discordante sobre un basamento Precámbrico y paleozoico. A su vez, estas soportan en discordancia molasas cenozoicas continentales (Carfantan, 1986). La estructura actual resulta de la superposición de varias fases tectónicas, de las cuales la fase Laramídica (compresiva) durante el Paleoceno, fue la responsable de las principales deformaciones.

Por último, la Sierra Madre Occidental presenta la misma orientación NNW-SSE (Fig. 5, Cap. II). Es un altiplano, que se extiende paralelamente al Golfo de California del Eje Transmexicano hasta el Norte de la Frontera con los Estados Unidos. Esta constituida por varios eventos volcánicos sobre todo ácidas, principalmente ignimbritas, donde se intercalan las riolitas, lavas intermedias y basaltos, estas últimas representan menos del 10% del volumen total (Carfantan, 1986). Este vulcanismo es principalmente del Oligoceno (con edades entre 34 y 23 Ma.; McDowell y Keiser, 1977; McDowell y Clabaugh, 1979; Cameron *et al.*, 1980, citado por Carfantan 1986). El conjunto es horizontal o ligeramente inclinado, tal vez ligeramente deformado por los pliegues de gran radio de curvatura. Reposo, en algunas partes, sobre andesitas y plutones deformados y alterados, de edad entre 100 y 45 Ma. Los autores citados anteriormente lo relacionan al vulcanismo marginal Pacífico mesozoico.

1.2.A.2. Placa de Cocos

La placa de Cocos esta localizada justo al Oeste de América Central y esta bordeada al Oeste por la Dorsal Oriental del Pacífico, al Sur por la Dorsal de Galápagos y el Este por la Trinchera de Centro-América. La Dorsal Oriental del Pacífico separa las placas de Cocos y Pacífico, ésta comprende tres zonas de fallas transformantes a lo largo de las siguientes estructuras: la Zona de Fallas de Orozco alrededor de la latitud 15°N, una zona de fallas sin nombre, cercana a la latitud 10.5°N y la Zona de Fallas de Siqueiros alrededor de la latitud 8°N (Fig. 5, Cap. II). El movimiento presente entre las placas del Pacífico y Cocos es aproximadamente Este-Oeste y esta representada por un polo relativo de rotación alrededor de la latitud 14.3°N, longitud 108.1°W (Minster *et al*, 1974).

La placa de Cocos se piensa que es un remanente de la antigua placa de Farallón (Mckenzie y Morgan, 1969; Atwater, 1970); y no se remonta más allá del Mioceno Inferior, al menos hasta el sur de Guatemala (Carfantan 1986), mientras que la Dorsal de Galápagos se rompió a lo largo de la placa de Farallón entre las Placas de Cocos y Nazca (Hey *et al*, 1972).

1.2.A.3. Placa del Caribe

La placa del Caribe esta localizada al este de América Central y esta bordeada al noroeste por el Sistema de Fallas Motagua-Polochic; al noreste por la Fosa de Puerto Rico; al suroeste por la Fractura de Panamá, al sureste por las Fallas Oca-El Pilar (Norte de América del Sur); al este por la Zona de Subducción de las Pequeñas Antillas; y al oeste por la Trinchera de Centro-América (Fig. 4; Cap. II).

El desplazamiento entre las placas de Norteamérica y del Caribe es de sentido sinistral, a través del Sistema Motagua Polochic. Este movimiento relativo entre las dos placas se originó a partir del Oligoceno Temprano, y como consecuencia la formación de pliegues de fondo perpendiculares a la dirección de compresión y de fallas de tensión paralelas a la dirección de los esfuerzos principales los cuales están vinculados a su vez con la diferente orientación entre el Eje Neovolcánico y la Cadena Volcánica de América Central (Demant, 1978).

Demant (1978) menciona que en varias ocasiones han considerado que el movimiento relativo de la Placa del Caribe es en dirección este, pero que en realidad la placa de Cocos se hunde a la altura de Centro-América (Fig. 4; Cap. II), y por lo tanto no esta empujando a la placa del Caribe. Además señala dicho autor, la existencia de una Zona de Subducción hacia el oeste (Zona de Subducción de la Pequeñas Antillas, Fig. 4; Cap. II), donde una parte del piso oceánico se hunde debajo de otra parte más antigua del fondo oceánico Atlántico, originando que la placa del Caribe no se desplace hacia el oeste como sucede con la placa de América del Norte. Por otra parte, la Fosa del Caimán y el sistema Motagua-Polochic juegan el papel de una fallas transformante entre la placa de Norteamérica que se desplace hacia el poniente y la placa del Caribe que se considera fija (Jordan, 1975, citado por el autor; Demant, 1978).

1.2.B. Las fronteras Mayores.

Las estructuras tectónicas mayores involucradas, son el limite entre las placas de Norteamérica y Caribe correspondiendo a los sistemas de fallas transcurrentes sinistral Polochic-Cuilco-Chixoy, Motagua y Jocotán-Chamelecón (Fig. 5, Cap. II), que por comodidad las llamaremos "Sistema Motagua-Polochic". Por otro lado, tenemos la Trinchera de Centro-América dividida en dos porciones debido a las características que impone la placa de Cocos, así como los rasgos litológico-estructurales.

1.2.B.1. La Trinchera de Centro-América.

Los datos de sismicidad (Ponce *et al*, 1992; Vázquez y Villaseñor, 1990, Fig. 6, Cap. II) y la solución de mecanismos focales (Dean y Drake, 1978) revelan características típicas de una zona de subducción de la Placa de Cocos debajo de las Placas de América del Norte y del Caribe.

Batimétricamente, la Trinchera está identificada por las isobatas de 5000 y 5500 metros hacia el Oeste y Sureste de la Dorsal de Tehuantepec (Fig. 7, Cap. II), correspondiente a las costas de Oaxaca y Chiapas-Guatemala, respectivamente. Por otra parte, las anomalías de aire libre positivas se extienden hacia el NW, a lo largo de la plataforma exterior de Guatemala, con un

flexión repentina hacia el continente a la altura del Golfo de Tehuantepec (Delgado y Carballido, 1990; Fig. 1.1).

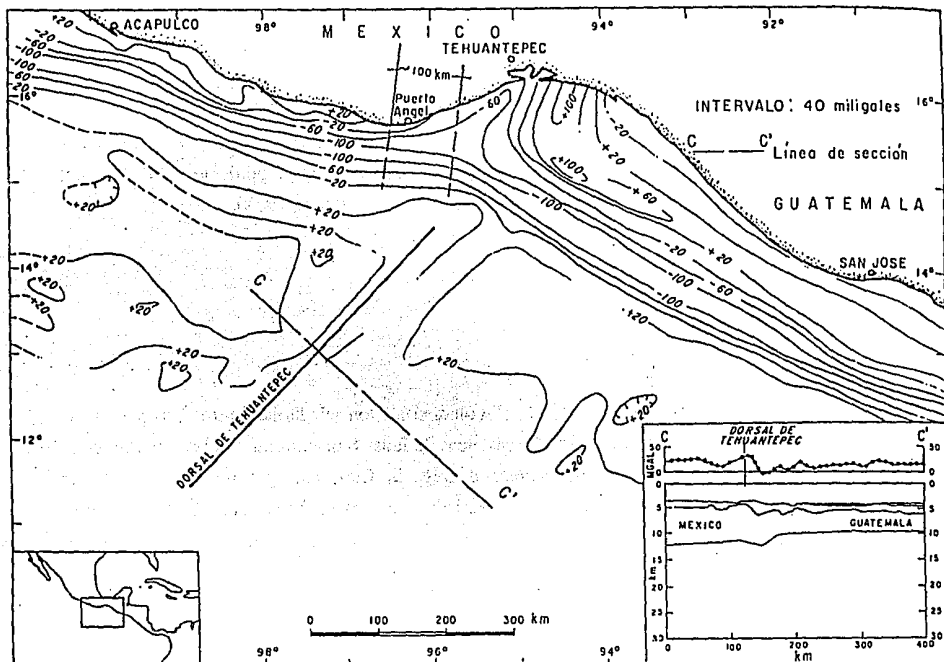


Fig. 1.1. Mapa de anomalía de gravedad de aire libre de la margen continental del sur de México y Guatemala; y sección cortical de la placa de Cocos, perpendicular a la Dorsal de Tehuantepec. (tomados de Delgado y Carballido, 1990)

La profundidad de la discontinuidad de Moho en la placa de Cocos, en los costados de la Dorsal de Tehuantepec, determinada por sismología de refracción, es de 12 Km hacia el NW y de 9.5 hacia el SE; se menciona además la existencia de una gran cuenca de sedimentación de forma alargada cuyo eje mayor es paralelo a la línea de la costa entre Puerto Ángel y Salina Cruz; la edad de la corteza oceánica al NW es de aproximadamente 10 Ma., y para el SE, es de 20 Ma. (Couch y Woodcock, 1981).

No obstante, el sistema de fracturas de la Dorsal de Tehuantepec se pudo haber formado hace 8 Ma. (Lynn y Lewis, 1976) de tal forma que el mínimo cambio en el movimiento de Cocos-

Pacífico y una reorientación de 20° de la Dorsal Oriental del Pacífico ocasionó la discordancia entre el alineamiento de la Dorsal de Tehuantepec y las zonas de fractura de Clipperton y Siqueiros (Fig. 8, Cap. II).

Por otra parte, la inclinación de la Zona de Benioff ha sido definida por varios autores, según Dean y Drake (1978) en 15° para la zona correspondiente al NW de la Dorsal de Tehuantepec (México) y de 21° para la zona de Guatemala, con vectores de desplazamiento relativo (subducción) entre una y otra zona de N35°E y N20°E y velocidades de 8 y 7 cm/año (Drummond, 1981, citado por Delgado y Carballido, 1990), respectivamente; y según Havskov *et al* (1982) esta definida por un plano de 45° de inclinación; mientras que los estudios de microsismos efectuados por Ponce *et al* (1992), revelan planos de subducción a partir de los 96° de longitud oeste de 45° a 50° hacia la longitud este.

1.2.B.2. El Sistema Motagua-Polochic

El sistema transformante Motagua-Polochic, incluye los sistemas Cuilco-Chixoy-Polochic (Rose *et al* 1975; citado por Delgado y Carballido, 1990), observándose al Norte de Guatemala y al Sur de Chiapas. El Sistema Motagua-Polochic funciona como límite entre las placas de América del Norte y del Caribe, con movimiento lateral izquierdo (Fig. 5, Cap. II); a pesar del sentido izquierdo del sistema, se pueden observar fallas secundarias de desplazamiento lateral derecho; lo anterior se puede deber a la compresión asociada con un sistema de subducción posterior al Mioceno Tardío (Burkart, 1983; Burkart *et al* 1987). En base a las dataciones de rocas volcánicas (Deaton y Burkart (1984), y otras evidencias estratigráficas, se considera que la actividad de esta falla es de 10.3 Ma. a 6.6 Ma., haciéndola síncrona y genéticamente relacionada con la Dorsal del Caimán.

Por último, la existencia de un cambio de orientación del sistema Polochic, respecto a los lineamientos del área del Istmo de Tehuantepec, ocasionó el desarrollo de una Cuenca Marginal entre Puerto Ángel-Macuspana (Delgado y Carballido, 1990).

1.2.B.3. La Junta Triple

Una de las soluciones que se han propuesto al sistema Tehuantepec se presentan en la figura 1.2, en la cual se tiene una evolución de la Trinchera de Centro-América a lo largo del sistema de fallas de Motagua-Polochic, definida como izquierda. En la cual se plantea la evolución de la junta triple a partir de una región frente a las costas de Puerto Ángel, en la zona donde se inicia la flexión principal de la Trinchera y el inicio de la cuenca definida por gravimetría y denominada "Cuenca de Salina Cruz" (Delgado y Carballido, 1990). De acuerdo a las edades fechadas de la Trinchera y la actividad de la Dorsal de Tehuantepec se tiene una evolución de la junta triple que inició hace 10 Ma., cuyos cambios no han sido substanciales con respecto a su geometría inicial; lo anterior se establece, bajo la consideración de que las velocidades relativas entre las placas no variaron significativamente.

Geoméricamente, la evolución de la junta triple explica la inflexión de la Trinchera y la generación de la Cuenca de Salina Cruz apoyándose en la geometría de la solución vectorial. El traslado de la porción SE de la Trinchera, sin considerar la Dorsal de Tehuantepec como un rasgo activo, permite conservar la orientación de la Trinchera hacia el SE, como se encuentra actualmente. Por otro lado, el vértice en el cual convergen las proyecciones de las dos porciones de la Trinchera definen un ángulo que evoluciona desde N63°E a N70°E donde, aparentemente, se estabiliza o al menos el cambio no es muy drástico como en las primeras etapas de desarrollo, considerando una migración a lo largo de más de 100 Km como se muestra en la figura 1.2 (según, Delgado y Carballido, 1990).

En resumen, la actividad de la junta triple, define un sistema tectónico inestable con migración al Este a lo largo del Sistema Polochic, ocasionando el desarrollo de una cuenca marginal entre Puerto Ángel y Salina Cruz, y como consecuencia se origina un sistema transpresivo de sentido siniestro y la existencia de un bloque activo con rotación en el sentido de las manecillas del reloj, cuyos límites no están bien definidos al Norte.

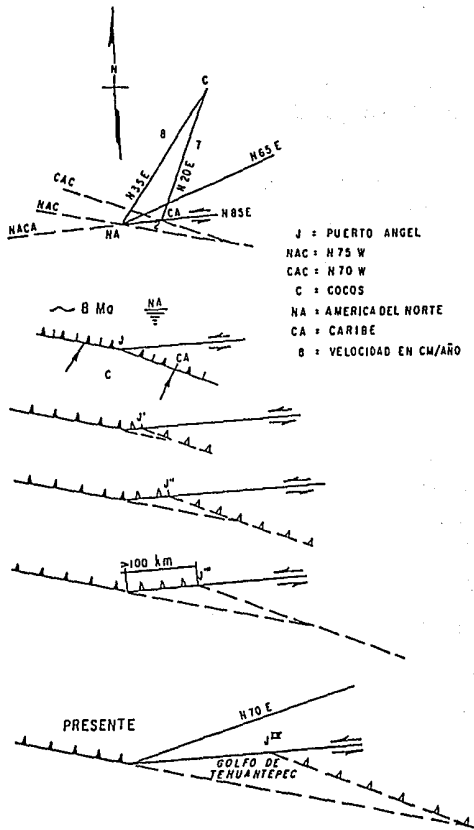


Figura 1.2. Geometría de la estabilidad de la Junta Triple de Tehuantepec y evolución a partir de Puerto Ángel, hace 8 Ma. aproximadamente. (Delgado y Carballido, 1990).

1.3 ESQUEMA GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la provincia geológica Sureste de México (XIV; López-Ramos, 1979), la cual a su vez se subdivide en las subprovincias siguientes:

- A. Cuencas Terciarias del Sureste.
 - 1. Tabasco.
 - 2. Istmo de Tehuantepec.
- B. Sierra de Chiapas.
- C. Macizo de Chiapas.
- D. Planicie Costera de Chiapas.
- E. Porción Sur del Istmo de Tehuantepec.

Como se puede apreciar en la figura 9 (Cap. II), ésta provincia está situada en la porción del Sureste de México conjuntamente con la Provincia Plataforma Yucatán-Campeche (XV). Sus límites al Norte lo constituyen el Golfo de México; al Sur el Océano Pacífico; al Este la República de Guatemala y una línea aproximadamente N-S al oriente de Cd. del Carmen, Campeche; al Oeste las provincias Cuenca de Veracruz, Sierra Madre del Sur, los Altiplanos de Oaxaca y de San Andrés Tuxtla.

Esta provincia esta caracterizada por la conjunción de diferentes alineamientos tectónicos, cuyos orígenes y evolución han sido motivo de controversias, debido al cambio notable entre una zona muy plegada y afallada como la Sierra Madre de Chiapas, y por otra parte, la Cuenca Terciaria de Veracruz-Tabasco con una plataforma estable desde el Cretácico Medio (López-Ramos 1979).

En base a la información de pozos petroleros y de geología superficial, se presenta a continuación un panorama geológico sobre la estratigrafía y tectónica de los conjuntos geológicos del Sureste de México, donde se incluye principalmente el Istmo de Tehuantepec, Tabasco y Chiapas.

1.3.A. Cuadro General: El Centro-Sur de México

Según Carfantan (1986), los principales conjuntos geológicos mayores presentes en el Sureste de México son (Fig. 10, Cap. II):

1. El Antepaís Maya.
2. El Dominio Olmeca, Chiapaneco y Quiche.
3. Sierra de Juárez.
4. Dominio Oaxaqueño o Bloque de Oaxaca.

1.3.A.1. El Antepaís Maya

El Antepaís-Maya esta situado al Norte, de las primeras cadenas plegadas de México, de Guatemala y Honduras. Comprendiendo la Península de Yucatán una gran parte de la Provincia de *Petén* de Guatemala y la región situada al Norte de los Montes Mayas a Honduras. En la región mencionada sólo el Cenozoico aflora, sin embargo, las formaciones más antiguas son conocidas gracias a los numerosos pozos petroleros, lográndose identificar el basamento pre-Mesozoico. Los accidentes principales presentan una orientación SSW-NNE y afectando principalmente la parte oriental del dominio.

1.3.A.2. El dominio Olmeca, Chiapaneco y Quiche.

Posteriormente al Antepaís Maya, viene un largo cinturón plegado tardíamente. Es este criterio estructural permite englobar en un mismo dominio las Cuencas Terciarias de los geólogos petroleros, el Conjunto de Chiapas y sus prolongamientos Guatemaltecos. Los afloramientos de la Planicie Costera del Golfo de México y los pozos petroleros muestran que esta región esta plegada al igual que Chiapas.

La región Chiapaneca se extiende en prácticamente todo el Estado de Chiapas y una parte de los estados de Veracruz y Oaxaca.

El Dominio Quiche es una de las provincias de Guatemala, atravesando por la parte alta de la Sierra de los Cuchumatanes y la Sierra de Chama que prolonga los pliegues de Chiapas; la región Quiche al Conjunto plegado situado en Guatemala y Honduras entre el Antepaís Maya y el Sistema Polochic.

El Basamento pre-Mesozoico del cinturón plegado Olmeca, Chiapaneco y Quiche aflora en Chiapas detrás de la cadena. La cobertura Mesozoica, excepto una pequeña capa molásica continental post-Apalachiana, esta constituida esencialmente por un espesor de calizas de plataforma. El Terciario es predominantemente detrítico. En la parte Olmeca del dominio y la región occidental de Chiapas estos depósitos, de carácter molásico, son marinos y particularmente copetentes. Al Este de Chiapas y en la región Quiche son de dominio continental y de espesor más reducido.

La estructuración del dominio externo resulta de la superposición de varias fases tectónicas. De las cuales Carfantan (1986), reconoce:

Una fase de distensión precoz, Triásica-Jurásica, dividiendo el amazón Paleozoico en fosas y pilares, permitiendo la ascensión de material volcánico. Entra en el marco de la distensión Triásica-Jurásica del Golfo de México y de sus márgenes, debida a la progresión hacia el Oeste del Tetys. A la altura del Golfo, el Tetys no rebasará un estado oceánico restringido. Abandonará esta vía en el límite del Jurásico y Cretácico.

Una fase orogénica Sub-Herciniana, determina la emersión en el límite del Senoniano Inferior-Senoniano Superior, y la erosión de las regiones internas del Dominio Chiapaneco. Es el contra-golpe de una fase compresiva mayor, Sub-Herciniana, conocida en el Dominio Caribeño.

Una fase orogénica de fracturación Laramídica, durante el Paleoceno, provoca la fracturación del Dominio Chiapaneco a partir del límite del Cretácico y Paleoceno, finalizando con la emersión, en el límite del Paleoceno y Eoceno, de la mayor parte del Dominio Chiapaneco y de la totalidad del Dominio Quiché.

Esta fracturación esta relacionada con el nacimiento del proto-sistema Motagua-Polochic y de la apertura de la cuenca de Yucatán.

Una fase compresiva mayor "Chiapaneca", durante el Mioceno Superior, es la fase esencial. La cobertura, despegada al nivel de las evaporitas, se deforma dibujando pliegues de estilo "Jurásico". Simultáneamente la fallas Laramídicas reactivadas actúan en fallas transcurrentes izquierdas provocando torsiones axiales y cabalgamientos de alcance limitado. De la misma manera, pero a escala del dominio, la terminación meridional del edificio sufre una torsión general debido a la actividad transcurrente izquierda del sistema Motagua-Polochic.

Finalmente, una tectónica distensiva Plio-Cuaternaria, se traduce notablemente por la presencia en Chiapas, de una gran depresión en formación paralela al límite del Pacífico homóloga a las depresiones costeras Centroamericanas. Dicha tectónica distensiva resulta del régimen "convergencia-extensión" entre la placa de Cocos y de la Placa de Norteamérica a la altura del Dominio Chiapaneco. Este mismo régimen, al sur del sistema Motagua-Polochic, entre la placa de Cocos y del Caribe, provocó la formación de las depresiones costeras Centroamericanas.

1.3.A.3. La Sierra de Juárez.

El frente de la Sierra de Juárez pasa, a nivel del Istmo de Tehuantepec detrás del basamento de Chiapas del cual cabalga la cobertura meridional, después desaparece debajo de los aluviones de la Planicie Costera del Pacífico. Su límite Oeste corresponde a importantes fallas verticales orientadas preferencialmente N20°E y N160°E (Carfantan, 1986).

La Sierra de Juárez comprende dos grandes conjuntos:

a. Un Dominio Externo, ubicado al NE, formado por series marinas principalmente carbonatadas neríticas del Kimmeridgiano-Paleoceno. El cual se encuentra caracterizado por:

i. Una tectonización sub-Herciniana del Dominio Interno se traduce por la aparición de facies detríticas en el Campano-Maestrichtiano.

ii. Una fase compresiva Laramídica es el evento mayor. Provocando el plegamiento y la emersión de los terrenos Mesozoicos-Paleocenos y la estructuración del edificio en diversas unidades tectónicas cabalgantes.

b. Un Dominio Interno, ubicado al W y SW, cabalgando el Dominio Externo. Comprende las unidades del basamento y las Unidades Mesozoicas predominantemente detríticas, encerrando los elementos ofiolíticos y en parte epimetamórficos. La franja de serpentina más importante aflora al Este de la localidad de Cuicatlan, razón por la cual Carfantan (1986) la menciona Cuenca Cuicateca a estas formaciones. Dentro de este dominio se reconocen:

i. Una fase distensiva precoz. Los datos rediométricos y estratigráficos permiten situar la apertura de la Cuenca Cuicateca al límite del Jurásico-Cretácico y el fin de su actividad magmática extensiva en el Hauteriviano.

ii. Una fase compresiva sub-Herciniana responsable, del primer plegamiento y del metamorfismo de las series de la Cuenca Cuicateca, del acarreo del Dominio Interno sobre el Dominio Externo y de su emersión.

iii. Una fase compresiva Laramílica pliega el nuevo edificio y provocan cizallamientos que afectan también el basamento de la margen occidental de la cuenca.

iv. Una fase compresiva de edad Mioceno Temprano provoca amplios pliegues de fondo.

v. Un fallamiento Cenozoico cuyas manifestaciones más espectaculares son las fallas del Sistema Cuicateco. Presentando una componente horizontal izquierdo pero los deslizamientos laterales quedaron limitados. Se superponen a los accidentes crustales Cretácicos y sus actividades durante el Cenozoico están ligadas a la evolución de la Margen Pacífica.

La Sierra de Juárez, al igual que la Sierra Madre Oriental emergen en su totalidad en el Paleoceno. Por lo consiguiente se depositan las molasas continentales discordantes después de los derrames volcánicos cubriendo una gran parte del edificio, particularmente en sus regiones meridionales.

1.3.A.4. El Dominio Oaxaqueño o Bloque de Oaxaca

Al W de las fallas que limitan la Sierra de Juárez, el Dominio Oaxaqueño comprende la Meseta Alta de Oaxaca y la región oriental de la Cuenca de Morelos-Guerrero.

Los afloramientos del Basamento Precámbrico y Paleozoico Inferior ocupan una gran superficie del Dominio Oaxaqueño. Un contacto tectónico mayor, antiguo, permitió subdividir el Basamento en dos grandes conjuntos: al Este el Dominio Zapoteco, constituido por paragneiss y ortogneiss granulíticos cuyas edades del metamorfismo es Grenvillana, éstas rocas metamórficas son cubiertas de raros jirones sedimentarios del Paleozoico Inferior y Superior; y el Oeste el Dominio Mixteco, esta formación comprende las rocas metasedimentarias y metafoliáticas ("Esquistos Acatlán") cuyo metamorfismo se remonta al Paleozoico Inferior.

El Dominio Oaxaqueño posee una cobertura sedimentaria Mesozoica de espesor reducido en su parte central y meridional. Aumentando considerablemente en la periferia del macizo donde las facies son más profundas. Esta reconocida una discordancia por los depósitos molásicos continentales, de los productos piroclásticos y lavas del Cenozoico.

En el límite del Senoniano Temprano-Senoniano Tardío, una fase Sub-Herciniana, de la Cuenca Cuicateca, es el resultado del acercamiento del Dominio Oaxaqueño-Honduras y de la plataforma oriental sud-mexicana. Por otro lado, la generalización de las facies detríticas a partir del Campaniano sobre el borde occidental del Dominio Oaxaqueño y en sus regiones centrales puede atestiguar una reactivación tectónica sub-Herciniana del edificio orogeniano occidental.

Una fase Laramíca, provoca una intensa deformación seguida de fallamiento inverso en los bordes oriental y occidental del Dominio Oaxaqueño, especialmente se su borde occidental sobre el cuál se avanzó más la frente del edificio orogeniano-subherciniano.

Una fase del Mioceno Temprano, caracterizada por una tectónica de pliegues de fondo, esta especialmente expresada sobre el borde oriental del macizo.

Finalmente una tectónica de fallamiento del Cenozoico, representada por fallas asociadas por una parte al Sistema Cuicateco de orientación general NNW-SSE; y por otra parte, al Sistema Atoyac de orientación general WNW-ESE y ENE-WSW, paleofrontera transcurrente izquierda de las placas de Norteamérica y Caribeña.

1.3.B. Geología del Istmo de Tehuantepec

La estratigrafía del Istmo de Tehuantepec ha sido estudiado por diversos autores (Bose, 1905; Hinojosa, 1961; Hegwein *et al*, 1965; De Cserna, 1965; Abacuc, 1976; citados por López Ramos 1978; Carfantan, 1986; entre otros), los cuales han tratado de explicar los eventos tectónicos y las formaciones involucradas en la compleja historia geológica de esta región. Es importante señalar, que debido a los intereses petroleros que representa dicha región, los estudios se encuentran enfocados principalmente para las edades del Mesozoico, lo cual viene a justificar en gran medida, la incertidumbre que se tiene en la estratigrafía del Neógeno, la cual se discute en el capítulo III.

A grandes rasgos, la estratigrafía de la zona de estudio se puede observar en la figura 1.3.

1.3.B.1. Estratigrafía del sector Noroccidental de Chiapas (Dominios Olmeca, Chiapaneco y Quiche).

El Basamento aflora en Chiapas, a lo largo de la margen pacífica actual, del sistema Polochic al Istmo de Tehuantepec. Comprendiendo tres grandes conjuntos (Fig. 1.3): la formaciones metamórficas Caledonianas; probablemente Cambro-Ordovicianas únicamente; las formaciones sedimentarias neríticas de edad Carbonífero-Pérmico Medio; los plutones graníticos Permo-Triásicos, siendo el principal el enorme batolito costero de Chiapas;

La cobertura está constituida por una molasa discordante sobre el zócalo, series sedimentarias neríticas Mesozoicas (esencialmente carbonatadas) y series terrigenas marinas o continentales de edad Paleoceno-Mioceno Medio. Las cuales de encuentran selladas en discordancia angular, por depósitos fluvio-lacustres o localmente marinos, y formaciones volcánicas Plio-Cuaternarias (Fig. 1.3).

Las formaciones Ante-Pliocenas están representadas por una molasa continental Post-Apalachiana, Series Neríticas Mesozoicas y las Series Terrigenas Terciarias.

La molasa continental presenta las facies "Nuevas Areniscas Rojas" y descansa con una discordancia angular sobre el edificio Herciniano y los plutones Permo-Triásicos; así mismo, contiene derrames volcánicos de edad Jurásico Medio y Oxfordiano.

Por su parte, las Series Nerfíticas Mesozoicas se formaron durante la transgresión del Mesozoico, lo que explica la presencia de evaporitas e intercalaciones marinas, de edad Jurásico Medio en la cima de la molasa Post-Apalachiana. Teniendo su origen en el Oxfordiano, al mismo tiempo que la apertura oceánica del Golfo de México, culminando al final del Jurásico.

Sin embargo, las facies y la distribución de las series de edad Neocomino-Aptiano muestran un retroceso del mar en Chiapas, contemporáneo de la transgresión del Antepaís Maya. La cual es interpretada por Carfantan (1986), como una consecuencia de la interrupción de la apertura oceánica a la altura del Golfo de México.

A partir del Albiano el basamento está totalmente sumergido, bajo estas condiciones se deposita una potente serie de calizas de plataforma en el Albiano-Senoniano Inferior.

No obstante, en el Campaniano-Maestrichtiano se depositan terrígenos litorales (Dominios Olmeca, Chiapaneca y Quiché). Mientras que la sedimentación queda carbonatada en otras regiones.

Por último, las Series Terrígenas Terciarias, durante el Paleoceno son detríticas en el dominio Olmeca, de facies *brechica* y margosa en la parte Noroccidental del Dominio Chiapaneca, y carbonatado principalmente en el resto del dominio Chiapaneca y Quiché.

En el límite Paleoceno-Eoceno se presenta una regresión importante, lo que explica la presencia de molasas continentales del Eoceno Inferior depositadas en la mayor parte del Dominio Chiapaneca y Quiché. Al mismo tiempo, en el Dominio Olmeca la sedimentación detrítica marina continúa.

Del Eoceno Medio al Mioceno Medio, de una y otra parte de una línea fluctuante, se acumulan, series detríticas marinas muy gruesas en el Dominio Olmeca y en el noroeste del Dominio Chiapaneca, continentales y menos potentes en el sureste de este dominio y en el de Quiché.

Las formaciones Plio-Cuaternarias, están representadas por sedimentos fluvio-lacustres depositados principalmente en los sinclinales producto de la tectónica Post-Mioceno Medio; sedimentos marinos de edad Plioceno Medio localizados en las proximidades del Golfo de México (Fig. 1.3); formaciones volcánicas calco-alcalinas y plutones hipoabisales alineados paralelamente a la Costa del Pacífico y engendrados por la subducción de la placa de Cocos. Finalmente, derrames alcalinos e hiper-alcalinos sobre el borde Oeste del Golfo, están vinculados a a distensión reciente de su margen.

1.3.B.2. Regiones Centrales y Meridionales del Istmo de Tehuantepec.

Las regiones Centrales y Meridionales del Istmo de Tehuantepec, pertenecen a tres de los grandes dominios geológicos Sud-Mexicanos, de NNE a SSW, el basamento y la cobertura del Dominio Externo; la Sierra de Juárez en su extremidad meridional; la correa Cordillerana de la Sierra Madre del Sur en su extremidad oriental (Fig. 11.A, Cap. II).

El basamento del Dominio Externo (Fig. 11.A, Cap. II), está representado, al Este del Istmo por el Batolito Permo-Triásico de Chiapas, y al Oeste, por el Batolito de la Mixtequita de la misma edad. Por su parte, la cobertura septentrional de los batolitos es la de los dominio Olmeca y Chiapaneca. Su cobertura axial y meridional se caracteriza por la molasa continental Post-Apalachiana; una serie litoral del jurásico tardío localizada en la depresión Norte-Sur situada entre los dos batolitos; calizas de plataforma pertenecientes a una serie de edad Albiano-Senoniano Temprano, erosionadas en gran parte, y descansando directamente sobre la molasa Post-Apalachiana en las regiones meridionales del Istmo; depósitos continentales Plio-Cuaternarios discordantes.

Por su parte la extremidad meridional de la Sierra de Juárez, incluye tres grandes unidades: la Unidad Frontal, la Unidad Intermedia y la Unidad Principal.

La Unidad Frontal, está constituida por una serie detrítica epimetamórfica, originalmente continental (molasa Post-Apalachiana metamorfozada) en la base; mármoles concordantes con rudistas Albiano-Cenomaniano.

La Unidad Intermedia, se caracteriza por una serie detrítica epimetamórfica originalmente marina (Neocomaniano-Aptiano(?)), metamorfozada en el Campaniano Temprano; mármoles concordantes en capas delgadas y con lechos de pedernal.

La Unidad Principal está constituida esencialmente por las formaciones del Mesozoico de la cuenca "Cuicateca", que incluyen en la base una serie epimetamórfica con metagrauvascas y metabas encerrando lentes de serpentinitas y donde se intercalan derrames diabásicos; esquistos cloritosos y sericitosos y cuarcitas desprovistos de elementos ofiolíticos; mármoles concordantes de edad Albiano-Cenomaniano; Plutones tectonizados de edad Cretácico Tardío que atraviesan las formaciones de la cuenca Cuicateca; y finalmente, formaciones sedimentarias discordantes rojas atribuidas al Campaniano-Maestrichtiano.

La distribución de las facies de esas tres unidades muestra el paso del Este hacia el Oeste de una plataforma carbonatada Mesozoica a una cuenca que presenta características oceánicas, ligadas a eventos tectónicos distintos, limitadas por fallas inversas inclinadas hacia el Pacífico.

Las Formaciones Terciarias (Fig. 1.3) están representadas en la base, por una potente molasa continental roja Post-Laramíca del Eoceno-Oligoceno, y por formaciones vulcanogénicas y plutones congénitos del Mioceno, vinculados a la subducción de la paleo-placa de Cocos.

La Extremidad Oriental de la Sierra Madre del Sur, se considera como una parte de la correa Cordillerana Occidental (Fig. 11.A, Cap. II), de orientación WNW-ESE, comprendida entre el Sistema Atoyac y la Fosa de Acapulco. Se subdivide en tres unidades tectónicas cabalgantes, limitadas por cizallamientos inversos inclinados hacia el Pacífico.

Esas unidades están constituidas por un basamento metamórfico representado por migmatitas de palcozona de anfibolitas, gneises y micaesquistos caledonianos.

La cobertura se caracteriza por terrenos Mesozoicos epimetamórficos, iniciando con rocas metadetríticas (molasa Post-Apalachiana metamorfozada), culminando con rocas metavolcánicas andesíticas y metavolcano-detríticas que encierran lentes de mármoles de rudistas de edad Albiano-Cenomaniano (arco Chontál). Estos vulcanógenos, están rematados por molasas marinas discordantes del Maestrichtiano, las cuales son atravesadas por numerosos intrusivos y sellados por depósitos continentales Terciarios.

Por último se tiene, que al igual que la Sierra de Juárez, molas continentales Post-Laramfídicas están rematadas por formaciones volcánicas del Mioceno (Fig. 1.3).

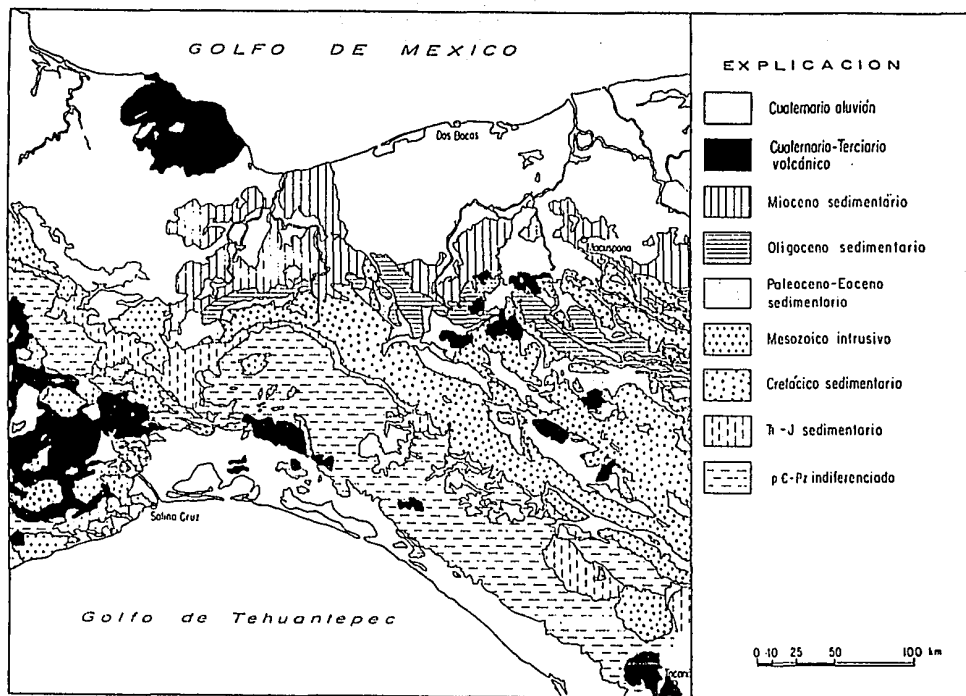


Fig. 1.3. Mapa Geológico del Centro-Sur de México (Delgado y Carballido, 1990).

BIBLIOGRAFÍA

- ATWATER, T., 1970, Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol. Soc. America Bull.*, v. 81, pp. 3513-3536
- BURKART, B., 1983, Neogene North America-Caribbean plate boundary across northern Central America-Offset along the Polochic fault. *Tectonophysics*, v. 99, pp. 251-270.
- BURKART, B., DEATON, B. C., DENGU C., AND MORENO G., 1987. Tectonic wedges and offset Laramide structures along the Polochic Fault of Guatemala and Chiapas, Mexico: Reaffirmation of large Neogene displacement. v. 6, No. 4, pp. 411-422.
- CARFANTAN, J. C., 1986, Du Systeme Cordillerain Nord-Americain au Domaine Caribe. *Mémoire de thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Univerité de Savoie*. v. I et II.
- COUCH, R., AND WOODCOCK S., 1981, Gravity and Structure of the Continental Margins of Southwestern Mexico and Northwestern Guatemala. *J. Geophys. Res.* v. 86, No. B3, pp. 1829-1840.
- DEAN, B. W., AND DRAKE, C. L., 1978 Focal mechanism solutions and tectonics of the Middle America Arc. *J. of Geology*, v. 86, pp. 111-128
- DEATON, B. C., AND BURKART, B., 1984, Time of sinistral slip along the Polochic fault of Guatemala. *Tectonophysics*, v. 102, pp. 297-313
- DELGADO-ARGOTE, L. A., Y CARBALLIDO-SÁNCHEZ, E. A., 1990, Análisis tectónico del Sistema Transpresivo Neogénico entre Macuspana, Tabasco, y Puerto Ángel, Oaxaca, Mexico. *Rev. Inst. Geología, UNAM*, v. 9, No. 1, pp. 21-32
- DEMANT, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Rev. Inst. Geología, UNAM*, v. 2, No. 2, pp. 172-187
- HAVSKOV, J., SINGH, S. K., Y NOVELO, D., 1982, Geometry of the Benioff zone in the Tehuantepec area in southern Mexico. *Geofísica Internacional (México)*, 21, pp. 325-330.
- HEY, R. N., DEFFEYES, K. S., LEONARD, G., AND LOWRIE, A., 1972, The Galapagos triple junction and plate motions in the east Pacific. *Nature*, v. 237, pp. 20-22.

- JORDAN, T. H., 1975, The present day motions of the Caribbean plate. *J. Geophys. Res.*, v. 83, pp. 3427-3434.
- LÓPEZ-RAMOS, E., 1979, *Geología de México*, 2da. Edición, Tomo III, pp. 157-262.
- LYNN, W. S., AND LEWIS, B. T. R., 1976, Tectonic evolution of the northern Cocos plate. *Geology*, v. 4, No. 12, pp. 718-722.
- MINSTER, J. B., JORDAN T. H., MOLNAR P., and HAINES E., Numerical modeling of instantaneous plate tectonics. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, v. 36, pp. 541-576.
- MCDOWELL, F. W., Y CLABAUGH, S. E., 1972, Edades potasio-argón de rocas volcánicas en la Sierra Madre Occidental al noreste de Mazatlán; Mazatlán. *Soc. Geol. Mexicana, Convención Nal.*, v. 2, Resúmenes, pp. 182-185 (resumen).
- MCDOWELL, F. W., AND KEIZER, R. P., Timing of mid-Tertiary vulcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico. *Geol. Soc. America Bull.*, v. 88, pp. 1479-1487.
- MCKENZIE, D. P., MORGAN, W. J., 1969, Evolution of Triple Junctions. *Nature*, 224, pp. 125-133.
- MORÁN-ZENTENO, D. J., 1984, *Geología de la República Mexicana*. INEGI, UNAM. México. pp. 77-85
- PONCE, L., GAULON, R., SUÁREZ, G., AND LOMAS, E., 1992, Geometry and state of stress of the Downgoing Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec, Mexico. *Geophys. Res. Lett.* v. 19, No. 8, pp. 773-776.
- VÁZQUEZ, M. M. E., VILLASEÑOR, R. P. E., SÁNCHEZ, Q. R., Y ISLAS, C. M. A., 1990, Integración Tectónica-Estructural en el Prospecto "Sierra de Chiapas". Informe Inédito IMP, México. pp. 1-65

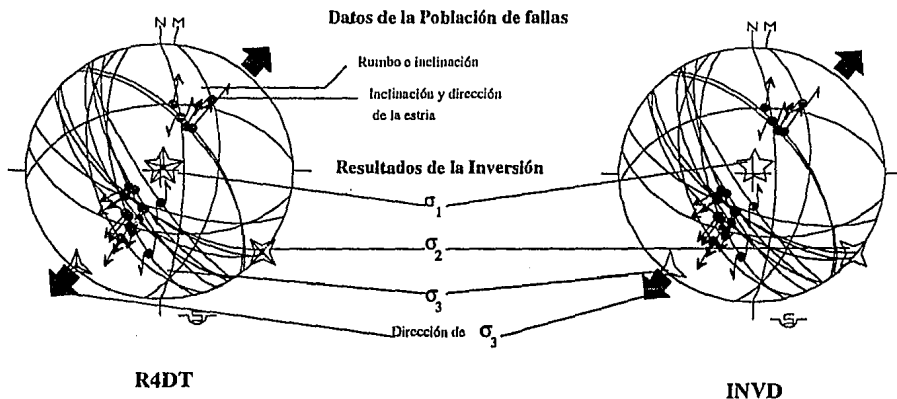
A P E N D I C E 2

RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE NEOTECTÓNICA DEL CENTRO-SUR DE MÉXICO

C O N T E N I D O

1. ZONA NORTE	2-2
1.1. ÁREA DE CATEMACO (CATE)	2-2
1.2. ÁREA NORTE (NORD)	2-7
2. ZONA CENTRO (CENT)	2-22
3. ZONA SUR	2-35
3.1. ÁREA SUROESTE (SUDE)	2-35
3.2. ÁREA SURESTE (SUD)	2-44

A continuación se presentarán los resultados del procesamiento de la información recabada de las campañas de campo, dichos resultados se obtuvieron a través de los algoritmos INVD y R4DT ya descritos en III.1.B.3 y de acuerdo a los criterios de selección mencionados en III.1.B.4 y III.1.B.5.



En las figuras mostradas arriba se resume la nomenclatura de los resultados obtenidos mediante los algoritmos de R4DT y INVD, de la estación NORD9302 (en este caso). Los símbolos aquí mostrados se asocian a los esfuerzos de la siguiente manera: la estrella de cinco picos (\star para INVD, \star para R4DT) al esfuerzo σ_1 , la de cuatro picos (\star para INVD, \star para R4DT) al esfuerzo σ_2 y la de tres picos (\triangle para INVD, \triangle para R4DT) al esfuerzo σ_3 . Lo anterior de acuerdo con las ecuaciones (3.10 y 3.11) del Cap. III sección 1.B.3. La dirección del esfuerzo principal σ_3 se representa por la flechas negras ($\leftarrow \rightarrow$) que en el caso que nos ocupa corresponde a un campo de esfuerzos extensional.

1. ZONA NORTE

1.1 ÁREA DE CATEMACO (CATE)

CATE9301

LOCALIZACIÓN: 18°19'28" Lat. N-95°05'47" Long. W. Estación a un costado de la carretera Acayucan-Catemaco, a 500 m al sur del poblado Zopoapan de Cabañas, Ver. (entrada al rancho "El Chorrito")

FORMACIÓN: Roca volcánica extrusiva; coladas de lavas de composición basáltica, muy fracturada e intemperizada de color rojo. Plio-Cuaternaria (Volcánico continental).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrias bien definidas, los cuales indican dos tipos de desplazamiento. Por un lado, uno de corrimiento lateral vinculado a un fallamiento lateral de sentido sinestral; y por otro, un desplazamiento vertical asociado a un fallamiento de tipo normal.

RESULTADOS: Los datos estructurales de microtectónica se procesaron mediante los algoritmos inversión directa (*INVD*) e iterativo cuadrimensional (*R4DT*), descritos en el Cap. III sección 1.B.3. Analizando los resultados de los métodos mencionados se seleccionó la siguiente información:

Evento Extensivo

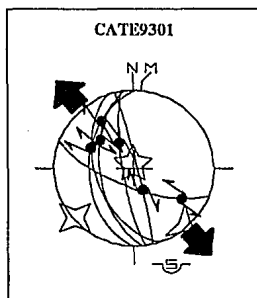
M. INVD

$$\sigma_1 = 352 \text{ 85} ; \phi = 0.517$$

$$\sigma_2 = 229 \text{ 03} ; \alpha = 21$$

$$\sigma_3 = 139 \text{ 04} ; \text{Ruptura} = 47$$

$$\text{Coherencia} = 83 \%$$



CATE9306

LOCALIZACIÓN: 18°13'42" Lat. N- 95°05'08" Log. W. Estación en la salida del poblado Sta. Rosa Loma Larga (Emiliano Zapata), Ver. Al sur de la Laguna de Catemaco.

FORMACIÓN: Roca volcánica extrusiva; coladas de composición basáltica muy fracturada e intemperizada de color rojo a café con vesículas y algunas zonas con esferulitas. El afloramiento es similar a los descritos en las estaciones anteriores. Plio-Cuaternario (volcánico continental).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrias. El estado de esfuerzos de este sitio esta asociado a dos eventos, uno distensivo vinculado o dos fallas de tipo normal en direcciones prácticamente perpendiculares entre sí; y por otro lado un evento compresivo asociado a un fallamiento lateral sinistral NNE-SSW.

RESULTADOS: De la información recabada se calculó únicamente el tensor medio de esfuerzos para los eventos distensivos. Con apoyo de los datos de campo se estableció la cronología relativa de los eventos y finalmente del análisis de los resultados se seleccionó la siguiente información:

1º Evento Extensivo

M. R4DT

$$\sigma_1 = 339 \text{ 75 ; } \phi = 0.517$$

$$\sigma_2 = 117 \text{ 11 ; } \alpha = 4$$

$$\sigma_3 = 209 \text{ 10 ; Ruptura} = 64$$

Coherencia = 100 %

2º Evento Extensivo

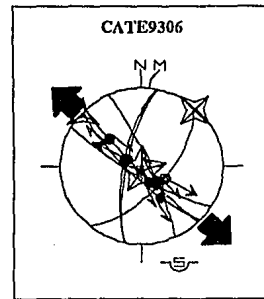
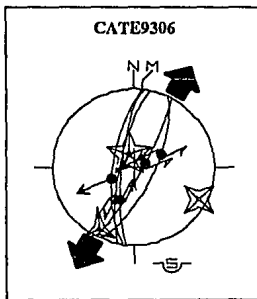
M. R4DT

$$\sigma_1 = 171 \text{ 86 ; } \phi = 0.257$$

$$\sigma_2 = 42 \text{ 18 ; } \alpha = 18$$

$$\sigma_3 = 312 \text{ 3 ; Ruptura} = 66$$

Coherencia = 100 %



CATE9307

LOCALIZACIÓN: 18°07'07" Lat. N-95°14'17" Log. W. Estación a 3 km. al SW del Poblado Sta. Rosa Loma Larga (Emiliano Zapata).

FORMACIÓN: Roca volcánica extrusiva; derrames de composición basáltica, con vesículas, muy fracturado con patrones irregulares y en zonas con planos de fracturamiento bien definidos, intemperizado de color rojo a café; formación idéntica a los anteriores afloramientos. Plio-Cuaternario (volcánico continental).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos conjugados y estrias, los cuales permitieron definir dos eventos distensivos; la cronología relativa de los eventos no se logró establecer con las observaciones de campo; sin embargo, con el análisis de gabinete y en base a los resultados anteriores se interpretó un primer evento N026 y un segundo evento N327.

RESULTADOS: Agrupando la información de campo de tal forma que pudieran estar vinculados a dos episodios distensivos, así como, del análisis de los resultados del cálculo del tensor medio de esfuerzos, se seleccionó la siguiente información:

1º Evento Extensivo

M. INVD

$$\sigma_1 = 123 \text{ 64} ; \phi = 0.269$$

$$\sigma_2 = 295 \text{ 25} ; \alpha = 23$$

$$\sigma_3 = 26 \text{ 3} ; \text{Ruptura} = 50$$

$$\text{Coherencia} = 80 \%$$

2º Evento Extensivo

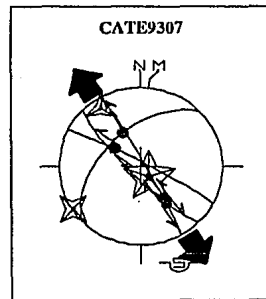
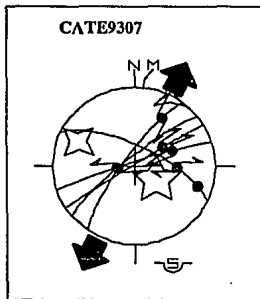
M. R4DT

$$\sigma_1 = 141 \text{ 76} ; \phi = 0.193$$

$$\sigma_2 = 237 \text{ 1} ; \alpha = 11$$

$$\sigma_3 = 327 \text{ 13} ; \text{Ruptura} = 64$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



CATE9308

LOCALIZACIÓN: 18°12'08"Lat N-95°05'51" Log. W. Estación localizada a 4 km. al E del poblado Cuatrotolapan Viejo, al SW de Juan Díaz Covarrubias, Ver.

FORMACIÓN: Roca sedimentaria terrigena de ambiente de terrazas aluviales, cuya formación esta asociada al Rfo San Juan. El afloramiento consiste de material fino (arenas, limos y arcillas) y material grueso (gravas y cantos rodados), con poca cementación y compactación. Plio-Cuatemario (Aluvi6n Continental).

DESCRIPCIÓN: Poblaci6n con planos y estrias asociados a un evento distensivo NW-SE, las condiciones del terreno no permitieron definir planos conjugados.

RESULTADOS: Calculando el tensor medio de esfuerzos para la informaci6n recabada y analizando los resultados de los dos m6todos empleados, se logro apreciar nuevamente un evento distensivo N148°, correlacion6ndose con el patr6n distensivo de las enteriores estaciones.

Evento Extensivo

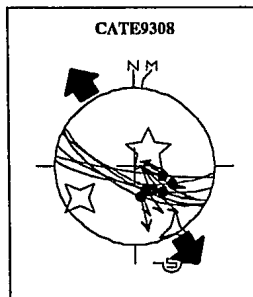
M. INVD

$$\sigma_1 = 48 \ 68 ; \phi = 0.332$$

$$\sigma_2 = 240 \ 21 ; \alpha = 6$$

$$\sigma_3 = 148 \ 6 ; \text{Ruptura} = 24$$

Coherencia = 100 %



Analizando los resultados de esta área podemos decir que existe un campo de esfuerzos distensivos vinculados a un fallamiento normal con una orientación de N209-237 y N026-139, lo cual establece un sistema conjugado distensivo para la zona CATE. Por otro lado, no se logra establecer si los desplazamientos laterales (CATE9301) están relacionados con un episodio compresivo, o con las permutaciones entre los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_2 dentro del contexto distensivo.

1.2 ÁREA DEL NORTE (NORD)

NORD9302

LOCALIZACIÓN: 18°08'41" Lat. N-94°57'08" Long. W. Estación a un costado de la terracería perpendicular a la carretera Acayucan-Juan Díaz Covarrubias a 10 Km al norte del poblado San Miguel, Ver.

FORMACIÓN: Material volcánico; distinguiéndose por un lado un material fino, probablemente producto de cenizas volcánicas, por otro lado, una toba lítica, cuyos fragmentos eran milimétricos a decimétricos. Con un alto grado de fracturamiento e intemperizado de color rojo.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías vinculados a esfuerzos extensivos (fallas normales) y compresionales (fallas de corrimiento lateral e inverso). En el terreno se logró establecer algunas cronologías de los posibles eventos involucrados; sin embargo, con un análisis más detallado de la información en el gabinete se definieron 5 probables fases de esfuerzos, tres fases para los eventos extensivos y dos fases para los eventos compresivos (fallamiento inverso).

RESULTADOS: Analizando la información de campo y establecidas las probables fases involucradas, se calculó el tensor medio de esfuerzos mediante el método de INVD y R4DT. Así mismo, examinado por separado las fases, se obtuvo para la primera fase extensional un σ_1 prácticamente vertical N039-87° definiendo una extensión NE-SW; para la segunda fase, σ_1 N235-83° definiendo una extensión NW-SE; por último, para la tercera fase, σ_1 065-77° definiendo una extensión ESE-WNW. Del mismo modo, se obtuvo para la primera fase compresional un σ_1 N326-18° definiendo una compresión NW-SE; finalmente, para la segunda fase, σ_1 N288-05° definiendo una compresión ESE-WNW (fallamiento inverso).

Evento Extensivo

M. R4DT

$$\sigma_1 = 39 \ 87 ; \phi = 0.392$$

$$\sigma_2 = 130 \ 0 ; \alpha = 10$$

$$\sigma_3 = 220 \ 3 ; \text{Ruptura} = 28$$

Coherencia = 100 %

Evento Extensivo

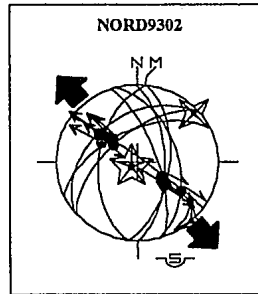
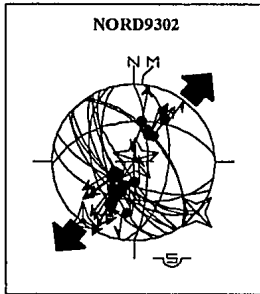
M. INVD

$$\sigma_1 = 235 \ 83 ; \phi = 0.392$$

$$\sigma_2 = 48 \ 7 ; \alpha = 6$$

$$\sigma_3 = 138 \ 1 ; \text{Ruptura} = 27$$

Coherencia = 100 %



3^{er} Evento Extensivo

M. INVD

$$\sigma_1 = 065 \ 77 ; \phi = 0.334$$

$$\sigma_2 = 182 \ 6 ; \alpha = 10$$

$$\sigma_3 = 273 \ 11 ; \text{Ruptura} = 25$$

Coherencia = 100 %

1^{er} Evento Compresivo

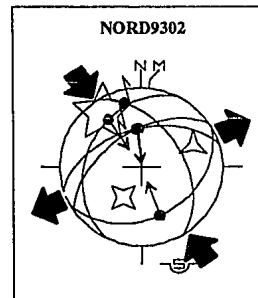
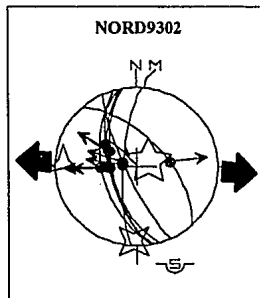
M. INVD

$$\sigma_1 = 326 \ 18 ; \phi = 0.057$$

$$\sigma_2 = 210 \ 53 ; \alpha = 16$$

$$\sigma_3 = 67 \ 31 ; \text{Ruptura} = 38$$

Coherencia = 100 %



2º Evento Compresivo

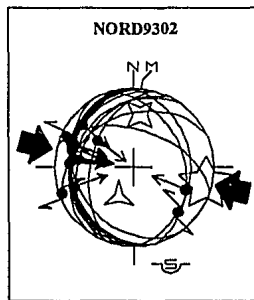
M. R4DT

$\sigma_1 = 288.05$; $\phi = 0.090$

$\sigma_2 = 24.52$; $\alpha = 13$

$\sigma_3 = 194.38$; Ruptura = 54

Coherencia = 100 %



NORD9303

LOCALIZACIÓN: 18°10'06" Lat. N-94°56'55" Long. W. Terracería perpendicular a la carretera Acayucan-Juan D. Covarrubias, a 500 m. al sur del poblado Morelos, Ver.

FORMACIÓN: Material volcánico, probablemente una toba lítica y ceniza volcánica, se trata de la misma formación de la estación anterior (NORD9302); muy fracturada e intemperizada de color rojo. Plio-Cuaternaria.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos con estrías asociados a esfuerzos compresionales que dieron origen a fallas inversas y de corrimiento lateral (sinistral y dextral); por otra parte, esfuerzos distensivos asociados a un fallamiento normal en dos direcciones (NE-SW y ESE-WNW).

RESULTADOS: La incertidumbre de los datos vinculados a esfuerzos compresionales no permiten el cálculo del tensor medio de esfuerzos. Analizando la información de los datos asociados a esfuerzos distensivos se logró establecer dos fases diferentes. Para la primera fase se calculó el tensor medio de esfuerzos y analizando los resultados de los dos métodos empleados se obtuvo un σ_3 con una orientación N083-18° (método INVVD); para la segunda fase se seleccionó nuevamente el resultado del método de INVVD, con una orientación de σ_3 de N031-09°.

La orientación NNE-SSW de σ_3 de la fase 2 se observó en la zona CATE.

1^{er} Evento Extensivo

M. INVVD (fase 2)

$\sigma_1 = 249 \text{ 79}$; $\phi = 0.281$

$\sigma_2 = 122 \text{ 7}$; $\alpha = 9$

$\sigma_3 = 31 \text{ 9}$; Ruptura = 32

Coherencia = 100 %

2^o Evento Extensivo

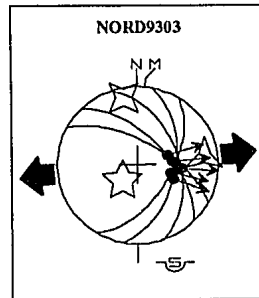
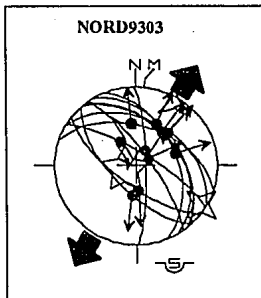
M. INVVD (fase 1)

$\sigma_1 = 223 \text{ 68}$; $\phi = 0.501$

$\sigma_2 = 349 \text{ 13}$; $\alpha = 3$

$\sigma_3 = 83 \text{ 18}$; Ruptura = 21

Coherencia = 100 %



NORD9306

LOCALIZACIÓN: 18°02'22" Lat. N-94°52'08" Long. W. Terracería perpendicular a la carretera Acayucan-Juan D. Covarrubias, a 3 Km al Este del poblado Monte Grande, Ver.

FORMACIÓN: Depósito sedimentario con material fino compuesto de arcillas, limos con algunos cantos rodados (gravas), fracturado y muy intemperizado. Cuaternario Aluvión.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos con estrías vinculados a esfuerzos distensivos ENE-WSW (fallamiento normal); los esfuerzos compresivos no se lograron definir con claridad en el terreno.

RESULTADOS: Analizando los resultados del primer cálculo del tensor medio de esfuerzos (esfuerzos distensivos), se decidió agrupar la información de tal forma que se separaran en dos fases: la primera con una orientación NE-SW y la segunda NW-SE. Posteriormente, analizando la información del nuevo cálculo se obtuvo para la primera fase NE-SW por el método de INV D que el esfuerzo σ_3 tiene una orientación de N237-24°; mientras que para la fase NW-SE los resultados tenían gran incertidumbre, de tal forma que estos resultados se desecharon, y por lo tanto sólo se tomaron en cuenta para esta estación los resultados de la fase NW-SE.

Por último, se puede decir que la dirección del campo de esfuerzos extensivo NNW-SSE (σ_3) en esta estación, es similar al observado en las anteriores estaciones.

Evento Extensivo

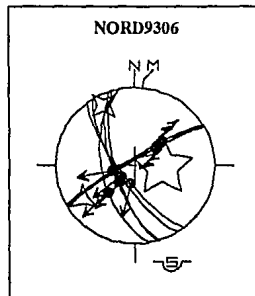
M. INV D

$$\sigma_1 = 92 \text{ 62} ; \phi = 0.008$$

$$\sigma_2 = 333 \text{ 15} ; \alpha = 9$$

$$\sigma_3 = 237 \text{ 24} ; \text{Ruptura} = 34$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



NORD9307

LOCALIZACIÓN: 18°02'02" Lat. N-94°50'08" Long. W. Terracería perpendicular a la carretera Acayucan-Juan D. Covarrubias, a 2 Km al oeste del poblado La Virgen.

FORMACIÓN: Depósito sedimentario (aluvión). Material con tres horizontes; un horizonte (superior) de arenas poco compactadas sin cementación muy intemperizadas de color rojo; el segundo horizonte (medio) de material arcilloso muy fracturado e intemperizado de color gris a rojo; el tercer horizonte (inferior) compuesto principalmente de gravas con poca compactación y cementación e intemperizada de color amarillo a rojo.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas decimétricas con estrías vinculadas a esfuerzos extensionales (fallamiento normal), con dos direcciones principales, una NE-SW y una segunda NW-SE.

RESULTADOS: Analizando los resultados del primer cálculo del tensor medio de esfuerzos, se agrupó la información de tal forma que se definieron tres posibles fases de esfuerzos extensivos. Los cálculos de las tres fases confirmaron la hipótesis, la fase NNE-SSW (considerada inicialmente N-S) con una orientación de σ_3 N017-00°; la segunda fase ENE-WSW (considerada inicialmente NE-SW), con una orientación de σ_3 N062-12°; por último, la tercera fase ESE-WNW (considerada inicialmente E-W), con una orientación de σ_3 N111-10°.

En esta estación se presenta la extensión NNE-SSW.

1^{er} Evento Extensivo

M. R4DT

$$\sigma_1 = 111 \ 84 ; \phi = 0.267$$

$$\sigma_2 = 287 \ 6 ; \alpha = 6$$

$$\sigma_3 = 17 \ 0 ; \text{Ruptura} = 26$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$

2^o Evento Extensivo

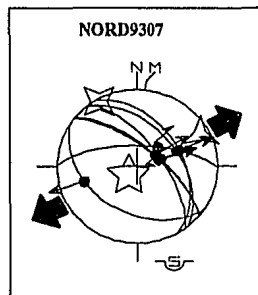
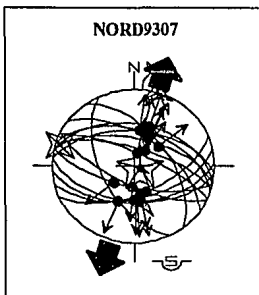
M. INV D

$$\sigma_1 = 223 \ 78 ; \phi = 0.447$$

$$\sigma_2 = 331 \ 4 ; \alpha = 5$$

$$\sigma_3 = 62 \ 12 ; \text{Ruptura} = 17$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



Evento Extensivo

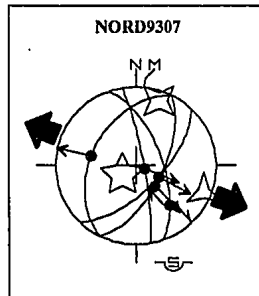
M. INVD

$$\sigma_1 = 235 \text{ 73} ; \phi = 0.441$$

$$\sigma_2 = 19 \text{ 14} ; \alpha = 12$$

$$\sigma_3 = 111 \text{ 10} ; \text{Ruptura} = 26$$

Coherencia = 100 %



NORD9310

LOCALIZACIÓN: 17°47'25" Lat. N-94°07'34" Long. W. Carretera Las Choapas-Cerro Nanchintal, a 1 Km al E del poblado El Mázate, Ver.

FORMACIÓN: Depósito sedimentario continental, probablemente de terrazas aluviales. Aluvión (arenas y arcillas) muy fracturadas y alteradas de color amarillo a rojo. Plio-Cuaternario Continental.

DESCRIPCIÓN: Población de planos de fallas con planos decimétricos y estrías definiendo principalmente un evento compresivo vinculado a un fallamiento inverso con una dirección de σ_1 N-S.

RESULTADOS: La información de campo no permite definir un sistema de fallamiento conjugado, sin embargo, se calculó el tensor medio de esfuerzos. Conociendo el margen de error que se tiene al realizar este tipo de cálculos y analizando los resultados de los métodos empleados, se selecciono el resultado del método de R4DT, de esta forma la dirección de σ_1 es N037-06° (NNE-SSW) prácticamente N-S como era de esperarse (análisis gráfico previo).

Evento Compresivo

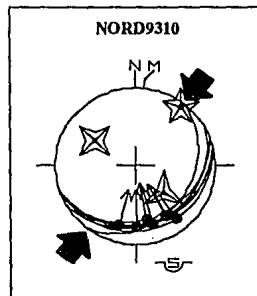
M. R4DT

$$\sigma_1 = 37 \text{ 6} ; \phi = 0.608$$

$$\sigma_2 = 302 \text{ 39} ; \alpha = 11$$

$$\sigma_3 = 135 \text{ 50} ; \text{Ruptura} = 50$$

Coherencia = 100 %



NORD9311

LOCALIZACIÓN: 17°56'04" Lat. N-94°43'30" Long. W. Carretera Acayucan-Jaltipan, a 3 Km al S del poblado Jaltipan de Morelos, Ver.

FORMACIÓN: Depósito sedimentario de ambiente marino. Material compuesto de terrigenos carbonatados, muy fracturado cuyos planos preferenciales están bien definidos, intemperizado de color amarillo a gris. Mioceno (?) Marino.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías, las cuales definen juegos de fallas conjugados asociados a esfuerzos distensivos con orientación NE-SW, vinculados a fallas normales; por otro lado, los esfuerzos compresionales asociados a movimientos laterales de tipo dextral presentan una orientación E-W.

RESULTADOS: La información que define los juegos conjugados de fallas normales , permitió el cálculo del tensor medio de esfuerzos; analizando los resultados de los dos método empleados y seleccionando el del método de INVD el cuál calcula un σ_2 en la dirección N250-02° (ENE-WSW). Por otro lado, se calculó el tensor medio de esfuerzos para los eventos compresionales, considerando de previamente la ausencia del juego de fallamiento conjugado, el cual permite tener un rango de confiabilidad mayor de los resultados, de esta forma se analizaron los resultado, seleccionando el del método de R4DT con un σ_1 de N097-17° (ESE-WNW), prácticamente E-W. Apoyados de la información de campo se logro establecer la siguiente cronología:

1^{er} Evento Extensivo

M. INVD

$$\sigma_1 = 110 \text{ 87} ; \phi = 0.586$$

$$\sigma_2 = 340 \text{ 2} ; \alpha = 13$$

$$\sigma_3 = 250 \text{ 2} ; \text{Ruptura} = 30$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$

2^o Evento Compresivo

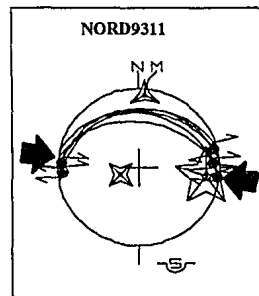
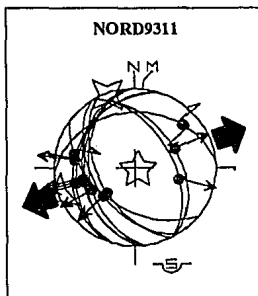
M. R4DT

$$\sigma_1 = 97 \text{ 17} ; \phi = 0.009$$

$$\sigma_2 = 250 \text{ 71} ; \alpha = 7$$

$$\sigma_3 = 5 \text{ 9} ; \text{Ruptura} = 50$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



NORD9312

LOCALIZACIÓN: 17°55'08" Lat. N-95°51'17" Long. W. Carretera Acayucan-Textistepec, a 9 Km al SE de Acayucan, Ver.

FORMACIÓN: Depósito sedimentario de ambiente marino. El material consiste principalmente de terrigenos carbonatados muy fracturados e intemperizados de color amarillo a gris, se trata de la misma formación de la estación NORD9311. Mioceno (?) Marino.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas decimétricos y estrías los cuales permiten definir un juego de fallamiento conjugado vinculado a una fallas tipo normal, con una dirección del plano de falla NW-SE.

RESULTADOS: La información de los juegos de fallas conjugados permiten el cálculo del tensor medio de esfuerzos. Analizando y seleccionando los resultados del método INVD se tiene un σ_3 en la dirección N329-18° (NW-SE).

Evento Extensivo

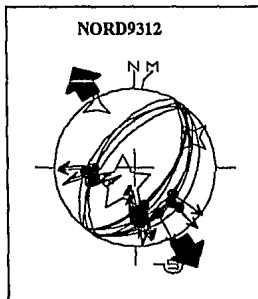
M. INVD

$\sigma_1 = 216 \text{ 69} ; \phi = 0.060$

$\sigma_2 = 62 \text{ 19} ; \alpha = 11$

$\sigma_3 = 329 \text{ 8} ; \text{Ruptura} = 27$

Coherencia = 100 %



NORD9313

LOCALIZACIÓN: 17°53'47" Lat. N-94°56'31" Long. W. Carretera Acayucan-Sayula, a 6 Km al SW de Acayucan, Ver. (cortes del proyecto de la carretera Cosoleacaque-Tuxtla G.).

FORMACIÓN: Depósito sedimentario de origen marino. El material esta compuesto por terrígenos carbonatados, muy fracturados e intemperizados de color amarillo a gris. Mioceno (?) Marino.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y eóstrías que definen posiblemente juegos conjugados de fallas normales, asociados a esfuerzos extensionales con una dirección preferencial NE-SW. En la mayor parte de los planos de fallamiento se observó precipitación de calcita y superficies pulidas (en cristales de calcita).

RESULTADOS: La información de posibles juegos de fallas conjugados de fallamiento permiten el cálculo del tensor medio de esfuerzos. Analizando y seleccionando los resultados del método INVD el cálculo permite definir una dirección de σ_3 de N251-19°. A pesar de contar con la información de un posible juegos conjugado de fallamiento la información no permitió definir claramente el campo de esfuerzos vinculados al mencionado fallamiento, esto se puede ver más claramente en la siguiente información:

Evento Extensivo

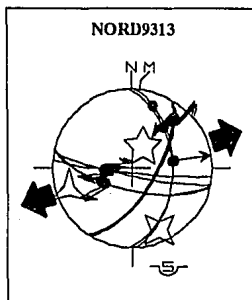
M. INVD

$$\sigma_1 = 27 \ 65 ; \phi = 0.515$$

$$\sigma_2 = 156 \ 16 ; \alpha = 7$$

$$\sigma_3 = 251 \ 19 ; \text{Ruptura} = 33$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



NORD9314

LOCALIZACIÓN: 17°46'12" Lat. N-94°39'11" Long. W. Poblado Hidalgotitlán, Ver. En la rivera E del Río Coatzacoalcos (sitio donde se encuentra ubicada la panga)

FORMACIÓN: Depósito sedimentario de ambiente continental, probablemente de ambiente de terrazas aluviales. El material comprende desde arcillas, arenas hasta cantos rodados y gravas gruesas (5 a 10 cm. de diámetro); compactado con poca cementación y fracturación, intemperizada de color amarillo. Cuaternario Continental.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías vinculadas a esfuerzos extensionales con una dirección preferencial N-S. Difícilmente se puede definir un juego conjugado de fallamiento tipo normal; debido a las condiciones del afloramiento.

RESULTADOS: La información de microtectónica en este sitio fue escasa y difícilmente se define un juego de fallamiento conjugado vinculado a fallas normales. Sin embargo, se realizó el cálculo del tensor medio de esfuerzos, finalmente analizando y seleccionando los resultados del método INVD se tiene un σ_3 con una dirección N 309-19° (NW-SE).

Evento Extensivo

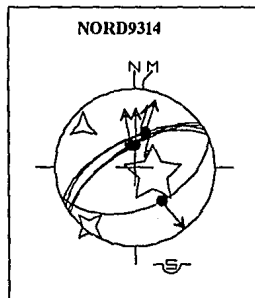
M. INVD

$$\sigma_1 = 109 \text{ 70} ; \phi = 0.034$$

$$\sigma_2 = 217 \text{ 7} ; \alpha = 5$$

$$\sigma_3 = 309 \text{ 19} ; \text{Ruptura} = 20$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



NORD9315

LOCALIZACIÓN: 17°52'09" Lat. N-94°42'44" Long. W. Terracería Jaltipan-Lomas de Tecamichapa, a 200 m. del río Tecamichapa al sur del poblado del mismo nombre, Ver.

FORMACIÓN: Afloramiento de rocas sedimentarias de ambiente marino. El material que lo forma es principalmente por terrígenos carbonatados, muy fracturados e intemperizados de color gris. Este afloramiento es similar al de las estaciones NORD9311, NORD9312 Y NORD9313. Mioceno (?) Marino.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías que definen difícilmente juegos de fallas conjugadas asociadas a esfuerzos compresionales (fallamiento de tipo inverso) y extensionales (fallamiento tipo normal) en dirección NE-SW.

RESULTADOS: La información define probablemente un juego de fallas conjugadas tanto de tipo normal (extensión) como inverso (compresional). Calculando el tensor medio de esfuerzos y analizando la información de los resultados se selecciono para el esfuerzo extensivo el método de R4DT con un σ_3 en dirección N205-08° (NNE-SSW); así mismo, para el esfuerzo compresional se tiene un σ_1 en dirección N236-01°, método R4DT.

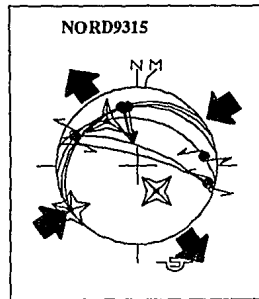
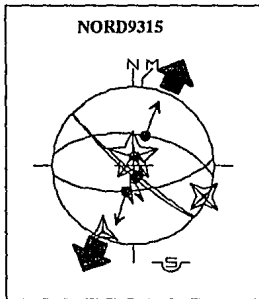
La fase de extensión, presenta nuevamente en este sitio una dirección NNE-SSW.

Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 353 \text{ 80}$; $\phi = 0.225$
 $\sigma_2 = 114 \text{ 5}$; $\alpha = 1$
 $\sigma_3 = 205 \text{ 8}$; Ruptura = 39
 Coherencia = 100 %

Evento Compresivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 236 \text{ 1}$; $\phi = 0.592$
 $\sigma_2 = 145 \text{ 58}$; $\alpha = 17$
 $\sigma_3 = 326 \text{ 32}$; Ruptura = 68
 Coherencia = 100 %



NORD9317

LOCALIZACIÓN: 17°48'55" Lat. N-94°05'14" Long. W. Terracería al E de la Carretera Las Choapas-Cerro Nanchintal, Ver., zona del banco de material "El Pinolillo".

FORMACIÓN: Afloramiento sedimentario probablemente de ambiente fluvial. Conglomerados continentales rojos con fracturamiento, fallamiento conjugado normal y de movimiento lateral. Cuaternario (?) Continental.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías que permiten definir probables juegos de fallamiento conjugados, principalmente de tipo normal, vinculados a esfuerzos extensionales.

RESULTADOS: Analizando en conjunto toda la información, se definieron dos fases, una en dirección NE-SW y la segunda NW-SE. Gran parte de la información seleccionada permite establecer posibles juegos conjugados de fallamiento normal. Calculando el tensor medio de esfuerzos para las dos fases, se tiene que para la primera fase definida (NE-SW) se seleccionó los resultados del método de INVD definiendo un σ_3 en dirección N014-16°; por otra parte, para la fase (NW-SE) los resultados seleccionados fueron nuevamente los del método INVD, con una dirección de σ_3 N134-09°, con la siguiente información adicional:

1^{er} Evento Extensivo

M. INVD

$$\sigma_1 = 116 \text{ 65} ; \phi = 0.471$$

$$\sigma_2 = 281 \text{ 25} ; \alpha = 19$$

$$\sigma_3 = 14 \text{ 16} ; \text{Ruptura} = 44$$

Coherencia = 100 %

2^o Evento Extensivo

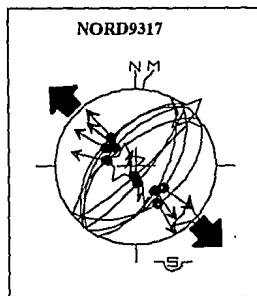
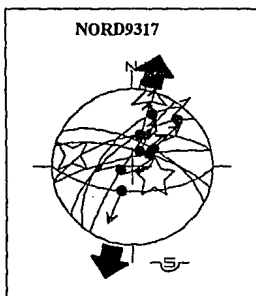
M. INVD

$$\sigma_1 = 281 \text{ 79} ; \phi = 0.447$$

$$\sigma_2 = 43 \text{ 6} ; \alpha = 4$$

$$\sigma_3 = 134 \text{ 9} ; \text{Ruptura} = 26$$

Coherencia = 100 %



NORD9318

LOCALIZACIÓN: 18°15'16 Lat. N.-94°42'30" Long. W. Terracería Chinameca-Pajapan, a 1 Km aprox. del poblado Pajapan, Ver., región SE del cerro San Martín (volcán).

FORMACIÓN: Afloramiento de aglomerados volcánicos muy fracturados de color café. Plio-Cuaternario (Volcánico Continental).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías que probablemente corresponden a un fallamiento tipo normal, vinculado a esfuerzos extensionales N-S.

RESULTADOS: Las condiciones del afloramiento de esta estación no permitieron definir claramente la falla de tipo normal. Sin embargo, se realizó el cálculo del tensor medio de esfuerzos seleccionándose los resultados del método R4DT, el cual define un σ_3 en la dirección N218-07° (extensión NNE-SSW).

Evento Extensivo

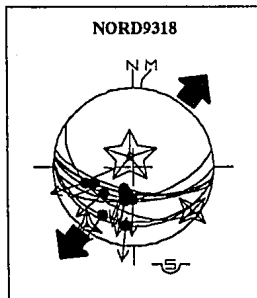
M. R4DT

$$\sigma_1 = 344 \text{ 79} ; \phi = 0.126$$

$$\sigma_2 = 127 \text{ 9} ; \alpha = 11$$

$$\sigma_3 = 218 \text{ 7} ; \text{Ruptura} = 28$$

Coherencia = 100 %



2. ZONA CENTRO (CENT)

CENT9303

LOCALIZACIÓN: 17°22'42" Lat. N-94°55'45" Long. W. Terracerfa perpendicular al E de la carretera Sayula-Palomares, en dirección al poblado Suchilapan, Ver. a 3 Km del Puente Suchilapan.

FORMACIÓN: Afloramiento sedimentario de ambiente continental, el material esta compuesto principalmente de arenas y gravas, muy fracturado e intemperizado de color rojo, con poca compactación y cementación. Plio-Cuaternario Continental.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías vinculados a fallas normales con una dirección de esfuerzos extensionales N-S. Difícilmente se definen juegos de fallamiento conjugado.

RESULTADOS: Analizando toda la información en conjunto, se establecieron dos posibles fases de esfuerzos; uno en la dirección NE-SW y un segundo NE-SW. Analizando los resultados del cálculo del tensor medio de esfuerzos, para el primer evento en la dirección NE-SW el método de INVd calculó un σ_3 en la dirección N208-02° (NNE-SSW); para el segundo evento (N-S) se seleccionaron los resultados del método de R4DT, el cual calculó un σ_3 en la dirección N168-04° (prácticamente N-S).

Evento Extensivo

M. INVd

$$\sigma_1 = 102 \text{ 85} ; \phi = 0.577$$

$$\sigma_2 = 298 \text{ 5} ; \alpha = 15$$

$$\sigma_3 = 208 \text{ 2} ; \text{Ruptura} = 27$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$

Evento Extensivo

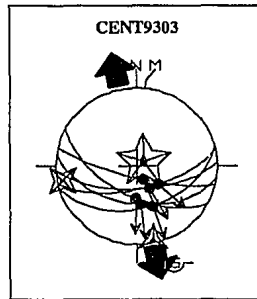
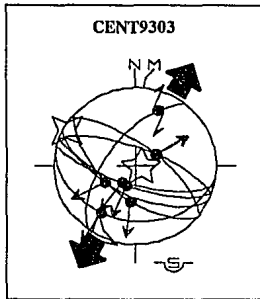
M. R4DT

$$\sigma_1 = 50 \text{ 81} ; \phi = 0.142$$

$$\sigma_2 = 259 \text{ 8} ; \alpha = 5$$

$$\sigma_3 = 168 \text{ 4} ; \text{Ruptura} = 22$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



CENT9304

LOCALIZACIÓN: 16°50'24" Lat. N-94°45'21" Long. W. Terracería perpendicular al E de la carretera Matías Romero-La Ventosa, en dirección al poblado Sta. Ma. Chimalapa, Oax., a 10 Km al SE de este poblado.

FORMACIÓN: Afloramiento de material volcánico, probablemente extrusivo, muy alterado y cubierto por una vegetación densa y con un patrón de fracturamiento irregular.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías indicando un evento extensivo asociado a un fallamiento normal y un segundo evento compresivo asociado a un fallamiento lateral. La información recabada permite definir un posible juego de fallamiento conjugado para el movimiento lateral sinistral, permitiendo con esto el cálculo del tensor medio de esfuerzos; por otro lado, para el evento distensivo no fue evidente la definición de un juego de fallamiento conjugado de tipo normal, sin embargo, se calculó el tensor.

Es importante señalar que las observaciones de campo no permitieron establecer la posible cronología de los eventos compresivos y extensivos que se presentaron en esta estación.

RESULTADOS: Analizando la información de campo se observó que era posible definir un juego de fallamiento conjugado para el movimiento lateral y por lo consiguiente, el cálculo del tensor medio de esfuerzos; analizando el resultado de los dos métodos y seleccionando el de INVD con un σ_1 en dirección N110-10° vinculado al movimiento lateral. Por otra parte, para el campo de esfuerzos extensivos se consideró la posible existencia de un juego de fallamiento conjugado normal y seleccionando nuevamente los resultados del método de INVD, se tiene un σ_3 en la dirección N231-16°.

Por lo tanto, el campo de esfuerzos extensionales se puede definir en la dirección NE-SW. Mientras que el campo de esfuerzos compresionales en la dirección ESE-WNW con una posible dirección de extensión NNE-SSW.

Evento Compresivo
M. INVD

$$\sigma_1 = 110 \text{ 10} ; \phi = 0.250$$

$$\sigma_2 = 232 \text{ 72} ; \alpha = 8$$

$$\sigma_3 = 18 \text{ 15} ; \text{Ruptura} = 33$$

Coherencia = 100 %

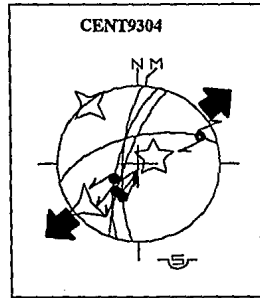
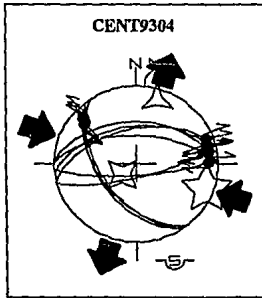
Evento Extensivo
M. INVD

$$\sigma_1 = 67 \text{ 73} ; \phi = 0.601$$

$$\sigma_2 = 322 \text{ 5} ; \alpha = 3$$

$$\sigma_3 = 231 \text{ 16} ; \text{Ruptura} = 33$$

Coherencia = 100 %



CENT9305

LOCALIZACIÓN: 16°48'59" Lat. N-94°45'50" Long. W. Terracerfa perpendicular al E de la carretera Matías Romero-La Ventosa, a 3 Km al SSE de la estación CENT9304.

FORMACIÓN: Afloramiento de rocas ígneas extrusivas e intrusivas en contacto; de composición ácida a intermedia. Muy fracturada con patrones irregulares e intemperizada de color blanco y verde. Cretácico-Paleozoico(?) Volcánico continental.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estría vinculados principalmente a un campo de esfuerzos extensivos y como una consecuencia a un fallamiento normal. Las condiciones del afloramiento no permiten definir un juego de fallamiento conjugado.

RESULTADOS: Analizando detenidamente la información de campo, se decidió estudiar los datos en dos posible fases diferentes; una fase en la dirección NW-SE, con un juego de fallamiento conjugado poco definido, y para la segunda fase en dirección E-W. Calculando el tensor medio de esfuerzos para las dos fases se seleccionó la siguiente información:

Evento Extensivo

M. R4DT

$$\sigma_1 = 156 \text{ 63} ; \phi = 0.741$$

$$\sigma_2 = 272 \text{ 13} ; \alpha = 13$$

$$\sigma_3 = 7 \text{ 24} ; \text{Ruptura} = 45$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$

Evento Extensivo

M. INV D

$$\sigma_1 = 158 \text{ 61} ; \phi = 0.118$$

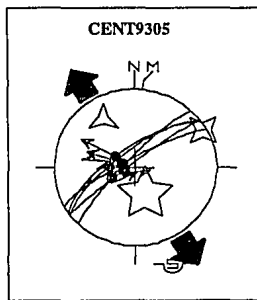
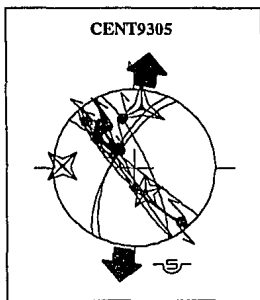
$$\sigma_2 = 60 \text{ 4} ; \alpha = 7$$

$$\sigma_3 = 328 \text{ 29} ; \text{Ruptura} = 17$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$

Extensión calculada NNE-SSW

Extensión calculada NW-SE



CENT9306

LOCALIZACIÓN: 17°27'42" Lat. N-94°34'48" Long. W. Terracerfa perpendicular al E de la carretera Sayula-Palomares, a 3 Km al W del poblado Ignacio Allende, al S de Hidalgotitlán.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca sedimentaria de ambiente marino; se identificaron dos materiales diferentes en la base del afloramiento, un conglomerado en contacto posiblemente por fallamiento inverso con terrigenos carbonatados (arcillas, pelitas, arenas), este último material se encuentra muy fracturado e intemperizado de color amarillo a gris. Esta formación se puede correlacionar con la de la estación NORD9315. Mioceno (?) Marino.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos centimétricos y estrías vinculados a un campo de esfuerzos compresionales asociados a una falla inversa, obteniéndose información también de una falla normal asociada un campo de esfuerzos extensional en dirección N-S.

En el campo se pudo determinar la cronología de los eventos involucrados (extensión y compresión), estableciéndose de este modo tres diferentes campos de esfuerzos, dos compresivos (NNW-SSE y NNE-SSW) y un extensivo (N-S).

RESULTADOS: Analizando toda la información y tomando en consideración la cronología establecida en el terreno, se calculó el tensor medio de esfuerzos para los tres campos de esfuerzos involucrados, lográndose definir un posible juego de fallamiento conjugado para el evento extensivo. De los resultados obtenidos mediante los dos métodos utilizados, se seleccionó la siguiente información:

1^{er} Evento Compresivo

M. R4DT

$$\sigma_1 = 160 \text{ 1 ; } \phi = 0.508$$

$$\sigma_2 = 70 \text{ 8 ; } \alpha = 4$$

$$\sigma_3 = 255 \text{ 82 ; Ruptura} = 19$$

Coherencia = 100 %

2^o Evento Compresivo

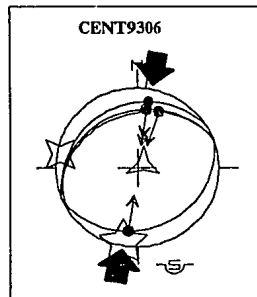
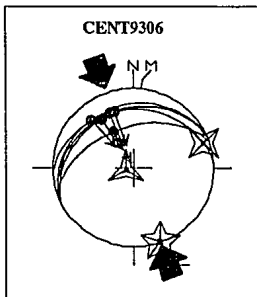
M. INVD

$$\sigma_1 = 190 \text{ 5 ; } \phi = 0.349$$

$$\sigma_2 = 281 \text{ 5 ; } \alpha = 8$$

$$\sigma_3 = 56 \text{ 83 ; Ruptura} = 31$$

Coherencia = 100 %



3^{er} Evento Extensivo

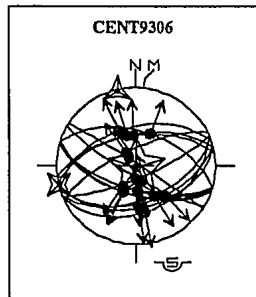
M. R4DT

$$\sigma_1 = 153.88 ; \phi = 0.026$$

$$\sigma_2 = 256.0 ; \alpha = 6$$

$$\sigma_3 = 346.2 ; \text{Ruptura} = 36$$

Coherencia = 100 %



CENT9307

LOCALIZACIÓN: 17°12'13" Lat. N-94°43'52" Long. W. Terracerfa perpendicular al E de la carretera Palomares-Matfas Romero, en direcci3n al poblado Dos, Ver.

FORMACI3N: afloramiento sedimentario, conglomerado y aluvi3n posiblemente marino o delt3ico (poligen3tico), intemperizado de color rojo. Plio-Cuaternario Marino.

DESCRIPCI3N: Poblaci3n de fallas con planos decim3tricos y estrfas vinculadas a un fallamiento normal, lográndose establecer un posible juego de fallamiento conjugado normal ESE-WNW apoyados con an3lisis detallado de gabinete.

RESULTADOS: Analizando detenidamente los datos de microtect3nica del sitio, se seleccion3 la informaci3n de tal forma que se definiera un posible juego de fallamiento conjugado normal y posteriormente se realiz3 el c3lculo del tensor medio de esfuerzos; de los dos m3todos empleados los resultados seleccionados fueron los siguientes:

Evento Extensivo (ESE-WNW)

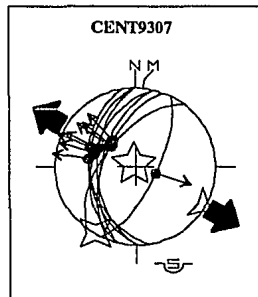
M. INVD

$$\sigma_1 = 328 \text{ 87} ; \phi = 0.367$$

$$\sigma_2 = 211 \text{ 2} ; \alpha = 5$$

$$\sigma_3 = 121 \text{ 3} ; \text{Ruptura} = 15$$

Coherencia = 100 %



CENT9308

LOCALIZACIÓN: 17°11'52" Lat. N-94°46'25" Log. W. Terracería perpendicular al E de la carretera Palomares-Matías Romero, en el entronque a la terracería hacia el norte rumbo al poblado Suchilapan, Ver.

FORMACIÓN: Afloramiento sedimentario de conglomerados poligenéticos y calcáreos de ambiente probablemente marino muy intemperizados de color rojo. Plio-Cuaternario (?) Marino.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos con estrías asociados a fallamientos normales, vinculados al mismo campo de esfuerzos extensivos.

RESULTADOS: La información de campo permite el cálculo del tensor medio de esfuerzos; analizando los resultados de los dos métodos empleados se seleccionó la información del método de R4DT, el cuál calculó un σ_3 en la dirección N008-08° con la siguiente información adicional:

Evento Extensivo (NNE-SSW)

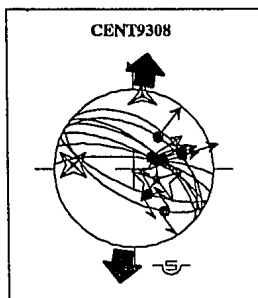
M. R4DT

$$\sigma_1 = 113 \text{ 64} ; \phi = 0.159$$

$$\sigma_2 = 274 \text{ 25} ; \alpha = 8$$

$$\sigma_3 = 8 \text{ 8} ; \text{Ruptura} = 41$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



CENT9309

LOCALIZACIÓN: 17°06'22" Lat. N-94°51'43" Long. W. Terracería perpendicular al E de la carretera Palomares-Matías Romero en los límites del poblado Cuahutemoc, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento sedimentario probablemente de ambiente marino, el material consiste principalmente de conglomerados, intemperizados de color rojo. Plio-Cuaternario (?) Marino (?).

DESCRIPCIÓN: Poblaciones de fallas con planos decimétricos con estrías asociados fallamientos normales vinculados a dos campos de esfuerzos extensivos diferentes, por un lado, un estado extensivo en dirección NE-SW y posteriormente en dirección ESE-WNW, esta última interpretación se dedujo de las observaciones *in situ*.

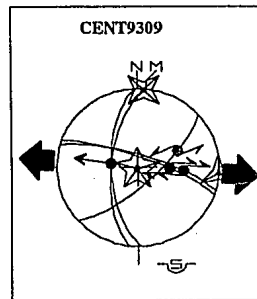
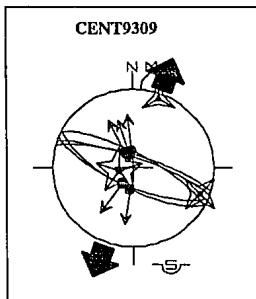
RESULTADOS: Considerando los dos estados de esfuerzos extensivos involucrados en este sitio, se agrupó la información de acuerdo a la cronología establecida en campo; posteriormente se calculó el tensor medio de esfuerzos. Analizando la información de los dos métodos empleados, se seleccionó los siguientes resultados:

1^{er} Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 259 \text{ 76}$; $\phi = 0.342$
 $\sigma_2 = 112 \text{ 12}$; $\alpha = 3$
 $\sigma_3 = 20 \text{ 8}$; Ruptura = 47
 Coherencia = 100 %
 Extensión NNE-SSW

2^o Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 218 \text{ 88}$; $\phi = 0.442$
 $\sigma_2 = 5 \text{ 1}$; $\alpha = 6$
 $\sigma_3 = 95 \text{ 1}$; Ruptura = 44
 Coherencia = 100 %
 Extensión E-W



CENT9310

LOCALIZACIÓN: 17°06'06" Lat. N-94°53'03" Long. W. Terracería perpendicular al E de la carretera Palomares-Matías Romero en la entrada del poblado Cuahutemoc, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento sedimentario probablemente de ambiente marino, conglomerado intemperizado de color rojo. Plio-Cuaternario Marino(?).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados a un fallamiento normal, vinculado a un estado de esfuerzos extensivos. Las condiciones del afloramiento no permiten definir un posible juego de fallamiento conjugado.

RESULTADOS: La escasez de la información no permite definir un juego de fallamiento conjugado, sin embargo se calculó el tensor medio de esfuerzos. Analizando la información de los dos métodos empleados en el cálculo, se seleccionó los resultados del método de INVD, el cual cálculo un σ_3 en la dirección N270-08°, con la siguiente información complementaria:

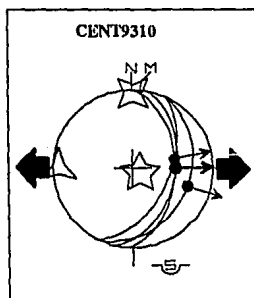
Evento Extensivo
M. INVD

$$\sigma_1 = 121 \text{ 81} ; \phi = 0.496$$

$$\sigma_2 = 1 \text{ 4} ; \alpha = 4$$

$$\sigma_3 = 270 \text{ 8} ; \text{Ruptura} = 11$$

Coherencia = 100 %



CENT9311

LOCALIZACIÓN: 17°05'50" Lat. N-94°55'11" Long. W. Terracería perpendicular al E de la carretera Palomares-Matías Romero, al W del poblado Cuahutemoc, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento probablemente sedimentario de color gris-negro, con micropliegues y esquistosidad. Cretácico-Jurásico (?).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías definidas en cristales de calcita. El estado de esfuerzos en esta estación es principalmente compresivo, vinculado al fallamiento inverso y de desplazamiento lateral observados.

RESULTADOS: Analizando los datos de campo se observó un posible juego de fallamiento conjugado de desplazamiento lateral, sin embargo al observar los resultados del cálculo del tensor medio de esfuerzos se llegó a la conclusión de que la información recabada no era representativa debido al gran margen de error obtenido, por lo tanto se anularon los resultados de este cálculo. Por otra parte, del cálculo del tensor para los datos del fallamiento inverso, se seleccionó los resultados del método INVD con un σ_1 en la dirección N049-02° (NE-SW), con la siguiente información adicional:

Evento Compresivo

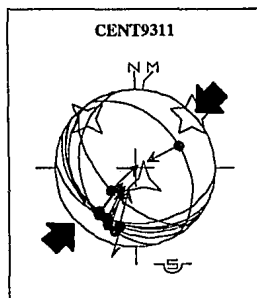
M. INVD

$$\sigma_1 = 49 \quad 2 ; \phi = 0.420$$

$$\sigma_2 = 318 \quad 47 ; \alpha = 8$$

$$\sigma_3 = 144 \quad 73 ; \text{Ruptura} = 24$$

Coherencia = 100 %



CENT9312

LOCALIZACIÓN: 16°52'44" Lat. N-95°34'17" Long. W. Terracería al E del poblado de Matías Romero, Oax. Excavaciones del poliducto de PEMEX.

FORMACIÓN: Afloramiento sedimentario de conglomerados aluviales, con fracturamiento en algunos cantos rodados, definiéndose difícilmente un patrón de fallamiento. Plio-Cuaternario Continental.

DESCRIPCIÓN: Poblaciones de fallas con planos y estrías asociados a un fallamiento normal. Algunas fracturas en los cantos rodados del afloramiento permitieron identificar el sentido del desplazamiento lateral, vinculado a un fallamiento sinistral y dextral (probablemente un juego conjugado).

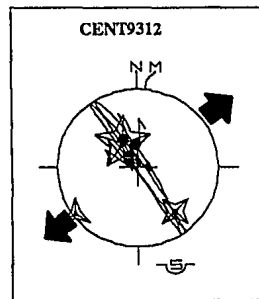
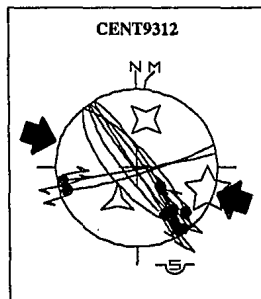
RESULTADOS: Con la información del fallamiento de desplazamiento lateral, se calculó el tensor medio de esfuerzos, de los dos métodos empleados se seleccionaron los resultados del método de INVVD. Por otra parte, para los datos vinculados a una falla normal se seleccionaron los resultados de R4DT. La información correspondiente se indica a continuación:

1^{er} Evento Compresivo
M. INVVD

$\sigma_1 = 108 \text{ 9}$; $\phi = 0.304$
 $\sigma_2 = 11 \text{ 38}$; $\alpha = 11$
 $\sigma_3 = 210 \text{ 50}$; Ruptura = 31
Coherencia = 100 %

2^o Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 330 \text{ 61}$; $\phi = 0.109$
 $\sigma_2 = 140 \text{ 29}$; $\alpha = 7$
 $\sigma_3 = 233 \text{ 04}$; Ruptura = 84
Coherencia = 100 %



CENT9313

LOCALIZACIÓN: 16°48'07"-Lat. N-95°03'42" Long. W. Poblado La Laguna Oax., en el área de la planta de Cementos Cruz Azul.

FORMACIÓN: Afloramiento de rocas sedimentarias. Calizas de plataforma Cretácicas, de color gris-negro, muy fracturadas y plagadas; cobertura del granito de Chiapas. Cretácico Marino.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos, decamétricos y estrías. En algunas zonas se logro establecer juegos de fallamiento conjugado principalmente para fallas de tipo normal. Es importante mencionar, que de acuerdo a las dimensiones que se tienen en los cortes del afloramiento, la metodología de medición se hizo de una manera muy aleatoria y general, bajo la consideración de contar con un panorama global del campo de esfuerzos asociados a las poblaciones de fallas existentes.

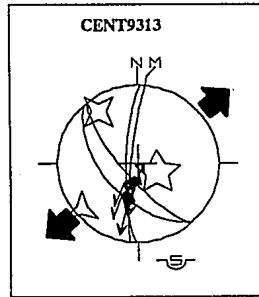
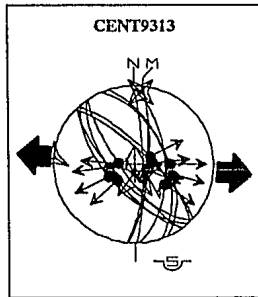
RESULTADOS: Analizando lo datos de microtectónica se agrupó la información de tal forma que definieran dos posibles fases. La primera fase, seta definida por los juegos de fallamiento conjugado con una orientación preferencial E-W; la segunda fase con una orientación NE-SW. Finalmente el cálculo del tensor medio de esfuerzos mediante los dos métodos empleados, se seleccionaron los siguientes resultados:

Evento Extensivo
M. R4DT

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 180 \text{ 81} ; \phi = 0.103 \\ \sigma_2 &= 5 \text{ 9} ; \alpha = 6 \\ \sigma_3 &= 275 \text{ 1} ; \text{Ruptura} = 47 \\ \text{Coherencia} &= 100 \% \end{aligned}$$

Evento Compresivo
M. INVD

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 115 \text{ 68} ; \phi = 0.356 \\ \sigma_2 &= 324 \text{ 19} ; \alpha = 5 \\ \sigma_3 &= 231 \text{ 10} ; \text{Ruptura} = 22 \\ \text{Coherencia} &= 100 \% \end{aligned}$$



3. ZONA SUR

3.1 ÁREA SUROESTE (SUDE)

SUDE9301

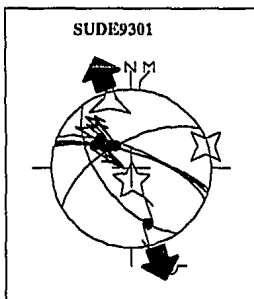
LOCALIZACIÓN: 16°45'24" Lat. N-95°27'52" Long. W. Terracerfa perpendicular al E de la terracerfa Ixtepec-Santa Marfa Guienagati, a 3 Km al E del poblado La Chidola, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca sedimentaria, calizas arenosas con intercalaciones de arcillas y arenas, con estratificación bien definida. La capas estaban plegadas con una inclinación prácticamente vertical y un fuerte fracturamiento en planos perpendiculares a la estratificación, observados principalmente en los horizontes de caliza.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos, decamétricos y estrfas. Por las condiciones topográficas del terreno no permitió una medición muy detallada. Los planos de estratificación presentaban una orientación general N-S y una inclinación de 80 a 90 grados.

RESULTADOS: Seleccionando la información vinculada a un posible estado de esfuerzos extensivo asociado a un fallamiento normal, se calculó en tensor medio de esfuerzos; finalmente analizando detalladamente la in formación de los dos métodos empleados, se seleccionaron los siguientes resultados:

Evento Extensivo
M. R4DT
 $\sigma_1 = 117 \text{ 77} ; \phi = 0.633$
 $\sigma_2 = 74 \text{ 3} ; \alpha = 7$
 $\sigma_3 = 343 \text{ 13} ; \text{Ruptura} = 24$
Coherencia = 100 %



SUDE9303

LOCALIZACIÓN: 16°44'43" Lat. N-95°24'48" Long. W. Terracería perpendicular al W de la terracería principal Ixtepec-Sta. Ma. Guicnagati, Oax.

FORMACIÓN: Esta estación comprende tres tipos de litología; una formación de roca volcánica extrusiva (posiblemente riolita) con diaclasas e intemperizada de color café; la segunda formación, se trata de una arenisca de color verde claro, probablemente el material que la constituye es de origen volcánico (bentonita (?)); por último, se observó una roca ígnea intrusiva de composición ácida con gran contenido de biotita, muy fracturada e intemperizada de color café claro a gris.

DESCRIPCIÓN: En el primer afloramiento se observaron poblaciones de fallas con planos y estrías asociados principalmente a un fallamiento normal (campo de esfuerzos extensivos).

En el segundo afloramiento se observaron poblaciones de fallas con planos y estrías asociados a un fallamiento normal, vinculado a un campo de esfuerzos extensivos; se logró identificar la cronología de las dos fases de fallamiento.

Por último, el tercer afloramiento presentaba poblaciones de fallas con planos decimétricos y estrías asociados nuevamente a un campo de esfuerzos extensivos.

RESULTADOS: Analizando la información de los tres afloramientos, se establecieron las dos posibles fases involucradas, lográndose definir un probable juego de fallamiento conjugado, uno en dirección NE-SW y el segundo en dirección NW-SE. Posteriormente analizando los resultados del cálculo del tensor medio de esfuerzos, se observó un gran error y ambigüedad de los resultados de la fase NW-SE, por lo que se decidió descartar esta información; por lo tanto, únicamente se consideraron los siguientes resultados:

Evento Extensivo

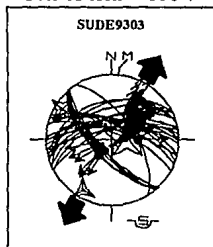
M. R4DT

$$\sigma_1 = 76 \text{ 72} ; \phi = 0.076$$

$$\sigma_2 = 302 \text{ 13} ; \alpha = 10$$

$$\sigma_3 = 209 \text{ 13} ; \text{Ruptura} = 47$$

Coherencia = 100 %



SUDE9304

LOCALIZACIÓN: 16°41'37" Lat. N-95°18'13" Long. W. Terracería perpendicular al E de la terracería principal Ixtepec-Sta. Ma. Guienagati, a 500 m. al W del poblado Guichixu, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea intrusiva de composición ácida (?), con gran contenido de micas (biotita) con diaclasas y fracturamiento irregular e intemperizado de color café. Este afloramiento se puede correlacionar con la tercera formación descrita en la estación SUDE9303.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados a un fallamiento normal, vinculado a esfuerzos extensionales; la información recabada no permitió definir un posible juego de fallamiento conjugado.

RESULTADOS: El primer cálculo del tensor medio de esfuerzos, considerando toda la información recabada permitió seleccionar la información más representativa para esta estación, después de realizar nuevamente el cálculo de tensor se seleccionaron los siguientes resultados:

Evento Extensivo

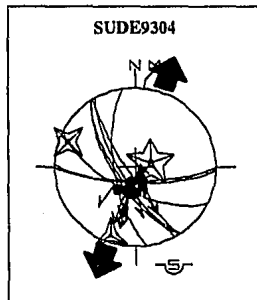
M. R4DT

$$\sigma_1 = 72 \text{ 74} ; \phi = 0.292$$

$$\sigma_2 = 291 \text{ 12} ; \alpha = 5$$

$$\sigma_3 = 199 \text{ 10} ; \text{Ruptura} = 27$$

Coherencia = 100 %



SUDE9305

LOCALIZACIÓN: 16°24'03" Lat. N-95°26'36" Long. W. Carretera Sto. Domingo Tehuantepec-Sta. Ma. Jalapa del Marqués, en el área del microondas, al S del poblado Sta. Ma. Jalapa del Marqués, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea intrusiva, probablemente granodiorita con cristalización bien desarrollada, muy fracturada, deleznable e intemperizada.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados a dos posibles campos de esfuerzos; por un lado un campo de esfuerzos extensivo vinculado a fallas normales; y por otro lado, un evento compresivo vinculado a fallas de movimiento lateral (probablemente sinistral).

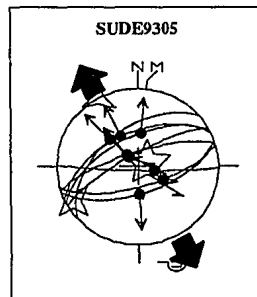
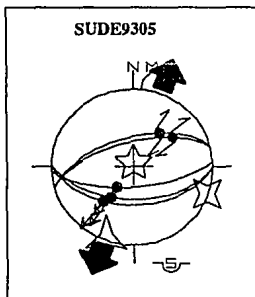
RESULTADOS: Analizando la información recabada, se seleccionaron únicamente los datos del evento distensivo para el cálculo del tensor medio de esfuerzos, ya que los datos asociados al evento compresivo presentaban incertidumbre para el mencionado cálculo.

Evento Extensivo
M. INVD

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 586; \phi = 0.621 \\ \sigma_2 &= 110; \alpha = 7 \\ \sigma_3 &= 201; \text{Ruptura} = 20 \\ \text{Coherencia} &= 100\% \end{aligned}$$

Evento Extensivo
M. INVD

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 6680; \phi = 0.292 \\ \sigma_2 &= 24122; \alpha = 5 \\ \sigma_3 &= 3311; \text{Ruptura} = 27 \\ \text{Coherencia} &= 87\% \end{aligned}$$



SUDE9606

LOCALIZACIÓN: 16°20'08" Lat. N-95°25'75" Long. W. Terracería perpendicular al W de la carretera Tehuantepec-Jalapa del Marqués, al S de la estación SUDE9305.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea intrusiva, probablemente granodiorita con cristalización bien desarrollada, con planos de fracturamiento bien definido (diaclasas). Esta formación se correlaciona posiblemente con la formación de la estación SUDE9305.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados a campos de esfuerzos extensionales vinculados a fallas normales, las condiciones del afloramiento no permitieron definir la posible cronología de los eventos involucrados; se observaron también planos con estrías asociados a eventos compresionales vinculados a un fallamiento de movimiento lateral, sin lograr establecer el sentido del movimiento.

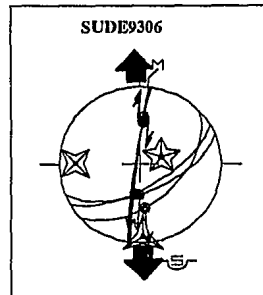
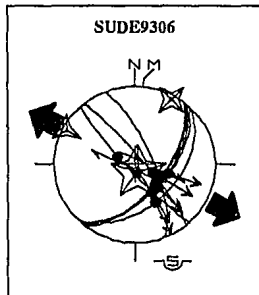
RESULTADOS: La incertidumbre del sentido del movimiento lateral asociado a un campo de esfuerzos compresional, no permiten el cálculo del tensor medio de esfuerzos; sin embargo, para los datos asociados a esfuerzos extensivos si se realizó dicho cálculo. Finalmente analizando los resultados de los dos métodos empleados, se seleccionó la siguiente información:

Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 165 \text{ 82}$; $\phi = 0.101$
 $\sigma_2 = 28 \text{ 6}$; $\alpha = 6$
 $\sigma_3 = 298 \text{ 6}$; Ruptura = 44
 Coherencia = 100 %

Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 69 \text{ 67}$; $\phi = 0.625$
 $\sigma_2 = 271 \text{ 22}$; $\alpha = 3$
 $\sigma_3 = 178 \text{ 8}$; Ruptura = 45
 Coherencia = 100 %



SUDE9307

LOCALIZACIÓN: 16°43'01" Lat. N-95°21'05" Long. W. Terracerfa Ixtepec-Sta. Ma. Guienagati, a 3 Km al S de Sta. Ma. Guienagati, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea extrusiva, muy fracturada e intemperizada de color verde a gris. Mioceno Superior (?).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas y estrías asociados a dos tipos de fallamiento; un fallamiento normal vinculado a esfuerzos extensivos y un fallamiento de movimiento lateral sinistral y dextral, estos dos últimos asociados al mismo campo de esfuerzos.

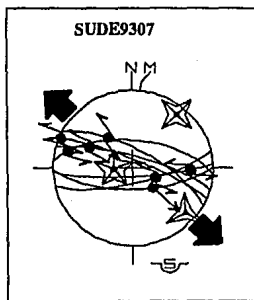
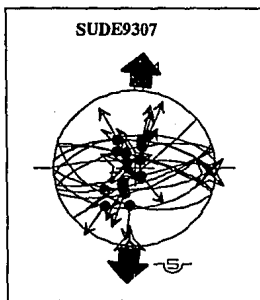
RESULTADOS: La escasa información de microtectónica del fallamiento de movimiento lateral, no permite realizar el cálculo del tensor medio de esfuerzos. Sin embargo, los datos de la falla normal permitieron dicho cálculo; finalmente, analizando los resultados de los dos métodos empleados y con el apoyo de la información de campo se interpreto y seleccionó la siguiente información:

1º Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 306 \text{ 80}$; $\phi = 0.192$
 $\sigma_2 = 94 \text{ 9}$; $\alpha = 11$
 $\sigma_3 = 184 \text{ 5}$; Ruptura = 46
 Coherencia = 100 %

2º Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 268 \text{ 71}$; $\phi = 0.525$
 $\sigma_2 = 39 \text{ 12}$; $\alpha = 14$
 $\sigma_3 = 132 \text{ 14}$; Ruptura = 45
 Coherencia = 100 %



SUDE9308

LOCALIZACIÓN: 16°38'06" Lat. N-94°56'53" Long. W. Carretera Matías Romero-La Ventosa, a 12 Km al N de la Ventosa, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca sedimentaria, calizas probablemente pertenecen a la Sierra de Juárez, con recristalización de calcita en los planos de fractura y fallamiento. Cretácico (?).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos, decamétricos y estrías asociados tanto a eventos extensivos como compresivos. Para el campo de esfuerzos extensional vinculado a fallas normales se recabo información de tal forma que permite definir un posible juego de fallamiento conjugado normal. Por otra parte, para el campo de esfuerzos compresionales, asociado a un fallamiento de movimiento lateral sinistral.

RESULTADOS: Analizando la información recabada, se descarto la posibilidad de calcular el tensor medio de esfuerzos para el evento compresional, realizándose únicamente para los datos que definen un campo de esfuerzos extensivo; finalmente, examinando los resultados del cálculo, se seleccionó la siguiente información:

Evento Extensivo

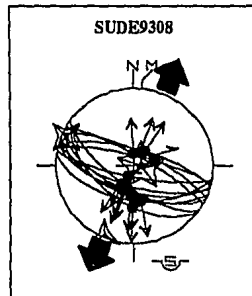
M. R4DT

$$\sigma_1 = 105 \text{ 84} ; \phi = 0.275$$

$$\sigma_2 = 292 \text{ 6} ; \alpha = 6$$

$$\sigma_3 = 202 \text{ 1} ; \text{Ruptura} = 44$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



SUDE9309

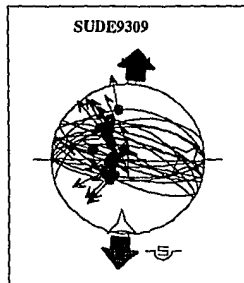
LOCALIZACIÓN: 16°31'53" Lat. N.-95°09'02" Long. W. Carretera Ixtaltepec-Ixtepec, a un costado de la carretera, ladera E del Cerro Blanco, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento de rocas ígneas extrusivas (riolitas, Mioceno Superior) en contacto con intrusivas (composición ácida, Cretácicas). Con alto grado de fracturamiento e intemperizadas de color amarillo.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados a fallas normales vinculadas al mismo estado de esfuerzos extensivos, se observó la evidencia de un posible fallamiento de movimiento lateral sinistral, las condiciones del afloramiento no permitieron recabar suficiente información para este último caso.

RESULTADOS: La información recabada, no permite definir claramente un juego de fallamiento conjugado normal para el evento distensivo, sin embargo, se calculó el tensor medio de esfuerzos. Analizando la información de los métodos empleados se seleccionó la siguiente información.

Evento Extensivo
M. INVD
 $\sigma_1 = 298 \text{ 62}$; $\phi = 0.296$
 $\sigma_2 = 90 \text{ 25}$; $\alpha = 13$
 $\sigma_3 = 185 \text{ 12}$; Ruptura = 47
Coherencia = 84 %



SUDE9310

LOCALIZACIÓN: 16°37'25" Lat. N-95°09'02" Long. W. Terracerfa perpendicular al W de la carretera Chihuitán-Santiago Loallaga, ladera S del Cerro Colorado, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea extrusiva, probablemente tobas del Mioceno Superior, muy fracturadas e intemperizadas de color café.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías asociados a fallas normales, vinculados a un campo de esfuerzos extensivo.

RESULTADOS: Se calculó el tensor medio de esfuerzos para la información recabada en campo, seleccionado posteriormente los resultados del método de R4DT se tiene la siguiente información:

Evento Extensivo

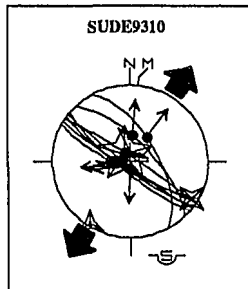
M. R4DT

$$\sigma_1 = 323 \text{ 81} ; \phi = 0.051$$

$$\sigma_2 = 122 \text{ 9} ; \alpha = 4$$

$$\sigma_3 = 212 \text{ 3} ; \text{Ruptura} = 62$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



3.2 ÁREA SURESTE (SUD)

SUD9301

LOCALIZACIÓN: 16°23'14" Lat. N-94°19'18" Long. W. Carretera La Ventosa-Zanatepec, al SE de Zanatepec a 500 m al Norte de Carlos Ramos, Oax.

FORMACIÓN: Afloramientos de rocas ígneas intrusivas, de composición intermedia muy fracturada e intemperizada de color verde claro y blanco, en contacto con rocas ígneas extrusivas probablemente tobas del Mioceno Superior(?).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados principalmente a un fallamiento normal, vinculado a un campo de esfuerzos extensionales. Las condiciones del afloramiento no permitieron definir un juego de fallamiento conjugado.

RESULTADOS: Analizando y seleccionando la información recabada, y posteriormente del cálculo el tensor medio de esfuerzos se obtuvieron los siguientes resultados:

Evento Extensivo

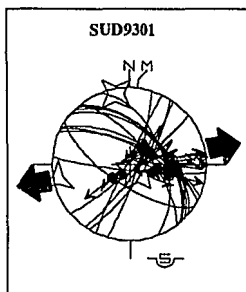
M. INVD

$$\sigma_1 = 333 \text{ 84} ; \phi = 0.422$$

$$\sigma_2 = 175 \text{ 6} ; \alpha = 22$$

$$\sigma_3 = 85 \text{ 2} ; \text{Ruptura} = 48$$

$$\text{Coherencia} = 87 \%$$



SUD9302

LOCALIZACIÓN: 16°22'46" Lat. N-94°20'14" Long. W. Carretera La Ventosa-Zanatepec, a 2 Km al W de Carlos Ramos, al SE del Zanatepec, Oax.

FORMACIÓN: Afloramientos de rocas ígneas extrusivas, de composición ácida (probablemente toba), en contacto con rocas metamórficas (esquistos). Este afloramiento pertenece al Complejo Metamórfico, el cual se encuentra con un alto grado de fracturación, observándose esquistosidad en las tres formaciones, con un mayor desarrollo dentro de las rocas metamórficas.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos con estrías, asociados tanto a esfuerzos extensivos (fallamiento normal) como a esfuerzos compresionales (fallamiento inverso y de desplazamiento lateral, en este último sin lograr establecer el sentido del desplazamiento). Las condiciones del afloramiento no permitieron definir la cronología del campo de esfuerzos involucrados. Sin embargo, por la edad del afloramiento (Paleozoico(?)), es evidente que las fases corresponden a edades diferentes dentro del tiempo geológico.

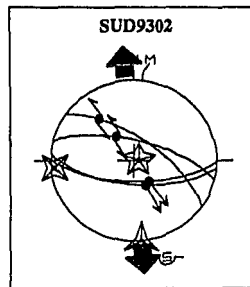
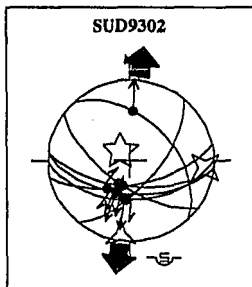
RESULTADOS: Analizando detenidamente la información recabada, se decidió establecer 4 fases; dos fases asociadas a campos de esfuerzos compresionales (una en dirección N-S y otra E-W), y dos fases vinculadas a un campo de esfuerzos extensionales (una en dirección NNE-SSW y otra NW-SE). Realizando los respectivos cálculos del tensor medio de esfuerzos para cada una de las fases, se seleccionaron los siguientes resultados:

1^{er} Evento Extensivo
M. INVD

$\sigma_1 = 314 \text{ 76}$; $\phi = 0.450$
 $\sigma_2 = 95 \text{ 11}$; $\alpha = 6$
 $\sigma_3 = 187 \text{ 8}$; Ruptura = 15
Coherencia = 100 %

2^o Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 80 \text{ 85}$; $\phi = 0.592$
 $\sigma_2 = 265 \text{ 5}$; $\alpha = 5$
 $\sigma_3 = 175 \text{ 0}$; Ruptura = 29
Coherencia = 100 %

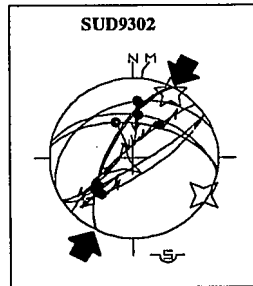
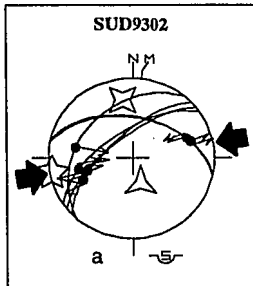


Evento Compresivo
M. INVD

$\sigma_1 = 259 \quad 3 ; \phi = 0.525$
 $\sigma_2 = 350 \quad 27 ; \alpha = 10$
 $\sigma_3 = 163 \quad 63 ; \text{Ruptura} = 34$
 Coherencia = 100 %

Evento Compresivo
M. INVD

$\sigma_1 = 29 \quad 9 ; \phi = 0.627$
 $\sigma_2 = 119 \quad 5 ; \alpha = 16$
 $\sigma_3 = 240 \quad 80 ; \text{Ruptura} = 53$
 Coherencia = 100 %



SUD9304

LOCALIZACIÓN: 16°25'40" Lat. N-94°30'25" Long. W. Terracería Reforma Pineda-Carretera principal Niltepec-Zanatepec, al Oeste Reforma Pineda, Oax., a 500 m al Norte de las vías del tren.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea extrusiva (tobas(?)), en contacto con rocas ígneas intrusivas de composición ácida. Se observaron patrones de fracturamiento irregular y diaclasas bien definidas; las rocas estaban muy intemperizadas de color amarillo ocre.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados a fallas normales, vinculado a un campo de esfuerzos extensionales, con una dirección aproximadamente N-S.

RESULTADOS: La información recabada no permite definir con gran detalle el campo de esfuerzos vinculado al fallamiento. No obstante, se calculó el tensor medio de esfuerzos. Analizando y seleccionando los resultados se obtuvieron los siguientes datos:

Evento Extensivo

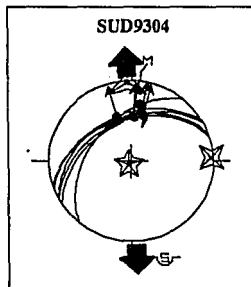
M. R4DT

$$\sigma_1 = 215 \text{ 86} ; \phi = 0.775$$

$$\sigma_2 = 87 \text{ 2} ; \alpha = 8$$

$$\sigma_3 = 357 \text{ 3} ; \text{Ruptura} = 19$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



SUD9305

LOCALIZACIÓN: 16°25'24" Lat. N-94°25'53" Long. W. Estación ubicada al NE del Poblado Reforma Pineda, Oax., aproximadamente a 4 Km sobre la carretera en dirección a la carretera Niltepec-Zanatepec.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea intrusiva de composición intermedia en contacto con rocas metamórficas, con un alto grado de fracturación e intemperizada de color amarillo (efecto de oxidación de minerales ferromagnesianos).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías, asociados a un campo esfuerzos extensivo NW-SE. Se logro observar una segunda población de fallas con planos y estructuras *Riedel* en la roca metamórfica (con poco desarrollo de esquistosidad) indicando un desplazamiento lateral sinistral (???) asociado a un campo de esfuerzos compresionales.

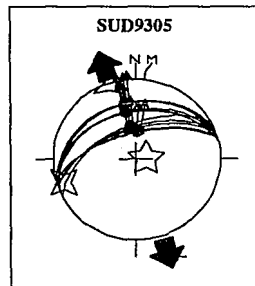
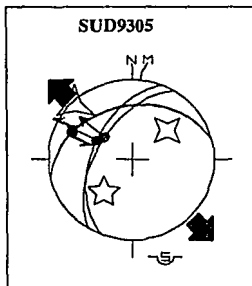
RESULTADOS: Agrupando la información exclusivamente para los datos del fallamiento normal, se calculó el tensor medio de esfuerzos, posteriormente con el apoyo de la información de campo se propusieron dos posibles fases obteniéndose los siguientes resultados:

1^{er} Evento Extensivo
M. INVD

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 220 \text{ 46} ; \phi = 0.692 \\ \sigma_2 &= 50 \text{ 43} ; \alpha = 7 \\ \sigma_3 &= 345 \text{ 5} ; \text{Ruptura} = 30 \\ \text{Coherencia} &= 100 \% \end{aligned}$$

2^o Evento Extensivo
M. INVD

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 86 \text{ 80} ; \phi = 0.505 \\ \sigma_2 &= 252 \text{ 10} ; \alpha = 3 \\ \sigma_3 &= 342 \text{ 2} ; \text{Ruptura} = 12 \\ \text{Coherencia} &= 100 \% \end{aligned}$$



SUD9306

LOCALIZACIÓN: 16°32'58" Lat. N-94°38'12" Long. W. 3 Km al W sobre la carretera Niltepec-La Ventosa, en el área del microondas a un costado de la carretera.

FORMACIÓN: Afloramiento de rocas ígneas extrusivas, probablemente riolitas, muy fracturada e intemperizada de color amarillo-óxido. Mioceno Superior (?).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías asociados a campos de esfuerzos extensivos y compresivos. Por un lado, el campo de esfuerzos extensivos puede estar vinculado a fallas de tipo normal, observándose un posible juego de fallamiento conjugado. Por otro lado, el campo de esfuerzos compresionales esta vinculado a fallas de tipo inverso y de desplazamiento lateral; sin embargo, las condiciones del afloramiento no permitió definir claramente estas últimas fallas.

RESULTADOS: Considerando únicamente los datos asociados al campo de esfuerzos extensivos, se calculó el tensor medio de esfuerzos. Analizando los resultados del cálculo, se seleccionaron los siguientes resultados:

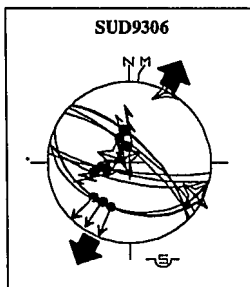
Evento Extensivo
M. R4DT

$$\sigma_1 = 291 \text{ 79} ; \phi = 0.259$$

$$\sigma_2 = 117 \text{ 11} ; \alpha = 7$$

$$\sigma_3 = 27 \text{ 1} ; \text{Ruptura} = 35$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



SUD9307

LOCALIZACIÓN: 16°20'36" Lat. N-95°04'31" Long. W. Al SE del Poblado Juchitán de Zaragoza, Oax.

FORMACIÓN: Afloramiento de rocas sedimentarias. Calizas(?) con terrígenos muy fracturadas y con un grado de metamorfismo de bajo grado, intemperizadas de color amarillo, de estratificación mediana (0.5 a 1 m aprox.).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados posiblemente a diferentes campos de esfuerzos extensivos, vinculados a fallas normales. La presencia de planos y estrías asociados a un campo de esfuerzos compresionales (fallas de desplazamiento lateral sinistral(?)) no se lograron establecer claramente.

RESULTADOS: Analizando minuciosamente los datos relacionados con esfuerzos extensivos, se propusieron dos fases extensivas vinculadas a fallas normales; del mismo modo, se estableció una fase compresiva. Finalmente del cálculo del tensor medio de esfuerzos se seleccionaron los siguientes resultados:

Evento Extensivo (N-S)

M. R4DT

$$\sigma_1 = 113 \text{ 87} ; \phi = 0.275$$

$$\sigma_2 = 282 \text{ 3} ; \alpha = 6$$

$$\sigma_3 = 12 \text{ 1} ; \text{Ruptura} = 42$$

Coherencia = 100 %

Evento Extensivo (NW-SE)

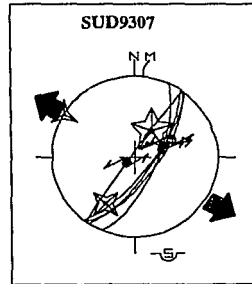
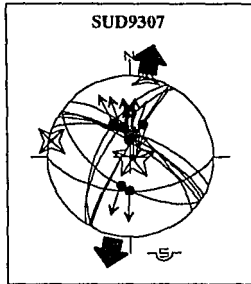
M. R4DT

$$\sigma_1 = 32 \text{ 58} ; \phi = 0.209$$

$$\sigma_2 = 212 \text{ 32} ; \alpha = 2$$

$$\sigma_3 = 302 \text{ 0} ; \text{Ruptura} = 57$$

Coherencia = 100 %



Evento Compresivo

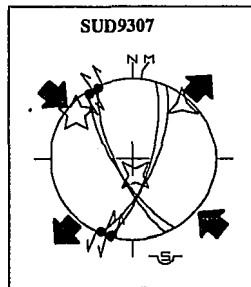
M. INVD

$$\sigma_1 = 310 \text{ 58} ; \phi = 0.209$$

$$\sigma_2 = 171 \text{ 73} ; \alpha = 6$$

$$\sigma_3 = 42 \text{ 11} ; \text{Ruptura} = 43$$

Coherencia = 100 %



Nota: debido a la incertidumbre de los datos del evento compresional, se decidió eliminar los resultados para esta fase.

SUD9309

LOCALIZACIÓN: 16°14'19" Lat. N-93°59'34" Long. W. 12 Km al W del poblado Arriaga, Chis., a un costado de las vías del tren.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea intrusiva, probablemente granodiorita, con bajo grado de intemperismo. Grado de cristalización regular. Mioceno (?).

DESCRIPCIÓN: Población de fallas y estrías asociados a un campo de esfuerzos compresivos vinculados a fallas de desplazamiento lateral sinistral. Por otra parte, esfuerzos extensivos vinculados a fallas normales. La incertidumbre de los datos y posibles errores en la recolección de la información de fallas de movimiento lateral influyeron en gran medida para desechar esta información.

RESULTADOS: Analizando únicamente los datos asociados a un campo de esfuerzos extensivo y observando una posible definición de un juego conjugado de fallamiento normal se calculó el tensor medio de esfuerzos. Finalmente se seleccionaron los siguientes resultados:

Evento Extensivo

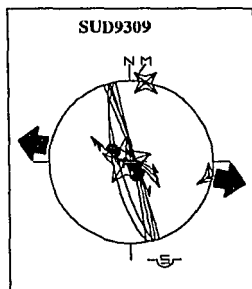
M. R4DT

$$\sigma_1 = 271 \text{ 86} ; \phi = 0.076$$

$$\sigma_2 = 11 \text{ 11} ; \alpha = 5$$

$$\sigma_3 = 101 \text{ 4} ; \text{Ruptura} = 68$$

$$\text{Coherencia} = 100 \%$$



SUD9311

LOCALIZACIÓN: 16°09'47" Lat. N-93°31'07" Long. W. Terracerfa Villa Flores-Sierra Morena, Chis.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea intrusiva en contacto con roca extrusiva, ésta última con un bajo grado de metamorfismo y diaclasas con planos paralelos bien definidos.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos y estrías asociados a dos campos de esfuerzos. Por una parte, un campo de esfuerzos compresivo vinculado a un fallamiento inverso; y por otra parte, un campo de esfuerzos vinculado a un fallamiento normal. Las condiciones del afloramiento no permitieron definir la cronología de los eventos.

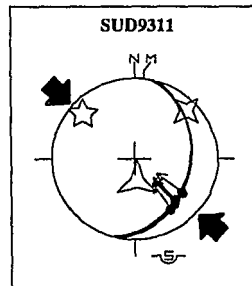
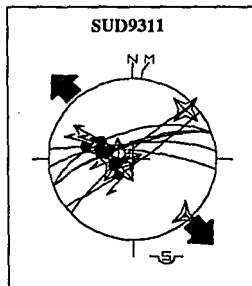
RESULTADOS: Agrupando los datos asociados a campos de esfuerzos compresivo y extensivo se calculó el tensor medio de esfuerzos para cada uno. Posteriormente analizando los resultados del cálculo se seleccionó la siguiente información:

Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 258 \text{ 76}$; $\phi = 0.159$
 $\sigma_2 = 46 \text{ 12}$; $\alpha = 7$
 $\sigma_3 = 138 \text{ 7}$; Ruptura = 61
 Coherencia = 100 %

Evento Compresivo
M. INV D

$\sigma_1 = 312 \text{ 17}$; $\phi = 0.758$
 $\sigma_2 = 47 \text{ 15}$; $\alpha = 6$
 $\sigma_3 = 175 \text{ 67}$; Ruptura = 12
 Coherencia = 100 %



SUD9312

LOCALIZACIÓN: 16°32'34" Lat. N-93°29'21" Long. W. Carretera Ocozocuatla- Villa Flores, terracerfa perpendicular a la carretera al W, rumbo a Santo Tomas, Chis.

FORMACIÓN: Afloramiento de roca ígnea intrusiva muy fracturada e intemperizada de color café-rojizo.

DESCRIPCIÓN: Población de Fallas con planos y estrías asociados a un campo de esfuerzos extensional y compresional. Para el campo de esfuerzos compresional se puede asociar a fallas de movimiento lateral (sinistra probablemente), mientras que para el campo de esfuerzos extensional están asociadas fallas normales. Las condiciones del afloramiento no permitieron definir la cronología de los eventos.

RESULTADOS: La incertidumbre y el posible error en la dirección del sentido del movimiento lateral, influyeron en gran medida a la anulación de los resultados del tensor medio de esfuerzos previamente calculados.

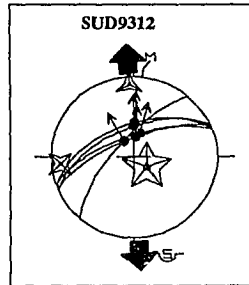
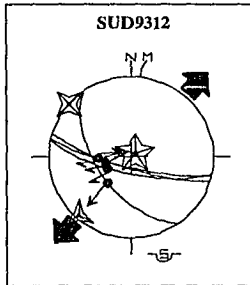
Por otra parte, para la información de eventos extensivos se dedujeron dos posible eventos de fallamiento normal y bajo este criterio realizó el cálculo de tensor medio de esfuerzos. Finalmente, analizando los resultados se tiene la siguiente información:

Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 128 \text{ 74}$; $\phi = 0.090$
 $\sigma_2 = 264 \text{ 12}$; $\alpha = 1$
 $\sigma_3 = 357 \text{ 11}$; Ruptura = 15
Coherencia = 100 %

Evento Extensivo
M. R4DT

$\sigma_1 = 48 \text{ 85}$; $\phi = 0.342$
 $\sigma_2 = 311 \text{ 1}$; $\alpha = 4$
 $\sigma_3 = 221 \text{ 5}$; Ruptura = 33
Coherencia = 100 %



SUD9313

LOCALIZACIÓN: 16°26'07" Lat. N-94°42'19" Long. W. Terracería perpendicular a la carretera La Ventosa-Niltepec, en dirección a San Dionisio del Mar, cercano a las vías del tren.

FORMACIÓN: Afloramiento de rocas ígneas extrusivas muy fracturadas e intemperizadas de color amarillo. Probablemente del Mioceno Superior.

DESCRIPCIÓN: Población de fallas con planos decimétricos y estrías asociadas a fallas normales, vinculadas a un campo de esfuerzos extensivo. Se observo igualmente juegos de fallas de movimiento lateral (sinistral, dextral); no obstante, las condiciones del afloramiento no permitieron definir claramente este campo de esfuerzos para el cálculo del tensor medio de esfuerzos.

RESULTADOS: Considerando únicamente los datos asociados a un campo de esfuerzos extensivo a su vez a un juego conjugado de fallamiento normal, se calculó el tensor medio de esfuerzos. Finalmente, analizando los resultados de los dos métodos empleados se seleccionó la siguiente información:

Evento Extensivo

M. INVD

$$\sigma_1 = 225 \text{ 77 ; } \phi = 0.356$$

$$\sigma_2 = 107 \text{ 6 ; } \alpha = 12$$

$$\sigma_3 = 16 \text{ 11 ; Ruptura} = 45$$

$$\text{Coherencia} = 91 \%$$

