

MECANISMO DE LOS TEMBLORES DE LA COSTA OCCIDENTAL DE MÉXICO

JAIME YAMAMOTO

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
México, D.F.

Resumen: En el presente trabajo se discuten los procesos de ruptura de los principales temblores ($M_s > 7.0$) ocurridos en la costa sudoccidental de México de 1963 a 1985. En particular, se analiza el proceso de ruptura del temblor de Michoacán ($M_{sz} = 8.1$) del 19 de septiembre de 1985 a las 13:17 GMT (07:17 hora local) y de su principal réplica ($M_s = 7.5$) ocurrida al día siguiente.

RUPTURE MECHANISM OF EARTHQUAKES ALONG THE WEST COAST OF MEXICO

Abstract: The most devastating earthquake ($M_{sz} = 8.1$) in the history of Mexico occurred on September 19, 1985 at 13:17 GMT near the coast of Michoacan (18.19°N; 102.53°W) followed by another earthquake ($M_s = 7.5$) on the 21th at 01:37 GMT. In this paper a discussion of the faulting mechanism of these two earthquakes is made and compared with rupture processes associated to major earthquakes ($M_s > 7.0$) occurred at the west coast of Mexico from 1963 to 1985.

1. INTRODUCCIÓN

El objeto de esta presentación es dar una visión panorámica de los procesos de ruptura asociados a los temblores mayores de la costa sudoccidental de México. En la discusión se utilizarán los principales temblores ($M_s > 7.0$) ocurridos en la región en épocas recientes (1963 a 1985). En particular se analizará el proceso de ruptura del temblor de Michoacán ($M_{sz} = 8.1$, $m_b = 6.8$) del 19 de septiembre de 1985 a las 07:17 AM (hora local) y el del 20 de septiembre ($M_{sz} = 7.6$, $m_b = 6.3$) a las 19:37.

Con objeto de hacer más sencilla la presentación y debido a lo heterogéneo de la audiencia, tendré que sacrificar precisión en aras de la simplicidad. Pido disculpas por adelantado a mis colegas expertos.

2. ESCENARIO GEOTECTÓNICO

La costa sudoccidental de México es la región sísmicamente más activa del continente en relación a la ocurrencia de temblores de foco superficial (Fig. 1). Fisiográfica y sísmicamente tiene la característica típica de una estructura de arco de isla. La región incluye una trinchera —la Trinchera Centroamericana— bien desarrollada y un patrón de sismicidad que va de focos muy superficiales en la costa a focos de profundidad intermedia (aproximadamente 250 km) en el interior del continente (figura 2).

Vulcanismo reciente es evidenciado por la presencia de volcanes cuaternarios activos en el cinturón volcánico trans-mexicano y en la región fronteriza México-Guatemala.

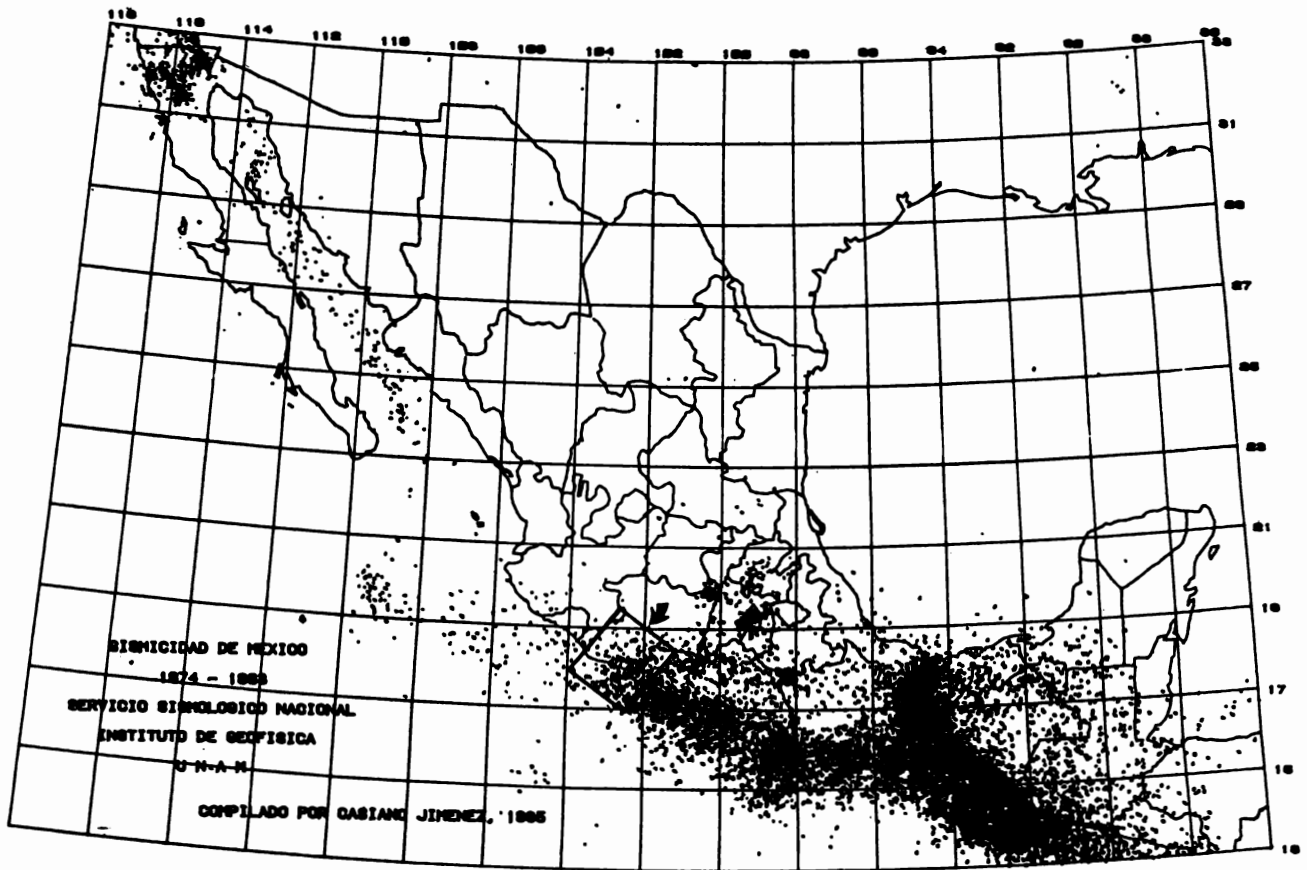


Fig. 1. Mapa que muestra la sismicidad de México para el periodo comprendido entre 1974 y 1983. Cada punto representa el epicentro de un temblor.

Dentro del contexto de la teoría de tectónica de placas, la costa occidental de México representa una zona típica de subducción. Aquí, la Placa de Cocos (océanica) que se mueve lentamente hacia el noreste, se sumerge por debajo de la Placa Americana (continente) a lo largo de la Trinchera Centroamericana (Figs. 3 y 4). El movimiento relativo entre estas dos placas genera enormes presiones sobre su área de contacto produciendo la intensa actividad sísmica de la costa. Debe hacerse notar que como se observa en la figura 2, las fronteras de las placas que convergen en esta región no están claramente delineadas por la distribución espacial de los hipocentros. Probablemente se debe, como sugieren algunos autores,¹ a la dispersión producida por errores en la localización de los hipocentros.

La Trinchera Centroamericana localizada frente a la costa sudoccidental de México y América Central

(Fig. 3) ha estado sujeta a una intensa exploración geofísica desde principios de este siglo.² Reconocimientos topográficos y de refracción sísmica hechos a lo largo y perpendicularmente a la trinchera, indican que la zona de fractura de Tehuantepec divide a la trinchera en dos segmentos: a) Desde su inicio en las islas Tres Marias hasta Tehuantepec la trinchera es más superficial, más arqueada; sísmica y volcánicamente menos activa. b) El segmento localizado más al sur hasta su final en la Cordillera de Cocos, es más profundo, sísmica y volcánicamente más activo. Por otro lado, el ángulo de inclinación (aproximadamente 19°) con que la Placa de Cocos subduce en esta región, es mayor que en el norte (aproximadamente 14°).

Las otras fronteras naturales de la Placa de Cocos son al sureste el Sistema de Fallas Polochic-Motagua, que al mismo tiempo divide a la Placa Americana y

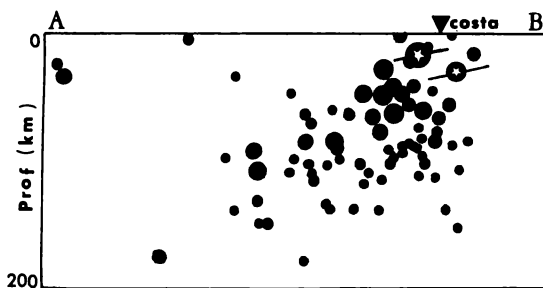
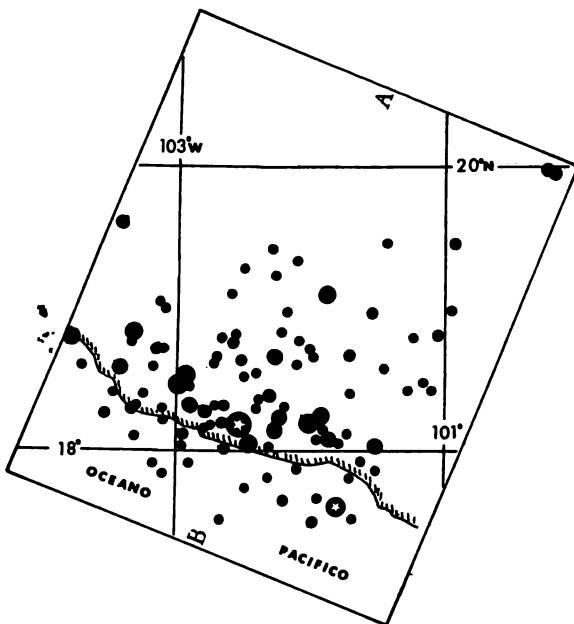


Fig. 2. (Superior) Detalle de la actividad sísmica del área de Michoacán (ver rectángulo en Fig.1). Sólo se graficaron los eventos más importantes ($M_s > 3$) ocurridos entre 1966 y 1981 y publicados por el ISC. El tamaño de los círculos oscuros es proporcional a su magnitud; (●) y (○) indican las posiciones de los epicentros de los temblores del 19 y 20 de septiembre de 1985, respectivamente. **(Inferior)** La sección inferior es un perfil de la actividad sísmica a lo largo de la línea AB perpendicular a la trinchera en función de la profundidad. Las barras muestran la inclinación de los planos de falla asociados a los dos eventos. (Figura modificada de Ref. 10).

del Caribe (Fig. 3). La Cordillera del Pacífico Oriental, considerada zona de divergencia, representa su frontera oeste.

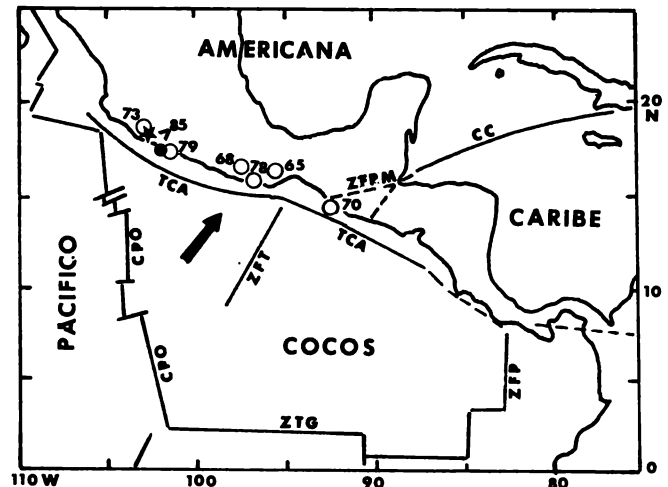


Fig. 3. Mapa que muestra la Placa de Cocos y otras placas vecinas con las que interactúa. Los círculos representan los temblores mayores ($M_s > 7$) ocurridos a lo largo de la costa entre 1963 a 1985. TCA, CPO y CC significan: Trinchera Centroamericana, Cordillera del Pacífico Oriental y el Canal de Cayman, respectivamente. ZFT, ZFP y ZFPM representan las zonas de fracturas de Tehuantepec, fallas de Panamá y Polochic-Motagua, respectivamente. La flecha indica la dirección del movimiento de la Placa de Cocos con respecto a la Americana. (Figura modificada de Ref. 2.)

3. TEMBLORES Y FALLAS

Desde el inicio del siglo XX se demostró que los temblores, especialmente los superficiales, se podían atribuir en general a rupturas ocurridas a lo largo de fallas. Fue durante el legendario temblor de San Francisco (1906) cuando se observaron claras evidencias de este hecho. Así, se estableció que un temblor se produce cuando las fuerzas que actúan sobre los lados opuestos de una falla o de una zona de debilidad sobrepasan la fuerza de fricción o la resistencia que los mantiene unidos, con lo cual sobreviene una liberación repentina y violenta de la energía almacenada en la roca, en forma de ondas sísmicas y calor generado por fricción (Fig. 4). Las ondas sísmicas irradiadas en todas direcciones dan lugar al temblor. Dentro del marco de la teoría de tectónica de placas, estos bloques representan las placas rígidas que conforman la superficie de la Tierra.

4. MÉTODO SÍSMICO Y GEOLÓGICO

No siempre es posible la observación en el campo de fallas asociadas con temblores, particularmente en temblores que ocurren en el mar. Afortunadamente,

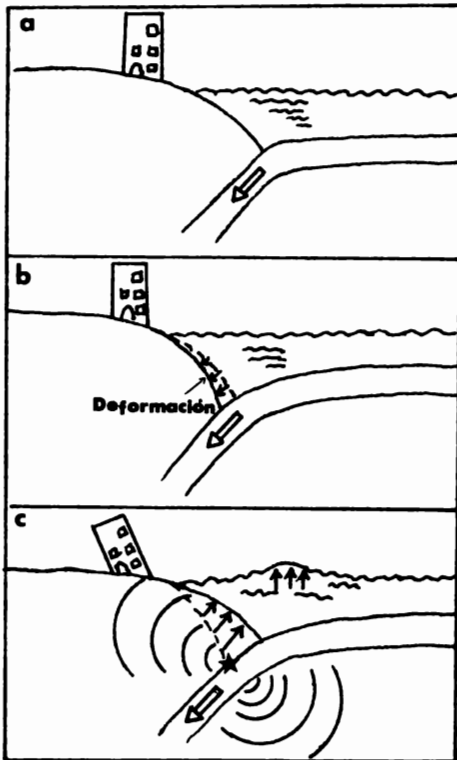


Fig. 4. Figura idealizada que muestra el proceso de subducción y su relación con la generación de temblores (comparar con Fig. 2 inferior). *a)* La placa oceánica (~ 100 km de espesor) subduce bajo la placa continental. *b)* La margen en contacto de la placa continental se deforma continuamente. *c)* Cuando la deformación excede un "cierto" límite, causa una liberación repentina de la energía resultando en un gran temblor. El proceso se repite continuamente.

además del método geológico para la determinación *in-situ* de la orientación y el desplazamiento de la falla, existe un método sismológico paralelo que proporciona información similar a partir del análisis de los registros obtenidos con los sismógrafos. Cabe decir que esta técnica llamada "solución de mecanismo de falla", representa el puente de conexión más importante entre la sismología y la geología.

Desde el inicio de la sismología instrumental se observó que la polaridad del pulso inicial de la onda *P* podía tomar dos sentidos: *compresional* (movimiento del suelo en la estación hacia arriba) o *dilatacional* (movimiento del suelo hacia abajo).

Estas polaridades graficadas convenientemente en un mapa³ presentaban una distribución muy particular. Se observó que era posible trazar dos líneas perpendiculares a través del epicentro, de tal manera que los cuadrantes opuestos por el vértice mostraban la misma polaridad (compresión o dilatación). Una de

estas líneas representaba el plano de falla y, la otra, el plano auxiliar.

Así, para determinar la orientación de la falla que dio origen a un temblor particular, únicamente será necesario graficar la polaridad del impulso inicial de la onda *P* para cada estación sismológica y ajustar dos planos mutuamente ortogonales, de tal manera que cuadrantes opuestos muestren la misma polaridad. En la práctica, debido al uso de datos a grandes distancias y a la naturaleza esférica de la Tierra, se utiliza una red estereográfica en lugar de un mapa o plano. Usando este método analizaremos a continuación los mecanismos de falla de los temblores recientes más importantes.

5. MECANISMO DE FALLA DE TEMBLORES RECIENTES

5.1 Temblor del 19 de septiembre de 1985

En las figuras 5 y 6 se muestran las localizaciones preliminares de las principales réplicas del temblor del 19 de septiembre publicadas por los centros de información sísmica. Un análisis detallado de la distribución final obtenida con datos de estaciones muy cercanas al epicentro, muestra dos concentraciones de réplicas que sugieren la existencia de dos áreas de ruptura distintas que pueden ser asociadas con los eventos del 19 y 20 de septiembre.⁴

Generalmente se acepta que el área en que se distribuyen las réplicas que siguen a un evento mayor, es una medida de la falla que lo originó. Así, la figura 6 sugiere una longitud de ruptura del orden de 170 km y 70 km para los temblores del 19 y 20, respectivamente, en dirección más o menos paralela a la costa.

En la figura 7 han sido graficadas en una proyección estereográfica las polaridades de los primeros impulsos de la onda *P*, observadas en varias estaciones sismológicas de acuerdo a su acimut y distancia del epicentro. Los círculos negros representan compresiones y los círculos vacíos dilataciones. La solución del mecanismo muestra dos planos nodales, uno de los cuales es el de falla. Esto es, el plano sobre el que ocurre la ruptura. El plano A con rumbo prácticamente este-oeste (E 6°N) buza 12° en dirección norte aproximadamente, y el plano B con rumbo E 37°S es casi vertical y buza 80° aproximadamente en dirección suroeste. Esta disposición de los planos nodales se observa comúnmente en temblores superficiales en zonas de subducción. Representa un afallamiento de cobijadura de tipo inverso con una pequeña componente de movimiento lateral izquierdo.

El método empleado no permite discernir cuál de

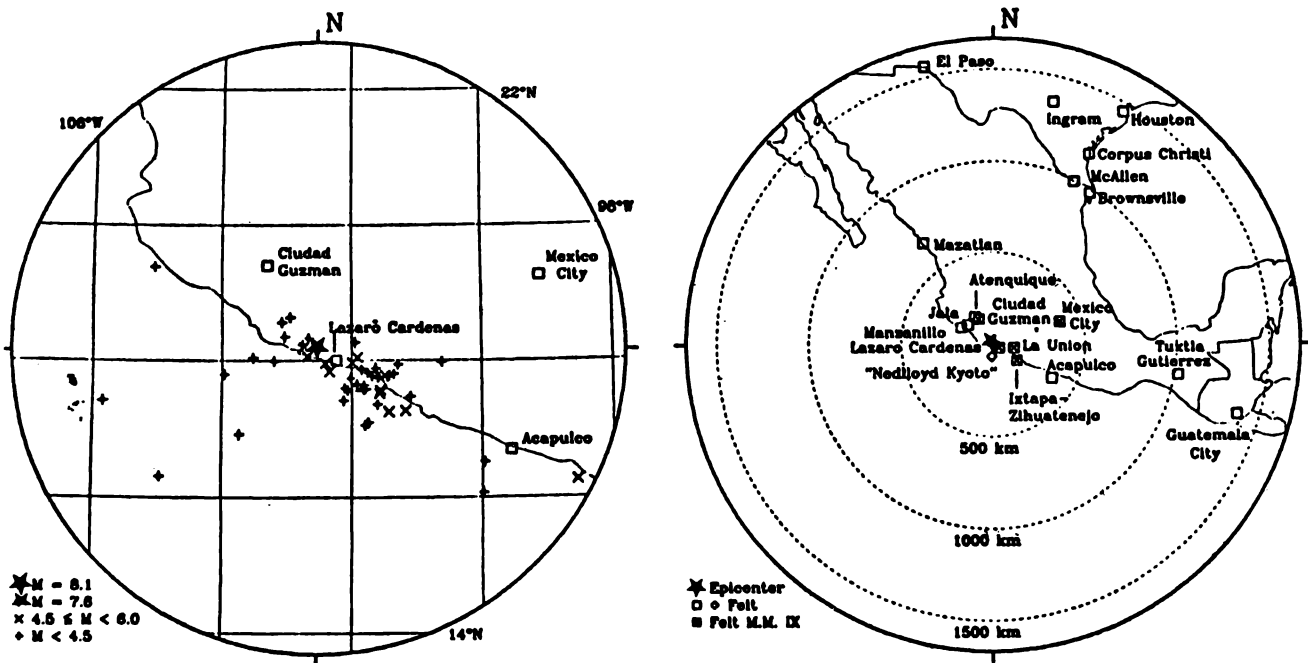


Fig. 5. a) Localización del epicentro del temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 (★) y de sus principales réplicas. b) (☒) indica las poblaciones donde se observaron daños mayores (~ IX Mercalli). (□) indica las principales poblaciones en donde se sintió el temblor. Nótese que hay reportes de lugares tan alejados como El Paso, Texas (~ 1500 Km). (◇) indica la posición del barco "Nedlloyd Kyoto" cuya tripulación reportó haber sentido fuertemente el temblor. (Ref. 9).

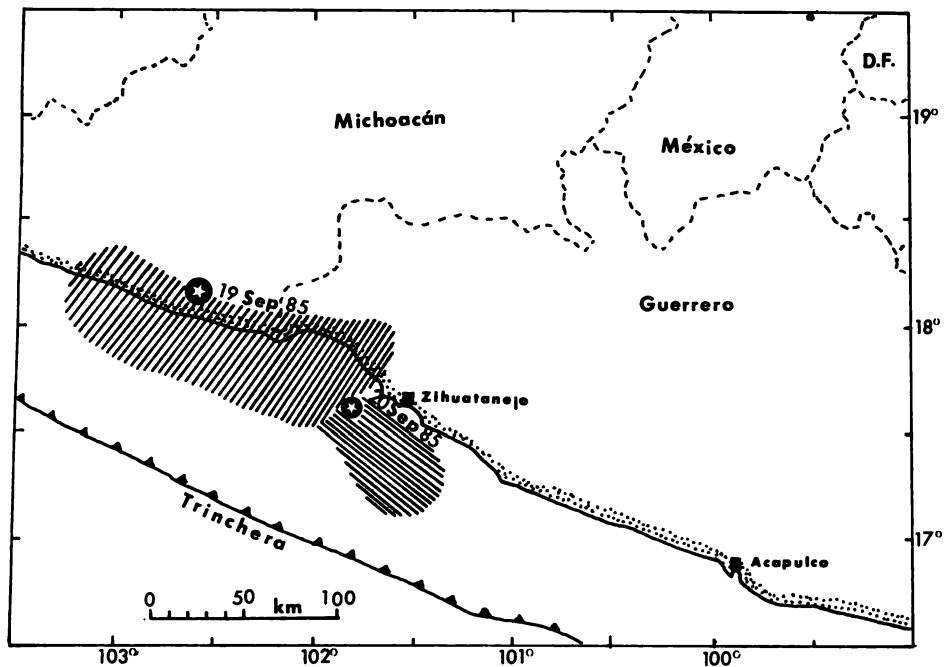


Fig. 6. Mapa que muestra el área de réplicas asociadas con el temblor del 19 (★, / / / /) y del 20 de septiembre (●, \ \ \ \). (Ref. 4.)

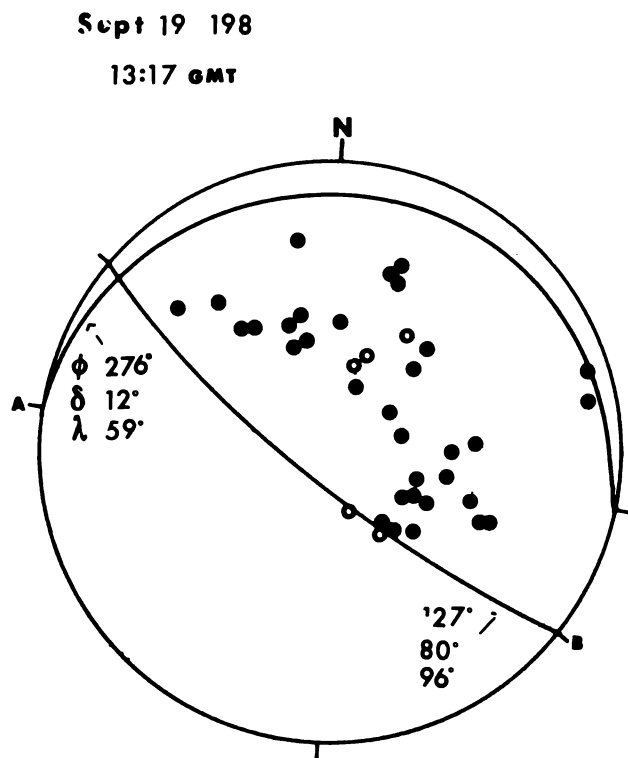


Fig. 7. Solución del plano de falla para el temblor del 19 de septiembre de 1985. El diagrama representa una proyección estereográfica de igual área. Los círculos llenos y vacíos representan compresiones y dilataciones para la onda *P*. ϕ , δ y λ representan el rumbo del plano de falla, el echado y la dirección de deslizamiento, respectivamente.

los dos planos nodales es el de falla. Se necesita recurrir a otras evidencias sísmicas y geológicas para resolver la ambigüedad. En general se escoge como plano de falla el plano menos inclinado. En este caso, si el plano orientado este-oeste (plano A) es el plano de falla, el mecanismo es congruente con la subducción de la Placa de Cocos bajo el continente. Así, la ocurrencia del temblor del 19 de septiembre debe estar íntimamente ligada a la interacción entre estas dos placas.

Nótese que el rumbo del plano de falla obtenido es oblicuo tanto al eje de la trinchera como a la línea de costa (fig. 10). ¿Por qué no sigue la dirección de trinchera como sería de esperar? Probablemente se deba a alguna característica geológica profunda de esta zona o quizás a la naturaleza segmentada del frente de la Placa de Cocos, como sugieren algunos autores⁵.

Se debe hacer notar que la solución del mecanismo presenta varios datos inconsistentes. Esto es, en esta-

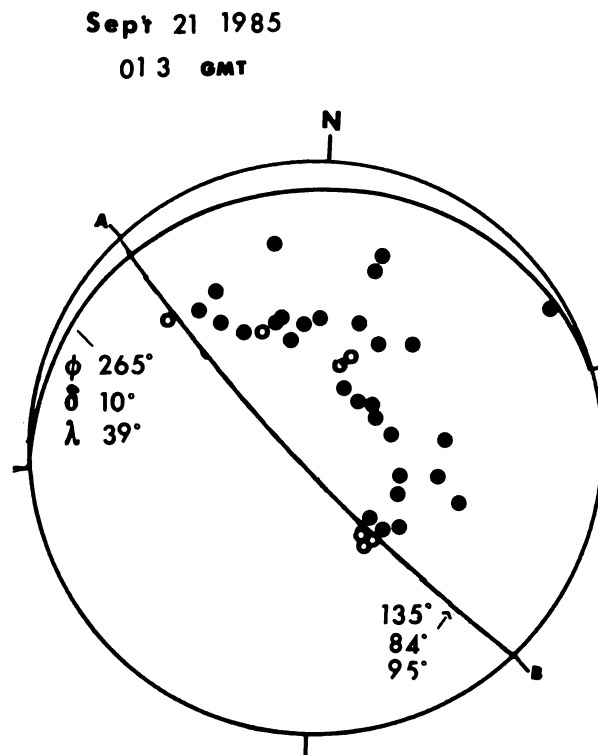


Fig. 8. Solución del plano de falla para el temblor del 21 de septiembre de 1985.

ciones donde teóricamente se esperaban compresiones, se reportaron dilataciones. Esto se debió en parte a una confusión ocasionada por un pequeño impulso que aparece en los sismogramas aproximadamente cuatro segundos antes del arribo principal de la onda *P*. Este tipo de inicio es característico de los grandes temblores superficiales.

5.2 Temblor del 20 de septiembre de 1985

La solución del mecanismo de este temblor (Fig. 8) es similar al anterior mostrando un plano (A) casi horizontal orientado aproximadamente este-oeste (S 85° W) y una inclinación de 10° hacia el norte y un plano (B) orientado en dirección E 45° S con una inclinación de 84° hacia el suroeste. La solución representa de nuevo un afallamiento de cobijadura de tipo inverso con un pequeño componente de movimiento lateral izquierdo. De nuevo se prefiere el plano A como plano de falla. Las conclusiones obtenidas para el evento anterior son también aplicables en este caso, excepto que los sismogramas indican que se trata de un evento con inicio más simple.

5.3 Otros eventos

Veamos ahora si hay alguna similitud con otros eventos mayores de la costa. La figura 9 muestra las

soluciones de los mecanismos para los seis eventos más importantes ocurridos de 1965 a 1979⁶ y el de 1981.⁷ Es clara la asombrosa similitud de los mecanismos de estos eventos con los temblores del 19 y 20

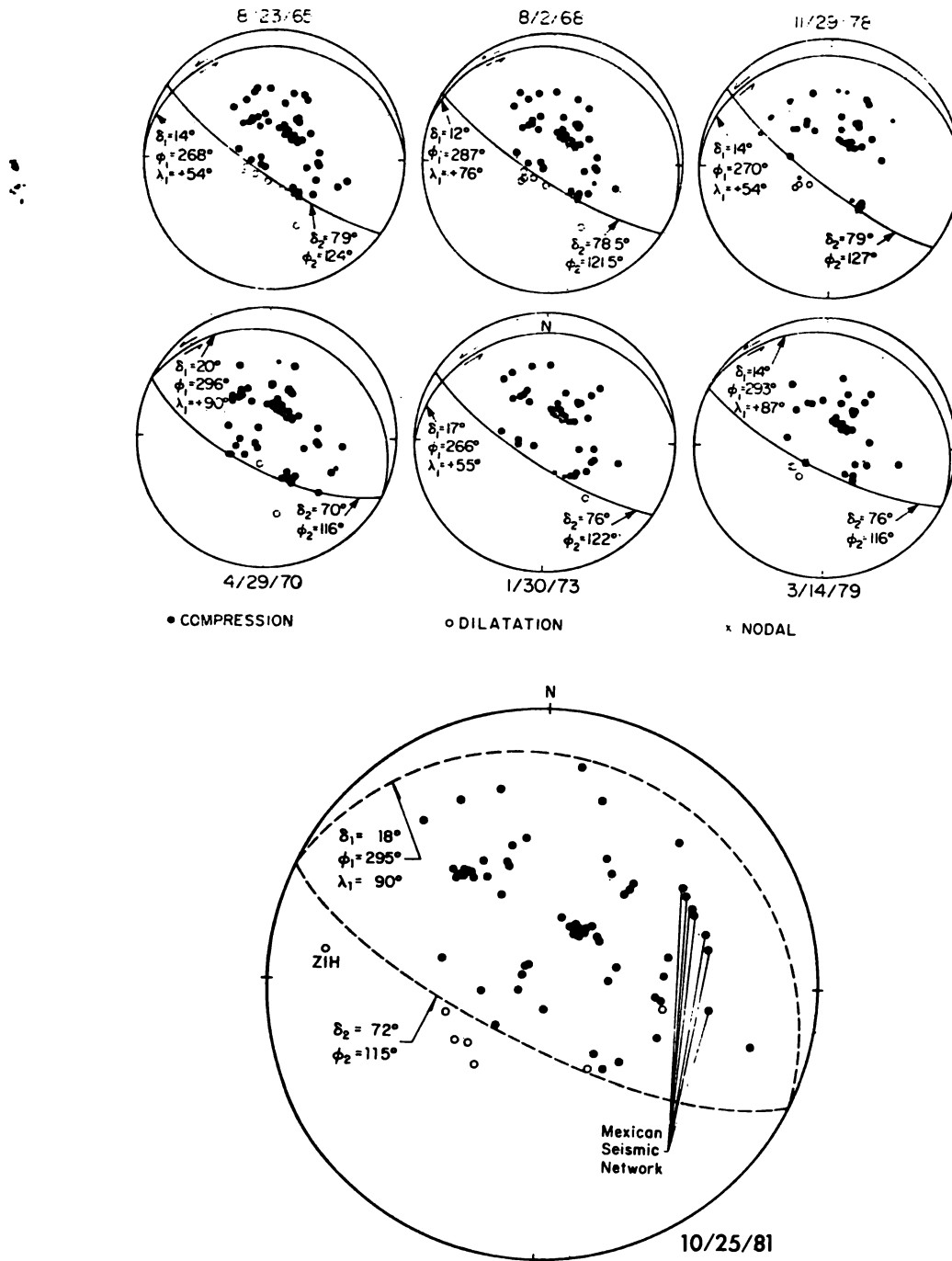


Fig. 9. Solución del mecanismo de falla para los eventos mayores ($M_c > 7$) ocurridos en la costa sudoccidental de México de 1965 a 1981, δ , ϕ y λ , representan el echado, rumbo del plano de falla y la dirección de deslizamiento, respectivamente. (Ref. 6 y 7).

de septiembre y, de manera muy particular, con el temblor de Colima de 1973.

Así, podemos concluir que los temblores mayores que ocurren en la costa sudoccidental de México tienen igual o muy parecido mecanismo de ruptura. Esto es, afallamiento de cobijadura de tipo inverso con una inclinación del plano de falla entre 10° y 20° con respecto a la horizontal y una pequeña componente de movimiento lateral izquierdo.

6. CONCLUSIÓN

En la figura 10 se grafican las áreas de réplicas para eventos analizados junto con la orientación de la

correspondiente falla obtenida de las soluciones de los mecanismos. Nótese que en general el rumbo del plano de falla coincide con la dirección del eje de la trinchera, excepto para el caso del temblor de Colima de 1973 y los del 19 y 20 de septiembre de 1985, que presentan una orientación oblicua a la trinchera. En virtud de que estos tres eventos están muy cerca uno de otro, refuerzan la idea de la existencia de una particularidad geológica profunda en esta zona. Otro aspecto importante es que tanto el temblor de Colima como el de Michoacán del 19 de septiembre, tienen signos claros de ser producto de una ruptura compleja. Complejidad que, como sugieren algunos autores,^{6,8} es resultado de la cercanía con la zona de con-

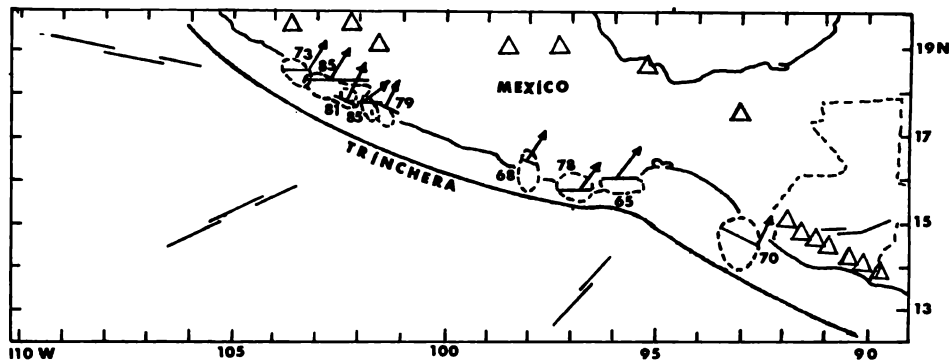


Fig. 10. Mapa que muestra las áreas de réplicas para los eventos analizados. Las barras superpuestas sobre cada área, indican el rumbo de la falla asociada al evento particular. Las flechas muestran la dirección del deslizamiento. (Δ) indica volcanes (figura modificada de Ref. 6).

TABLA 1. Datos de los temblores utilizados en la discusión.

Fecha *	Hora origen* H M S	Epicentro		Profundidad foco Km	Longitud falla Km	Momento sísmico $\times 10^{27}$ (dina-cm)	Magnitud M_s
		$^\circ$ N	$^\circ$ W				
Ags. 23, 1965	19 : 46 : 01.8	16.30	95.80	16	105	1.7	7.6
Ags. 2, 1968	14 : 06 : 43.9	16.59	97.70	16	84	1.0	7.1
Abr. 29, 1970	14 : 01 : 32.8	14.52	92.60	25	130	1.2	7.3
Ene. 30, 1973	21 : 01 : 12.5	18.48	103.00	48	90	3.0	7.5
Nov. 29, 1978	19 : 52 : 45.5	15.77	96.80	18	85	3.2	7.8
Mar. 14, 1979	11 : 07 : 11.2	17.46	101.46	20	70	2.7	7.6
Oct. 25, 1981	03 : 22 : 13	17:75	102.25	20	40	0.9	7.3
Sept. 19, 1985	13 : 17 : 49.0	18.19	102.53	16-28	170	9.5	7.9-8.1
Sept. 21, 1985	01 : 37 : 11.7	17.62	101.81	31	70	2.7	7.5-7.6

* En tiempo medio de Greenwich (GMT). Para obtener la hora de México, reste 6 horas.

NOTA: La información de la tabla fue extraída de las referencias: 6, 7 y 9.

vergencia de varias placas litosféricas. Finalmente, sería recomendable evaluar cuidadosamente los errores involucrados en las determinaciones de las soluciones de los mecanismos, puesto que las diferencias observadas podrían ser sólo resultados aparentes de la incertidumbre inherente al método empleado.

Agradecimientos

El autor agradece a L. Contreras su valiosa colaboración en la determinación de los mecanismos de falla y a C. Jiménez el haber proporcionado algunos mapas.

REFERENCIAS

1. Molnar, P. y L. R. Sykes: "Tectonics of the Caribbean and Middle American Region from Focal Mechanisms and Seismicity." *Geol. Soc. of America Bull.* Vol. 80, p. 1639-1684, 1969.
2. Shor, G. G.: "Continental Margins of Middle American, en: *The Geology of Continental Margins*, ed. Springer-Verlag, pp. 599-602, 1974.
3. Kasahara, K.: *Earthquake Mechanics*, ed. Cambridge University Press, pp. 28-52, 1981.
4. Anderson, J. G. et al.: "Strong Ground Motion and Source Mechanism of the Mexico Earthquake of September 19, 1985 ($M_s = 8.1$)". Enviado para publicación.
5. Carr, M. J. et al.: "The Segmented Nature of Source Continental Margins", en: *The Geology of Continental Margins*, ed. Springer-Verlag, pp. 105-114, 1974.
6. Chael, E. P. y G. S. Stewart: "Recent Large Earthquakes Along the Middle America Trench and Their Implications for the Subduction Process". *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 87, pp. 329-338, 1982.
7. Harskov, J. et al.: "Playa Azul, Michoacán, México, Earthquake of 25 October 1981 ($M_s = 7.3$). *Bull. Seism. Soc. of America*, Vol. 73, pp. 449-457, 1983.
8. Yamamoto, J.: "Rupture Process of Some Complex Earthquakes in Southern Mexico". Ph. D. Dissertation, Saint Louis Univ., 1978.
9. EDR No. 9-85, U.S. Department of the Interior, pp. 137-267, March, 3, 1986.
10. Contreras, L.: "Seismicity in Michoacan Distic, Mexico". *Individual Studies by Participants at the IISEE*, Vol. 21 (en prensa), Tokyo, Japan, 1985.