Un Modelo del Eje Volcánico Mexicano

Jaime H. Urrutia F.*
Luis del Castillo G.*

RESUMEN

En este trabajo se presentan nuevos datos para explicar la ausencia de paralelismo de la zona de volcanismo andesítico asociada a la trinchera Mesoamericana en la parte de México de la Placa Americana.

Se incluyen las velocidades de entrada de la Placa de Cocos bajo las Placas Americana y Caribe en 11 perfiles calculados bajo la base de las ecuaciones desarrolladas por Morgan (1968) y los ángulos de subducción en ocho de los perfiles mencionados, estimados según un modelo propuesto por Hatherton y Dickinson (1969).

ABSTRACT

A new data for the explanation in the relation between the andesitic volcanism zone (Mexican Volcanic Belt) and the Mesoamerican trench in the Mexican Continent is presented.

It is included the subduction velocities of the Cocos Plate below the American and Caribe Plates in eleven profiles calculated with the equations given by Morgan (1968); also it is included the underthrusting angles in eight of the mentioned profiles, estimated with a model developed by Hatherton and Dickinson (1969).

INTRODUCCION

En México la zona de volcanismo andesítico más cercana a la trinchera Mesoamericana está constituida principalmente por el Eje Volcánico Mexicano (EVM). Variadas e interesantes hipótesis han sido propuestas para explicar esta notable característica en el transcurso de un siglo, desde la

época del barón de Humboldt (Mooser, 1968, 1972, 1974). En los últimos años con el desarrollo de la teoría de Tectónica de Placas, en los bordes convergentes (destructivos) del tipo Océano—Continente, los fenómenos de subducción y derretimiento de las placas de corteza oceánica y de los sedimentos sobre ellas se han relacionado con la producción de volcanismo andesítico (Dickinson y Hatherton, 1967; Hatherton y Dickinson, 1968 y 1969) y de depósitos hidrotermales de sulfuros (Degens y Ross, 1970; Roma, 1973) en áreas adyacentes y paralelas a los bordes; y son precisamente estos aparatos volcánicos y zonas mineralizadas, las principales características empleadas para definir los límites del EVM. Entre las hipótesis que emplean la relación con la subducción de la Placa de Cocos se cuentan una en Molnar y Sykes (1969) y otra de Mooser (1974).

ALGUNAS CARACTERISTICAS DE LA PLACA COCOS Y LA EXPLICACION DEL MODELO

La Placa de Cocos es una placa de dimensiones modestas (alrededor de tres millones de km²) compuesta de corteza oceánica. Entre sus límites se tienen al occidente la dorsal del Pacífico este, al sur la dorsal de Galápagos, al norte y al este la trinchera Mesoamericana y al sureste la zona de fractura de Panamá (Fig. 1).

El arreglo de los límites constructivos de la Placa de Cocos respecto del límite destructivo proporciona una serie de características que varían según la posición, así del extremo NW al SE a lo largo del eje de la trinchera el material de la placa

* Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Fig. 1.— La presente muestra los límites de la Placa de Cocos, los cocientes de esparcimiento y la dirección probable del movimiento relativo (línea continua) respecto a la Placa Americana y la dirección necesaria (línea discontinua) para una entrada perpendicular a la trinchera en la zona de México (batimetría, anomalías magnéticas y epicentros de temblores de Chase y Menard, 1968).

dorsal	↗ vector de movimiento real
x epicentros	↘ vector de movimiento perpendicular
● volcanes e islas	→ dirección de esparcimiento
~ anomalía magnética	

se vuelve más denso y menos caliente y joven; la placa aumenta su espesor y rigidez; la superficie superior está a más profundidad y con una mayor cubierta de sedimento; la velocidad de entrada crece (Tabla III) y aumenta la capacidad de interac-

ción con la Placa Americana, por lo que el ángulo de subducción de Cocos disminuye (Tabla I).

Estos hechos unidos a que la dirección de movimiento de Cocos-América no es perpendicu-

TABLA I

ANGULOS DE SUBDUCCION DE LA PLACA DE COCOS BAJO LAS PLACAS AMERICANA Y CARIBE

PERFIL	Coordenadas del origen (abscisa O) de los perfiles (Figs. 6 y 7)		Considerando la Astenósfera entre los 100 y 200 km. (ángulos máximos)	Considerando la Astenósfera entre los 80 y 250 km. (ángulos mínimos)		
Placa Americana (Fig. 6-a)	Latitud (N)	Longitud (W)	Ángulos en la zona de temblores someros	Ángulos en la zona de volcanismo andesítico	Ángulos en la zona de temblores someros	Ángulos en la zona de volcanismo andesítico
A - A'	19°	104°	52.25°	61.48°	45.94°	58.73°
B - B'	18°	102°	31.82°	61.00°	26.40°	58.22°
C - C'	17°	100°	31.82°	46.87°	26.40°	43.69°
D - D'	16°	99°	28.97°	41.87°	23.89°	38.73°
E - E'	16°	98°	18.97°	42.83°	15.38°	39.67°
Placa del Caribe (Fig. 6-b)						
H - H'	14°	92°	82.59°	38.49°	80.77°	35.44°
I - I'	13°	90°	80.91°	41.25°	78.69°	38.12°
K - K'	10°	86°	85.99°	44.34°	84.99°	41.16°

lar a la trinchera (Urrutia, 1975; Del Castillo y Urrutia, 1975), ocasionan que la placa de Cocos forme ángulos diferentes en la entrada (Fig. 2). Por lo que los 20° (Singh, 1974) que forman el EVM con la trinchera quedan explicados al entrar horizontalmente una distancia mayor la placa hacia el Golfo de México (Fig. 2).

El modelo propuesto está de acuerdo con la información sismológica disponible (Fig. 3); los sismos someros se concentran cercanos a la trinchera y son más profundos bajo el EVM y en el Istmo de Tehuantepec, esta última región marca un cambio en la relación geométrica de placas, ya que la trinchera tiene otra orientación y la dirección del movimiento Cocos-Caribe es casi perpendicular a ella; en apoyo se tiene entre los 95° y 96° de longitud W una falla (Fig. 4) sugerida por los datos de batimetría (Fisher, 1961), ya que el fondo de la trinchera cambia de abrupto casi libre de sedimentos a suave y con mayores espesores de sedimentos y además la edad de la trinchera varía de más joven a más vieja (Fisher, 1961).

En América del Centro la zona volcánica andesítica se encuentra cercana y paralela a la trin-

chera (Fig. 6-b) presentando un arreglo similar a las trincheras y arcos de islas (Morgan, 1968; Hatherton y Dickinson, 1969; James, 1973) de otras regiones del mundo, cuya característica en común es la entrada perpendicular de la placa respecto al límite convergente.

ANGULOS Y VELOCIDADES DE SUBDUCCION

Dos ángulos (Tabla I) fueron estimados basándose en un modelo propuesto por Hatherton y Dickinson (1969) que relaciona los límites de la zona de volcanismo andesítico con la posición de la astenósfera (Fig. 5). Los límites considerados para la astenósfera fueron de 80 a 250 Km. (Fig. 7) y de 100 a 290 Km. La posición de los perfiles (Figs. 6a y 6b) y la localización de los hipocentros fue tomada de Molar y Sykes (1969).

En base a este modelo, el magma presenta un zoneamiento que depende de la profundidad de la zona de producción, particularmente con un mayor contenido de potasio (K_2O) mientras más profunda sea ésta (Dickinson y Hatherton, 1967; Hatherton y Dickinson, 1968-1969). La existencia de

Fig. 2.— Diagramas esquemáticos que muestran la entrada de la Placa de Cocos bajo la Americana y del Caribe (b) considerando una dirección no perpendicular a la trinchera en la zona correspondiente a la Placa Americana (a).

este tipo de tendencia geoquímica unida al estudio de otros elementos y relaciones entre ellos se ha utilizado para avalar la presencia de zonas de subducción antiguas (Coulon y Dupuy, 1975), en concreto la relación K_2O profundidad de la zona de Benioff se ha empleado para determinar la profundidad de paleozonas de subducción en Norteamérica (Dickinson, 1970; Lipman *et al*, 1971).

De aquí que los análisis geoquímicos de los magmas del EVM deberán mostrar un aumento en

el contenido de K_2O hacia su extremo norte y una disminución hacia el Golfo de México de acuerdo a la profundidad de la zona de Benioff (ver Fig. 2); debe considerarse que los magmas estarán contaminados en su paso por la corteza continental, por lo que aún en una misma unidad litológica se tendrán variaciones fuertes en composición; además hay que establecer las edades de las rocas estudiadas, ya que la zona de subducción evoluciona con el tiempo. Por ello, los resultados geoquímicos para rocas coetáneas deberán analizarse estadísticamente y elaborar con ellos mapas de igual composición química; ésto permitirá estudiar la historia del límite convergente.

En la Tabla II aparece la lista de los resultados de un análisis geoquímico de rocas de la Cuenca de México (Gunn y Mooser, 1971; Negendank, 1973) en comparación con datos de otras regiones (Wright, 1971; Coulon y Dupuy, 1975). En esta tabla puede observarse una disminución del contenido de potasio (K_2O) con el tiempo, lo que sugiere que la profundidad de la zona de producción ha disminuido. Sin embargo, la ausencia de datos de otras regiones no permite establecer en forma cuantitativa este decremento.

Las velocidades de subducción (Tabla III) se calcularon empleando las ecuaciones desarrolladas por Morgan (1968) y los datos de Larson y Chase (1970) y de Morgan (1971) para las Placas Cocos—América y de Larson y Chase (1970) para las Placas Cocos—Caribe.

CONCLUSIONES

1. El modelo propuesto explica bien el ángulo formado por el EVM y está de acuerdo con la distribución de temblores y las características de las Placas de Cocos, Americana y Caribe.
2. La dirección del movimiento relativo de Cocos—América forma un ángulo de unos 50° respecto al eje de la trinchera en la zona de México y es casi perpendicular en la de América Central.
3. La zona del Istmo de Tehuantepec (Fig. 4) es

TABLA II
COMPOSICION QUIMICA MEDIA DE ROCAS ANDESITICAS

	Rocas ígneas del Valle de México*			Composición media aproximada de andesitas**	Rocas de Cerdeña, Italia***	
	Oligoceno-Mioceno Promedio 27 análisis	Mioceno Superior Plioceno Promedio 19 análisis	Cuaternario Promedio 36 análisis		Andesitas 56 ^o /o SiO ₂ 62 ^o /o Promedio 20 análisis	Andesitas 56 ^o /o SiO ₂ 62 ^o /o Promedio 5 análisis
Si O ₂	63.3	63.1	58.1	60.0	58.62	
Al ₂ O ₃	16.8	16.6	16.5	17.0		
Fe ₂ O ₃	3.3	2.9	4.7	2.0		
Fe O	1.3	1.7	1.9	4.0		
Mn O	0.0	0.1	0.1	—		
Mg O	2.6	3.0	4.9	3.5		
Ca O	5.0	4.6	6.6	7.0		
Na ₂ O	4.0	4.0	3.9	3.5	3.15	3.08
K ₂ O	2.0	2.1	1.6	1.5	2.75	2.17
Ti O ₂	0.6	0.6	1.0	0.5		
P ₂ O ₅	0.1	0.1	0.2	—		
H ₂ O	0.7	1.0	0.4	1.0		
K ₂ O/Na ₂ O	0.5	0.53	0.41	0.43	0.87	0.70

Datos en ^o/o en peso

* Negendank, 1973;

** Wright, 1971;

*** Coulon y Dupuy, 1975.

crítica en el estudio de las relaciones de Cocos con América y Caribe (Moore y Del Castillo, 1974). En ella se ha inferido una falla (Del Castillo, 1974), probablemente relacionada con la que se encuentra en la trinchera del tipo transformada sinistral arco convexo—arco convexo de acuerdo a Wilson (1965) y al escarpe de Sigsbee en el Golfo de México y además se tiene una junta triple formada por las Placas Americana, Cocos y Caribe (Molnar

y Sykes, 1969).

- Los ángulos estimados dependen del límite astenósfera—mesósfera, de la delimitación de la zona de volcanismo andesítico en el continente, de las velocidades de la posición del polo de rotación y de la velocidad angular entre las placas; por lo que una determinación adecuada de estos parámetros proporcionarán datos más confiables.

TABLA III

VELOCIDADES DE ENTRADA DE LA PLACA DE COCOS, BAJO LAS PLACAS AMERICANA Y CARIBE

PERFIL Placa Americana (Fig. 6-a)	COORDENADAS		COCOS/AMERICA		COCOS-CARIBE
	Latitud (N)	Longitud (W)	Velocidad calculada usando datos de Larson y Chase, 1970. (cm/año)	Velocidad calculada usando datos de Morgan, 1971. (cm/año)	Velocidad calculada usando datos de Larson y Chase, 1970. (cm/año)
A - A'	18.00°	104.64°	6.39	6.96	
B - B'	17.00°	102.50°	6.55	7.50	
C - C'	16.16°	100.36°	7.61	7.97	
D - D'	15.83°	99.04°	7.95	8.24	
E - E'	15.50°	98.07°	8.21	8.45	
F - F'	15.53°	96.02°	8.64	8.66	
G - G'	14.72°	94.42°	9.10	9.03	
Placa del Caribe (Fig. 6-b)					
H - H'	13.59°	92.45°			5.54
I - I'	12.59°	90.37°			6.32
J - J'	11.93°	88.19°			7.00
K - K'	10.52°	86.18°			7.43

5. Análisis geoquímicos de rocas de diferentes edades de la zona del EVM permitirán estudiar la evolución de la zona de subducción; de aquí que es necesario incrementar el número de estudios geoquímicos con base a determinar un posible zoneamiento químico en tiempo y espacio; asimismo, se requiere aumentar el número de elementos a analizar, para incluir por ejemplo a los elementos trazas, cuya presencia se ha sugerido caracteriza los límites convergentes. (Sakes y White, 1972).

6. Los ángulos estimados en América del Centro

para la zona de temblores someros son demasiado altos, por lo que el modelo considerado necesita una redefinición en lo correspondiente a la posición de la astenósfera, cuyos límites deben estar a menores profundidades bajo esta zona.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los colegas S.K. Singh y H. Sandoval por la cooperación y discusiones durante la preparación del presente trabajo y en especial al Profr. Daniel A. Valencio por leer y criticar este manuscrito.

Fig. 3.— Distribución de sismos en las Placas de Cocos y Americana (tomada de López Ramos, 1974).

Fig. 4.— Posible falla transformada sinistral del tipo arco convexo—arco convexo en la trinchera Mesoamericana entre los 95° y 96° W (modificada de Del Castillo, 1974 y Urrutia, 1975); (a) Placa delgada, joven, poco espesor de sedimentos, menor velocidad y mayor ángulo de subducción, menor rigidez y dirección de entrada no perpendicular a la trinchera; (b) Placa con mayor espesor, menor temperatura, mayor edad, velocidad de subducción, rigidez y espesor de sedimentos, e interacción mayor con la placa Americana; (c) Cambio en la dirección de entrada respecto a la trinchera. Esta tiene mayor edad y fondo más suave por el relleno de sedimento.

Fig. 5.— Modelo generalizado de una zona de subducción en relación a la zona de volcanismo andesítico y la posición de la astenósfera (tomada de Hatherton y Dickinson, 1969).

Fig. 6a.— Localización de los perfiles. Geología y posición de la trinchera de López Ramos, 1974

Fig. 8b.— Localización de los perfiles. Geología tomada de ICAITI, 1969

Fig. 7.— Secciones que muestran la entrada de la Placa de Cocos, bajo las Placas Americana y del Caribe. (Notación similar a la Fig. 5, y la localización de la trinchera, volcanes y focos de temblores de Molnar y Sykes, 1969).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ATWATER, T. 1970. Implications of Plate Tectonics for the Evolution of Western North-America: *Geol. Soc. Am. Bull.* v. 81, p. 3513.
- CHASE, T.E. and MENARD, H.W. 1968. Four Fracture Zones of Mexico, Pan American Symposium on the Upper Mantle. México, D.F., p. 7.
- COULON, C. 1975. Evolution Spatiale des Caracteres Chimiques du Volcanisme Andésitique de la Sardaigne (Italia): *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 25, p. 170.
- DEGENS, E.T. and ROSS, D.A. 1970. The Red Sea Hot Brines: *Scientific American*, v. 222, No. 4, p. 32.
- DEL CASTILLO, G.L. 1974. Marine Geophysics along the Gulf of Mexico and Yucatan Peninsula Coastal area in Mexico: *Phys. Earth Planet. Int.* v. 9, p. 227.
- DEL CASTILLO, G.L. and URRUTIA, F.J. 1975. Geophysical Investigation in the Cocos Plate: an Active Plate: 13th. Pacific Science Congress, Vancouver, Canada. p. 397, Abstract. In revision submitted to *Jour. of Earth Sciences in Canada*.
- DICKINSON, W.R. 1970. Relations of Andesites, Granites and Derivatives Sandstones to Arc-Trench Tectonics: *Rev. Geophys. Space Phys.*, v. 8, p. 813.
- DICKINSON, W.R. and HATHERTON, T. 1967. Andesitic Volcanism and Seismicity Around the Pacific: *Science*, v. 157, p. 800.
- FISHER, R.L. 1961. Middle America Trench: Topography and Structure: *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 72, p. 703-720.
- GUNN, B.M. and MOOSER, F. 1971. Geochemistry of the Volcanics of Central Mexico: *Bull. Volc.* v. 34, p. 577-616.
- HATHERTON, T. and DICKINSON, W.R. 1968. Andesite Volcanism and Seismicity in New Zealand: *J. Geophys. Res.* v. 73, p. 4615-4619.
- HATHERTON, T. and DICKINSON, W.R. 1969. The Relationship Between Andesitic Volcanism and Seismicity in Indonesia. The Lesser Antilles and other Island Arcs: *J. Geophys. Res.*, v. 74, p. 5301.
- ICAITI, 1969. Mapa Metalogenético de América Central: Guatemala, Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial.
- JAKES, P. and WHITE, A.J.R. 1972. Major and Trace Elements Abundances in Volcanic Rocks from Orogenic Areas: *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 83, p. 29.
- JAMES, D.E. 1973. The Evolution of the Andes: *Scientific American*, v. 229, No. 2, p. 60.
- LARSON, R. and CHASE, C. Relatives Velocities of the Pacific North-America and Cocos Plates in the Middle America Region: *Earth Planet. Sci. Lett.* v. 7, p. 421.
- LOPEZ RAMOS, E. 1974. *Geología General y de México*. 3a. Edición, México, 509 p.
- LIPMAN, P.W., PROSTKA, H.J. and CHRISTIANSEN, R.L. 1971. Evolving Subduction Zones in the Western United States as Interpreted from Igneous Rocks: *Science*, v. 174, p. 821.
- MOLNAR, P. and SYKES, L.R. 1969. Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from the Focal Mechanisms and Seismicity: *Geol. Soc. Am. Bull.* v. 80, p. 1639.
- MOORE, G.W. and DEL CASTILLO, G.L. 1974. Tectonic Evolution of the Southern Gulf of Mexico: *Geol. Soc. Am. Bull.* v. 85, p. 607.
- MOOSER, F. 1968. The Mexican Volcanic Belt-Structure and Development. Formation of Fractures by Differential Crustal Heating: Pan American Symposium on the Upper Mantle, México, D.F., p. 15.
- MOOSER, F. 1972. The Mexican Volcanic Belt: Structure and Tectonics, *Geof. Intern.* v. 12, p. 55.
- MOOSER, F. 1974. Presentación del Nuevo Mapa Geológico del Valle de México: Reunión Anual UGM, México, D.F. (Resumen).
- MORGAN, W.J. 1968. Rises, Trenches, Great Faults, and Crustal Blocks: *J. Geophys. Res.* v. 73, p. 1959.
- MORGAN, W.J. 1971. Plate Motions and Deep Mantle Convection: in R. Shagan (Ed.) *Hess Volume*, *Geol. Soc. Am. Mem.*, v. 132.
- NEGENDANK, J.F.W. 1973. Geochemical Aspects of Volcanic Rocks of the Valley of Mexico: *Geof. Intern.* v. 13, p. 267.
- RONA, P. 1973. Plate Tectonics and Minerals Resources: *Scientific American*, v. 229, No. 1, p. 86.
- SINGH, S.K. 1974. Mexican Volcanic Belt: Some Comments on the Model Proposed by F. Mooser (Private Circulation. Depto. Exploración, Inst. Geof. UNAM).
- URRUTIA, F.J. 1975. Estudio Tectonofísico sobre la Placa de Cocos: Tesis profesional (Geofísica), Facultad de Ingeniería, UNAM.
- WILSON, J.T. 1965. A New Class of Faults and their Bearing on Continental Drift: *Nature*, v. 207, No. 4995, p. 343.
- WRIGHT, J.B. 1971. Volcanism and the Earth's Crust: in *Understanding the Earth*, Arcturus Press, p. 301.