

## LA FALLA TAMAZULA, LÍMITE SURORIENTAL DEL BLOQUE JALISCO, Y SUS RELACIONES CON EL COMPLEJO VOLCÁNICO DE COLIMA, MÉXICO

*Víctor Hugo Garduño-Monroy*<sup>1</sup>, *Ricardo Saucedo-Girón*<sup>2</sup>,  
*Zenón Jiménez*<sup>3</sup>, *Juan Carlos Gavilanes-Ruiz*<sup>2</sup>,  
*Abel Cortés-Cortés*<sup>2</sup> y *Rosa María Uribe-Cifuentes*<sup>4</sup>

### RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de un estudio microtectónico de la porción meridional del *rift* de Colima, en el cual fueron determinados cuatro importantes fases de deformación. La fase I corresponde a una serie de fallas laterales izquierdas subverticales con orientaciones de N 120° a N 150° en las calizas del Cretácico Superior; se estima que esta fase corresponde al Terciario temprano. La fase II se define por fallas laterales e inversas orientadas de N100° a N130° y de N40° a N/80°, respectivamente; se estima que la edad de esta fase es del Terciario medio. La fase III se identificó en rocas epiclásticas y fluvioacustres del complejo volcánico de Colima (CVC) y coincide con fallas normales de dirección NE-SW; la edad de esta fase se puede considerar menor a los 20,000 años. La fase IV corresponde al graben de Alseseca-Atenquique (GAA), que afecta productos volcánicos del paleovolcán de Fuego de Colima y que podría estar controlando la actividad del volcán de Fuego de Colima. Con base en estos datos se propone que el límite oriental del bloque Jalisco es diferente al postulado en trabajos previos. Se observa que el límite oriental del bloque Jalisco obedece a dos estructuras regionales. Por un lado, el *rift* de Colima cambia de geometría al intersectarse con la falla Tamazula, lo cual permite establecer que el CVC se encuentra en la intersección de dos estructuras regionales. Por otro lado, el Nevado de Colima está afectado por un graben que parece responder a la geometría de la falla Tamazula. La ubicación de los epicentros configura una línea que aparentemente coincide con la traza de esta falla y la presencia del vulcanismo en el punto de intersección de esta falla con el *rift* de Colima indican que esta falla está activa. La nueva geometría propuesta del bloque Jalisco se corrobora con la sismicidad en la zona de Manzanillo-Colima, que obedece a un corredor de fallas NE-SW, es decir, a la falla Tamazula, la cual afecta tanto al bloque Jalisco como al bloque Michoacán. Se concluye que la falla Tamazula es una estructura de basamento que ha gobernado la geometría del *rift* de Colima y la evolución volcánica del CVC, tiene una dirección NE-SW y una extensión de más de 160 km. Las fallas normales que afectan a los sedimentos recientes presentan un  $\sigma_3$ , lo que posiblemente se relaciona con la actividad de la falla Tamazula y con los colapsos gravitacionales del CVC que dispararon las grandes avalanchas de su sector meridional.

Palabras clave: Tectónica, bloque Jalisco, volcán de Colima, fallas, vulcanismo, México.

### ABSTRACT

This work shows the results of a microtectonic study carried out in the southern part of the Colima Rift, where four deformation phases were obtained. Phase I is related to a series of subvertical left-lateral faults with orientations from N120° to N150° in Late Cretaceous limestones; this phase is estimated to be of the early Tertiary. Phase II corresponds to lateral and reverse faults oriented from N100° to N130° and N40° to N80°, respectively; the age of this phase is estimated to correspond to the middle Tertiary. Phase III was identified in epiclastic and fluvioacustrine rocks of the Colima Volcanic Complex (CVC), and consists of normal faults of NE-SW direction; an age of less than 20,000 yr can be attributed to this phase. Phase IV corresponds to the Alseseca-Atenquique Graben, with NE-SW direction; this phase is affecting volcanic products of the Paleovolcán de Fuego de Colima and controls activity of the Volcán de Fuego de Colima. Based on this data, this work proposes to consider that the eastern boundary of the Jalisco block is different from that one proposed in previous works. It is possible to observe that the eastern limit of the Jalisco Block is controlled by two regional structures. The Colima Rift changes its geometry at the point where it is intersected by the Tamazula Fault, which allows to conclude that the CVC is located at the intersection of two regional structures. And the Nevado de Colima is being affected by a graben that appears to be a response to the geometry of the Tamazula Fault. The locations of the epicenters plot on a line that is consistent with the location of this fault; this fact and the presence of volcanism in the intersection point of this fault with the Colima Rift indicate that this fault is active. The new proposed geometry of the Jalisco Block is confirmed by the seismicity in the Manzanillo-Colima zone, which is controlled by NE-SW faults: the Tamazula Fault, which is fragmenting not only the Jalisco Block, but the Michoacán Block as well. The Tamazula Fault is a basement structure that has governed the geometry of the Colima Rift and the volcanic evolution of the CVC, and has a NE-SW direction and a length greater than 160 km. The normal faults that affect the recent sedi-

<sup>1</sup> Departamento de Geología y Mineralogía, UMSNH-IIM, Edif. "U" Cd. Universitaria, Morelia, México.

<sup>2</sup> Observatorio Vulcanológico, Universidad de Colima, Colima, Col., México.

<sup>3</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F., México.

<sup>4</sup> Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Delegación Coyoacán, Ciudad Universitaria, 04510 D.F., México.

mentary deposits present a  $\sigma_3$ , which is possibly related to the activity of the Tamazula fault and to the gravitational collapses of the CVC that triggered the big avalanches of its southern sector.

Key words: Tectonics, Jalisco Block, Colima Volcano, fault, volcanism, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

En la geometría del punto triple, el *rift* de Colima (RC) ha sido considerado como la frontera oriental del bloque Jalisco (BJ) (Allan *et al.*, 1991; Bandy *et al.*, 1993, 1995). El *rift* de Colima (RC) tiene una dirección general que varía de NNE-SSW en su parte septentrional, a NNW-SSE en su parte meridional; sin embargo, el sismo del 9 de octubre de 1995, que afectó a los estados de Jalisco y Colima, reactivó y puso en evidencia que en el sector meridional del RC las estructuras activas no corresponden a las tradicionalmente señaladas (N-S) como fronteras del RC (Johnson y Harrison, 1990; Allan *et al.*, 1991; DeMets y Stein, 1990; Bourgois y Michaud, 1991). Las reactivaciones se concentraron sobre estructuras NE-SW, principalmente (Saucedo *et al.*, 1995).

El sector meridional del RC ha sido un tema de controversia en el estudio de la geometría de este sector del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). Sin embargo, podemos separar dos grandes grupos: (a) los que proponen que el RC se extiende desde el punto triple, del sector occidental del CVTM, hasta el sur del volcán de Colima, encontrando su prolongación hacia el mar en el *graben* del Gordo (Bourgois y Michaud, 1991; Barrier *et al.*, 1990); (b) otros consideran que el RC se termina al norte del volcán de Colima (Serpa *et al.*, 1992; Garduño *et al.*, 1996; Rosas-Elguera *et al.*, 1996; Medina *et al.*, 1996).

El sector meridional del RC se caracteriza por estar afectando a rocas sedimentarias carbonatadas de ambiente de plataforma, que se depositaron en la zona que Petróleos Mexicanos define como Cuenca de Colima (Grajales-Nishimura y López-Infanzón, 1983). Dichas rocas de edad cretácica fueron deformadas por una fase plicativa que dio lugar a pliegues muy amplios (Serpa *et al.*, 1992). Estos carbonatos fueron afectados también por intrusiones de yeso y de cuerpos plutónicos de tipo granítico de edad terciaria (Smith, 1990).

Los sectores meridional y septentrional del RC parecen estar separados por el complejo volcánico de Colima (CVC). Sin embargo, tanto al NE como al SW del CVC, se ha observado la traza de una estructura que podría estar controlando la geometría del RC y la actividad volcánica del CVC. A esta estructura la hemos denominado falla Tamazula (FT), la cual corta a todas las unidades litológicas y sugiere estar en relación con la paleogeografía de las plataformas del Cretácico, las cuales sólo se presentan al sur del CVC, por lo que podría ser una estructura de basamento. Sobre el CVC, dicha estructura se manifiesta como una falla ligada a una tectónica distensiva, la cual generó un *graben* de orientación NE-SW (*graben* Atenuque-Alseseca—GAA) (Figura 1).

En esta investigación se expone los resultados de un estudio geológico estructural que pueden ayudar a comprender la

geometría oriental del BJ, así como las relaciones de la FT con la actividad volcánica del CVC.

## MARCO TECTÓNICO

El vulcanismo cuaternario en la porción occidental del CVTM se asocia a dos ambientes tectónicos presentes en esta región: (a) la subducción de la placa Rivera bajo la placa Norteamericana, y (b) el desarrollo de tres zonas de *rift* (Figura 1).

- a. Hasta principios de los 80 se pensó que la subducción de la placa Rivera era asísmica (Nixon, 1982). Sin embargo, aunque escasa, la sismicidad relacionada a la subducción de la placa Rivera bajo la placa Norteamericana (bloque Jalisco) ha estado presente desde 1837 con seis sismos ( $M_c > 7.0$ ) uno de los cuales fue el de 1932, que tuvo una magnitud de 8.2 y que ha sido uno de los más devastadores en la historia de México (Pardo y Suárez, 1993, 1995; Eissler y McNally, 1984; Singh *et al.*, 1985), así como el último registrado el 9 de octubre de 1995 de magnitud 7.5, cuyo epicentro se localizó enfrente de la bahía de Manzanillo (Figura 1).
- b. Los trabajos de Luhr y Carmichael (1981, 1990); Nixon (1989); y Garduño y Tibaldi (1991) han mostrado evidencias de la existencia de una triple unión en el occidente del CVTM (*rift* de Chapala, *rift* Tepic-Zacoalco y *rift* de Colima). A este ambiente tectónico está asociada la generación de magmas de la serie alcalina, los cuales desde los últimos 4.6 Ma se sobreponen temporal y espacialmente a magmas de la serie calcialcalina relacionados con la subducción de la placa Rivera (Allan *et al.*, 1986; Luhr y Carmichael, 1990; Macías *et al.*, 1993). Las tres estructuras mencionadas se intersectan a 40 km al sur de Guadalajara con direcciones de N305°, N90° y N170° (Allan *et al.*, 1991; Figura 1). Partiendo del punto de intersección, el *rift* de Chapala se extiende más de 100 km hacia el este, el *rift* de Colima tiene una longitud de 150 km hacia el sur hasta la costa del Pacífico, mientras que el *rift* de Tepic-Zacoalco se extiende 200 km hacia el noroeste hasta el Océano Pacífico (Luhr y Carmichael, 1990).

La porción septentrional del RC está limitada por un sistema de fallas N-S. Estas fallas son evidentes desde el punto triple hasta el CVC; sin embargo, a partir de este último punto su prolongación hacia el Océano Pacífico ya no es clara. Al respecto, Bandy y colaboradores (1995) discuten la extensión del RC hacia la costa del Pacífico, mientras Serpa *et al.* (1992) y Garduño *et al.* (1996) han propuesto la hipótesis de la no prolongación hacia el sur del RC, debido a la aparente ausencia de fallas normales N-S al S del CVC. (Figura 1).

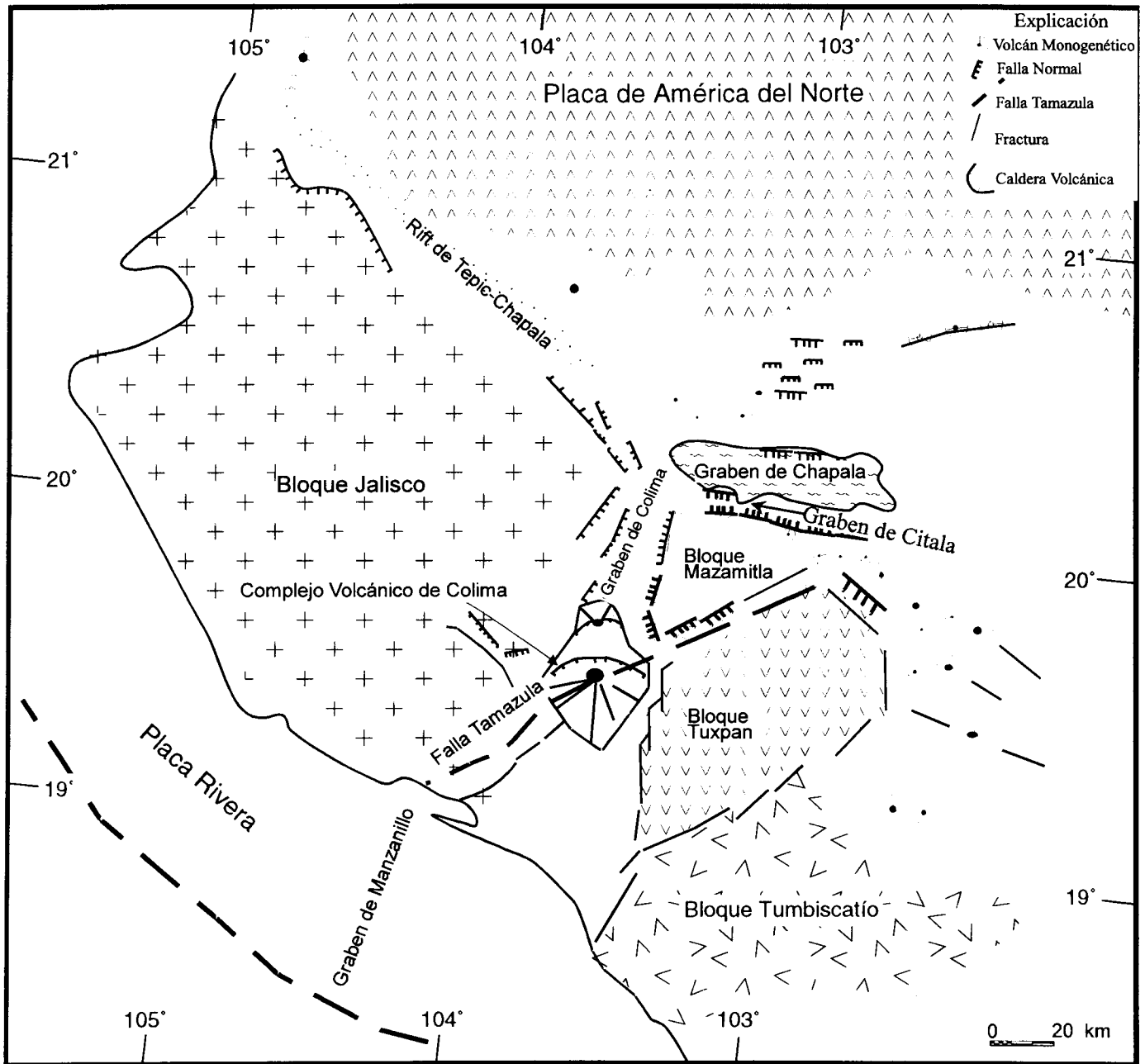


Figura 1. Esquema regional del punto triple del occidente del CVTM, del bloque Jalisco y del complejo volcánico de Colima. En esta figura se puede apreciar la posición de la falla Tamazula y sus relaciones regionales con el bloque Jalisco y con el rift de Colima. También se puede observar como FT está fragmentando el bloque Michoacán, en el bloque Mazamitla y el bloque de Tuxpan. En el BJ destaca la FM la cual estaría fragmentando al BJ con un movimiento lateral.

El límite entre las placas Rivera y Cocos hasta el momento no ha podido ser bien definido; sin embargo, podría coincidir con la zona sísmicamente difusa ubicada entre la dorsal del Pacífico y la trinchera Mesoamericana (Eissler y McNally, 1984). Ésta además concuerda con la ubicación de la mayoría de los grandes sismos ( $M_c > 7.0$ ) que han ocurrido en esta región desde 1832 (el de 1932 con magnitud de 8.2, 7.8 y 1973 de 7.5; Pardo y Suárez, 1995).

No obstante, hasta el momento este límite entre las placas no ha podido ser confirmado, pues no hay rasgos batimétricos

que puedan asociarse a un límite entre placas (Pardo y Suárez, 1995).

En este mismo sentido, Garduño y Tibaldi (1991) reportan una estructura de carácter regional a la que denominan falla Tamazula (Figura 1), la cual tiene un rumbo NE-SW y una longitud de 160 km, cortando al rift de Colima en su parte central a la altura del CVC, donde se genera un graben con la misma orientación.

Desde el punto de vista sísmológico, Castellanos y Jiménez (1995), dan a conocer una serie de epicentros, localizados

por la Red Sismológica Telemétrica de Colima (RESCO) de enero a septiembre de 1990, de los cuales se podría inferir un posible lineamiento de los epicentros paralelo a la FT. Posteriormente se enfatizará al respecto.

#### LA FALLA TAMAZULA (FT)

En la imagen de satélite LANDSAT (proporcionada por M. Abrams, 1997; Figura 2) se observa claramente una serie de fracturas alineadas NE-SW, desde la bahía de Manzanillo que cortan a la secuencia sedimentaria de Cerro Grande y después al CVC. Hacia el este provoca la fragmentación del bloque Michoacán, separando a los pequeños bloques de Mazamitla y Tuxpan, configurando así el río Tamazula, del cual toma su nombre (Figura 1). Estos rasgos estructurales que conforman a la falla Tamazula terminan en la estructura del *semigraben* de Cotija, de dirección NW-SE, el cual a su vez configura la frontera noroccidental del Corredor Tarasco, que aloja a más de 1,000 conos volcánicos.

En el CVC se puede distinguir dos grandes rasgos morfológicos. En las faldas occidentales sobresalen las barrancas de los arroyos de Alseseca y El Remate, así como la depresión del Jabalí (Figuras 2 y 4). Entre los dos arroyos citados se observa una depresión de dirección NE-SW en la que se ha depositado un gran volumen de productos volcánicos (Figura 2).

En las faldas orientales del CVC resaltan los rasgos labrados por el arroyo Atenquique, donde las lavas que provienen del Nevado de Colima se han observado desplazadas por un movimiento normal de más de 200 m hacia el N. Este desnivel se observa entre el cerro Alto (estación de microondas a 2,000 m s.n.m.) y las lavas que se encuentran en la pared norte del arroyo Atenquique a 1,800 m s.n.m.. En la falda oriental del CVC el límite septentrional de la depresión es menos evidente; sin embargo podría estar representada por el cauce del arroyo Seco. Estas depresiones en ambas faldas del CVC y con orientación NE-SW las hemos asociado a la presencia de un *graben* que denominamos *graben* de Alseseca-Atenquique (GAA).

Los productos volcánicos que corta el GAA corresponden al Nevado de Colima y al Paleofuego de Colima con edades que van de 2,500 a 45,000 años (Komorowski *et al.*, 1996). Es importante señalar que en la actividad más reciente del volcán de Fuego de Colima, los domos, denominados Los Hijos del Volcán, El Volcancito (1869) y las fracturas recientes con fumarolas y temperaturas de más de 700°C, guardan un patrón NE-SW.

Desde el punto de vista sismológico, el mapa de sismicidad del estado de Colima con temblores localizados por la Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima (RESCO), dado a conocer por Castellanos y Jiménez (1995), muestra un alineamiento de epicentros NE-SW, como se ve en el mapa de sismicidad de la Figura 3a, similar al de estos autores. En éste se han completado los epicentros de todo el año de 1990. Por otra parte, Jiménez y colaboradores (1996), de acuerdo con la distribución de epicentros de septiembre de 1995 a agosto de

1996, delimitaron tres regiones sísmicas: (1) la asociada con procesos de fractura superficiales que están ocurriendo en la región centroccidental de Colima y sudoeste de Jalisco, la cual se interrumpe abruptamente en el margen occidental del *graben* de Colima, (2) la asociada al *graben* de Colima, donde se observó poca actividad superficial y (3) la asociada al proceso de subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa Norteamericana. La Figura 3b es una sección transversal siguiendo la dirección de la Figura 3a, que hace evidente estas observaciones. Considerando estos trabajos, se puede inferir, a *grosso modo*, que el alineamiento de epicentros NE-SW puede estar en relación con la reactivación de la falla Tamazula.

#### ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO

Con el análisis de la mesoestructuras y con ayuda de los tectoglifos fueron separados dos tipos de distribución de los campos de esfuerzo:

En las rocas del Cretácico se identificaron fallas de tipo lateral con direcciones que variaron de N120° a N150° y de N30° a N60°, todas ellas con *pitchs* inferiores a 30°. Estas estructuras fueron bastante claras en el cerro Grande y en los afloramientos de la autopista a la altura de Atenquique. El procesamiento de estos datos sugiere que las rocas cretácicas estuvieron sometidas a compresiones E-W y N-S. Tratándose de fallas laterales donde  $\sigma_3$  y  $\sigma_1$  están en el plano horizontal se concluye que la última fase podría estar ligada a la compresión N-S. Es importante señalar que con esta fase pudo haberse iniciado un *proto-rift* de Colima, ya que el  $\sigma_3$  pudo haber quedado heredado en el tiempo, para después llegar a ser un  $\sigma_3$  más intenso que generó la fase distensiva mayor de este *rift*.

En las rocas epiclásticas y en las secuencias fluviolacustres del CVC se encontraron fallas normales. Por el tipo de litología, en los planos de fallas casi no se encontraron estrías. Al NW del CVC, en la región de Tolimán, se midieron fallas normales de dirección NNW-SSE; sus planos son subverticales, observándose desplazamientos que van desde unos centímetros hasta varios metros. Sólo en pocos planos se encontraron estrías claras con ángulos superiores a los 70° de *pitch*. Sin embargo, para el procesamiento de datos se realizó un cálculo de densidades, utilizando los polos de las fallas normales, obteniendo que el  $\sigma_3$  se localizó en el cuadrante ENE-WSW. También en esta zona se puede apreciar un alineamiento de conos cineríticos N-S que han sido datados con edades inferiores de 12,000 a 1,500 años (Luhr y Carmichael, 1981); esta alineación de conos constata un  $\sigma_3$  orientado E-W. En epiclastitas, al sur del CVC se midieron fallas normales casi N-S que indican una dirección de  $\sigma_3$  de N90°. Estos depósitos descansan sobre una avalancha que posiblemente corresponda a una edad inferior a 20,000 años datada por Stoope y Sheridan (1992) y Hooper (1995).

Con el análisis de teledetección y en la cartografía geológica, estas estructuras son las responsables del GAA, el cual corta a los productos volcánicos del Paleofuego de Colima y

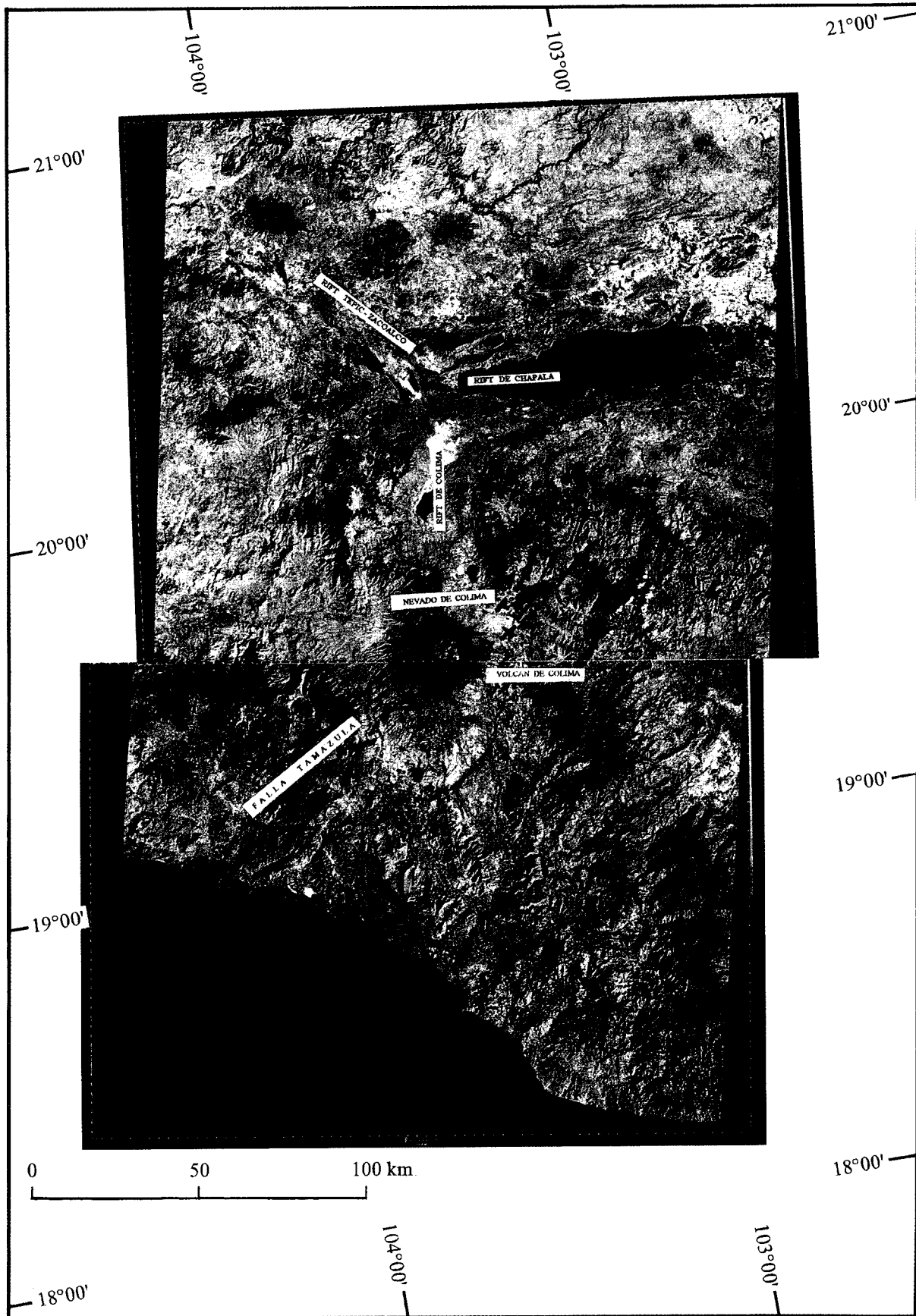


Figura 2. Imagen de satélite del occidente de México; se observa el complejo volcánico de Colima (CVC), la traza de la falla de Tamazula (FT) y la depresión que se infiere de la gran acumulación de sedimentos en el sector occidental del CVC.

posiblemente jugó un papel importante en la actividad volcánica del Fuego de Colima. En sedimentos lacustres que afloran en Mazatán, se midió una serie de fallas normales NE-SW, que están relacionadas con una fase distensiva NW-SE. Estas secuencias lacustres fueron datadas en 70,000 años por el método  $^{14}\text{C}$  (J.C. Komorowski, comunicación personal, 1997). En brechas de talud, sobre la carretera Colima-Minatitlán al sur del cerro Grande, se midió un gran plano de falla normal orientado  $\text{N}66^\circ$  con inclinación de  $64^\circ$  SE y un *pitch* de  $70^\circ$  NE. Estos datos sugieren la existencia de una fase de fallamiento a la que se puede asociar un  $\sigma_3$  con orientación NW-SE.

#### LA FRONTERA ORIENTAL DEL BLOQUE JALISCO

Con los datos del sismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995 y con los estudios de microtectónica realizados, podemos considerar que la geometría de la frontera oriental del bloque Jalisco cambia respecto a la anteriormente propuesta (Allan *et al.*, 1991; Bourgois y Michaud, 1991). En el estudio de Rosas y colaboradores (1996) se ha considerado que la geometría del BJ involucra en su frontera sudoriental a la falla Tamazula.

El RC fue claramente seguido hasta la zona norte del volcán de Colima donde el campo de esfuerzos siempre dio un  $\sigma_3$  que varía entre  $\text{N}70^\circ$  y  $\text{N}90^\circ$ . Este campo de esfuerzos fue determinado en los depósitos retrabajados que provienen del Nevado de Colima, donde las estructuras corresponden a fallas normales con direcciones que variaron de N-S a NNW-SSE. Las estructuras de este *rift* se pueden continuar hacia el sur del volcán de Colima, pero con menos claridad que en el norte, ya que los carbonatos del Cretácico de la cuenca de Colima parecen comportarse de diferente forma ante la deformación superficial. Las dos márgenes del *rift* de Colima son visibles hasta la altura de la ciudad de Colima, donde los ríos Armería y Naranjo dibujan claramente las márgenes de esta depresión.

Por otro lado, como ya se mencionó, el Nevado de Colima está afectado por un *graben* que parece responder a la geometría de la falla Tamazula. La edad de esta estructura sería post-Nevado (<500,000 años), encontrándose aún activa debido a que la sismicidad y el vulcanismo responden a ella.

Por lo anterior, se puede observar que la frontera oriental del BJ obedece a dos estructuras regionales. Por un lado, en la zona noreste la frontera está definida por el *graben* clásico de Colima, que al llegar a intersectar la FT cambia de dirección (Figura 1), la cual diseña el límite suroriental del BJ. Este arreglo nos lleva a concluir que el CVC se encuentra localizado en la intersección de ambos accidentes regionales, es decir, en el vértice sudoriental de BJ. Esta nueva geometría se corrobora con la sismicidad de la zona de Manzanillo-Colima, la cual no obedece a las estructuras N-S sino a las fallas NE-SW (Castellanos y Jiménez, 1995; Jiménez *et al.*, 1996), es decir, a la FT, la cual no sólo fragmenta al BJ, sino también al bloque Michoacán. Es importante señalar que el sismo del 9 de octubre de 1995 generó un fallamiento con dirección NE-SW a lo largo de las márgenes del río Marabasco, cuyo cauce es paralelo a la FT.

Con esta nueva geometría del occidente del CVTM se observa la gran importancia de los procesos de fragmentación. Por lo tanto, los autores presentes consideran que la geometría del BJ también está comprometida con otras fragmentaciones internas; evidencia de ello es la presencia de la falla Minatitlán (FM), de dirección NW-SE, que presenta una morfología de falla lateral activa (Figura 1). Una manifestación de esta estructura se observa de manera clara sobre la carretera Colima-Minatitlán, donde se observó un plano de falla cortando a sedimentos recientes. Posiblemente, la distribución de sismos en un *trend* NW-SE podría estar en relación con esta estructura (Figura 3) (Saucedo *et al.*, en prensa).

#### DISCUSIÓN

La desestabilización de un edificio volcánico puede ser el resultado de la acción conjunta o individual de varios factores, entre los cuales se destacan tres: (a) aquéllos que son el producto de una explosión freática sin aporte magmático (tipo Bandai; Moriya [1980]), (b) los producidos por explosiones ocasionadas por un nuevo aporte de magma (tipo Bezymianny; Gorshkov [1959, 1963]) y (c) los asociados con sismos derivados de la tectónica regional (tipo Unzen; Ui [1985]). Además, la desestabilización de un edificio volcánico puede ser favorecida por una excesiva inclinación de uno de sus flancos, o bien por un debilitamiento del edificio debido a una prolongada alteración hidrotermal (Siebert, 1984).

El complejo volcánico de Colima (CVC) se caracteriza por presentar dentro de su estratigrafía una serie de depósitos de avalancha, que según Komorowski *et al.* (1996) pueden ser el resultado de más de 10 avalanchas gravitacionales que en total forman un volumen comprendido entre 60 y 100  $\text{km}^3$  (Komorowski *et al.*, 1994, 1996), con alcances hasta de 100 km (Stoopes y Sheridan, 1992).

Morfológicamente, en el CVC (volcanes Nevado y Fuego de Colima) se definen al menos cuatro estructuras volcánicas en forma de herradura. Tres de ellas muestran su eje de colapso orientado hacia el SSE, mientras que la cuarta presenta su flanco ENE destruido (Figura 4).

Los depósitos de avalancha están distribuidos principalmente hacia los sectores S, SE y SW del CVC. Hacia el este y por el oeste se reportan depósitos de avalancha hasta el poblado de Mazatán, ubicado cerca de la desembocadura del arroyo El Huacal (Cortés, comunicación personal, 1997).

Es importante hacer notar que los colapsos asociados con depósitos de avalanchas están abiertos siempre en dirección S o SE, es decir paralelos a la dirección de máxima distensión  $\sigma_3$  (NW-SE; Figura 5), lo que hace pensar que la FT ha jugado un papel determinante en la desestabilización y colapso de los antiguos edificios del CVC. Por lo anterior, si se considera la dirección de la zona de rompimiento de las diferentes calderas, al menos tres podrían ser el resultado de colapsos de edificios volcánicos asociados con procesos tectónicos.

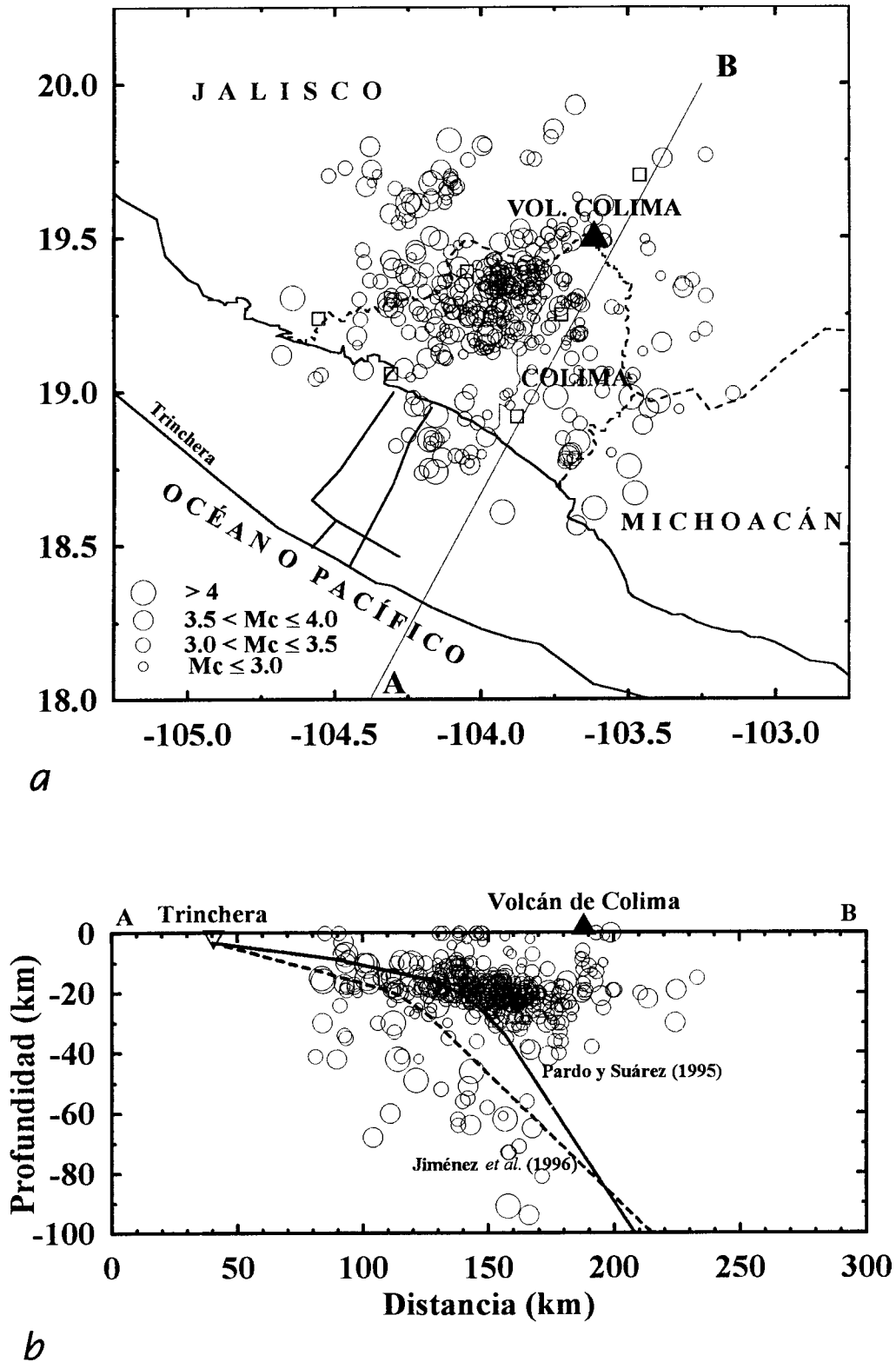


Figura 3. *a*, Epicentros localizados en el estado de Colima durante 1990 por la Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima (RESCO), modificada de Castellanos y Jiménez (1995). Las localizaciones muestran un alineamiento de epicentros NE-SW. *b*, Sección transversal en dirección (A-B) de los epicentros de la Figura 3a. Como se puede ver de la profundidad focal de los eventos, unos están asociados con la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa Norteamericana y otros a fracturas superficiales de la corteza. Las líneas sólida y punteada representan la parte superior de la placa en subducción según Pardo y Suárez (1995) y Jiménez *et al.* (1996), respectivamente.  $M_c$ : magnitud de coda.

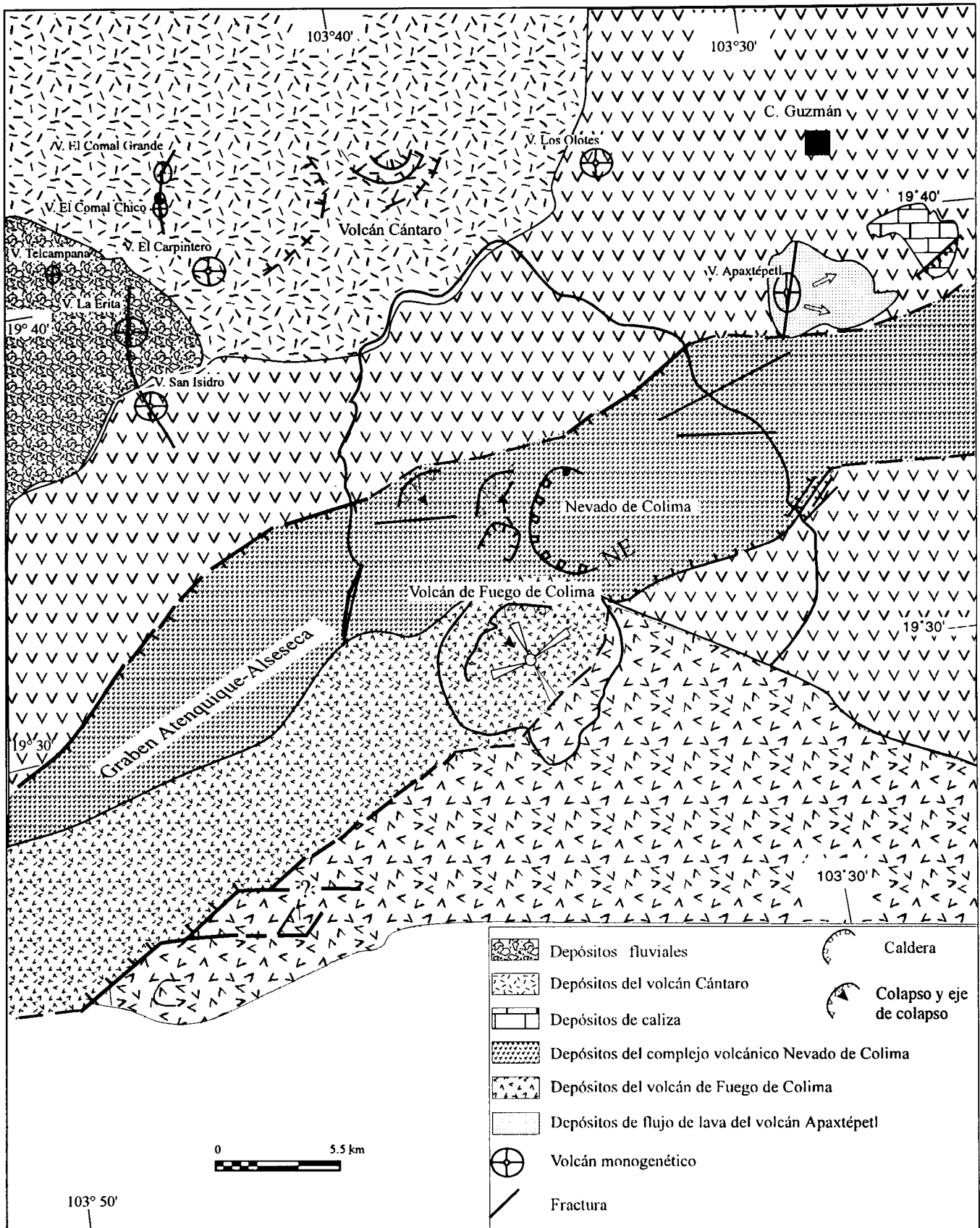


Figura 4. Mapa geológico del complejo volcánico de Colima en el que se muestra el *graben* de Atenquique-Alseseca y sus relaciones con el complejo volcánico de Colima. Los símbolos de "v" ordenados, chicos y grandes corresponden a productos del Nevado de Colima, mientras que los de "v" en desorden corresponden a productos del volcán de Fuego de Colima. En el arroyo Atenquique se observa un grupo de cuatro fallas normales que configuran una contrapendiente en el terreno.



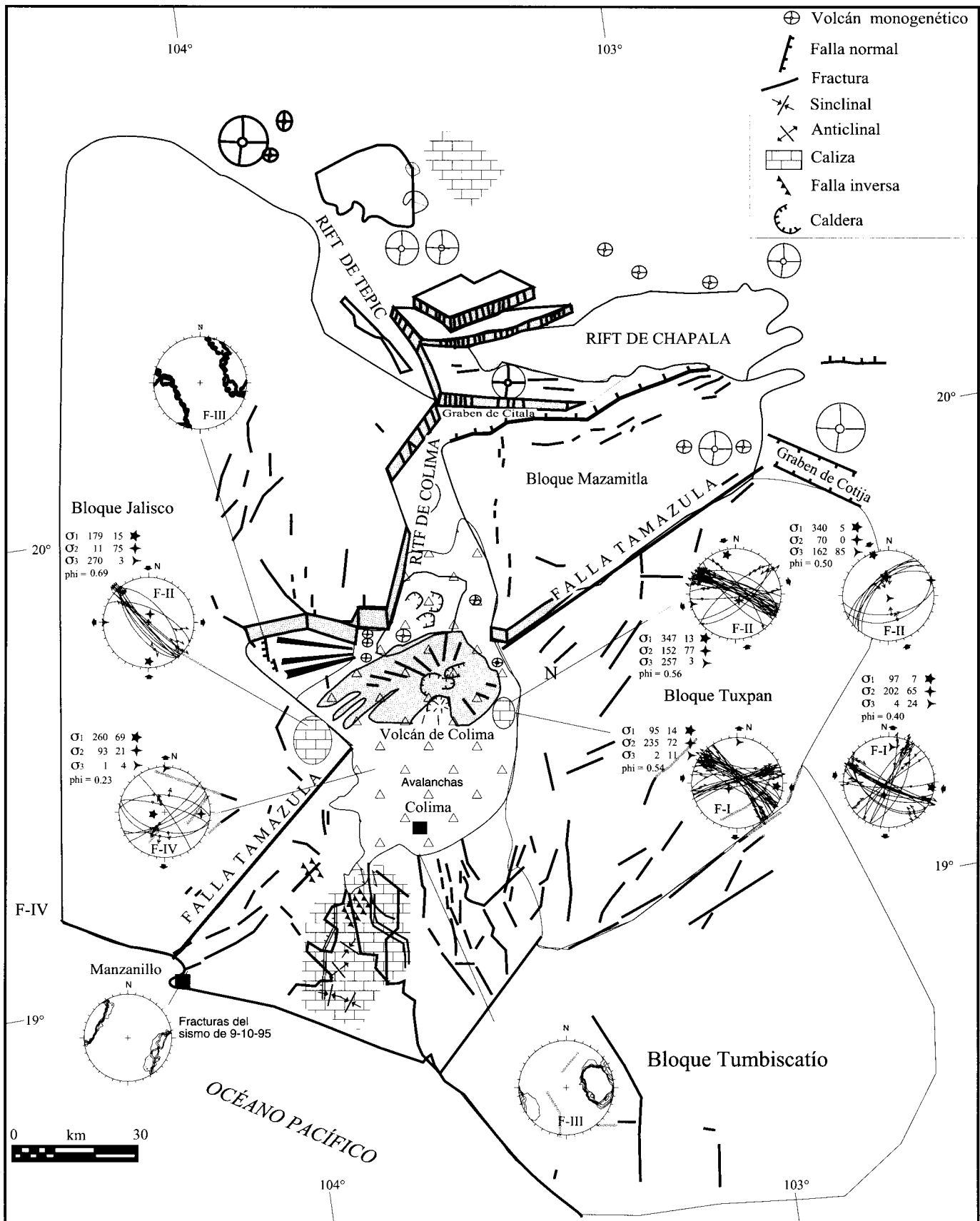


Figura 5. Mapa estructural del sector del CVC, en el que se han marcado los principales elementos estructurales de la frontera oriental del BJ. También se puede observar las estaciones microtectónicas más representativas; las letras F-I, F-II, F-III, F-IV, están marcando la fase descrita en el texto. En los estereogramas, la estrella de tres puntas marca la posición del  $\sigma_3$  mientras que la de cuatro puntas marca la posición de  $\sigma_2$  y la de cinco puntas marca la posición de  $\sigma_1$ .

La relación genética entre estructuras tectónicas de carácter regional y el emplazamiento de depósitos de avalancha es frecuente. En Japón se ha observado que en algunas calderas de avalancha, los ejes de éstas son perpendiculares tanto a un sistema de diques que afectan el edificio volcánico, como a un alineamiento de volcanes parásitos (Siebert, 1984) (Figura 6). Esto sugiere que la dilatación derivada de la intrusión de diques, que a su vez son inducidos por la máxima compresión horizontal, es un factor importante en la desestabilización de edificios volcánicos (Siebert, 1984; Garduño *et al.*, 1997).

El caso de Colima es más parecido al del volcán Jocotitlán, donde el colapso del edificio volcánico hacia el NE parece estar controlado por la tectónica regional, pues este volcán se ubica a 10 km al S de las fallas activas que conforman el graben de Acambay de dirección E-W. El patrón tectónico general y el emplazamiento de los depósitos de avalancha hacia el NE, sugieren una relación genética entre el régimen de esfuerzos tectónicos de extensión y la inclinación de la falla (Siebe *et al.*, 1992). Como ya se vio, dicha relación también se observa en el volcán Jocotitlán donde el  $\sigma_3$  es paralelo a la geometría del colapso por gravedad, siendo además paralelo al eje máximo de distribución de los depósitos de avalancha (Siebe *et al.*, 1992). Dichos fenómenos fueron también estudiados sobre el volcán Etna, Italia, donde se observa que los grandes colapsos por gravedad estuvieron siempre asociados a la dirección de  $\sigma_3$  (Neri y Garduño, 1991; Ferrari, 1991).

Lo anterior conduce a la conclusión de que la influencia de la falla Tamazula sobre el CVC ha sido un factor determinante tanto en el disparo como en el control de la dirección de colapsos por gravedad de los antiguos edificios volcánicos de este complejo.

Es importante señalar que la caldera del volcán Nevado de Colima que presenta su parte abierta hacia el ENE (Figura 4) tiene un origen diferente, pues parece ser el resultado de una actividad puramente magmática, a la cual se asocian los depósitos de más de 10 m de espesor de bloques y cenizas cubiertos por ceniza y pómez, los cuales se pueden observar hasta una distancia de 19 km de la fuente (autopista Guadalajara-Colima a la altura de la fábrica de papel de Atenquique). Por lo tanto, la FT ha jugado un papel muy importante tanto en la evolución volcánica como en los estilos eruptivos que ha presentado el CVC a lo largo de su historia.

Considerando la orientación de los domos Los Hijos del Volcán, el Volcancito y las fracturas que actualmente presenta el domo del volcán de Fuego de Colima (todos orientados NE-SW), es obvio que este vulcanismo está obedeciendo a estructuras paralelas a la FT.

Por lo anterior, se sugiere que la FT haya facilitado el ascenso de magma a través de fallas y fracturas para dar origen a erupciones magmáticas como la que formó la caldera abierta hacia el ENE (Figura 4) y que pudo haber jugado un papel importante en las erupciones históricas del volcán de Colima.

En este mismo sentido, los datos reportados por Bandy y colaboradores (1993) en las costas de Manzanillo y Tecmán muestran la presencia de estructuras submarinas con dirección NE-SW que han generado magmatismo y sedimentación que obedece a ese sistema estructural. La sismicidad que se presenta en esta parte de la placa se concentra en estas zonas de debilidad cortical y pueden producir la migración de los epicentros hacia el CVC, como se ha venido observando en las crisis sísmicas de las costas de Colima (Jiménez *et al.*, 1996), conjugando la alimentación de magma y la inestabilidad gravita-

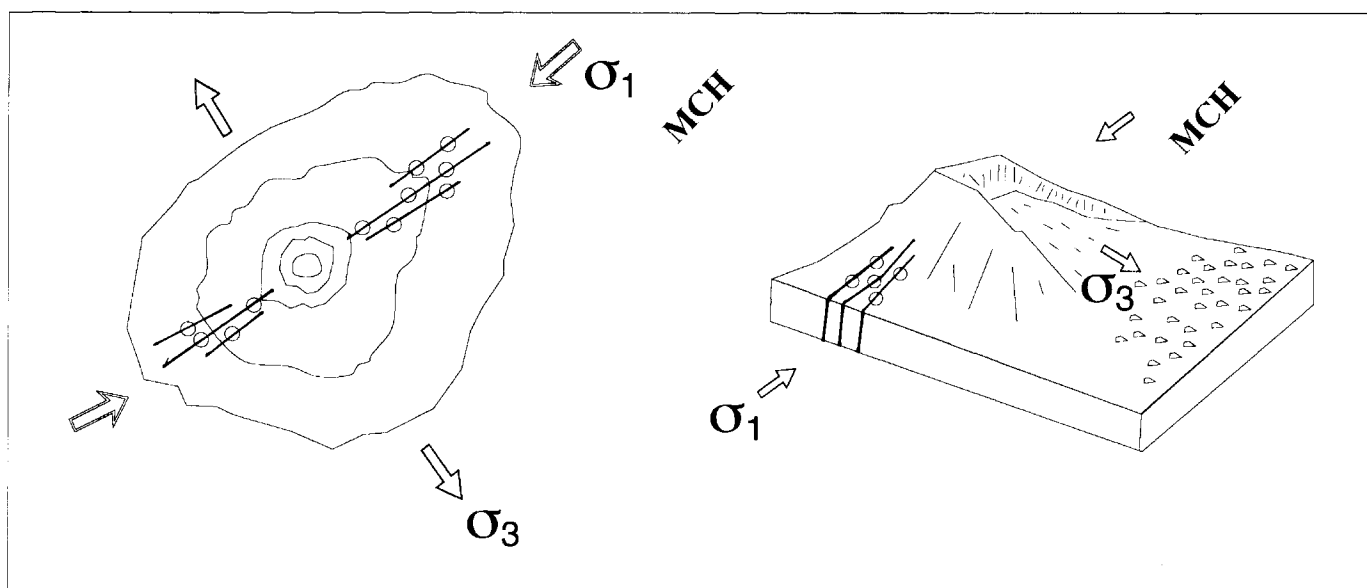


Figura 6. Diagrama esquemático donde se ilustra el emplazamiento de diques radiales y volcanes parásitos en una dirección paralela a la máxima compresión horizontal (MCH), produciendo elongación del edificio y un esfuerzo de dilatación dentro del volcán, promoviendo el colapso en dirección normal a la MCH. (Modificado de Moriya, 1980, in Siebert, 1984).

cional de los edificios volcánicos. Otra muestra de la relación tectónica-vulcanismo puede ser la presencia del volcán El Metate de más de 1,800 m s.n.m., el cual se ubica sobre la traza de la FT, aproximadamente a 35 km al NE del volcán de Fuego de Colima (Figura 2).

## CONCLUSIONES

La presencia de la FT dentro del RC permite comprender el cambio de geometría que éste sufre en sus sectores meridional y septentrional. En el primero, la deformación cretácica fue gobernada por las facies de calizas de la cuenca de Colima y en esta misma la deformación también se llevó a cabo a través de fallas laterales que sugiere un  $\sigma_3$  con orientación casi N-S, y un E-W.

La FT, con una dirección NE-SW y una extensión de más de 160 km, es una estructura de basamento que por lo analizado en este artículo, podría estar influyendo en la geometría del RC y la evolución volcánica del CVC, primero jugando como falla lateral.

La FT ha generado el GAA sobre el CVC y, además, se sugiere que dicha falla sea la responsable de las estructuras de colapso por gravedad (calderas de avalancha) cuyos ejes máximos son paralelos al  $\sigma_3$  y que coinciden con un campo de esfuerzos obtenido en sedimentos recientes aún no consolidados, donde el eje mínimo de compresión (fase IV) es paralelo a los ejes de máxima acumulación de depósitos de avalancha y a los ejes de abertura de las estructuras en herradura generadas por el emplazamiento de las avalanchas.

El análisis microtectónico de las fallas normales que afectan a sedimentos recientes traducen un  $\sigma_3$  con dirección N135°. Esta dirección está posiblemente relacionada con la actividad de la FT y obviamente con los grandes colapsos por gravedad del CVC, que probablemente hayan desencadenado la formación de grandes avalanchas en el sector meridional del CVC.

En el sismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995, se constató que muchas estructuras con dirección NE-SW fueron reactivadas a todo lo largo de la bahía de Manzanillo y a lo largo del cauce del río Marabasco. En Manzanillo se reactivaron especialmente las estructuras que se encuentran en las rocas graníticas de la bahía, mientras que en los márgenes del río Marabasco fueron observadas fracturas de hasta un metro de separación y de más de un metro de profundidad. Por tal motivo, la reactivación de la FT puede ser un factor importante para la migración de la sismicidad provocada por la placa Rivera. Es importante recordar que la subducción de la placa Rivera se ha caracterizado desde 1837 por presentar escasos sismos, pero con magnitudes superiores a  $M_c > 7$ . No sería remota la posibilidad de que una crisis sísmica de la placa Rivera pudiera disparar una actividad magmática en el edificio del volcán de Colima.

La actividad de las fallas activas dentro del CVTM es sin duda un tema aún abierto a la discusión. Dichas fallas son las

responsables de la fragmentación de la placa Norteamericana y de la actividad sísmica y volcánica, como es el caso de los volcanes Nevado de Toluca, Jocotitlán, Pico de Orizaba, Caldera de Los Azufres, etc. Lo mismo ocurre en el occidente del CVTM, donde las fallas parecen ser responsables de la geometría del BJ y RC, así como de su actividad sísmica y volcánica. En este artículo se ha destacado el papel que ha jugado la FT en la fragmentación del BJ; sin embargo, la fragmentación del BJ también se está desarrollando en sus límites occidental y noroccidental, donde la FM se manifiesta como un rasgo morfológico a lo largo de varios cientos de kilómetros, evidenciando su actividad actual e induciendo la fragmentación del BJ en este sector.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean hacer patente su reconocimiento por el apoyo recibido a las siguientes instituciones y programas: SIMORELOS-CONACYT, CONACYT y PADEP DEL CCH de la Universidad Nacional Autónoma de México, sin los cuales no habría sido posible la elaboración de este artículo. También agradecemos a los árbitros, quienes contribuyeron enormemente en este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allan, J.F.; Nelson, S.A.; Luhr, J.F.; Carmichael, I.S.E.; Wopat, M.; y Wallace, P.J., 1991, Pliocene-Recent rifting in SW Mexico and associated volcanism—an exotic terrane in the making, *in* Dauphin, P.J., and Simoneit, B.R.T., eds., *The Gulf and Peninsular province of the Californias*: American Association of Petroleum Geologists Memoir 47, p. 425–445.
- Bandy, W.L.; Mortera-Gutiérrez, C.A.; y Urrutia-Fucugauchi, Jaime, 1993, Gravity field of the southern Colima graben, Mexico: *Geofísica Internacional (México)*, v. 32, núm. 44, p. 561–567.
- Bandy, W.L.; Mortera-Gutiérrez, C.A.; Urrutia-Fucugauchi, Jaime; y Hide, T.W.C., 1995, The subducted Rivera-Cocos plate boundary—where is it, what is it and what is its relationship to the Colima rift?: *Geophysical Research Letters*, v. 22, p. 3075–3078.
- Barrier, E.; Bourgois, J.; y Michaud, F., 1990, Le système de rifts actifs du point triple de Jalisco—vers un proto-golfe de Jalisco: *Comptes rendues hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences (Paris)*, v. 310, p. 1513–1520.
- Bourgois, J., y Michaud, F., 1991, Active fragmentation of the North America plate at the Mexican triple junction area of Manzanillo: *Geo. Marine Letters*, v. 11, p. 59–65.
- Castellanos, G., y Jiménez, Z., 1995, Sismología de Colima: Universidad de Colima, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Educación Pública, SESIC-DES., 101 p.
- DeMets, C., y Stein, S., 1990, Present-day kinematics of Rivera Plate and implications for tectonics in southwestern Mexico: *Geos, Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, v. 15, núm. 2, p. 63–64.
- De la Cruz, V., y Castillo, D., 1987, Reconocimiento geológico de la zona terminal de Tetitlán-Valle Verde, Nayarit: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, Reporte interno.
- Eissler, H.K., y McNally, K.C., 1984, Seismicity and tectonics of the Rivera Plate and implications for the 1932 Jalisco, Mexico, earthquake: *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 4520–4530.
- Ferrari, Luca, 1991, *Evoluzione vulcanologica e strutturale del Monte Etna e suoi rapporti con il vulcanismo ibleo*: Milán, Univ. di Milano, tesis doctoral, 153 p. (inédita).

- Ferrari, Luca; Nelson, S.A.; Rosas-Elguera, José, Aguirre-Díaz, G.J., y Venegas-Salgado, Saúl, 1997, Tectonics and volcanism of the western Mexican Volcanic Belt, in Aguirre-Díaz, G.J.; Aranda-Gómez, J.J.; Carrasco-Núñez, Gerardo; y Ferrari, Luca, Magmatism and tectonics of central and northwestern Mexico—a selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Excursion 12, p. 85–130.
- Garduño, V.H., y Tibaldi, A., 1991, Kinematic evolution of the continental active triple junction of the western Mexican Volcanic Belt: *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences (Paris)*, v. 312, p. 135–142.
- Garduño, V.H.; Saucedo, R.; Gavilanes, J.C.; Cortés, A.; y Navarro, C., 1996, La falla de Tamazula, límite suroriental del bloque Jalisco: Universidad de Colima, Reunión Internacional Volcán de Colima, 5ª, Colima, Col., 2 p. (resumen) (en formato electrónico).
- Garduño, V.H.; Neri, M.; Pasquaré, Giorgio; Borgia, A.; y Tibaldi, A., enviado, Geology of the NE-Rift of Mount Etna (Italy): *Acta Vulcanologica*.
- Gastil, R.G., 1983, Mesozoic and Cenozoic granitic rocks of southern California and western Mexico: *Geological Society of America Memoir* 159, p. 265–275.
- Gastil, R.G.; Krummenacher, David; y Jency, W.A., 1978, Reconnaissance geology of the west-central Nayarit, Mexico: *Geological Society of America, Map and Chart Series MC24*, 1:200,000.
- Gastil, R.G.; Krummenacher, David; y Mich, J., 1979, The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California: *Geological Society of America Bulletin*, v. 90, núm. 1, p. 839–857.
- Gorshkov, G.S., 1959, Gigantic eruption of the volcano Betziymianny: *Bulletin Volcanologique*, v. 20, p. 77–109.
- 1963, Directed volcanic blasts: *Bulletin Volcanologique*, v. 26, p. 83–88.
- Grajales-Nishimura, J.M., y López-Infanzón, Manuel, 1983, Estudio petrográfico de las rocas ígneas y metamórficas del prospecto Tomatlán-Guerrero-Jalisco, Proyecto C-1160: México, D.F., Instituto Mexicano del Petróleo, informe en archivo abierto (inédito).
- Hooper, D.M., 1995, Computer-simulation models of scoria cone degradation in the Colima and Michoacán-Guanajuato volcanic fields, Mexico.
- Jiménez, Z.; Reyes, G.; y Ramírez, A., 1996, Actividad sísmica observada en la frontera sur-oriental del bloque de Jalisco—de septiembre de 1995 a agosto de 1996: *Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, v. 16, núm. 4 (resumen).
- Johnson, C.A., y Harrison, C.G.A., 1990, Neotectonics in central Mexico: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 64, p. 187–210.
- Komorowski, J.C.; Saucedo, R.; Cortés, A.; y Navarro, C., 1994, The 1913 paroxysmal eruption of Colima volcano, México—field characteristics of flow and fall deposits, eruptive processes and implications for older historical pyroclastic sequences: IAVCEI General Assembly, Ankara, (resumen).
- Komorowski, J.C.; Cortés, A.; Navarro, C.; Gavilanes, J.C.; Siebe, Claus; y Rodríguez, S., 1996, Edifice collapse and debris avalanche deposits at Colima volcanoes, Mexico—a review with new variations on a recurrent theme: Universidad de Colima, Reunión Internacional Volcán de Colima, 5ª, Colima, Col., 12 p. (resumen en extenso) (en formato electrónico).
- Lange, R.A., y Carmichael, I.S.E., 1991, A potassic volcanic front in western Mexico—the lamprophyric and related lavas of San Sebastian: *Geological Society of America Bulletin*, v. 103, p. 928–940.
- Luhr, J.F., 1981, Colima—history and cyclicity of eruptions: *Volcano News*, v. 7, p. 1–3.
- Luhr, J.F., y Carmichael, I.S.E., 1981, The Colima volcanic complex, Mexico: II, Late Quaternary cinder cones: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 76, p. 127–147.
- 1990, Geology of Volcán de Colima: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Boletín* 107, 101 p.
- Macías, J.L.; Capaccioni, B.; Conticelli, S.; Giannini, L.; Martini, M.; y Rodríguez, S., 1993, Volatile elements in alkaline and calc-alkaline rocks from the Colima graben, Mexico—constraints on their genesis and evolution: *Geofísica Internacional (México)*, v. 32, núm. 4, p. 575–589.
- Medina-Martínez, Francisco; Espíndola, J.M.; De la Fuente, Mauricio; y Mena, M., 1996, A gravity model of the Colima, Mexico region: *Geofísica Internacional (México)*, v. 35, núm. 4, p. 409–414.
- Moriya, I., 1980, Banday type eruption and its geomorphology: *K. Nishimura Memorial Geomorphological Proceedings*, p. 214–219.
- Neri, M.; Garduño, V.H.; and Rasa, R., 1991, Studio strutturale e modello cinematico della Valle del Bove e del versante nord-orientale etneo: *Acta Vulcanologica*, núm. 1, p. 17–24.
- Nixon, G.T., 1982, The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere: *Geological Society of America Bulletin*, v. 93, p. 514–523.
- Nixon, G.T.; Demant, Alain; Armstrong, R.L.; and Harakal, J.E., 1987, K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional (México)*, v. 26, p. 109–158.
- Pantoja-Alor, Jerjes, y Estrada-Barraza, Samuel, 1986, Estratigrafía de los alrededores de la mina de hierro de El Encino, Jalisco: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 47, p. 1–15.
- Pardo, M., y Suárez, G., 1993, Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western Mexico: *Journal of Geophysical Research*, v. 20, p. 2391–2394.
- 1995, Shape of subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico—seismic and implications: *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 12357–12372.
- Righter, K.; Carmichael, I.S.E.; Becker, T.A.; y Renne, P.R., 1995, Pliocene-Quaternary volcanism and faulting at the intersection of the Gulf of California and the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, v. 107, p. 612–626.
- Romero, F.; Saucedo, R.; y Cortés, A., 1991, Estudio geológico regional del graben de Tepic-Ixtlán, Nayarit: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, Reporte interno (inédito).
- Rosas-Elguera, José; Ferrari, Luca; Garduño-Monroy, V.H.; y Urrutia-Fucugauchi, Jaime, 1996, Continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico: *Geology*, v. 24, núm. 10, p. 921–924.
- Salazar, S.M., 1983, Estratigrafía y tectónica del área Manzanillo-Colima-Las Encinas, en el estado de Colima: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Convención Nacional, 15, Excursiones # 1, p. 4–12.
- Saucedo, R.; Ramírez, R.J.J.; Gavilanes, R.J.C.; Navarro, O.C.; y Cortés, C.A., 1995, Reporte geológico estructural preevaluativo de las zonas afectadas por el sismo del 9 de octubre de 1995 en la ciudad y puerto de Manzanillo, Colima: Colima, Universidad de Colima, Reporte interno, 26 p. (inédito).
- Schaaf, Peter; Morán-Zenteno, D.J.; Hernández-Bernal, M.S.; Solis-Pichardo, G.N.; Tolson, Gustavo; y Köhler, H., 1995, Paleogene continental margin truncation in southwest Mexico—geochronological evidence: *Tectonics*, v. 14, p. 1339–1350.
- Schaaf, Peter, y Martínez-Serrano, Raymundo, 1997, The Puerto Vallarta Batholith—an example for multicomponent parenthood of continental arc magmas: *Mid congress field trip guide No. 8*, Puerto Vallarta, Jalisco, 24 p.
- Serpa, L.; Smith, S.; Katz, C.; Skidmore, C.; Sloan, R.; y Pavlis, T., 1992, A geophysical investigation of the southern Jalisco block in the State of Colima, Mexico: *Geofísica Internacional (México)*, v. 31, núm. 4, p. 475–492.
- Siebe, Claus; Komorowski, J.C.; y Sheridan, M.F., 1992, Morphology and emplacement of an unusual debris-avalanche deposit at Jocotitlán Volcano, central Mexico: *Bulletin of Volcanology*, v. 54, p. 573–589.
- Siebert, L., 1984, Large volcanic debris avalanche—characteristics of source area, deposits and associated eruptions: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 22, p. 163–197.
- Singh, S.K.; Ponce, Lautaro; y Nishenko, S.P., 1985, The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932—subduction of Rivera Plate: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 75, p. 1301–1313.
- Smith, S.A., 1990, A geologic reconnaissance study of a middle Cretaceous marine volcanic arc—the stratigraphic evolution and subsequent strike-

- slip fragmentation of the Colima Basin: University of New Orleans, tesis de maestría en ciencias, 107 p. (inédita).
- Stoopes, G., y Sheridan, M.F., 1992, Giant debris avalanches from the Colima Volcanic Complex, Mexico—implications for long-runout landslides (> 100 km) and hazard assessment: *Geology*, v. 20, p. 299–302.
- Villemin, T., y Chalesworth, H., 1991, Stress—a program to analyse data from striated fault.
- Ui, T., 1985, Debris avalanche deposits associated with volcanic activity: International Conference and Field Workshop on Landslide, 4<sup>a</sup>, Tokyo, Proceedings, p. 405–410.
-