

## ESTRUCTURA INTERNA DE LA FALLA DE OAXACA (MÉXICO) E INFLUENCIA DE LAS ANISOTROPIAS LITOLÓGICAS DURANTE SU ACTIVIDAD CENOZOICA

Ángel Francisco Nieto-Samaniego,<sup>1</sup>  
Susana Alicia Alaniz-Álvarez<sup>1</sup> y  
Fernando Ortega-Gutiérrez<sup>2</sup>

### RESUMEN

Un rasgo geomorfológico lineal de 380 km de longitud y dirección norte-sur, en el que se reconoce tres sectores diferenciados por sus características geomorfológicas, se extiende desde Perote, Estado de Veracruz, hasta Miahuatlán, Estado de Oaxaca. El sector septentrional se reconoció por el alineamiento de los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba. La morfología de los sectores central y meridional está dominada por la falla de Oaxaca y la transición entre estos dos sectores la constituye la falla de Donají, la cual tiene dirección este-oeste. Las fallas de Oaxaca y Donají tuvieron actividad sincrónica durante el Cenozoico. En el sector central, el contacto que separa al complejo milonítico Sierra de Juárez, ubicado en el bloque del bajo, del Complejo Oaxaqueño y su cobertura, ubicados en el bloque del alto, es un plano de falla que se inclina 30° al oeste. Se interpreta que este contacto de ángulo de inclinación moderado controló la deformación frágil cenozoica, activándose como falla normal y controlando la orientación de la falla de Oaxaca hasta una profundidad mínima de 10 km. En el sector meridional, donde no afloran las rocas miloníticas, la falla de Oaxaca presenta una traza segmentada por fallas transversales, de las cuales la falla de Donají es la mayor y más septentrional.

Palabras clave: Geología estructural, fallamiento cenozoico, reactivación, falla de Oaxaca, México.

### ABSTRACT

A 380-km-long linear physiographic feature in southern Mexico extends from Perote, State of Veracruz, on the north, to Miahuatlán, State of Oaxaca, on the south. Contrasting geomorphology along this prominent physiographic feature indicates that it consists of three segments. The northern one is recognized by the alignment of volcanoes Pico de Orizaba and Cofre de Perote. The geomorphic expression of the northerly striking Oaxaca fault characterizes the central and southern segments. The easterly striking Donají fault marks the transition between the central and southern segments. Brittle slips on the Donají and Oaxaca faults in the Cenozoic are considered to have been contemporaneous. The Oaxaca fault in the central segment is a continuous feature that is localized by the 30° westward dipping tectonic contact separating the mylonitic rocks of the Sierra de Juárez mylonite complex from the suprajacent Oaxaqueño Complex and its cover rocks. This moderately dipping contact is interpreted to have controlled the Cenozoic brittle deformation to depths of 10 km. In the southern segment, mylonitic rocks do not crop out, and the Oaxaca fault is broken by numerous transverse faults, of which the Donají fault is the northernmost.

Key words: Structural geology, Cenozoic faulting, reactivation, Oaxaca fault, Mexico.

### INTRODUCCIÓN

Uno de los rasgos geomorfológicos más prominentes del sur de México consiste en una depresión alargada con relleno fluvio-lacustre, limitada en su parte central, hacia el oriente, por la falla de Oaxaca. Esta falla se extiende desde Tehuacán, Puebla, hasta Oaxaca, Oaxaca, donde se intersecta con otra falla, de dirección oriente-poniente, denominada en este artículo, falla de Donají. Esa intersección fue considerada por Centeno-García (1988) como el límite meridional de la falla de Oaxaca, suponiéndole ahí un desplazamiento nulo. No obstante, más al sur de la ciudad de Oaxaca, la falla de Oaxaca se manifiesta por segmentos de falla interrumpidos por valles transversales que fueron reconocidos hasta Ocotlán, Oaxaca. Además, la depresión alargada descrita persiste hasta Miahuatlán, donde una sierra transversal la limita (Figura 1).

La falla de Oaxaca tuvo actividad principalmente normal durante el Cenozoico (Centeno-García 1988) y su traza coincide con otro rasgo estructural más antiguo, formado por el complejo milonítico Sierra de Juárez. Este complejo constituye una zona de cizalla que tuvo actividad como cabalgadura entre el Paleozoico tardío y el Jurásico Medio (Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego y Ortega-Gutiérrez, 1994) y como falla transcurrente en el Jurásico Medio (Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego, Ortega-Gutiérrez y van der Hyden, 1994).

El complejo milonítico Sierra de Juárez fue interpretado como la zona de yuxtaposición de los terrenos Zapoteco y Cuicateco (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1990), lo que le confiere una geometría de cabalgadura con dirección de transporte hacia el oriente (Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego y Ortega-Gutiérrez, 1994).

El estudio teórico de la reactivación de planos de debilidad preexistentes, durante eventos de deformación frágil, ha sido discutido recientemente (Sibson, 1985; Ranalli y Yin, 1990; Huyghe y Mugnier, 1992; Ivins *et al.*, 1990; Yin y Ranalli, 1992). La falla de Oaxaca actuó sobre rocas cuya

<sup>1</sup>Estación Regional del Centro, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 376, 36000 Guanajuato, Gto., México

<sup>2</sup>Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, D. F., México.

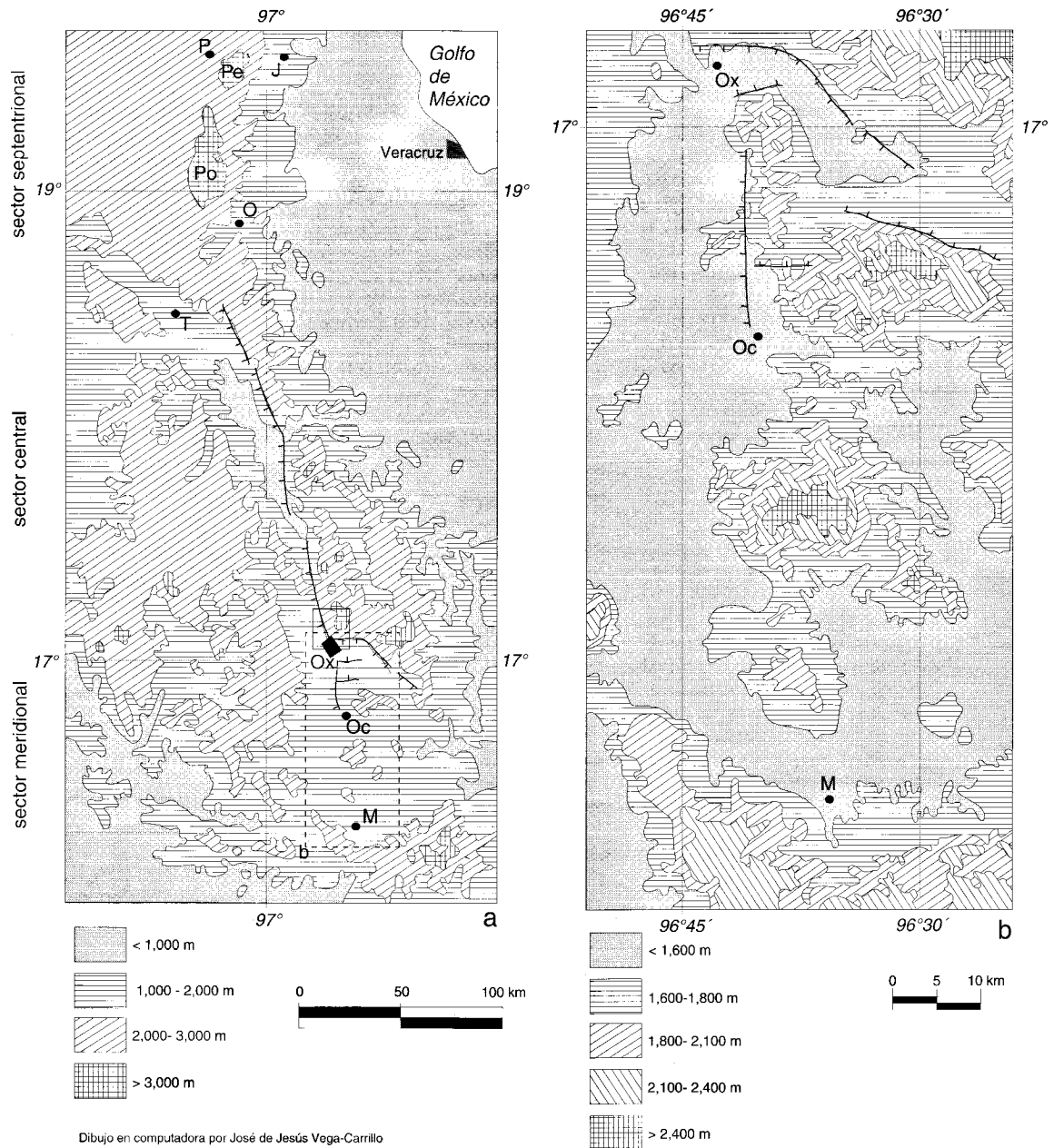


Figura 1.- *a*, Mapa hipsográfico regional que muestra los tres sectores en los que se dividió la megaestructura estudiada. El rectángulo pequeño en línea sólida muestra el área estudiada a detalle; el de línea interrumpida, el área de la figura *b*. *b*, Ampliación del sector sur del mapa hipsográfico regional. J, Jalapa, Ver.; M, Miahuatlán, Oax.; O, Orizaba, Ver.; Oc, Ocotlán, Oax.; Ox, Oaxaca, Oax.; P, Perote, Ver.; Pe, volcán Cofre de Perote; Po, volcán Pico de Orizaba; T, Tehuacán, Pue.

estructura está dominada por foliación milonítica, lo que implica su desarrollo en un medio que contiene planos de debilidad. En el estudio presente, se documenta la geometría superficial de la falla de Oaxaca, su estructura interna, su relación con la falla de Donají y se discute la influencia que ejercieron los planos de debilidad preexistentes en su actividad

cenozoica.

Dado que el trabajo a escala de mesoestructuras se hizo en un área pequeña, las mediciones hechas y los resultados cuantitativos obtenidos son aplicables de manera estricta solamente al área estudiada; sin embargo, se considera las interpretaciones generales extrapolables a otras regiones.

## DESCRIPCIÓN DE LA MEGAESTRUCTURA

El mapa hipsográfico (Figura 1) define un rasgo lineal sobresaliente que se extiende desde Perote, Veracruz, hasta Miahuatlán, Oaxaca. Al norte de Tehuacán, Puebla, se identificó solamente por el alineamiento de los volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote. Hacia el sur de Tehuacán y hasta la ciudad de Oaxaca, consiste en una depresión alargada limitada al oriente por la falla de Oaxaca, que presenta un escarpe bien definido. Al sur de la ciudad de Oaxaca y hasta Miahuatlán, Oaxaca, la falla de Oaxaca muestra un escarpe discontinuo, cortado por varias depresiones menores de dirección este-oeste. Este rasgo geomorfológico tiene, así, 380 km de longitud.

No se conoce estudios publicados que describan las características estructurales del límite occidental de la depresión; sin embargo, se le considera un origen tectónico, ya que el contraste hipsográfico que forma es lineal y paralelo al límite oriental y en toda su longitud no se separa de éste por una distancia de más de 20 km (Figura 1).

## ANÁLISIS MESOESTRUCTURAL

### LA FALLA DE OAXACA

En el área estudiada a detalle (Figura 1), la falla de Oaxaca se manifiesta como un escarpe rectilíneo de dirección N10°W, que consiste en un grupo de fallas paralelas o que forman ángulos de hasta 25° con esa dirección. En el bloque del bajo, están las rocas del complejo milonítico Sierra de Juárez, cuya edad se ubica entre el Paleozoico tardío y el Jurásico Medio (Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego y Ortega-Gutiérrez, 1994), y en el bloque del alto, rocas pertenecientes al Complejo Oaxaqueño de edad precámbrica y a su cobertura cretácica, o bien rocas volcánicas y sedimentarias continentales terciarias.

La Lámina 1 muestra, de manera esquemática, la disposición de las fallas que en conjunto forman la falla de Oaxaca en una sección transversal. No se pudo determinar la edad relativa de las estructuras mostradas; sin embargo, Centeno-García (1988) realizó un estudio geomorfológico detallado a partir de la ubicación y forma de los abanicos aluviales y del análisis de la sinuosidad y la morfología del escarpe de la falla, concluyendo que se sucedieron fases múltiples de actividad. Dicha autora sugiere que las fallas formadas en las fases más jóvenes estén ubicadas al poniente de las precedentes, observándoseles actualmente en la parte baja del escarpe; apoyó esta idea en la morfología y en la presencia de depósitos aluviales correspondientes al relleno del valle en partes elevadas del escarpe; asimismo, asumió que esos depósitos se formaron durante etapas más antiguas de actividad.

El contacto entre la milonita, ubicada al oriente, y las rocas que forman la cobertura del Complejo Oaxaqueño, ubicadas al poniente, es una falla de actitud N15°W, 35°SW. Hay numerosas fallas asociadas con esta estructura que tienen rum-

bo semejante; sin embargo, por su ángulo de inclinación, pueden separarse en dos grupos: (1) fallas con inclinación > 60°, ubicadas en la cobertura del Complejo Oaxaqueño, y (2) fallas de inclinación < 45°, que predominan en la milonita, aun cuando también hay, en cantidad menor, fallas con ángulos de inclinación más grandes (Lámina 1).

El desplazamiento vertical mínimo de la falla de Oaxaca en el área de estudio está dado por el desnivel medido en el escarpe, que fue de 1,800 m en promedio. Esta deformación ocurrió en un lapso comprendido entre el Mioceno y el Pleistoceno, ya que las rocas miocénicas de la Formación Suchilquitongo (Wilson y Clabaugh, 1970; Ferrusquía-Villafranca, 1990) rellenan la fosa de Oaxaca y, por otra parte, la morfología del escarpe indica una actividad tan joven como el Pleistoceno (Centeno-García, 1988)

### LA FALLA DE DONAJÍ

No hay evidencias que indiquen que la falla de Donají continúe hacia el poniente de su intersección con la falla de Oaxaca, ubicada en los alrededores de San Felipe del Agua (Lámina 1). La traza de la falla de Donají coincide con el límite septentrional de una depresión alargada de dirección oriente-poniente, que tiene un desnivel topográfico de 1,500 m respecto al cerro La Peña. Este frente montañoso es rectilíneo y el pie de monte muestra un escarpe con facetas triangulares bien desarrolladas. Estas características morfológicas son indicativas de la presencia de fallas normales.

La traza de la falla de Donají se ubicó gracias a que los bloques que limita tienen litologías fácilmente distinguibles. En el bloque septentrional afloran rocas perteneciente al complejo milonítico Sierra de Juárez, y en el bloque meridional afloran sedimentos marinos cretácicos (Ortega-Gutiérrez y González-Arreola, 1985), o bien, rocas volcánicas o sedimentarias continentales terciarias. Un plano de falla que pone en contacto sedimentos cretácicos con rocas miloníticas se observó en un afloramiento cercano a San Felipe del Agua, midiéndose un rumbo de N60°W y una inclinación de 25°SW.

Por otro lado, no se encontró marcadores estratigráficos para determinar la magnitud y el sentido del movimiento relativo de los bloques limitados por la falla de Donají, pero se considera que la morfología descrita y la presencia de las rocas más jóvenes en el bloque del alto indican un movimiento de tipo normal. Por otra parte, se observó numerosas estrías horizontales en planos de falla menores dentro de las rocas volcánicas terciarias, ubicadas muy cerca de la estructura principal.

Si la falla de Donají tuvo actividad sincrónica con la falla de Oaxaca, como lo indica la semejanza del relieve formado por ambas estructuras, debió haber movimientos laterales de ajuste en una o ambas estructuras, dada la perpendicularidad de sus rumbos. Esto explica las estrías horizontales observadas, sin tener que suponer movimientos a rumbo importantes, de los cuales, debe señalarse, no hay evidencia morfológica ni estratigráfica. Por este motivo, se considera que el desliza-

miento sobre la falla de Donají fue oblicuo, con una componente mayor de tipo normal.

#### ESTRUCTURAS PRECENOZOICAS

Las rocas anteriores al Cenozoico presentes en el área de estudio contienen numerosos planos de debilidad, representados, en un caso, por los planos de estratificación de las rocas mesozoicas y, en otro, por los planos de foliación de las rocas miloníticas. Un plano mayor es el cambio litológico entre el complejo milonítico Sierra de Juárez y las rocas ubicadas en el bloque occidental de la falla de Oaxaca.

En el caso de los planos de estratificación, se pudo observar que, a escala regional, su actitud es variable por encontrarse plegados; no obstante, en la sección que se muestra en la Lámina 1, se inclinan en promedio 45° en una dirección que varía de norte a norponiente. La foliación milonítica tiene dos actitudes preferentes, cada una de las cuales se ubica en un sitio específico: hacia el oriente de San Felipe del Agua, la foliación tiene un rumbo que varía entre N10°E y N85°E, con inclinación entre 10 y 30° hacia el SE; hacia el poniente de San Felipe del Agua, el rumbo varía de N10°W a N20°E, con inclinación entre 20 y 35° hacia el W.

#### RELACIÓN ENTRE EL FALLAMIENTO CENOZOICO Y LOS PLANOS DE DEBILIDAD PREEXISTENTES

##### PRINCIPIOS TEÓRICOS DEL DESLIZAMIENTO SOBRE PLANOS DE DEBILIDAD

En un sistema de fallamiento que obedezca el criterio de Mohr-Coulomb, un cuerpo homogéneo se fracturará en dos grupos de fallas, cuya línea de intersección tiene la misma dirección que el esfuerzo principal intermedio ( $\sigma_2$ ). El cuerpo se romperá cuando el esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ) supere a la cohesión del cuerpo ( $S$ ), más el producto del esfuerzo normal al plano potencial de falla ( $\sigma_n$ ), multiplicado por el coeficiente de fricción interna del material ( $\mu$ ), de acuerdo con

$$\tau = S + \mu \sigma_n \quad (1)$$

De manera semejante, el esfuerzo de cizalla requerido para que se produzca deslizamiento sobre un plano de debilidad está determinado por la cohesión ( $S'$ ), el coeficiente de fricción ( $\mu'$ ) y el esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ); todos ellos sobre el plano de debilidad, según la relación

$$\tau' = S' + \mu' \sigma_n \quad (2)$$

donde la cohesión ( $S'$ ), el coeficiente de fricción ( $\mu'$ ), o ambos, son menores que  $S$  y  $\mu$ , respectivamente.

El valor de  $\tau'$  requerido para que se produzca deslizamiento sobre planos de debilidad, calculado con la ecuación (2), podrá ser mayor o menor que el esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ) necesario para generar una falla por fractura, calculado mediante la ecuación (1). Si  $\tau > \tau'$ , se producirá deslizamiento sobre el plano preexistente, y si  $\tau < \tau'$ , se formará una falla nueva.

La magnitud del esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) está determinada por la orientación del plano sobre el cual actúa, ya que este esfuerzo es una solución tensorial sobre dicho plano, según la ecuación

$$\sigma_n = \sigma_i N_i^2 \quad (3)$$

donde  $N_i$  es un vector unitario perpendicular al plano y  $\sigma_i$  es el tensor de esfuerzos en función de sus componentes principales.

Si se considera valores fijos de  $S'$  y  $\mu'$ , el esfuerzo de cizalla ( $\tau'$ ) requerido para el deslizamiento sobre un plano preexistente estará determinado por la orientación de dicho plano de acuerdo con las ecuaciones (2) y (3). Por otra parte, de acuerdo con las ecuaciones (1) y (3), el valor de  $\tau$  requerido para formar una falla por fractura estará determinado por el tensor de esfuerzos, ya que la geometría de este tensor define la orientación del plano de fractura. Lo anterior muestra que las orientaciones de los planos de debilidad preexistentes—planos de foliación, diaclasas, planos de estratificación, fallas o contactos geológicos—determinarán si la deformación en un cuerpo de roca será liberada por fractura o por deslizamiento sobre los planos preexistentes.

Varios estudios han abordado el problema de la reactivación de planos de debilidad preexistentes asumiendo que la deformación obedece el criterio de Mohr-Coulomb. Algunos analizan el caso bidimensional (Sibson, 1985; Ranalli y Yin, 1990; Huyghe y Mugnier, 1992) y el caso tridimensional en un sistema andersoniano—con un esfuerzo principal vertical—fue tratado por Ivins y colaboradores (1990).

El sistema más general, donde los esfuerzos pueden tener cualquier dirección, fue tratado por Yin y Ranalli (1992). En su estudio, estos autores dedujeron ecuaciones en las cuales el esfuerzo requerido para producir fractura o deslizamiento sobre planos preexistentes está expresado como la diferencia ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), siendo  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  los esfuerzos principales compresivos máximo y mínimo, respectivamente. En sus ecuaciones, esta diferencia es función de las orientaciones del tensor de esfuerzos y de los planos preexistentes. De acuerdo con los mismos autores, considerando que  $\sigma_2 = \sigma_3 + \delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ , donde  $0 < \delta < 1$ , la fractura se alcanza cuando

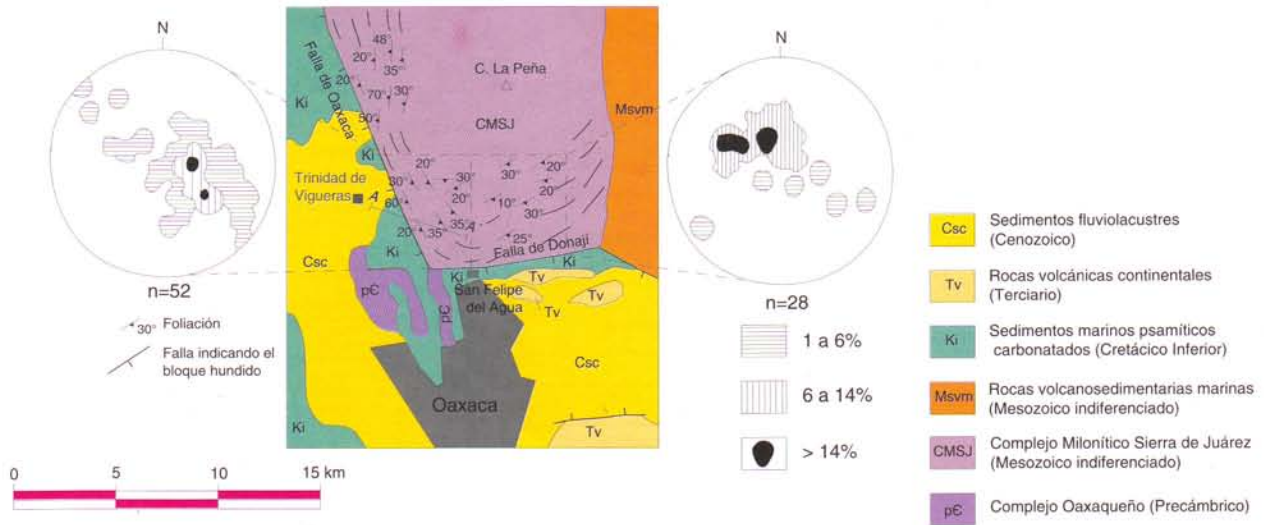
$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2 \mu \rho g z (1 - \lambda) + 2S}{(\mu^2 + 1)^{1/2} - \mu + 2 \mu (m_1^2 + \delta m_2^2)} \quad (6)$$

donde  $\rho$  es la densidad promedio de la columna de roca que yace encima,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $z$  es la profundidad,  $\lambda$  es la razón presión de fluido intersticial / presión litostática y  $m_i$  es un vector unitario perpendicular al plano horizontal. El deslizamiento sobre planos de debilidad es alcanzado cuando

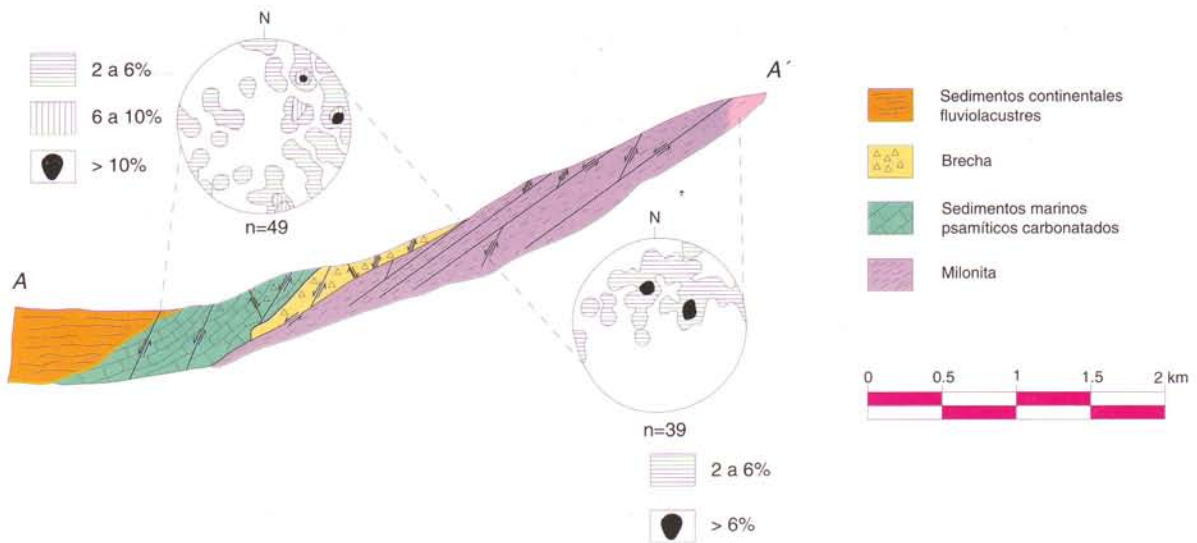
$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\mu' \rho g z (1 - \lambda) + S'}{[(n_1^2 + \delta^2 n_2^2) - (n_1^2 + \delta n_2^2)^2]^{1/2} + \mu' [(m_1^2 + \delta m_2^2) - (n_1^2 + \delta n_2^2)]} \quad (7)$$

donde  $n_i$  es un vector unitario perpendicular al plano de debilidad. Se ilustra las relaciones geométricas en la Figura 2. De

Los estereogramas muestran el hemisferio inferior con las concentraciones de los polos de la foliación.



Los estereogramas muestran el hemisferio inferior con las concentraciones de los polos de las fallas.



Proceso completo de selección de color por computadora por José de Jesús Vega-Carrillo

MAPA GEOLÓGICO Y SECCIÓN ESTRUCTURAL ESQUEMÁTICOS DEL ÁREA DE OAXACA

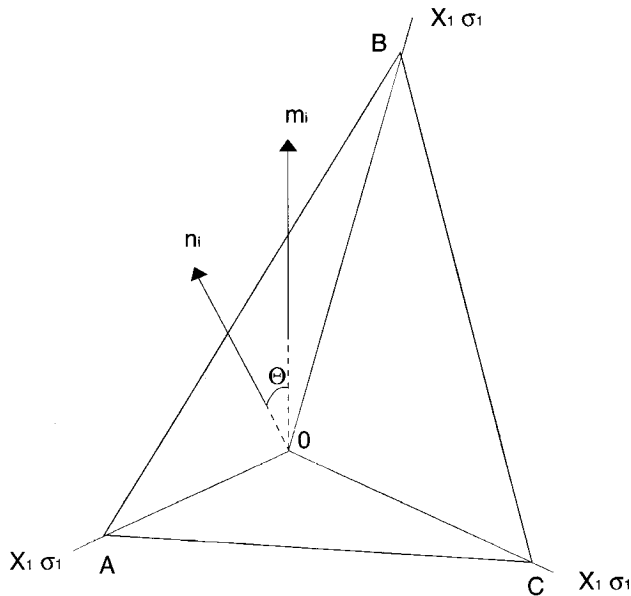


Figura 2.- Relaciones geométricas usadas en las ecuaciones del texto;  $m_i$  y  $n_i$  son vectores unitarios vertical y perpendicular al plano ABC, respectivamente.

acuerdo con estas ecuaciones, para características definidas de la roca ( $\mu$ ,  $\mu'$ ,  $\rho$ ,  $S$ ,  $S'$ ,  $\lambda$ ), a una profundidad determinada ( $z$ ) y a una misma orientación del sistema de esfuerzos, la orientación de los planos de debilidad determinará si se produce deslizamiento sobre ellos, lo que sucede si el valor  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  de la ecuación (7) es menor que el de la ecuación (6); de lo contrario, la roca se fracturará.

#### APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

En el área de estudio, los dos planos de falla que limitan a las rocas miloníticas tienen inclinaciones de  $25^\circ$  en un caso—falla de Donají— y  $35^\circ$  en el otro—falla de Oaxaca. En esos mismos lugares, la foliación tiene inclinaciones de  $25$  y  $30^\circ$ , respectivamente, y las direcciones promedio de las trazas de las fallas y de las foliaciones respectivas forman ángulos pequeños ( $< 15^\circ$ , Lámina 1). Estos hechos indican que el fallamiento cenozoico fue controlado por las foliaciones precenozoicas, ya que en un medio isotrópico, el ángulo mínimo de inclinación de fallas normales formadas por fractura debería ser  $45^\circ$ , lo que excluye la posibilidad de ángulos como los observados.

Por otra parte, dentro de las rocas miloníticas, hay fallas cuya inclinación es  $> 60^\circ$  y cortan a los planos de debilidad, mostrando así que los planos preexistentes no tuvieron influencia en el desarrollo de esas fallas.

Si se calcula  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  en las ecuaciones 6 y 7, usando los valores  $\mu = 0.75$ ,  $\mu' = 0.60$ ,  $\rho = 2,650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $g = 9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,  $\delta = 0.5$ ,  $\lambda = 0$ ,  $S = 75 \text{ MPa}$ ,  $S' = 5 \text{ MPa}$ ,  $m_1 = 1$ ; considerando varias profundidades ( $z$ ) y la orientación de las foliaciones medidas junto a la falla de Oaxaca ( $n_1 = 0.866$ ,  $n_2 = 0.0436$ ,  $n_3 = 0.4981$ ), se observa que los planos de debilidad preexis-

tentes controlarán la dirección del fallamiento hasta una profundidad cercana a los 10 km; y si se introduce un valor para la presión de fluidos de  $\lambda = 0.4$ , con el fin de observar el comportamiento de la gráfica, la profundidad a la que se preferirá la fractura aumenta a 14 km (Figura 3).

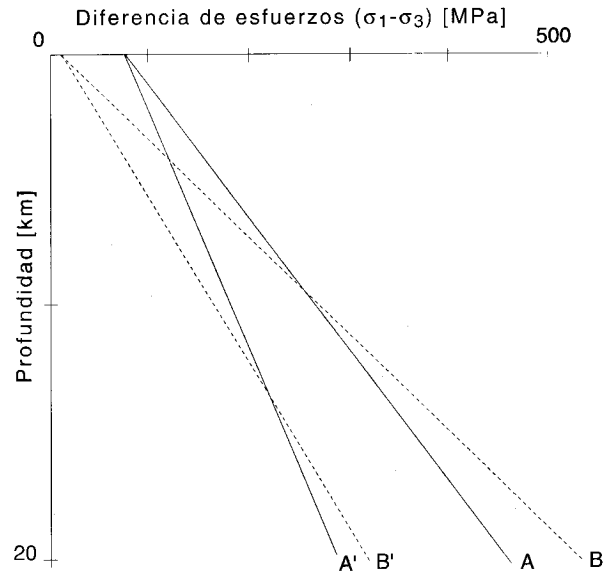


Figura 3.- Gráfica que muestra la diferencia de esfuerzos  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  requerida para iniciar el fallamiento en la falla de Oaxaca. A y A' fueron calculadas de la ecuación (6), que corresponde a la ruptura del material, usando los valores siguientes:  $\mu = 0.75$ ,  $\rho = 2,650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $g = 9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,  $\delta = 0.5$ ,  $S = 75 \text{ MPa}$ ,  $m_1 = 1$ . B y B' fueron calculadas usando la ecuación (7), que corresponde al deslizamiento sobre el plano de debilidad medido en la falla de Oaxaca, utilizando los valores siguientes:  $\mu' = 0.60$ ,  $S' = 5 \text{ MPa}$ ,  $n_1 = 0.866$ ,  $n_2 = 0.0436$  y los mismos valores de  $\rho$ ,  $g$ ,  $\delta$ , y  $m$  que fueron empleados para calcular A y A'. Para las líneas A' y B' se usó  $\lambda = 4$ ; para las líneas A y B,  $\lambda = 0$ . En ausencia de presión de fluidos (líneas A y B), se observa que, hasta una profundidad de 10 km, se requiere una menor diferencia de esfuerzos  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  para reactivar el plano de debilidad que para romper el material; por lo tanto, la deformación será producida por deslizamiento sobre el plano preexistente. A mayor profundidad, se requerirá una menor diferencia de esfuerzos  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  para romper el material que para producir deslizamiento sobre el plano; por lo tanto, la deformación será liberada por ruptura abajo del punto de intersección. En presencia de presión de fluidos (líneas A' y B'), aumenta la profundidad hasta la cual se prefiere el deslizamiento sobre el plano de debilidad.

Tomando la ecuación (7), dándole los valores ya mencionados de  $\mu$ ,  $\mu'$ ,  $\rho$ ,  $g$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $S$ ,  $S'$ ,  $m_i$ , una profundidad ( $z$ ) de 0.1 km y variando los valores de  $n_2$ , se obtiene la gráfica de la Figura 4a. De ella, se deduce que en superficie, asumiendo  $\sigma_1$  vertical y mientras se mantenga el ángulo de  $30^\circ$  de inclinación del plano de debilidad, la rotación sobre el eje vertical, ya sea del plano de debilidad o de los esfuerzos principales  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , no generará ruptura. Si en las mismas condiciones se hace variar  $n_1$  se obtiene la gráfica de la Figura 4b, la cual muestra que ocurrirá la ruptura cuando la foliación tenga ángulos de inclinación menores que  $24^\circ$ .

Se desconoce el comportamiento del contacto entre las milonitas y las rocas adyacentes a profundidad; sin embargo, por tratarse de la zona de acreción de dos terrenos tectono-

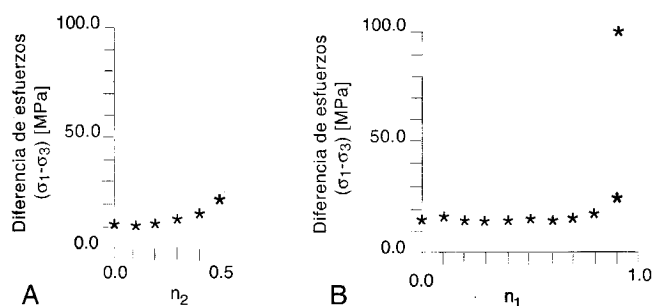


Figura 4.- Gráficas que muestran la variación de la diferencia de esfuerzos ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) necesaria para el deslizamiento sobre el plano medido cerca de la falla de Oaxaca, al hacerlo rotar: (A) alrededor de un eje horizontal paralelo a su rumbo; (B) alrededor de un eje vertical. Nótese que al girar sobre el eje horizontal nunca se alcanza los 75 MPa necesarios para la ruptura, y al girar sobre el eje vertical este valor es alcanzado cuando los ángulos de inclinación son menores que  $24^\circ$ . Se usó los parámetros indicados en el texto.

tratigráficos, cabe esperar que afecte a la totalidad o a la mayor parte de la corteza; se supone, también, que la orientación observada en superficie se mantenga con poca variación a profundidad. Por otra parte, en zonas profundas de la corteza es difícil suponer que la deformación sea frágil, lo que hace inadecuado el uso del criterio de Mohr-Coulomb en que se basó el desarrollo de las ecuaciones usadas.

Las fallas normales con ángulos de inclinación grandes fueron observadas tanto en la milonita como en las rocas adyacentes; su presencia en las rocas no milonitizadas se explica porque éstas carecen de planos de debilidad—como en el caso de la brecha masiva que aflora en la sección estudiada—o porque los planos que contienen no son adecuados para que se dé deslizamiento sobre ellos, ya sea por ser pequeños, no penetrativos o por tener orientaciones que se distribuyen aleatoriamente, como los observados en los sedimentos mesozoicos (Lámina 1).

En las rocas miloníticas, hay fallas con inclinación grande que no siguen los planos de debilidad; algunas son pequeñas y afectan sólo a espesores que varían entre metros y decenas de metros de roca milonitizada. Se considera que estas fallas menores se hayan formado para acomodar la deformación interna que no pudo ser liberada por deslizamiento a lo largo de los planos de foliación en las capas de milonita. También hay fallas mayores con ángulos de inclinación grandes; su orientación y distribución indican que son estructuras sintéticas y antitéticas de las fallas de Oaxaca y Donají; se cree que se deban a varias causas no excluyentes: (1) que se hayan formado en fases antiguas de deformación, cuando los planos de debilidad tenían orientaciones no adecuadas para que se diera el deslizamiento sobre ellas y que posteriormente hayan sufrido rotación hasta presentar las orientaciones actuales; (2) que la dirección de los esfuerzos principales haya variado, ya sea en el espacio, presentando distintas orientaciones en lugares diferentes, o en el tiempo, teniendo orientaciones distintas durante fases de deformación diferentes; y (3) que se hayan formado por sistemas de esfuerzos secundarios, cuya orientación no fue adecuada para reactivar los planos de debilidad.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La megaestructura analizada presenta un comportamiento diferente en los distintos sectores que la constituyen. En la parte meridional del sector central, el límite oriental de la megaestructura es la falla de Oaxaca, la cual se desarrolló sobre rocas miloníticas que ejercieron un control fundamental durante el fallamiento cenozoico. En contraparte, en el sector meridional no aflora la milonita, sino sedimentos marinos plegados y rocas volcánicas y sedimentarias continentales. En este sector, el bloque oriental presenta varias depresiones topográficas transversales, de las cuales fueron visitadas dos; a ambas se reconoció un origen tectónico. La mayor de ellas es una fosa tectónica limitada al norte por la falla de Donají; en la otra, más pequeña, se observó fallas transversales a la falla de Oaxaca, ubicadas cerca de los límites de la depresión (Figura 1).

Es probable que las depresiones transversales a la falla de Oaxaca ubicadas al sur de la falla de Donají sean fosas tectónicas, dada la morfología que presentan y la orientación de las fallas observadas en el campo; de ser así, esto significaría que el estilo de la deformación cambia radicalmente al pasar del sector central al meridional, ya que en el central el tipo de fosas transversales no fue reconocido. Las fosas tectónicas con simetría ortorrómbica, como las que se infiere que existen en el sector meridional, implican una deformación tridimensional de la corteza, ya sea que las fosas se hayan formado sincrónicamente en un solo evento de deformación triaxial, como el descrito por Reches (1978), o por la sobreposición de varios eventos de deformación plana en los que hubo rotación de las direcciones principales de esfuerzo  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . A diferencia de lo anterior, en el sector central sólo se observa la fosa del valle de Oaxaca, sin fosas transversales u oblicuas identificables, lo que indica que la deformación fue bidimensional. Los autores presentes consideran que la coincidencia del cambio litológico en los afloramientos y el cambio en el estilo de la deformación, al pasar del sector central al meridional, responda a una anisotropía mayor de la corteza involucrada.

La transición entre los sectores central y meridional es la falla de Donají, estructura que también coincide con un cambio en la orientación de la foliación en las rocas miloníticas. Las foliaciones no se cortan una a otra, sino que cambian su orientación gradualmente, de paralelas a la falla de Oaxaca a perpendiculares a ella y paralelas a la falla de Donají (Lámina 1), sugiriendo que se formaran sincrónicamente. Se sabe que el primer evento de milonitización tuvo lugar entre el Paleozoico tardío y el Jurásico Medio (Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego y Ortega-Gutiérrez, 1994; Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego, Ortega-Gutiérrez y van der Hyden, 1994), lo cual descarta la posibilidad de que el cinturón milonítico se deba al levantamiento cenozoico o a la compresión laramídica. Estas observaciones indican que la coincidencia entre las orientaciones de las fallas cenozoicas de Oaxaca y Donají y las foliaciones miloníticas se deba a la reactivación de planos de

debilidad preexistentes, por lo que el desarrollo de la falla de Donají se debe al cambio en la dirección de las foliaciones.

La geometría descrita para las foliaciones puede deberse a: (1) una relación de tipo *lateral ramp* entre ambas direcciones de foliación, durante el cabalgamiento Paleozoico tardío - Jurásico Medio, y (2) plegamiento posterior a la formación de las milonitas, presumiblemente durante su exhumación en el Neocomiano (Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego y Ortega-Gutiérrez, 1994; Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego, Ortega-Gutiérrez y van der Hyden, 1994).

Una observación importante es que la falla de Donají se ubica en el límite meridional de los afloramientos de milonita; la ausencia de afloramientos de estas rocas más al sur, puede explicarse por el hundimiento relativo del sector meridional durante el Cenozoico, o porque la falla de Donají se ubique en el límite meridional del cinturón milonítico. Se considera la primera interpretación como más probable, debido a que en el sector meridional la falla de Oaxaca persiste, indicando la continuidad de la dirección estructural N10°W, la cual es controlada por el cinturón milonítico en el sector septentrional. Si este razonamiento es correcto, la milonita debe continuar hacia el sur en el subsuelo, cubierta por rocas mesozoicas y cenozoicas.

En una escala menor, a nivel de afloramiento, las fallas que siguen los planos de debilidad preexistentes no tienen la misma dirección ni inclinación que los planos de debilidad medidos en esos mismos lugares. Se cree que esto se deba a variaciones locales provocadas por las ondulaciones de los planos de debilidad, que en el caso presente comúnmente muestran una estructura trenzada, lo que provoca que las mediciones hechas en lugares cercanos arrojen valores distintos. Estas variaciones locales en la dirección e inclinación de los planos de debilidad pueden llegar a producir localmente la formación de fallas nuevas que corten a dichos planos, extendiéndose hasta el punto donde se encuentre otro plano de debilidad en posición adecuada para que ocurra deslizamiento sobre él.

El grado de incertidumbre al hacer estimaciones de los valores de  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  usando las ecuaciones (6) y (7) para profundidades mayores que 10 km es muy grande, por lo que no se cree razonable hacer un modelado cuantitativo del control ejercido por los planos de debilidad preexistentes en el fallamiento cenozoico a profundidades mayores. Sin embargo, los cálculos hechos son considerados indicadores cualitativos adecuados para establecer un modelo conceptual de la relación del fallamiento cenozoico con las anisotropías litológicas preexistentes, con base en las observaciones geológicas realizadas.

De los datos y la discusión presentados, se puede concluir que:

1. Los comportamientos estructurales distintos que presentan los sectores central y meridional de la megaestructura descrita, coinciden con cambios litológicos de las rocas que afloran, por lo que se cree que estas anisotropías mayores

de la corteza hayan determinado los estilos estructurales observados.

2. La falla de Donají es de desplazamiento oblicuo con un mayor componente de tipo normal; termina al poniente en su intersección con la falla de Oaxaca. Constituye el límite meridional de los afloramientos del cinturón milonítico Sierra de Juárez y marca la transición entre los sectores central y meridional, que son estructuralmente contrastantes.
3. Aunque al sur de la ciudad de Oaxaca la falla de Oaxaca continúa, cambia su expresión morfológica, observándose que su escarpe está segmentado por depresiones transversales.
4. La estructura interna del sector central de la falla de Oaxaca fue controlada por los planos de debilidad preexistentes. El mayor de estos planos es la zona de contacto entre las milonitas y las rocas adyacentes, por lo que se cree que la falla siga ese contacto al menos hasta profundidades cercanas a los 10 km, sin descartar la posibilidad de que lo haga hasta zonas tan profundas como la parte media o baja de la corteza.
5. La formación de las fallas normales que tienen ángulos de inclinación cercanos o mayores que 60° puede ser explicada cuando se trata de fallas pequeñas, como fallas menores que sirvieron para acomodar la deformación interna de las capas miloníticas. Cuando se trata de fallas mayores, son consideradas fallas sintéticas y antitéticas de las fallas de Donají y Oaxaca. En el caso de la cubierta mesozoica, la fractura se debió a que las rocas afectadas contenían planos de debilidad con orientaciones muy variables o no adecuados para que se diera el deslizamiento sobre ellos. En el caso de las rocas miloníticas, la fractura pudo deberse a la rotación, ya sea de las direcciones principales de esfuerzo, de los planos de debilidad preexistentes, o de ambos.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Fred McDowell y Richard Tosdal las revisiones críticas hechas al manuscrito. Esta investigación forma parte de las actividades desarrolladas por S.A. Alaniz-Álvarez y Á.F. Nieto-Samaniego en el Posgrado en Geofísica de la Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México, y forma parte de sus tesis doctorales. Se agradece el financiamiento recibido de CONACYT, proyecto 3155T y PADEP, UNAM, proyectos 030347 y 030355.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alaniz-Álvarez, S.A.; Nieto-Samaniego, Á.F.; y Ortega-Gutiérrez, Fernando, 1994, Structural evolution of the Sierra de Juárez mylonitic complex, State of Oaxaca, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 11, p. 147-156.
- Alaniz-Álvarez, S.A.; Nieto-Samaniego, Á.F.; Ortega-Gutiérrez, Fernando; y van der Hyden, Peter, 1994, A Middle Jurassic age for the Oaxaca Shear Zone



- and its tectonic interpretation: Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional, 12, Toluca, Libro de resúmenes, p. 2-3 (resumen).
- Centeno-García, Elena, 1988, Evolución estructural de la falla de Oaxaca durante el Cenozoico: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis de maestría, 156 p. (inédita).
- Ferrusquía-Villafranca, Ismael, 1990, Biostratigraphy of the Mexican continental Miocene; Part 2, The southeastern (Oaxacan) faunas: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 56, p. 60-109.
- Huyghe, Pascale, y Mugnier, J.L., 1992, The influence of depth on reactivation in normal faulting: *Journal of Structural Geology*, v. 14, p. 991-998.
- Ivins, E.R.; Dixon, T.H.; y Golomberg, M.P., 1990, Extensional reactivation of an abandoned thrust—a bound on shallowing in the brittle regime: *Journal of Structural Geology*, v. 12, p. 303-314.
- Ortega-Gutiérrez, Fernando, y González-Arreola, Celestina, 1985, Una edad cretácica de las rocas sedimentarias deformadas de la sierra de Juárez, Oaxaca: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 5, p. 100-101.
- Ortega Gutiérrez, Fernando; Mitre-Salazar, L.M.; Roldán-Quintana, Jaime; Sánchez-Rubio, Gerardo; y De la Fuente-Duch, Mauricio, 1990, North American Continent-Ocean Transect Program, Transect H-3, Acapulco Trench to the Gulf of Mexico across southern Mexico: Geological Society of America, Centennial Continent/Ocean, escala 1:500,000.
- Ranalli, Giorgio, 1987, Rheology of the Earth, deformation and flow processes in geophysics and geodynamics: Londres, Allen and Unwin, 366 p.
- Ranalli, Giorgio, y Yin, Z.M., 1990, Critical stress difference and orientation of faults in rocks with anisotropies—the two-dimensional case: *Journal of Structural Geology*, v. 12, p. 1067-1071.
- Reches, Ze'ev, 1978, Analysis of faulting in three-dimensional strain field: *Tectonophysics*, v. 47, p. 109-129.
- Sibson, R.H., 1985, A note on fault reactivation: *Journal of Structural Geology*, v. 7, p. 751-754.
- Wilson, J.A., and Claubagh, S.E., 1970, A new Miocene formation and a description of volcanic rocks, northern valley of Oaxaca: Sociedad Geológica Mexicana, libro guía de la excursión México-Oaxaca, p. 120-128.
- Yin, Z.M., and Ranalli, Giorgio, 1992, Critical stress difference, fault orientation and slip direction in anisotropic rocks under non-Andersonian stress systems: *Journal of Structural Geology*, v. 14, p. 237-244.
- Manuscrito presentado: 27 de abril de 1992.  
 Manuscrito corregido devuelto por el autor: 12 de febrero de 1995.  
 Manuscrito aceptado: 20 de febrero de 1995.