

## INTERPRETACIÓN DE LA CINEMÁTICA DE LAS FALLAS NEO-TECTÓNICAS FRÁGILES DEL SECTOR SURESTE DE LA SIERRA DE PACHUCA

José Cruz Escamilla-Casas <sup>a</sup>, Luis Enrique Ortiz-Hernández <sup>a</sup>, Alberto Blanco-Piñón <sup>a</sup>, Enrique Cruz-Chávez <sup>a</sup>, Silvia Patricia Ambrocio-Cruz <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
[jocesca@uaeh.edu.mx](mailto:jocesca@uaeh.edu.mx)

### RESUMEN:

Las fallas frágiles en la Sierra de Pachuca se asocian con eventos geológicos regionales de deformación neo-tectónica. Debido a lo anterior, en las rocas cenozoicas volcánicas que afloran en el sector sureste predomina la deformación frágil. El objetivo del presente trabajo es determinar el estado de los paleoesfuerzos en este sector de la Sierra de Pachuca, a partir de datos estructurales de desplazamiento en fallas frágiles.

En Geología Estructural, para el estudio de fallas frágiles se consideran tres etapas: colecta de datos, análisis, e interpretación. En el presente trabajo, los datos de campo colectados son: la actitud del plano de falla, la orientación del deslizamiento, el sentido de movimiento y el grado de confianza en la determinación del sentido de movimiento. Para el análisis de los datos, se observó la consistencia de los datos, la integración de subgrupos de datos, y la determinación del nivel de calidad de los datos.

Finalmente, para la interpretación se aplicó la técnica de la inversión del tensor de los esfuerzos y se consideraron las siguientes dos suposiciones: 1) el desplazamiento en los planos de falla ocurre en la dirección de la solución de los esfuerzos de cizalla y 2) los datos reflejan un campo de esfuerzos uniforme.

Los resultados preliminares de esta investigación combinados con la cartografía geológica muestran lo siguiente: 1) la historia de deformación neo-tectónica frágil en la zona de estudio registra al menos dos etapas, 2) el estado de los esfuerzos indica una rotación levógira de la orientación de los esfuerzos principales y 3) la disposición topológica de las fallas frágiles en la región estudiada sugiere un arreglo Riedel muy probablemente asociado con un movimiento regional lateral izquierdo.

### 1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de los procesos geológicos deformantes pueden ser estudiados únicamente en regiones tectónicamente activas. Adicionalmente, la evidencia de la deformación neotectónica se limita a la deformación frágil, misma que se origina en la parte superior de la corteza terrestre. Por otro lado, se entiende que las rocas afectadas por mecanismos plástico-cristalinos ocurren a profundidad.

Específicamente, para el estudio de la deformación frágil, las fallas proporcionan información fundamental por las siguientes razones: (a) las fallas acumulan una proporción considerable de la deformación generada por los mecanismos de deformación frágil, (b) las fallas son estructuras penetrativas en la superficie de la tierra y a escala regional y (c) las fallas pueden establecer el orden de la secuencia cronológica de la historia geológica [1].

En el sector sureste de la Sierra de Pachuca, afloran rocas volcánicas cenozoicas que preservan estructuras generadas por deformación frágil. Tales estructuras, a su vez, preservan a otras de segundo y de tercer orden, mismas que proporcionan información crítica para aplicar los criterios para la

interpretación de la cinemática de los bloques fallados [2, 3, 4]. Las observaciones en campo indican que las fallas estructurales son abundantes, predominando el fallamiento normal y lateral, en menor grado ocurre el fallamiento inverso. Ocasionalmente, el fallamiento subhorizontal o de baja inclinación también se encuentra presente.

En este estudio, para la cuantificación de datos estructurales y determinación de la cinemática en fallas, se aplicó una variante de la técnica de la inversión de los esfuerzos [5, 6] y validado mediante los métodos gráficos para inferir ciertos elementos del tensor de los esfuerzos [7, 8]. Los resultados obtenidos indican que la orientación de los esfuerzos principales tiene una variación significativa. Consecuentemente, se distinguen al menos tres eventos de deformación frágil sucesivos.

Para fines de interpretación regional, se combinaron los resultados de las orientaciones de los esfuerzos principales con la cartografía digital que permite interpretar la distribución espacial de las estructuras. Finalmente, se combinaron los resultados anteriores con la cinemática de una estructura regional, denominada Falla Veracruz [9]. La Falla Veracruz y la topología de las fallas reconocidas en el presente estudio, sustentan la presencia de un movimiento cortical lateral izquierdo y un arreglo topológico de tipo Riedel instaurado durante el Neógeno. Tal movimiento afecta a la Sierra de Pachuca y se evidencia mediante un continuo pulsante de mecanismos de deformación frágil.

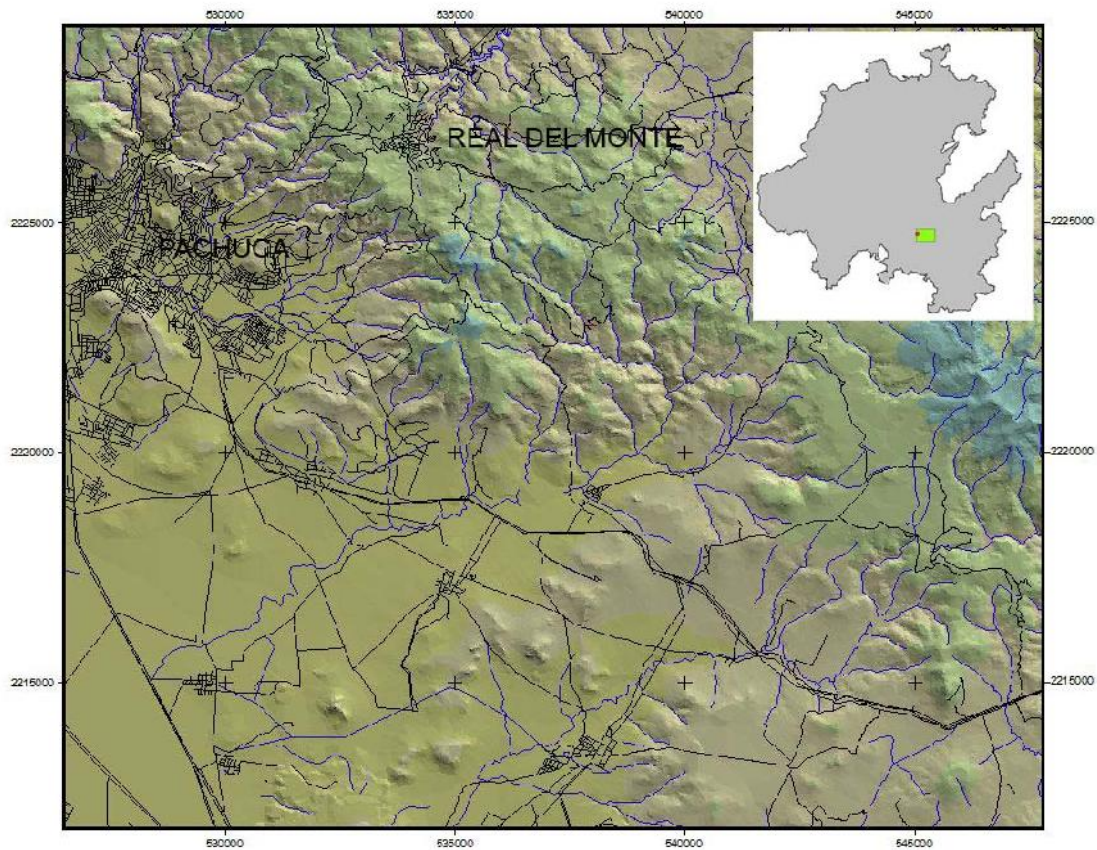


Figura 1. Modelo digital de elevación mostrando el sector sureste de la Sierra de Pachuca, objeto de estudio del presente trabajo. El inserto muestra el contorno del Estado de Hidalgo con la localización del área estudiada. Las coordenadas están expresadas en UTM y son concordantes con el estándar WGS84

## 2. MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se localiza en el sector sureste de la Sierra de Pachuca (Figura 1). Dentro del contexto geológico regional, el área estudiada se ubica en el sector oriental de la Faja Volcánica Trans Mexicana [10]. Las rocas cenozoicas extrusivas aflorantes son principalmente riolitas, pórfidos riolíticos, andesitas y depósitos irregulares de pumicita. Asimismo, afloran de manera ocasional un cuerpo intrusivo ígneo constituido por un pórfido de dacita y un pórfido cuarcífero. De acuerdo a la estratigrafía reconocida y descrita por Geyne et al. [11], las rocas aflorantes estudiadas pertenecen a las formaciones Vizcaína y Cerezo. Las rocas mencionadas, constituyen el sector oriente del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, yacimiento considerado de calidad mundial.

Siguiendo las relaciones de corte entre las rocas y las fallas y asumiendo que el inicio de la deformación frágil antecede a la mineralización, se puede estimar que la deformación neotectónica del sureste de la Sierra de Pachuca, debió instaurarse en un tiempo anterior a los 20.3 +/- 0.5 Ma (Mioceno). Tal edad corresponde al resultado de la datación de la mineralización realizada mediante K-Ar en la adularia formada hidrotermalmente [12].

La predominancia de los tipos de falla en las rocas con deformación frágil observadas en campo y de acuerdo a la clasificación andersoniana es, en orden descendente: fallas normales, fallas de desplazamiento lateral y en menor cantidad fallas inversas y de bajo ángulo o cabalgaduras. La morfología de las fallas indica que la historia geológica de la Sierra de Pachuca incluye periodos de compresivos y distensivos, mismos que se asocian con la evolución geotectónica de la Faja Volcánica Trans Mexicana.

## 3. METODOLOGÍA

Una falla es una discontinuidad en las rocas la cual resulta por el desplazamiento relativo a lo largo de una zona estrecha o zona de falla. Como consecuencia, existe un desajuste en la geología a lo largo de la estructura. Tal desajuste, el cual es útil para reconocer y localizar zonas de falla en el campo, es comúnmente obvio debido a las diferencias entre ambos lados de la falla. Una consecuencia común de estas diferencias es un contraste en la morfología entre ambos bloques de una falla, debido a: 1) un desplazamiento vertical relativo y 2) velocidades de erosión diferentes entre las diferentes formaciones rocosas.

Con el creciente interés en la tectónica frágil y la neotectónica, se han desarrollado una gran variedad de métodos para analizar los datos de desplazamientos en las fallas. En el presente trabajo, Los datos para efectuar el análisis en fallas consisten en un mínimo de tres observaciones: 1) la orientación del plano de falla, 2) la orientación de las estrías en la superficie fallada y 3) el sentido de desplazamiento. Para obtener la máxima información de los datos de los afloramientos de fallas (p. e. Para obtener la suma del tensor de los momentos) la información acerca del promedio de desplazamiento y del área de la superficie de falla debe obtenerse también. Por otro lado, se considera que una de las maneras más efectivas para determinar la dirección del desplazamiento en fallas es mediante la observación minuciosa de las estrías en el plano de falla. Adicionalmente, las estrías son estructuras que comúnmente se encuentran en los planos de falla y que además, determinan la orientación del desplazamiento.

El método empleado, se basa en las siguientes aspectos matemáticos [13]: El elipsoide de esfuerzos es descrito en su totalidad mediante el tensor de los esfuerzos,  $\mathbf{T}$ , el cual puede ser descrito en forma de una matriz que contiene seis variables independientes, ecuación 1:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

En el sistema coordinado definido mediante los ejes de los esfuerzos principales, el tensor de los esfuerzos tiene una expresión más simplificada con solo tres variables, las magnitudes de los esfuerzos principales, Ecuación 2:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Las tres variables que han sido eliminadas corresponden a las orientaciones de los tres ejes principales. Estas orientaciones, en un marco de referencia rectangular, corresponden a tres vectores unitarios perpendiculares entre sí y paralelos a los ejes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , los cuales están definidos respectivamente por:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \text{ y } \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

Estos nueve valores por sí solos corresponden a las tres variables independientes, ya que describen los vectores unitarios los cuales son mutuamente perpendiculares. Como resultado, la expresión general del tensor de los esfuerzos mostrados en la Ecuación 1, contiene tres variables independientes relacionadas a las orientaciones de los esfuerzos principales y otras tres variables independientes relacionadas a las magnitudes de los esfuerzos. De esa forma, los términos de  $a$  hasta  $f$  se computan de acuerdo al siguiente producto matricial, el cual relaciona la forma general del tensor de los esfuerzos no rotados:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ b & d & e \\ c & e & f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

Se debe aclarar que la Ecuación 4 es simplemente la expresión matricial de un tensor de rotación, esto es, la transferencia del sistema principal de los ejes principales a un sistema general de coordenadas cartesianas.

El vector de los esfuerzos ( $\sigma$ ) actuante en un plano de falla caracterizado por su vector unitario  $\mathbf{n}$  está dado, en notación vectorial y sucesivamente en notación matricial, por las siguientes expresiones:

$$\sigma = \sigma_1 n_1 + \sigma_2 n_2 + \sigma_3 n_3$$

siendo:

(5)

(6)

El módulo del esfuerzo normal  $v$  está dado por el producto escalar del vector de los esfuerzos por el vector unitario normal:

(7)

ó

(8)

El vector del esfuerzo normal, por sí mismo,  $v$ , es obtenido con relativa facilidad:

(9)

ó

(10)

Conociendo el vector de los esfuerzos  $\sigma$  y el vector de esfuerzo normal  $v$ , se puede obtener el esfuerzo cortante,  $\tau$ :

(11)

esto es:

(12)

Ahora bien, el problema directo consiste en determinar la orientación y sentido de deslizamiento entre los bloques de la falla conociendo la orientación del plano de falla, para un tensor de los esfuerzos dado,  $T$ . El problema inverso consiste en determinar el tensor medio,  $T$ , conociendo las orientaciones y los sentidos de deslizamiento en numerosas fallas. En ambos casos, se asume básicamente que cada deslizamiento de falla (indicado por las estrías) tiene la dirección y sentido del esfuerzo cortante que corresponde a un tensor de esfuerzos común e individual. Sin embargo, la colecta de datos implica errores, ocurriendo una dispersión en los patrones focales del esfuerzo y, por otro lado, los movimientos entre las fallas influyen uno sobre el otro. En la práctica, uno busca el ajuste óptimo entre todos los datos de desplazamiento en las fallas que a su vez pertenecen a un solo evento tectónico y al mismo tensor de esfuerzos. Para efectuar el ajuste óptimo, se utilizó el programa computacional FaultKin v. 5.5.0 y las condiciones teóricas descritas por Marrett y Allmendinger [14].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se obtuvieron tras la aplicación del procedimiento matemático descrito en la sección anterior, se resumen en la Tabla 1. Para identificar la ubicación de cada estación en el campo, se hace referencia a la Figura 2. Con la finalidad de obtener una estadística robusta, se colectaron un mínimo de 85 datos estructurales en cada estación.

Las estructuras observadas en el campo y las orientaciones de los ejes P y T, indican que la predominancia en la orientación del esfuerzo principal (número 1 en la columna Eje de la Tabla 1) es E-W y N-S. Sin embargo, el valor de la inclinación del eje es bajo. Indicando que la deformación frágil es ocasionada por esfuerzos de bajo ángulo. Por otro lado, las orientaciones de los planos de falla indican una predominancia de orientaciones N-S, seguida de las E-W y en menor grado las NE-SW.

Con la finalidad de correlacionar las observaciones llevadas a cabo en la Sierra de Pachuca con estructuras regionales, se generó el modelo digital de elevación que abarca un segmento de la Falla Veracruz (Figura 3). Sobre el modelo digital se identificaron los lineamientos topográficos más prominentes; se trazaron las líneas paralelas a los lineamientos y sus respectivas perpendiculares. Con lo anterior, se obtiene el punto de rotación de los bloques responsables de generar los lineamientos o polo de Euler.

Se puede observar que los polos de Euler empatan con la traza y con el sentido de rotación de la Falla Veracruz. Asimismo, es importante resaltar que las fallas estudiadas, tienen una orientación sub-paralela a los segmentos que componen los lineamientos topográficos observados a escala regional. Adicionalmente, las orientaciones del Eje P en cada estación configuran una variación en sentido levógiro.

Tabla 1. La ubicación de las estaciones se muestran en la Figura 2. Las abreviaturas empleadas son como sigue: Direc. = dirección; Incl. = inclinación; R = rumbo, E = echado; D = dirección; I = inclinación. Exceptuando las columnas Estación, Eje y Falla, las unidades están expresadas en grados de circunferencia

Estación	Suma del Tensor de los Esfuerzos			Solución de los planos de falla			Eje P		Eje T	
	Eje	Direc.	Incl.	Falla	Plano (R/E)	Sentido de desplazamiento (D/I)	Dirección	Inclinación	Dirección	Inclinación
<b>1</b>	1	218.9	10.4	1	307.1/40.1	50.1/39.4	95.1	81.7	224.2	5.3
	2	309.7	4.3	2	140.1/50.6	217.1/49.9				
	3	61.6	78.7							
<b>2</b>	1	65.2	3.2	1	145.4/42.6	254/41.1	316.5	80.1	65.2	3.2
	2	155.7	9.4	2	344/48.9	55.4/47.4				
	3	316.5	80.1							
<b>3</b>	1	122.9	4.6	1	217.1/40.5	60.8/40.3	262.4	83.9	122.9	4.6
	2	32.5	3.9	2	29.2/40.7	127.1/49.5				
	3	262.4	83.9							

4	1	159.9	22.3	1	253.2/22.7	21.5/22.6	335.1	67.6	159.9	22.3
	2	69.2	1.7	2	68.5/67.4	163.2/67.3				
	3	335.1	67.6							
5	1	194.7	14.6	1	274.6/31	20.7/30	194.7	14.6	41.8	73.7
	2	286.6	7.1	2	110.7/60	184.6/59				
	3	41.8	73.7							
6	1	56.2	12.8	1	279.2/49.7	67.5/31.8	122.9	56.1	220.1	4.8
	2	324	8.8	2	157.5/58.2	189.2/40.3				
	3	200.5	74.4							

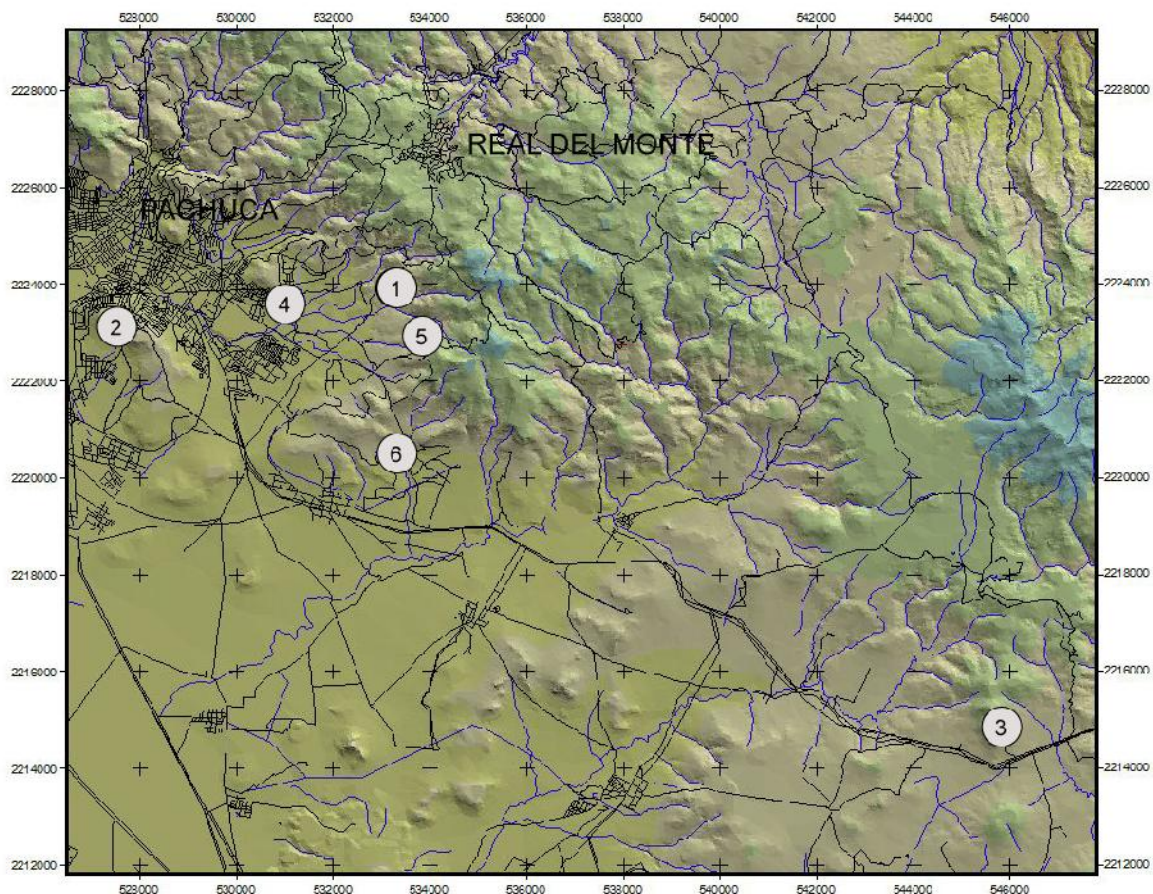


Figura 2. Modelo digital de elevación mostrando la localización de las estaciones en campo. Las coordenadas están expresadas en UTM y son concordantes con el estándar WGS84

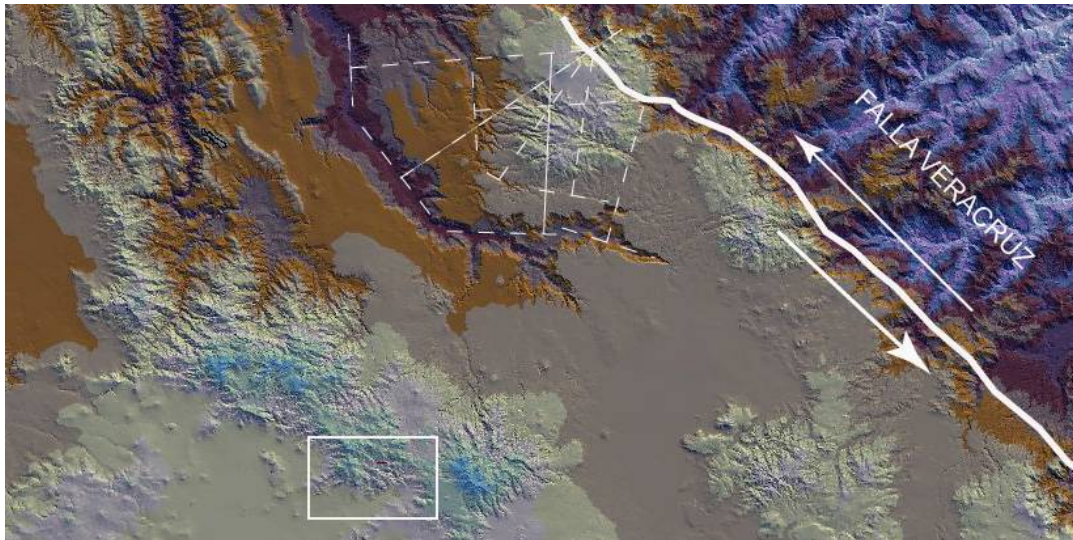


Figura 3. Modelo digital de elevación mostrando el recuadro donde se localiza la zona de estudio, la traza de la Falla Veracruz y los trazos paralelos a los lineamientos topográficos que definen el polo de Euler. Las coordenadas están expresadas en UTM y son concordantes con el estándar WGS84

## CONCLUSIONES

1. Los lineamientos topográficos observados en el modelo de elevación digital de escala regional, definen polos de Euler que convergen a lo largo de la traza de la Falla Veracruz.
2. La disposición escalonada de la traza de las fallas en la Sierra de Pachuca, son paralelas a los segmentos de los lineamientos topográficos regionales.
3. Los datos estructurales, la determinación de la cinemática de las fallas y la técnica de la inversión del tensor de los esfuerzos permiten inferir el estado de los esfuerzos prevaleciente en el momento de ocurrir la deformación frágil para cada estación, definiendo al menos tres eventos de deformación.
4. La variación en la orientación de los esfuerzos define, consistentemente, un giro levógiro.
5. Si la deformación frágil en la Sierra de Pachuca se asocia con la cinemática de la Falla Veracruz, entonces las fallas en la Sierra de Pachuca estarán asociadas a un sistema neotectónico activo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. R. Marret, R. W. Allmendinger, "Kinematic analysis of fault-slip data", *J. Struct. Geol.*, Vol. 12, 8, 1990, pp. 973-986.
2. J. P. Petit, "Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks", *J. Struct. Geol.*, Vol. 9, 5/6, 1987, pp. 597-608.
3. M. Doblas, "Slickenside kinematic indicators", *Tectonophysics*, 295, pp. 187-197.
4. J. W. Gephart, "Stress and the direction of slip on fault planes", *Tectonics*, Vol. 9, 4, 1990, pp. 845-858.
5. J. Zalohar, M. Vrabec, "Combined kinematic and paleostress analysis of fault-slip data: The Multiple-slip method", *J. Struct. Geol.*, 30, 2008, pp 1603-1613.
6. P. Molnar, "Average regional strain due to slip on numerous faults of different orientations", *J. Geoph. Res.*, Vol. 88, B8, 1983, pp. 6430-6432.



7. J. Angelier, P. Mechler, “Sur un methode graphique de recherche des contraintes principales egalment utilisable en tectonique et en seismologie: La methode des diedres droits”, Bull. Soc. Geol. Fr., Vol. 19, 1977, pp. 1309-1318.
8. B. Céleriér, A. Etchecopar, F. Bergerat, P. Vergely, F. Arthaud, P. Laurent, “Inferring stress from faulting: From early concepts to inverse methods”, Tectonophysics, Vol. 581, 2012, pp. 206-219.
9. L. Andreani, C. Rangin, J. Martínez-Reyes, C. Le Roy, M. Aranda-García, X. Le Pichon, R. Peterson-Rodríguez, “The Neogene Veracruz fault: evidences for left-lateral slip along the southern Mexico block”, Bull. Soc. Géol. Fr., T. 179, 2, 2008, pp. 195-208.
10. A. Gómez-Tuena, M. T. Orozco-Esquivel, L. Ferrari, “Petrogénesis de la Faja Volcánica Transmexicana”, Bol. Soc. Geol. Mex. Vol. 57, 3, 2005, pp. 227-283.
11. A. R. Geyne, C. Fries, K. Segerstrom, R.F. Black, I.F. Wilson, “Geology and mineral deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, Mexico”, Consejo de Rec. Min., Publ. 5E, 1963, 205 p.
12. L.E. Sánchez-Rojas, J. A. Arredondo-Mendoza, E. A. Cardoso-Vázquez, “Carta Geológico-Minera Pachuca F14-D81 Hidalgo y Estado de México”, Ser. Geol. Mex., 2007.
13. P. L. Hancock, “Fault Slip Analysis and Palaeostress Reconstruction” in *Continental Deformation* (Pergamon Press, Inc, 660, Tarrytown, New York 10591-5153, U.S.A., 1994) Chapter 4, pp. 53-100.
14. R. Q. Marrett, R. W. Allmendinger, “Kinematic análisis of fault-slip data”, Jour. Struct. Geol., Vol. 12, 1990, pp. 973-986.