

PRIMICIAS EN LA INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DEL DISTRITO MINERO PACHUCA REAL DEL MONTE

José Cruz Escamilla-Casa, E. P. Castañeda-Ovando, J. A. Callejas-López

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
jocesca@uaeh.edu.mx

RESUMEN

En el Distrito Minero Pachuca- Real del Monte, las bases de la definición y descripción sistemática y a detalle de unidades litológicas y estructuras, tanto en el subsuelo como en superficie, datan de la década de 1960. El trabajo más sobresaliente sobre el tema, fue publicado en 1963 [1]. A partir de entonces, los autores de trabajos más recientes sobre el tema han tenido que enfrentar limitantes tales como el cierre de las minas del Distrito y en consecuencia, al acceso a las obras mineras subterráneas. El acceso a las obras mineras subterráneas es crítico, ya que a finales de la década de 1950, fue posible efectuar muestreos, colecta de datos estructurales y cartografía geológica subterránea. Por otro lado, y en muchos de los casos, la mancha urbana ha obliterado afloramientos de roca críticos para el estudio de las unidades rocosas del distrito, situación que limita de igual forma la ejecución de los trabajos de cartografía geológica. En años recientes, la investigación que se enfoca en las estructuras geológicas de la Sierra de Pachuca, ha permitido identificar diferentes etapas en la historia de la deformación frágil. Sin embargo, la localización de estrías de falla en planos horizontales en diversas localidades, sugiere que dentro del proceso de deformación compresiva, existen fallas inversas de bajo ángulo, mismas que se interpretan como una cabalgadura. Comúnmente, el desplazamiento horizontal en fallas de bajo ángulo se distribuye a lo largo de planos discretos en vez de un solo plano continuo. Los planos discretos son paralelos entre sí y sub horizontales. Los planos de falla encontrados, se localizan entre las cotas 2450 y 2700 msnm, lo que sugiere que los planos que se describen, pueden pertenecer a una falla de desplazamiento horizontal mayor o cabalgadura de escala regional. Por otra parte, paralelamente a los planos con estrías sub horizontales, se observan horizontes de brechas tectónicas compuestas por clastos angulares a sub angulares de material lítico, ocasionalmente mostrando la estructura de dislocación, no cementado y embebido en un material de grano fino del tamaño de la arcilla. Cabe mencionar que los clastos corresponden a fragmentos de roca tanto pertenecientes a las unidades sobreyacentes como a las subyacentes. El objetivo del presente trabajo, es mostrar los avances en la investigación de la deformación frágil en la Sierra de Pachuca, particularmente se pretende mostrar las evidencias en campo de la presencia de una cabalgadura regional. Finalmente, cabe mencionar que es primordial probar la hipótesis de la presencia de la cabalgadura regional dado que, de ser esta cierta, la interpretación actual de la estratigrafía se vería alterada significativamente. Por otro lado, tal reinterpretación serviría de base para realizar estudios más pormenorizados que aportarían datos valiosos para entender la génesis del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, un distrito minero de calidad mundial.

Palabras Clave: Sierra de Pachuca, Pachuca-Real del Monte, deformación frágil, falla inversa, cabalgadura regional.

ABSTRACT

Lithologic units of the Pachuca Real del Monte Mining District were detailed and systematically described in the early 1960s: in 1963, it was published the most remarkable work on this topic [1]. Since then, later authors have faced critical restrictions, such as closed shafts and tunnels and inoperative underground mines. Access to tunnels is vital for subsurface geological survey. Therefore, in the late 1950s it was possible to integrate rock samples, structural data, and integrate detailed underground geologic maps. On top of the above mentioned limitations, urban areas still under development and a number of outcrops have been obliterated. Many of the missing outcrops are critical to correlate rock units within the mining district. Consequently, nowadays geological mapping in this area is, somehow, cumbersome. In recent years, research efforts have been focused on the identification and description of brittle deformation in Sierra de Pachuca. As a result, a number of outcrops with subhorizontal fault planes have been identified indicating the occurrence of low angle regional thrust faults associated with compressional deformation. Commonly, the net displacement in low angle faults is distributed along discrete parallel planes instead of a single plane. The mapped planes in the study area are located within 2450 and 2700 m above sea level, suggesting that this set of sub parallel fault planes belong to a larger regional fault structure. Additionally, paralleling the faulted planes, horizons of tectonic breccias occur. These horizons are composed of angular lithic fragments, occasionally presenting puzzle structure, embedded in a poorly cemented fine grained groundmass. The lithic fragments belong to under and overlying rock units. The objective of this work is to present recent findings of the undergoing research project in Sierra de Pachuca, particularly, to show field evidence of the presence of thrust faulting in the area. Finally, the outreach of this research is to validate the working hypothesis of the presence of a regional thrust fault. If the hypothesis is true, then the actual stratigraphic interpretation will be significantly changed. Moreover, the new interpretation will constitute the foundation for detailed studies that will shed more light on the understanding of the genesis of this world-class mining district.

Keywords: Sierra de Pachuca, Pachuca-Real del Monte, brittle deformation, reverse fault, regional thrust.

1. INTRODUCCIÓN

La estratigrafía del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte (DMPRM) más reciente y actualmente en uso, es la que ha sido elaborada por el Servicio Geológico Mexicano [2], [3]. Sin embargo, tal estratigrafía se basa principalmente en las descripciones y nomenclatura de la columna estratigráfica establecidas por Geyne [1], abarcando rocas cretácicas hasta recientes. Por otro lado, es pertinente resaltar que la mayoría de los contactos entre las unidades volcánicas de tal columna, han sido reportados como discordancias, tanto angulares como erosionales. Los datos estructurales que se muestran en la obra citada, permiten hacer un análisis de las orientaciones preferenciales de los flujos de lava en las diferentes unidades. Los datos de los flujos tienen inclinaciones significativas, indicando que el depósito de las lavas no fue a lo largo de planos horizontales o sub-horizontales, sugiriendo que el depósito ocurrió a lo largo de superficies irregulares producidas por la

paleotopografía o, que posterior al depósito, existieron movimientos tectónicos que bascularon a los paquetes de rocas. Sin embargo, la anterior interpretación promueve a la siguiente pregunta: ¿Los horizontes que separan a las unidades discordantemente, son generadas por erosión? Así mismo, surge la interrogante para poder explicar la presencia de brechas volcánicas basales como componentes de diversas unidades litológicas, e.g. Formación Vizcaína, Real del Monte, etc., que contienen fragmentos líticos de las formaciones sub y supra yacentes. El enfoque del presente estudio, es la inspección meticulosa de los horizontes aflorantes de brecha y que presumiblemente corresponden a las discordancias descritas en la obra ya citada, bajo la hipótesis de que los contactos y brechas reportadas tienen un origen tectónico y no vulcano-estratigráfico. Tal inspección se ha realizado en la porción norte y noreste del Cerro de Santa Apolonia, al norte de la Cd. de Pachuca, Hidalgo en tobas andesíticas de la Formación Vizcaína. Adicionalmente, y en soporte a la hipótesis anteriormente planteada, a lo largo de la Sierra de Pachuca, se han localizado múltiples espejos de falla en planos horizontales a sub-horizontales. Las estrías de falla, tienen una orientación NE-SW y E-W. Indicando un transporte de los bloques cabalgantes es de suroeste a noreste (Fig. 1), [4].

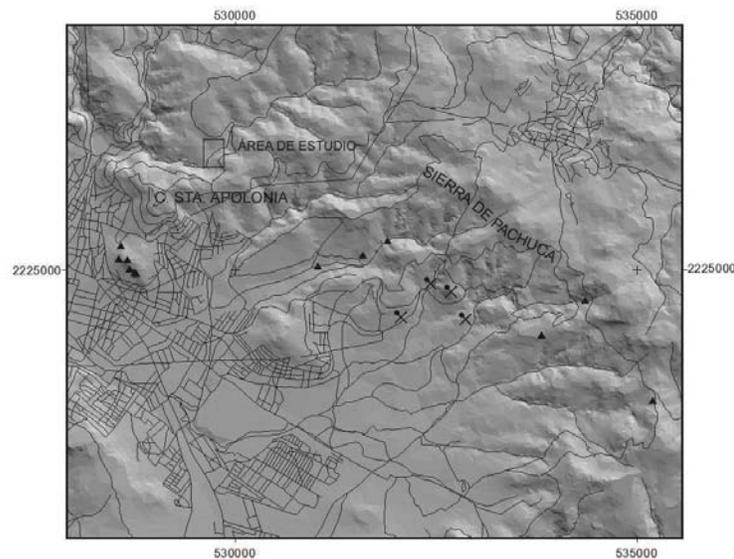


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio con coordenadas UTM (m). Los triángulos muestran los sitios donde se han observado planos de falla subhorizontales. Así mismo, se muestra la localización de las obras mineras abandonadas.

Para probar la hipótesis sobre el origen de las brechas, se ha recurrido al análisis de Fry [5] [6] y al análisis cinemático en los planos y estrías de falla. Lo anterior con la finalidad de establecer las orientaciones de los ejes principales de la elipse de deformación y de los esfuerzos principales, σ_1 , σ_2 , σ_3 . Los análisis realizados en muestras orientadas de roca, demuestran que las brechas observadas si tienen un origen tectónico y que los granos han sido afectados por la deformación frágil. Los resultados que se reportan sugieren la urgente redefinición de la columna estratigráfica de la Sierra de Pachuca bajo el contexto de incluir desplazamientos a lo largo de planos subhorizontales, los cuales probablemente están relacionados con fallas de bajo ángulo o cabalgaduras de escala regional y que el orden de la secuencia en uso de las unidades litológicas, no necesariamente obedece a una secuencia progresiva en tiempo. En cualesquier caso, la conclusión de este estudio en desarrollo hará contribuciones significativas al estudio y entendimiento de la génesis del DMPRM.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La progresión en este estudio, ha permitido aplicar diversas técnicas, tanto tradicionales como innovadoras. La cartografía y el registro de datos en campo de estructuras planas y lineales, han sido realizados en la forma tradicional, utilizando la brújula tipo Brunton, el navegador personal GPS y la base topográfica geo-referenciada en sus versiones electrónica e impresa, además de los sistemas de información geográfica (SIG). Debido al enfoque principal del estudio que es la deformación frágil, se ha puesto principal atención a los datos estructurales asociados a las fallas, como son: localización de los planos fallados y a la dirección e inclinación de las estrías de falla (Fig. 2). Esto último con la finalidad de determinar el tipo de falla, así como la identificación e interpretación de los indicadores de movimiento de acuerdo a los criterios de Petit [7] y Doblas [8], y establecer el movimiento relativo entre los bloques. La integración de los datos ha permitido crear un nivel de información en el SIG con un total de 35 estaciones en campo y con la base de datos estructurales y de cinemática, ha sido posible aplicar la teoría de Angelier [9] [10] para inferir la orientación de los esfuerzos principales responsables de la deformación frágil en las rocas de la Sierra de Pachuca. Para la integración, síntesis, interpretación de los datos de fallas y determinación estadística de la orientación de los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 , σ_3), se utilizó el programa computacional FaultKin v.7 así como la teoría de los algoritmos del programa establecida por Allmendinger [11] [12] [13].



Figura 2. Imágenes de los afloramientos en campo. A la Izquierda se muestra el aspecto en campo del afloramiento donde se localizaron los horizontes con brechas. A la derecha se muestra un plano de falla con estrías, la dirección del movimiento es en sentido de la punta del estilógrafo.

Para probar la hipótesis de que el origen de las brechas encontradas es tectónico y no vulcano-estratigráfico, se empleó el método de Fry [5] [6]. El método de Fry se basa en el supuesto de que una distribución uniforme de puntos no acumulados cambiará después de la deformación a una distribución no uniforme y formará cúmulos. Esto se explica mejor si consideramos que las

distancias entre los puntos después de la deformación aumentarán en el sentido de la extensión máxima y disminuirán en el sentido de la máxima compresión. Por consiguiente, la distancia máxima y mínima será paralela a los semiejes mayor y menor de una elipse, respectivamente. Tal elipse definirá la deformación finita en los puntos sobre el plano analizado. Si el plano está referido, por ejemplo al norte, la orientación e inclinación de la elipse determinará la orientación de los ejes principales de esfuerzo. Si el análisis se lleva a cabo en tres planos perpendiculares entre sí, entonces se podrá definir el elipsoide de deformación. Para la aplicación del método de Fry y determinar la deformación finita plana, se seleccionó una muestra que contiene planos paralelos a los planos que contienen estrías de falla incipientes. Las estrías son los indicadores primarios que sugieren que las brechas en la secuencia volcánica de la Sierra de Pachuca, son de origen tectónico. La muestra orientada se cortó del afloramiento siguiendo el procedimiento descrito por Passchier & Trouw [14]. La actitud estructural del plano de la muestra analizado es 305/16. Dicha muestra presenta estrías de falla subhorizontales con actitudes estructurales de 90/9, 82/11 y 62/14 (E-W y NE-SW). A pesar de que las estrías se observan con claridad, los indicadores cinemáticos no son conclusivos para determinar con certeza el movimiento relativo de los bloques. Posteriormente, se pulió el plano a analizar con un esmeril de disco de diamante de 3 mm, marca Skil modelo 9050 Gtia Bosch, y sucesivamente de manera manual con lijas con granulometrías de 80, 120, 600 y 1000. El proceso de pulido se hace con la finalidad de tener un plano virtualmente libre de rugosidades e irregularidades. Posteriormente, con el uso de una cámara digital convencional de 14 megapíxeles, se tomó una fotografía con plano de imagen es paralelo al plano pulido (Fig. 3). El archivo con la imagen se manipuló electrónicamente mediante el procesador de imágenes Paint.NET, para obtener una imagen posterizada y así resaltar los bordes de los granos que constituyen la matriz de la roca. Este último procedimiento permite la localización más exacta de los centros de los granos que son los puntos considerados en el método de Fry [6] (Fig. 3).

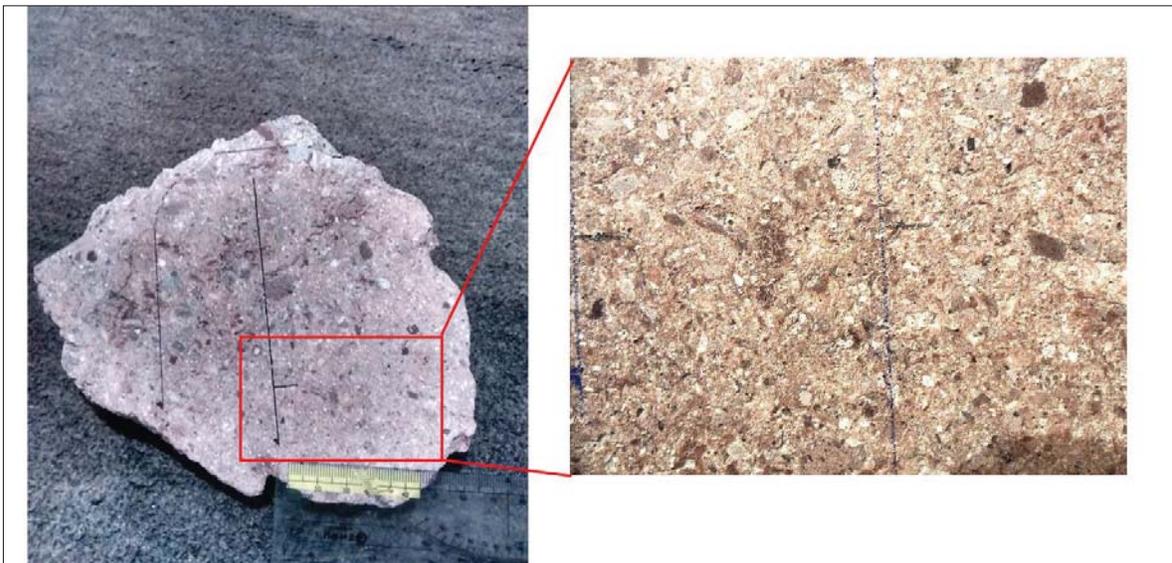


Figura 3. Imagen mostrando la muestra considerada para el análisis de Fry. En la imagen de la izquierda se observa el plano pulido, la escala de la regla es en cm. El cuadro en rojo indica la porción del plano considerada para efectuar el análisis.

En la imagen posterizada del plano pulido dentro del entorno del programa computacional GeoFryPlots, a partir de la cual se seleccionaron 67 puntos que representan los centros de los fragmentos líticos, en su mayoría con longitudes que oscilan de 3-5 mm (Fig. 4). Una vez generada la elipse, se puede aplicar la función zoom para visualizar la elipse con claridad. Así mismo, el entorno del programa permite ajustar la elipse de acuerdo a los puntos generados por el programa (Fig. 5).

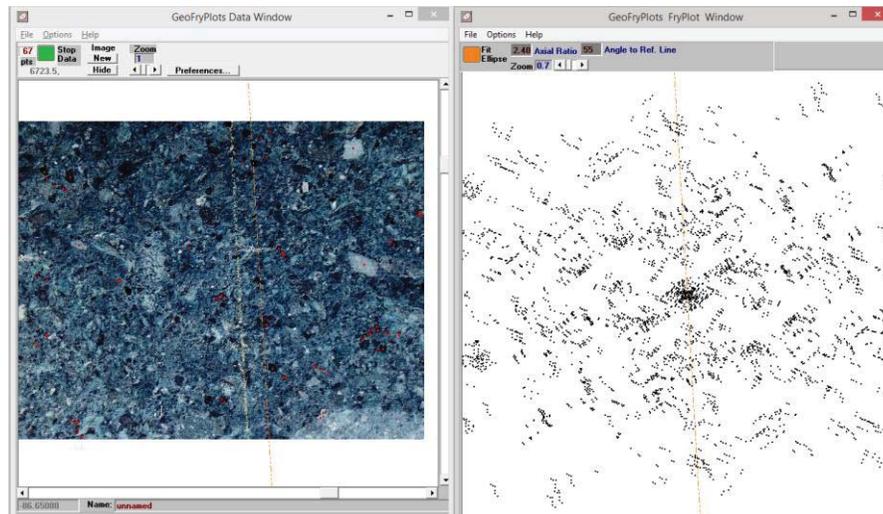


Figura 4. A la izquierda se muestra la imagen posterizada del plano pulido que se seleccionó para el análisis de Fry. Las marcas casi al centro de la imagen, corresponden a la línea de referencia y al símbolo que representa la actitud del plano. A la derecha se muestra el resultado del análisis de Fry [6]. La elipse que representa la deformación finita aparece al centro de la imagen.

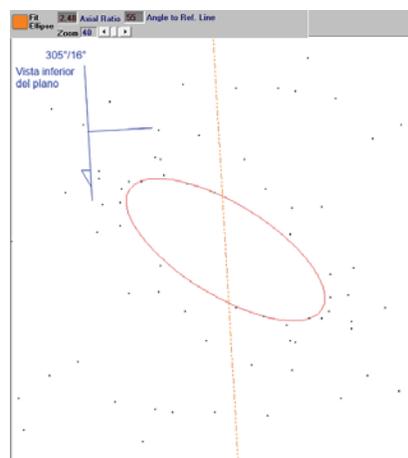


Figura 5. Imagen en el entorno del programa computacional GeoFryPlots [6] mostrando la elipse que representa la deformación finita en el plano analizado, ver texto. Mediante la marca de la esquina superior izquierda, se especifica la posición del plano inferior. Para la interpretación, es necesario girar la imagen para referirla a su posición original.

Con la finalidad de sustentar las observaciones obtenidas con el método de Fry, se realizó el análisis cinemático utilizando los datos de dirección e inclinación de las estrías de falla. Los datos se procesaron en el entorno del programa computacional FaultKin [13]. Considerando la actitud estructural del plano que contiene a las estrías y la dirección e inclinación de las mismas, se generó un gráfico tipo pelota de playa con la proyección estereográfica de las estructuras para calcular las orientaciones de los esfuerzos principales y definir los sectores en donde ocurre la compresión y la distensión (Fig. 6.)

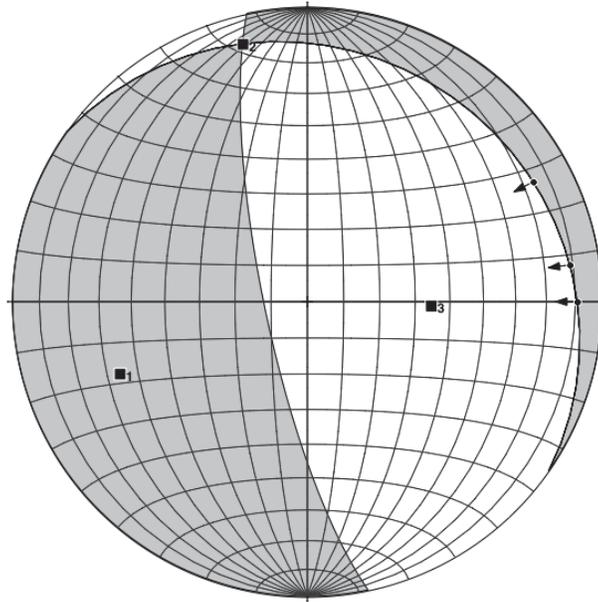


Figura 6. Diagrama tipo pelota de playa, generado en el entorno del programa FaultKin [13] con la proyección estereográfica de las estrías de falla y los sentidos de movimiento inferidos (flechas).

Los cuadros rellenos indican la dirección e inclinación de los esfuerzos principales. El área sombreada corresponde a la zona de compresión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se discuten en esta sección, corresponden a los avances en la investigación de la deformación frágil en la Sierra de Pachuca. Particularmente, los resultados que se obtuvieron se enfocan a probar la hipótesis de que las brechas en planos horizontales a subhorizontales no son de origen vulcano-sedimentario, sino de origen tectónico.

Una vez generada la elipse en el entorno del programa computacional GeoFryPlots [6] y tras la reorientación de la imagen para recrear la actitud geológica en campo de la muestra analizada, se obtiene una elipse que representa la deformación finita en el plano con actitud estructural 305/16; con el semieje mayor orientado en una dirección N-S (Fig. 7). El semieje mayor de la elipse indica la dirección de la máxima extensión y perpendicular al mismo y paralela al semieje menor, ocurre la dirección de máxima compresión (dirección E-W). Contrastando las orientaciones de los semiejes de la elipse con las orientaciones de las estrías de falla, se puede observar que tanto la deformación

finita determinada analíticamente con el método de Fry y la deformación frágil que originó las estrías son paralelas a subparalelas entre sí. Es decir, de acuerdo a la cinemática que se infiere por las estrías, la orientación de la máxima compresión es subparalela a la dirección del movimiento de los bloques fallados.

Tabla 1. Orientaciones de los esfuerzos principales obtenidos mediante el gráfico de tipo pelota de playa.

Esfuerzo	Dirección (°)	Inclinación (°)
σ_1	249.1	32.3
σ_2	345.9	10.6
σ_3	091.8	55.5

Por otro lado, las orientaciones de los esfuerzos principales obtenidas a partir del gráfico tipo pelota de arena, indican que el esfuerzo σ_1 es 20° diferente con respecto a la orientación del semieje menor de la elipse obtenida con el método de Fry (Tabla 1).

Es notable la similitud entre las orientaciones de los esfuerzos estimadas por el método de Fry y las orientaciones calculadas mediante el análisis cinemático en el horizonte estudiado. Adicionalmente, las orientaciones presentadas por Escamilla-Casas, et al. [4] también indican paralelismo entre las orientaciones de los esfuerzos principales.

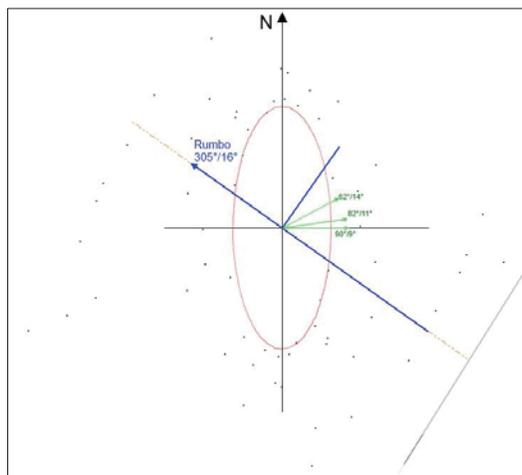


Figura 7. Figura mostrando la disposición de la elipse de deformación. La imagen fue rotada para orientarla con respecto al norte magnético. Los segmentos de recta diferentes a los semiejes de la elipse, representan la dirección de las estrías en el plano de falla.

4. CONCLUSIONES

Se comprueba la existencia de horizontes de brecha tectónica, generados por deformación frágil, en la columna estratigráfica volcánica de la Sierra de Pachuca. La brecha tectónica se presenta en planos horizontales o subhorizontales. Las estrías de falla encontradas en los planos de falla paralelos a las brechas tectónicas, indican un movimiento con dirección predominante ENE-WSW. Las orientaciones de los esfuerzos principales son concordantes con la orientación de los semiejes de la elipse que representa a la deformación finita. Las orientaciones de los esfuerzos principales reportadas por Escamilla-Casas et al. [4] son sub paralelas a las obtenidas en el presente estudio. Muy probablemente, los planos de brecha tectónica paralelos entre sí estén asociados a un mismo evento tectónico y en consecuencia, con una estructura geológica mayor de escala regional. Por lo anterior, se sugiere que la reinterpretación de la génesis del DMPRM debe incluir fallas inversas o cabalgaduras que, muy probablemente, sean parte de una estructura de escala regional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la dirección de la Compañía Real del Monte y Pachuca por permitir el acceso a terrenos dentro de su propiedad, en los que fueron tomadas las muestras analizadas. Particularmente al Lic. José Luis Martínez López Gerente de Recursos Humanos de la Cía. Real del Monte y Pachuca y al Ing. Miguel del Río, Jefe de Geología, por compartir información de la geología superficial.

BIBLIOGRAFÍA

1. GEYNE, AR., FRIES, C., SEGERSTROM, K., BLACK, RF., WILSON IF., “Geology and Mineral Deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, Mexico”, *Consejo de Rec. Min., Publ. 5E*, 1963, 205 p.
2. SÁNCHEZ-ROJAS, LE, ARREDONDO-MENDOZA, JA, CARDOSO-VÁZQUEZ, EA. Carta Geológico-Minera Pachuca, F14-D81, Escala 1:50,000, Estado de Hidalgo. 1998, Secretaría de Economía-Servicio Geológico Mexicano, Mapa Digital, Segunda Edición.
3. SÁNCHEZ-ROJAS, LE, ARREDONDO-MENDOZA, JA, CARDOSO-VÁZQUEZ, EA. Carta Geológico-Minera Pachuca, F14-D81, escala 1:50,000, Estado de Hidalgo. 2005, Secretaría de Economía-Servicio Geológico Mexicano, Texto Explicativo, 115 p.
4. ESCAMILLA-CASAS, JC, ORTIZ-HERNANDEZ, LE, BLANCO-PIÑÓN, A., CRUZ-CHÁVEZ, E., AMBORCIO-CRUZ, SP. Interpretación de la Cinemática de las Fallas Neo-Tectónicas Frágiles del Sector sureste de la Sierra de Pachuca. In *VII Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales*, 17-19 septiembre de 2014, Pachuca, Hgo. p.67-75. ISSN 2395-8405.
5. FRY, N. Random Point Distribution and Strain Measurements in Rocks, 1979, *Tectonophysics*, vol. 60, p. 89-105.
6. GEOFRY PLOTS, v. 3.1, Holcombe, RJ, Department of Earth Sciences – University of Queensland, Queensland, 4072, Australia, 2003.
7. PETIT, JP. “Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks”, *Journal of Structural Geology*, 1987, vol. 9, 5/6, pp. 597-608.
8. DOBLAS, M. “Slickenside kinematic indicators”, *Tectonophysics*, 1998, vol. 295, pp. 187-197.

9. ANGELIER J., MECHLER, P. “Sur un méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en seismologie: La methode des diedres droits”, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1977, vol. 19, pp. 1309-1318.
10. ANGELIER J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, 1989, vol. 11, 37-50.
11. MARRETT, RA, ALLMENDINGER, RW. Kinematic Analysis of Fault-Slip Data, *Journal of Structural Geology*, 1990, vol. 12, p. 973-986.
12. ALLMENDINGER, RW, CARDOSO, NC, FISCHER, D. *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*: Cambridge, England, University Press, 289pp.
13. FAULTKIN v. 7.4.1, Allmendinger, RW, Cornell University, New York, 2015.
14. PASSCHIER, C, TROUW, W, RUDOLPH, AJ. *Microtectonics*, Springer, 2nd edition, 2005, 366p. ISBN: 3540640037