

Geología de diques emplazados en tefra, SE Sierra de Pachuca Geology of dikes emplaced in *tephra*, SE Sierra de Pachuca

J. C. Escamilla-Casas ^a, E. Meneses-Meneses ^a, L. E. Ortiz-Hernández ^a, E. M. Uribe-Alcántara ^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El presente trabajo forma parte de un proyecto de cartografía geológica a semidetalle en la porción sureste de la Sierra de Pachuca, en el que se identificó la presencia de diques andesíticos, orientados preferentemente 245/31, alojados en depósitos de tefra. Adicionalmente, se hizo la reconstrucción de paleoesfuerzos a partir fallas y estructuras menores asociadas. Tal reconstrucción acusa un régimen de fallamiento normal con ejes orientados: $\sigma_1=336/74$, $\sigma_2=121/13$ y $\sigma_3=213/09$. Siendo σ_2 y σ_3 la compresión media y extensión máxima, respectivamente. Considerando que el emplazamiento de los diques es paralelo a la compresión máxima, se interpreta un régimen de esfuerzos distinto al de las fallas, con diferencia de 112° medidos sobre un plano orientado 202/39. Finalmente, los depósitos de tefra son reconocidos como la unidad litológica más joven y, consecuentemente, el emplazamiento de diques es posterior y constituye parte de la etapa de vulcanismo más reciente en el área de estudio.

Palabras Clave: Cartografía, Diques, Sierra de Pachuca, Tefra, Paleoesfuerzos, Volcanismo reciente.

Abstract

The present work is part of a cartographic project conducted in the southeast portion of the Sierra de Pachuca, in which the occurrence of andesitic dikes, preferentially oriented 245/31 and emplaced in tephra deposits, is reported. In addition, based on secondary structures associated with fault planes, the paleo stress regime was reconstructed, resulting in a normal fault regime with the main axes oriented: $\sigma_1=336/74$, $\sigma_2=121/13$ y $\sigma_3=213/09$. Where σ_2 y σ_3 , are the medium compression and maximum extension, respectively. Considering that the emplacement of dikes parallels the maximum compression, two distinct stress regimes have been interpreted, with a difference of 112° measured along a plane oriented 202/39. Finally, tephra deposits are recognized as the youngest lithological unit and, consequently, postdated by the emplacement of dikes, constituting part of the most recent stage of volcanism in the study area.

Keywords: Cartography, Dikes, Sierra de Pachuca, Tephra, Paleo stress, Recent Volcanism.

1. Introducción

Los diques son estructuras que se forman al solidificarse el magma presurizado que asciende desde el reservorio hacia la superficie, ya sea a través de fracturas preexistentes o mediante la propagación de grietas formadas por fracturamiento hidráulico (Daniels *et al.*, 2012; Pansino *et al.*, 2019; Ruz *et al.*, 2020).

Adicionalmente, los diques son elementos estructurales considerados como indicadores en los análisis de paleoesfuerzos y paleo-deformaciones de la corteza debido a que, comúnmente, la propagación de estas intrusiones sigue

orientaciones preferentes, paralelas al máximo esfuerzo horizontal y perpendiculares a la dirección de máxima extensión. Es decir, los diques se emplazan perpendicularmente al esfuerzo mínimo compresivo (Pollard, 1993; Gudmunsson, 2006; Hou, 2012; entre otros).

Particularmente, en la Sierra de Pachuca (SP), Geyne *et al.* (1963) identificaron en superficie 160 diques agrupados en tres orientaciones principales: la que predomina es N70°W; seguida por Este franco; y una minoría de 11 diques orientados hacia el Noreste. De modo similar, para el episodio que se ha identificado como el final del fallamiento y emplazamiento de diques se le asignó una edad (K-Ar) de 20.3 ± 0.5 Ma (McKee

*Autor para la correspondencia: jocesca@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: jocesca@uaeh.edu.mx (José Cruz Escamilla Casas), elvira.menesesme@hotmail.com (Elvira Meneses-Meneses), rleoh@uaeh.edu.mx (Luis Enrique Ortiz-Hernández), edgar_uribe8920@uaeh.edu.mx (Edgar Misael Uribe-Alcántara)

et al., 1993). Por otra parte, en la columna geológica de la SP se han reconocido depósitos de tefra y se han asignado a la unidad litológica más reciente, (Geyne, et al., 1963; Sánchez Rojas, et al., 2005, Roy et al., 2010). Recientemente, Escamilla-Casas et al. (2018) reportaron la cinemática de fallas en la porción SE de la Sierra de Pachuca y propusieron una secuencia de cambios en la orientación de los principales esfuerzos corticales.

El propósito del presente trabajo es documentar, mediante cartografía superficial a semidetalle, la presencia de diques al sureste de la SP alojados en depósitos de tefra. Adicionalmente, la reconstrucción de paleoesfuerzos realizada se contrasta con la orientación preferente de los diques, y se pone de manifiesto que el episodio tardío de incipiente actividad ígnea y el proceso de emplazamiento del material lávico fueron gobernados por la orientación de esfuerzos corticales, muy probablemente, diferentes a los responsables de la etapa más reciente de deformación frágil registrada en las rocas de la zona estudiada, Figuras 1 y 2.

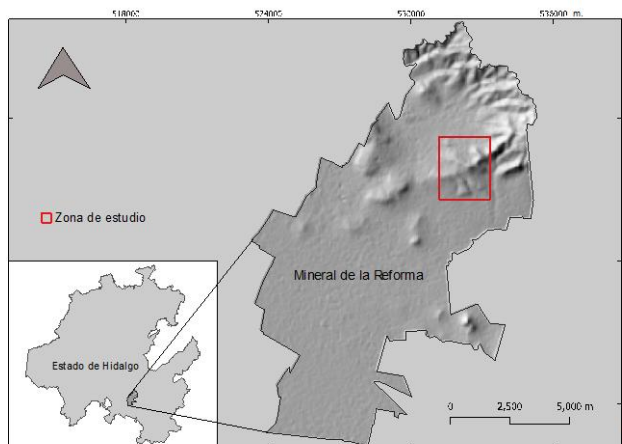


Figura 1: Mapa de localización mostrando la ubicación de la zona de estudio, con referencia al estado de Hidalgo y al municipio de Mineral de la Reforma.

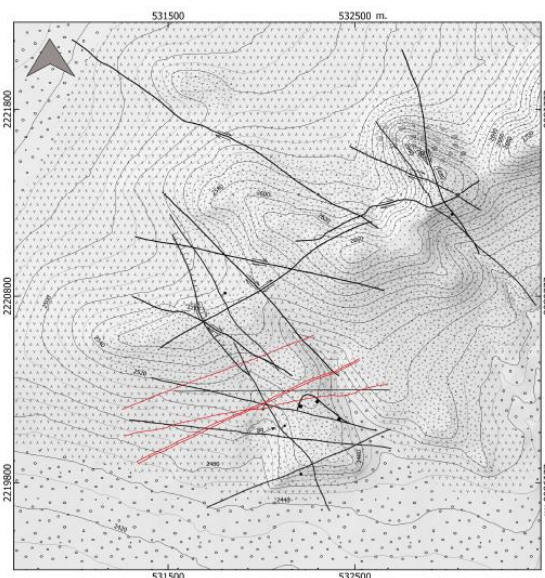
2. Geología

2.1. Geología regional

Desde el punto de vista geológico, la parte media del territorio mexicano se encuentra afectada por la geodinámica asociada con el desarrollo del arco volcánico Plio-Cuaternario, denominado Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), la cual divide al territorio de este a oeste por su parte media, conformando una franja de 1000 km de longitud y abarcando los ~19° – 20° de latitud norte. Particularmente, en el sector oriente de la FVTM se ubica la Sierra de Pachuca (SP) que, a su vez, se aloja en la porción centro-meridional del Estado de Hidalgo. La SP está constituida por rocas ígneas andesíticas, riolíticas y basálticas derivadas de una gran actividad volcánica cenozoica, en forma de derrames de lava y depósitos piroclásticos (tanto de flujo como de caída libre), comúnmente dispuestas en unidades litológicas discordantes entre sí. Hacia los flancos de la SP, se han identificado flujos de basalto (Segerstrom, 1956), (Geyne et al., 1963; Sánchez-Rojas et al., 2005).

2.2. Geología local

El área estudiada (Figuras 1 y 2), se localiza en el sector noreste del municipio de Mineral de la Reforma, y tiene un sustrato rocoso constituido, predominantemente, por dos unidades volcánicas reconocidas en la región suroeste de la Carta Geológico-Minera Pachuca F14-D81, escala 1:50,000 (Sánchez Rojas et al., 2005). La primera unidad se reconoce como QptTR-R (toba riolítica - riolita) y corresponde al vulcanismo de la Sierra de las Navajas, constituida por un complejo volcánico de composición principalmente riolítica con flujos de lava y domos intercrecidos con depósitos de caída y flujos de avalancha, todos con la característica presencia de vidrio volcánico u obsidiana negra y dorada, y ocasionales derrames basálticos. En el área de estudio, la base de esta unidad es un vitrófido riolítico. A la segunda unidad se le identifica como QpthoPu, originalmente identificada por Geyne et al. (1963) como Toba Cubitos. Esta unidad es una sucesión de capas de piroclastos de composición máfica a intermedia, predominantemente, y se agrupa con depósitos que ocurren en los flancos de cerros y lomeríos. Posteriormente, Roy et al., (2010) estudiaron depósitos similares de tefra, en una localidad cercana a la zona de interés de este estudio.



SIMBOLOGÍA

Litología	Elementos estructurales	Falla compuesta. Flecha y cifra indican dirección e inclinación de estrías
Aluvión	Falla normal	Falla lateral izquierda
Tefra	Falla inversa	Diques
Brecha volcánica	Falla vertical	
Intrusivo de pórfido cuarcítico	Falla lateral derecha	
Toba riolítica - riolita	Falla normal lateral derecha	

Sistema de coordenadas: NAD27 / UTM Zone 14N
 Datum: North American Datum 1927 (NAD27)
 Elipsoides: Clarke 1866
 Unidades: Metros

Escala 1:15 000
 0 500 1,000 m

Figura 2: Mapa geológico a semidetalle del área de estudio.

3. Materiales y métodos

3.1. Cartografía geológica

Para el desarrollo del presente trabajo, se aplicaron las técnicas fundamentales de la cartografía geológica superficial. En la colección de datos de ubicación geográfica y

estructurales en campo, se utilizó un navegador portátil GPS Spectra – Global Mapper 20, y una brújula tipo Brunton, respectivamente. La base topográfica digital se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), hoja Pachuca - F14D81, escala 1:50,000. El manejo de datos de ubicación de las estaciones en campo y la generación de mapas se hizo mediante el uso del programa computacional QGIS 3.16.9 Hannover. A través de este programa de distribución libre, se transformó la base topográfica de INEGI a una distancia entre curvas de nivel de 10 m y escala 1:15,000, North American Datum 1927 (NAD27), elipsoide Clarke 1866, Zona 14. La proyección de los contactos litológicos, datos de estructurales de fallas y de diques sobre la base topográfica modificada se efectuó aplicando el método de los contornos, ideal para zonas de estudio como la de este trabajo, de poca extensión territorial, Figura 2.

3.2. Análisis de paleoesfuerzos

Para la reconstrucción de la evolución del régimen de los esfuerzos en la zona estudiada, se colectaron sistemáticamente los datos estructurales de los planos de falla, rumbo y echado (aquí expresados como pares de datos separados por una diagonal, e.g. 224/34), así como los datos de inclinación y dirección de las estrías. La dirección del desplazamiento entre los bloques de falla se infirió a partir de estructuras observadas en las estrías presentes en los planos. Adicionalmente, para asegurar una interpretación acertada, se eligieron los planos de fallas con estrías y estructuras secundarias claras y definidas.

Los datos obtenidos se invirtieron para obtener los cuatro parámetros del tensor de esfuerzos reducido (Angelier 1979, 1989, 1994; Delvaux y Sperner 2003; Tranos 2015): los ejes de los esfuerzos principales; σ_1 , σ_2 y σ_3 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) y la proporción de los esfuerzos principales $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. El estado de los esfuerzos puede ser definido mediante los tres ejes y el valor de R, el cual describe la forma del elipsoide de los esfuerzos (Etchecopar *et al.*, 1981). Para realizar la inversión de los esfuerzos, se empleó el programa computacional interactivo Win-Tensor v. 5.8.8 (Delvaux, 1993; Delvaux y Sperner, 2003). Para facilitar la representación del régimen de esfuerzos, se emula en el programa el índice del régimen de los esfuerzos R' , el cual define un régimen de esfuerzos específico para un rango particular de valores. El índice del régimen de los esfuerzos se define como sigue: $R' = R$ corresponde a un régimen de falla normal, $R' = (2 - R)$ para un régimen de falla de desplazamiento a rumbo y $R' = (2 + R)$ para un régimen de falla inversa. Los datos se procesaron utilizando el método mejorado de los diedros rectos (F5, en Win Tensor), propuesto originalmente por Angelier y Mechler (1977), este método es de visualización y determina el posible rango de los ejes de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 .

3.3. Petrografía

El estudio petrográfico se llevó a cabo empleando láminas delgadas de roca de 30 micras de espesor, estudiadas a través de un microscopio petrográfico binocular Zeigen, modelo Petro III Millenium, y un analizador de imágenes Motic Images Plus 2.0, a través de una cámara de alta resolución Moticam 2300. Las microfotografías se obtuvieron con luz

polarizada y doblemente polarizada, los oculares utilizados fueron 10X/0.25, 20X/0.40 y 40X/0.65.

4. Resultados y discusión.

4.1. Cartografía

En la cartografía detallada en la zona de estudio, (escala 1:15,000) se muestra la presencia de unidades litológicas discordantes entre sí (Figura 2). En los positivos topográficos afloran, predominantemente, rocas riloíticas, gris claro, de textura porfirítica, con estructuras fluidales y vesículas. Hacia la base se presenta, ocasionalmente, un vitrófiro basal característico con abundante oxidación. Hacia los flancos de estos positivos topográficos, afloran los depósitos de tefra. Estas rocas se incluyen en las descritas como la unidad Qpt - TR-R y QpthoPu, respectivamente, por Sánchez-Rojas, *et al.* (2005). Las zonas topográficamente bajas están cubiertas por aluvión.

Las fallas identificadas son normales, de desplazamiento lateral, de ángulo medio a alto, dispuestas en arreglo de fallas conjugadas. Sin embargo, la cinemática indica que pertenecen a episodios diferentes entre los que se distingue la reactivación, generando fallas normales con componente lateral y compuesta. Los diques identificados son subparalelos entre sí. Sin embargo, no guardan un paralelismo definido con la mayoría de las fallas.

4.2. Análisis de paleoesfuerzos

El análisis de paleoesfuerzos se llevó a cabo a partir de los datos estructurales obtenidos en 20 planos de falla, con estrías bien desarrolladas y estructuras asociadas claramente identificables, mismas que permitieron establecer el movimiento relativo de los bloques de las fallas. La opción de análisis efectuado es la de los diedros rectos optimizado, dado que las estructuras son fallas con estrías asociadas (Figura 3).

A pesar de tener 20 registros, el programa descartó dos por inconsistencias, de ahí que el rango de calidad sea bajo (QRw y QRt). No obstante, el resultado de los análisis es confiable dada la corta extensión del terreno y el tamaño de la muestra.

Los resultados se obtuvieron mediante la aplicación de la función F5 del programa y definida por la ecuación (1).

$$F5(i) = 360 \cdot \text{sen}^2 \left(\frac{\alpha(i)}{2} \right) + \left(\frac{Tinv(i) + v(i) - 29.7}{P} \right) \quad (1)$$

Donde $Tinv(i) = \sigma_1/2 - |t(i)|$, i representa el dato individual, $|t|$ representa la magnitud del esfuerzo cortante, α es la desviación del desplazamiento, $|v|$ representa la magnitud del esfuerzo normal y P corresponde al factor de proporcionalidad (Delvaux y Sperner, 2003).

El tensor reducido que se obtuvo arroja un valor de $R = 0.54$ y direcciones de los ejes principales (dirección e inclinación, en grados) como sigue: eje de esfuerzo principal (σ_1) 336/74, esfuerzo medio (σ_2) 121/13 y el eje del esfuerzo mínimo (σ_3) 213/09, que corresponde a la dirección de máxima extensión. El tensor descrito define un régimen de falla normal (NF, de

acuerdo con las siglas estándares del Mapa Mundial de Esfuerzos).

se distinguen algunos granos de plagioclasas, feldespato potásico, cuarzo y ferromagnesianos.

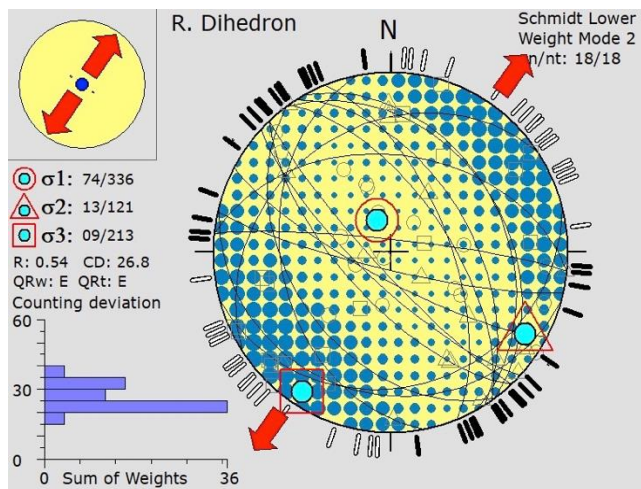


Figura 3: Representación gráfica de la reconstrucción de paleoesfuerzos proyectada en la red estereográfica de Schmidt, hemisferio inferior, ver texto para su explicación.

4.3. Depósitos de tefra

Los depósitos de tefra que alojan a los diques D2 a D4, están constituidos por una secuencia de ~5 m de espesor, en la que se distinguen 4 depósitos concordantes entre sí de material volcánico y una capa de regolito hacia la cima (Unidades 1-5, Figura 4). Hacia la base (Unidad 1), se presenta un espesor de 80 cm de depósitos de caída libre, con líticos de andesita y riolita de aproximadamente 15 a 20 cm, embebidos en lapilli café y negro y ceniza gruesa. A la unidad anterior le sobreyace un depósito (Unidad 2) de 2.1 m de lapilli café rojizo, masivo, que hacia la cima presenta escoria y ceniza gris oscura con líticos de dacita de 1-2 cm. El depósito anterior subyace a la Unidad 3, constituida de 90 cm de lapilli café claro y gris, ocasionalmente con líticos de andesita de 4-5 cm. Hacia la cima del depósito el color cambia a rojo ocre. Seguidamente, se presenta un depósito de 50 cm con láminas ondulantes y discontinuas de caliche blanco y lapilli color café claro. Finalmente, los depósitos de material volcánico están cubiertos por una capa de 50-60 cm de suelo y regolito compuesto de material erosionado.

4.4. Diques

En la porción media del área de estudio, los diques afloran en una franja angosta, aproximadamente 300 m de ancho y 1.5 km de longitud y son subparalelos entre sí, con una dirección e inclinación preferente 245/31 (Tabla 1). La roca encajonante del dique que se ubica en el extremo norte (D1) de la franja es un vitrófido riolítico. Por otra parte, para los diques restantes (D2, D3, y D4) es tefra (Figura 4 y 5). La composición de los diques es primordialmente andesítica a dacítica, color gris claro, intemperizando a rojizo y ocre, con textura afanítica. Ocasionalmente, se observan fragmentos líticos angulosos de la roca encajonante y fragmentos de vidrio. Con la lupa de 20X



Figura 4: Fotografía viendo al NE, mostrando el depósito de tefra compuesto de cuatro unidades de material volcánico y la capa superior de suelo y regolito (Unidad 5). El martillo tiene una longitud de 40 cm.

Al microscopio petrográfico se observan microfenocristales subhedrales y euhedrales de plagioclasa (Plg), clasificada como andesina y oligoclasa, con parcial remplazamiento por arcillas. Estas plagioclasas son ubicuas en la roca y también como parte de los líticos subredondeados. El maclado es polisintético y presentan moderado fracturamiento. El cuarzo (Qz) es anhedral y escaso. El feldespato potásico (Fdk), subordinado, ocurre en microfenocristales anhedrales con maclado concéntrico y fracturamiento, exhibiéndose a veces subhedral con reemplazamiento parcial a total por arcillas. Estos minerales se presentan inmersos en una matriz criptocristalina de ceniza y vidrio en menor proporción, ferromagnesianos oxidados, clorita y epidota. Están presentes

diseminaciones de minerales opacos como son, titanita, magnetita y sulfuros finos (Figura 6).

Tabla 1: Datos estructurales de los diques, de norte a sur, en la zona de estudio. Referirse a la Figura 2 para su ubicación.

Dique	Roca encajonante	Rumbo (°)	Echado (°)	Espesor promedio (cm)
D1	Vitróvido riolítico	248	82	15
D2	Tefra	061	88	30
D3	Tefra	065	80	34
D4	Tefra	080	74	45

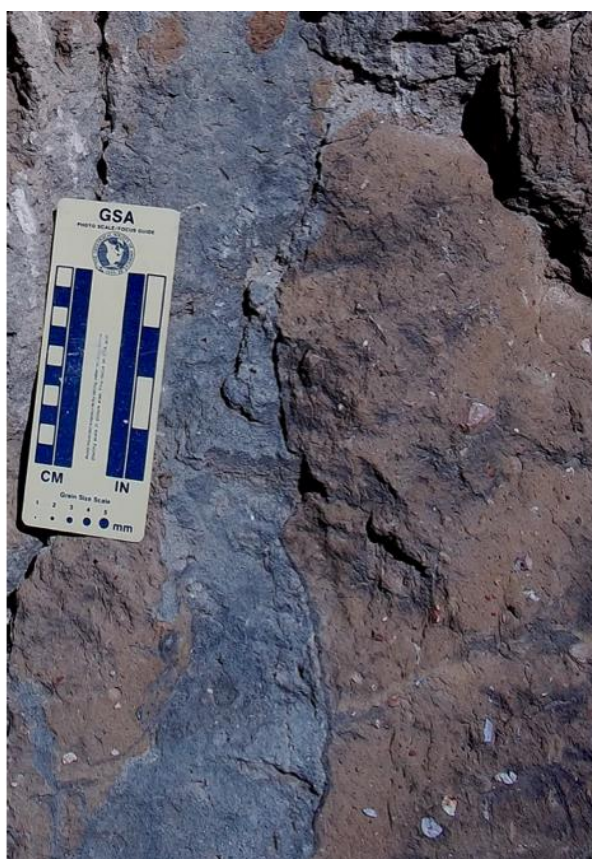


Figura 5: Fotografía viendo al NE, mostrando el material que constituye a los diques. En la parte superior, se observan fragmentos embebidos de la roca encajonante. El margen de enfriamiento se muestra en el borde derecho.

5. Conclusiones

Tomando en cuenta la actitud estructural de los diques, se puede estimar una actitud general de 245/31, la que se interpreta como paralela a la máxima compresión y perpendicular a la máxima extensión durante el emplazamiento. Por otro lado, la orientación de la máxima extensión obtenida a través del análisis de paleo esfuerzos es de 213/09. Ambas orientaciones de máxima extensión tienen una diferencia de 112° entre sí, medidos en un plano 203/39. Lo que sugiere la presencia de dos regímenes de paleoesfuerzos diferentes: uno fue responsable del fallamiento

registrado en rocas y el otro asociado con el proceso de emplazamiento de los diques.

Atendiendo las relaciones de corte entre los depósitos de tefra y los diques, se establece que el proceso de emplazamiento de los diques es el más reciente y, consecuentemente, constituye parte de una etapa de vulcanismo incipiente y poco reconocida en la región. Por todo lo anterior, se establece que el orógeno denominado Sierra de Pachuca, tiene una historia geológica con más de una etapa de deformación frágil.

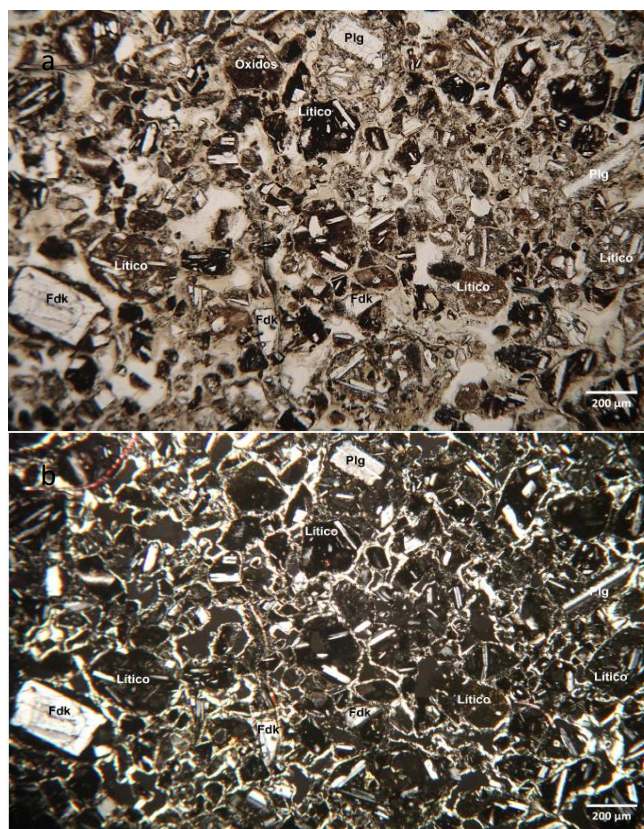


Figura 6: Microfotografías de la roca constituyente de los diques, mostrando los microfenocristales de plagioclasa (Plg), feldespato potásico (Fdk) y líticos; la imagen superior (a) corresponde a luz paralela, la inferior a nicóles cruzados (b).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado como parte del desarrollo de los proyectos de investigación: “Caracterización de las intrusiones magmáticas recientes en el sureste de la Sierra de Pachuca” y “Mapa de inundación para el municipio de Tula, Hidalgo”. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias de un revisor anónimo.

Referencias

Angelier, J., (1979). Determination of the mean principal stresses for a given fault population. *Tectonophysics* 56, T17-T26.

- Angelier J., (1989). From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology* 11, 37-50.
- Angelier, J., (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In: Hancock, P.L. (Ed.), *Continental Deformation*. Pergamon, Oxford, pp. 101-120.
- Angelier, J., Mechler, P., (1977). Sur un methode graphique de recherche des contraintes principales egalement utilisable. In: *Tectonique et en seismologie: la methode de deidres droits*. Bulletin de la Societe Geologique de France 7, 1309-1318.
- Daniels, K. A., Kavanagh, J. L., Menand, T., Stephen, J.S.R., (2012). The shapes of dykes: evidence of the influence of cooling and inelastic deformation. *Bulletin of the Geological Society of America* 124 (7-8) 1102-1112.
- Delvaux, D., (1993). The TENSOR program for paleostress reconstruction: Example from East Africa and the Baikal Rift Zones. In: *EUGVII Strassburg, France, Vol. 5. Terra Nova*, p. 216.
- Escamilla-Casas, J.C., Meneses-Meneses, E., Uribe-Alcántara, E. M., Ortiz-Hernández, L. E., Montiel-Palma S., Ortega-Reyes, A. O., (2018). Geología y Deformación Frágil de los Cerros La Sotolera y La Crucita, al Oriente de Pachuca. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales* 5, 53-58.
- Etchecopar, A., Sassi, W., Angelier, J., (1981). An inverse problem for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology* 3, 51-65.
- Geyne, A. R., Fries, Jr. C., Segerstrom, K., Black, r. F., Wilson, I. F., (1963). *Geology and Mineral Deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of hidalgo, Mexico*. Publication 5E, Consejo de Recursos Naturales no Renovables, México. D. F.
- Gudmundsson, A., (2006). How local stress control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes? *Earth Science Reviews* 79, 1-2, 1-31.
- Hou, G., (2012). Mechanisms for three types of mafic dyke swarms, *Geoscience Frontiers* 3(2), 217-223.
- McKee, E. H., Dreier, J. E., Noble, D. C., (1992). Early Miocene Hydrothermal Activity at Pachuca-Real del Monte, México: An Example of Space-Time Association of Volcanism and Epithermal Ag-Au Mineralization. *Economic Geology*, 87, 1635-1637.
- Pansino, S., Emadsadeh, A., and Taisne, B., (2019). Dike Channelization and Solidification: Time Scale Controls on the Geometry and Placement of Magma Migration Pathways 124, 1-20. DOI: 10.1029/2019JBO18191
- Pollard, D. D., Saltzer, S. D., Rubin, A., (1993). Stress inversion methods: are they based on faulty assumption? *Journal of Structural Geology* 15 (8), 1045-1054.
- Roy, P. D., Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., Pi, T., Lozano, R., (2010). Rare earth element geochemistry of the Late Quaternary tephra and volcano-clastic sediments from Pachuca sub-basin, north eastern Basin of Mexico. *Geofísica Internacional* 49 (1), 3-15.
- Ruz, J., Browning, J., Cembrano, J., Iturrieta, P., Gerbault, M., Sielfeld, G. (2020). Field observations and numerical models of a Pleistocene-Holocene feeder dyke swarm associated with a fissure complex to the east of the Tatara-San Pedro-Pellado complex, southern Volcanic Zone, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 404, 107033. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2020.107033
- Sánchez-Rojas, L. E., Arredondo-Mendoza, J. A., Cardoso -Vázquez, E. A., (2005) *Carta Geológico-Minera Pachuca, F14D81, Escala 1:50,000, Estado de Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano*. Pachuca. DOI:10.1017/CBO9781107415324.004