



## ESTUDIO PRELIMINAR DE ANISOTROPÍA DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE MIGMATITAS DEL COMPLEJO XOLAPA

José Alberto Figueroa-Guadarrama<sup>1\*</sup>, Roberto Stanley Molina-Garza<sup>2</sup>, Tomás A. Peña-Alonso<sup>3</sup>,  
Carolina Latorre-Correa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Licenciatura en Geología, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Ex-hacienda San Juan Bautista s/n, Taxco el Viejo, Guerrero, México.*

<sup>2</sup> *Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blv. Juriquilla No. 3001, Juriquilla, Querétaro 76230, México.*

<sup>3</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Tampico-Madero, Tampico, Tamaulipas 89339, México.*

<sup>4</sup> *Posgrado en Ciencias de la Tierra; Centro de Geociencias-UNAM, Blv. Juriquilla No. 3001, Juriquilla, Querétaro 76230, México.*

\*e-mail: [albfigueroa@outlook.com](mailto:albfigueroa@outlook.com)

### ABSTRACT

The Xolapa Complex consists of meta-igneous and metasedimentary rocks intruded by Cenozoic plutons with no evidence of deformation. This Complex has been interpreted as continental magmatic arc and its respective arc margin sedimentation. Deformation in Xolapa Complex's rocks has been associated to either Laramide Orogeny or sinistral transpression linked to Chortis displacement; while the exhumation of Xolapa Complex has been associated with either subduction erosion or flattening subduction. There is a controversy about metamorphism age because of the multiple migmatization events reported: ~130 Ma, ~60 Ma, and one Oligocene event. We describe results of one preliminary magnetic fabric study in Xolapa Complex in the area within Puerto Escondido and San Gabriel Mixtepec, Oaxaca. Data were obtained from 140 samples belonging to 8 sites in representative lithologies, which includes diatexites, and stromatic migmatites. Structural interpretation in this area is not precise, due to structures attributed to either (1) contractional regime with folds and through with NE trend; or (2) south-north extension associated to trans-arc tectonic setting, a transtensive setting, or attributed to gravitational collapse. Cretaceous neosome exhibits well-defined magnetic fabrics, with high anisotropy values ( $P_j$  average: 1.152 and 1.126). Oligocene diatexites display sub-horizontal fabrics. The anisotropy degree is consistent with the susceptibility average. Northern sites in the study area seem to be migmatites developed in milonites parallel to Chacalapa fault, and suggest they suffered a migmatization process. In these sites, magnetic foliation is either semi-vertical or dips in high angle. All localities show consistent pattern with southward magnetic lineation, with an exception for one single locality from Oligocene diatexite with eastward lineation. Although our results are in a preliminary state, the interpretation is compatible with N-S extension, and not with northeastward compression. Models to explain N-S extension could be either transtension during Oligocene time or gravitational collapse in the Paleocene.

**Keywords:** *Xolapa Complex, migmatites, anisotropy of magnetic susceptibility, magnetic fabric, transtension, gravitational collapse.*

### RESUMEN

El Complejo Xolapa está caracterizado por rocas metaígneas y meta-sedimentarias intrusionadas por plutones cenozoicos no deformados. Ha sido interpretado como un arco magmático continental, con sedimentación de peri-arco. La deformación de las rocas en el Complejo Xolapa se ha asociado con la Orogenia Laramide o a transpresión sinistral ligada al movimiento de Chortis; mientras que, su levantamiento se ha asociado a erosión por subducción o subducción plana. Existe controversia sobre la edad del metamorfismo porque se han reconocido eventos de migmatización de ~130Ma, ~60Ma y del Oligoceno. Aquí se reportan los resultados de un estudio de fábrica magnética en el Complejo Xolapa en la región entre Puerto Escondido



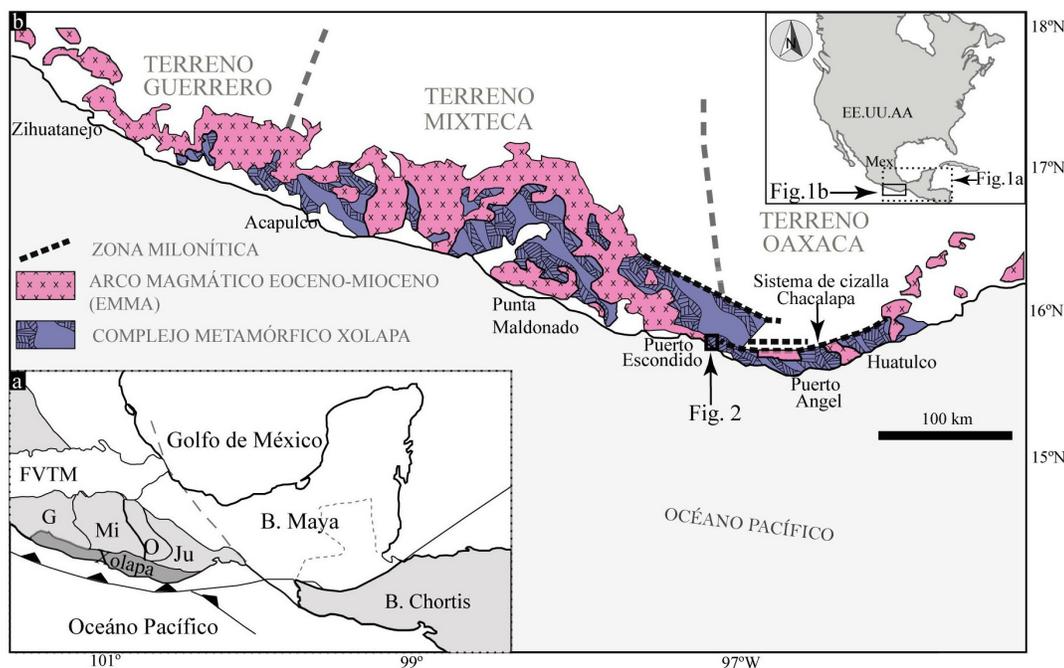
y San Gabriel Mixtepec. Se colectaron 140 muestras en 8 sitios de muestreo, en litologías que incluyen diatexitas y migmatitas estromáticas. La interpretación estructural en esta zona no es clara, ya que las estructuras se han atribuido a un régimen contraccional con pliegues y cabalgaduras con vergencia al NE; extensión N-S en un ambiente transtensivo de tras-arco, o asociado a colapso gravitacional. El neosoma de edad Cretácica presenta fábricas bien definidas, con valores de anisotropía altos ( $P_j$  media de 1.152 y 1.126). Las diatexitas del Oligoceno se caracterizan por presentar fábricas subhorizontales. Los sitios situados al norte del área de estudio parecen migmatitas desarrolladas en milonitas paralelas a la falla Chacalapa que sufrieron migmatización. En estos sitios la foliación magnética es semi-vertical o buza con un ángulo alto. Todas las localidades presentan lineación magnética hacia el sur, excepto para una localidad de diatexitita del Oligoceno con lineación al E. Aunque los resultados son preliminares, la interpretación es consistente con una extensión N-S, y no con compresión al NE. Los modelos para explicar esta extensión N-S pueden ser de transtensión durante el Oligoceno o colapso gravitacional durante el Paleoceno.

**Palabras Clave:** Complejo Xolapa, migmatitas, anisotropía de susceptibilidad magnética, fábrica magnética, transtensión, colapso gravitacional.

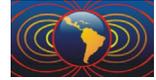
### 1. Introducción

El Complejo Xolapa (terreno Xolapa en Campa y Coney, 1983), al sur de Mexico (*Fig. 1a*), limita al norte por contacto tectónico con los terrenos Guerrero, Mixteca, Juárez y Oaxaca. Este se conforma por rocas metamórficas cuyos protolitos corresponden a rocas ígneas y sedimentarias, intrusionadas por cuerpos plutónicos cenozoicos no deformados (*Fig. 1b*). Esta entidad geológica representa el basamento de un arco magmático continental edificado durante el Jurásico-Paleogeno (Herrmann *et al.*, 1994).

La deformación de las rocas del Complejo Xolapa ha sido relacionada a la Orogenia Laramide en el Cretácico Tardío o bien con la transpresión izquierda ligada al desplazamiento hacia el este del Bloque

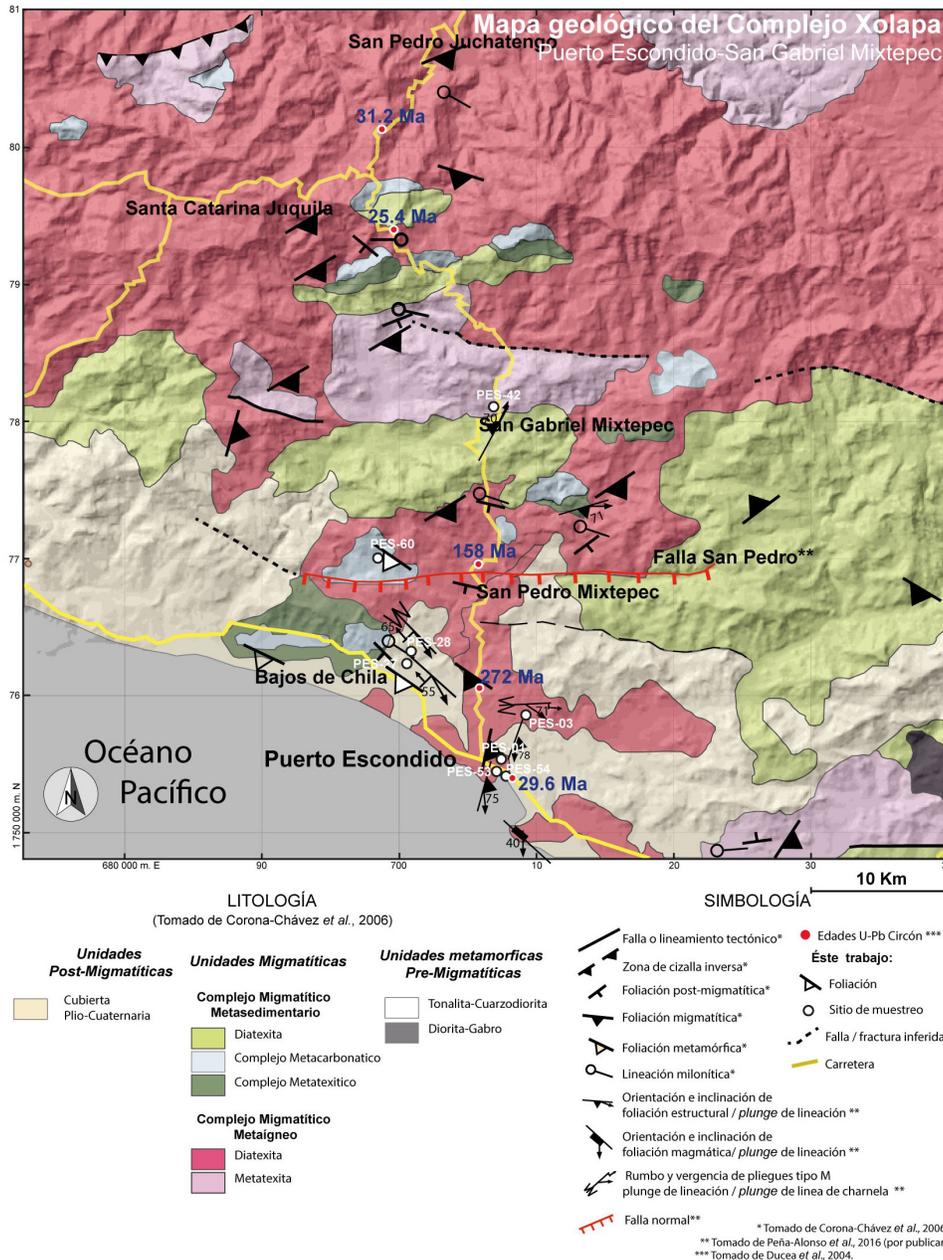


**Figura 1.** Mapa regional del complejo Xolapa y entidades adyacentes. (a) Mapa de terrenos tectonoestratigráficos del sur de México. **G:** terreno Guerrero; **Mi:** terreno Mixteca; **O:** terreno Oaxaca; **Ju:** terreno Juárez; **B. Maya:** Bloque Maya; **B. Chortis:** Bloque Chortis; **FVTM:** Faja Volcánica Transmexicana. *Adaptado de Campa y Coney, (1983).* (b) Mapa regional de los rasgos litológicos y límites tectónicos del complejo Xolapa, en esta es señalada el área de estudio marcada como Fig.2.



Chortis (*Fig. 1a*) durante el Paleogeno (Schaaf *et al.*, 1995). La deformación del terreno Xolapa es bastante compleja ya que las rocas han registrado diferentes fases de deformación. Esta incluye procesos de migmatización, metamorfismo y deformación de régimen dúctil-frágil; impresos mediante estructuras con morfología migmatítica, foliación, lineación, sistemas de cabalgaduras (?) y milonitas transtensionales con componente sinistral. Corona-Chávez *et al.* (2006) proponen hasta cinco fases de deformación para las rocas del Complejo Xolapa, ubicándolas temporalmente en tres eventos: deformación pre-migmatítica (D1), migmatítica (D2-D3) y post-migmatítica (D4-D5).

El proceso de migmatización, por sí mismo, implica un estado de dificultad alto para el entendimiento geológico de la región, ya que este proceso se origina mediante cambios graduales de temperatura hasta casi alcanzar el punto de fusión de la roca en cuestión. Por esta razón es que existen controversias respecto



**Figura 2.** Mapa de localización del área de estudio (entre Puerto Escondido y San Gabriel Mixtepec) en el sector sur del Complejo Xolapa.



a la edad del metamorfismo, dado que se han reportado al menos tres eventos de migmatización para el Complejo Xolapa: ~130Ma, ~60Ma y del Oligoceno (Solari *et al.*, 2007; Estrada-Carmona *et al.*, 2016).

Por ello, la interpretación estructural en esta zona no es clara ya que las estructuras se han atribuido a: (1) un régimen contraccional con pliegues y cabalgaduras con vergencia al NE (Corona-Chávez *et al.*, 2006); o, (2) extensión N-S en un ambiente de tras-arco, un ambiente transtensivo, o asociado a colapso gravitacional (Ratschbacher *et al.*, 1991). En este trabajo se reportan resultados preliminares de análisis de anisotropía de susceptibilidad magnética aplicado principalmente a migmatitas, con la finalidad de asociar la fábrica magnética con los rasgos estructurales regionales y contribuir con el mejor entendimiento de la evolución estructural del Complejo Xolapa entre Puerto Escondido y San Gabriel Mixtepec (Fig. 2).

## 2. Metodología

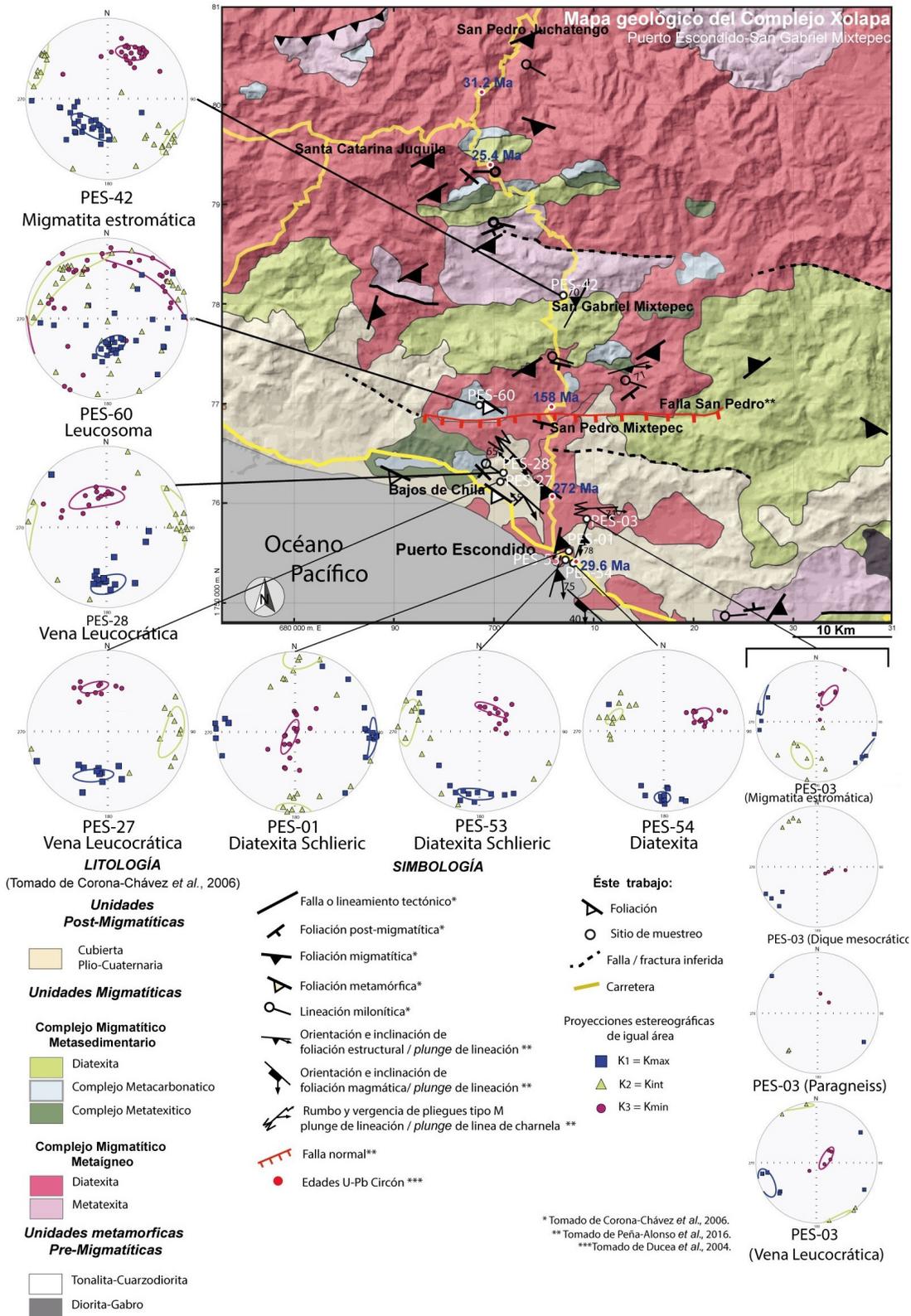
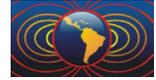
Se realizó el análisis de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en 140 muestras de 8 sitios en total en la región del Complejo Xolapa entre Puerto Escondido y San Gabriel Mixtepec (Fig. 2). La extracción de muestras en afloramiento, durante el trabajo de campo, fue mediante una perforadora portátil de motor a gasolina, con barrena de punta de diamante de 25 mm de diámetro. Cada núcleo fue perforado a una profundidad de entre 40 a 60 mm en cada sitio. Para poder realizar el análisis de susceptibilidad, fue necesario cortar los núcleos de los 8 sitios muestreados con una cortadora de disco fija para obtener la mayor cantidad de especímenes de forma cilíndrica con una altura de 21mm.

Las mediciones de susceptibilidad magnética se llevaron a cabo en el Laboratorio de Paleomagnetismo y magnetismo de rocas del Centro de Geociencias-UNAM, en un equipo KLY-3 Kappabridge, el cual opera a una frecuencia de 875 Hz y una intensidad de campo de 300 Am<sup>-1</sup>, basado en la obtención de las susceptibilidades de cada espécimen (25mm de diámetro por 21mm de alto) a través de 15 posiciones predeterminadas realizadas manualmente durante el análisis. Para obtener el valor de susceptibilidad magnética se analizó de forma individual cada espécimen de acuerdo al sitio que pertenece, para su posterior interpretación mediante el software SUSAM de AGICO fabricante del instrumento.

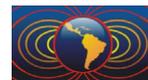
## 3. Resultados

A partir del análisis de la disposición espacial de los ejes del elipsoide de ASM (Fig. 3) se pudo determinar que la migmatita diatexitica con estructuras *schlieren* o *schlieric* del sitio PES-01, tiene la misma proporción de elipsoides oblados y prolados y una distribución de ejes  $K_{max}$  que indican una lineación magnética casi horizontal orientada E-W. En el sitio PES-03 se muestrearon cuatro litologías distintas que afloran en el mismo sitio, estas corresponden a: migmatita estromática (bandeada), un dique mesocrático que corta a la migmatita, paragneiss y la fracción leucocrática de la migmatita dispuesta en venas. Cada litología se dispuso en un estereograma respectivamente para facilitar su interpretación (Fig. 3). La migmatita estromática, la cual presenta casi la totalidad de sus elipsoides prolados en la fábrica y valores altos de susceptibilidad, muestra una fábrica bien definida con la distribución de  $K_{max}$  definiendo una lineación magnética subhorizontal de orientación NW-SE. Para el dique del mismo sitio, pese a que fueron muy pocas las muestras analizadas, los datos presentan una buena agrupación de los ejes de una fábrica triaxial, donde  $K_{max}$  tiene una inclinación que tiende al SW. Para la vena leucocrática de este sitio, el agrupamiento es aceptablemente bueno, y el valor de  $K_{max}$  muestra una concordancia con el valor obtenido de  $K_{max}$  del dique, ambos con inclinación al SW. La fábrica de ambos está conformada por elipsoides casi en su totalidad oblados con valores de  $T > 0$ .

Los datos obtenidos de la fracción leucocrática de una roca meta-granítica del sitio PES-27, muestran buena agrupación con una fábrica oblada muy bien definida con valores de susceptibilidad que van de moderados a altos. La concentración de  $K_{max}$  sugiere una lineación magnética inclinada al SSW. Para el leucosoma de la misma litología del sitio PES-28, los resultados muestran valores con buena distribución y fábrica



**Figura 3.** Mapa geológico del área de estudio con puntos de muestreo y sus respectivos estereogramas de anisotropía de susceptibilidad magnética. Se incluyen algunos datos de edad obtenidas por U-Pb en círcón reportadas por Ducea *et al.*, 2004.



conformada por elipsoides prolados y oblados, siendo los prolados los de mayor proporción. La distribución de los ejes de susceptibilidad máxima sugiere una lineación magnética con inclinación predominantemente al sur.

Los resultados de la migmatita estromática del sitio PES-42 (Fig. 3), cuyas características relictas sugieren que el protolito fue originalmente una milonita, muestran datos bien agrupados. La roca presenta una fábrica oblada con valores bajos de susceptibilidad y alto grado de anisotropía ( $P_j$ : 1.26). La concentración de  $K_{min}$  indica una foliación magnética de rumbo SE y con alto ángulo de inclinación (al SW); con una lineación magnética con tendencia de inclinación al SW. La migmatita diatexítica (sitio PES-53) con estructuras *schlieren* o *schlieric* (Fig. 3) presenta un agrupamiento moderado con una fábrica oblada conformada por elipsoides oblados con baja susceptibilidad. La disposición de sus  $K_{max}$  indica una lineación magnética con buzamiento al SSW; sin embargo en el otro sitio donde fue muestreada la misma litología (PES-01; Fig. 3), el  $K_{max}$  se distribuye con dirección E-W. Los resultados de las migmatita diatexítica del sitio PES-54 presentan muy buen agrupamiento. La fábrica del sitio PES-53 está conformada por elipsoides prolados y oblados, con valores de moderada a alta susceptibilidad ( $K_m$ ) y alto grado de anisotropía ( $P_j$ : 1.27). La configuración agrupada de  $K_{max}$  muestra una lineación magnética inclinada hacia el sur.

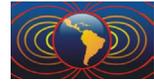
El leucosoma del sitio PES-60 muestra una agrupación moderadamente buena,  $K_{max}$  indicando una lineación muy inclinada hacia el SSE, los elementos que conforman la fábrica son predominantemente oblados ( $T > 0$ ) con baja susceptibilidad ( $K_m$ ) y alto grado de anisotropía ( $P_j$ : 1.34). Los valores de  $K_{max}$  indican una lineación magnética casi sur.

#### 4. Discusión y conclusiones

El proceso de migmatización implica un estado de dificultad elevado para el entendimiento geológico de una región. El aumento de temperatura que implica este proceso, hasta casi alcanzar el punto de fusión, podría sembrar duda de que si los elementos que definen la fábrica de las migmatitas presentan o no un arreglo bien definido en respuesta a los esfuerzos que están siendo aplicados. Los análisis de susceptibilidad magnética realizados en este trabajo indican fábricas magnéticas muy bien definidas para cada sitio, y consistentes con grados de anisotropía altos ( $P_j$  media: 1.152 y 1.126), dado que son migmatitas la mayoría de las muestras analizadas y considerando los múltiples eventos de deformación y migmatización. Todo esto indica que durante el proceso de migmatización, los elementos de la fábrica se orientan notablemente en respuesta a los esfuerzos actuantes. Por lo que los datos pueden ser utilizados para la interpretación estructural del área de estudio.

Edades U-Pb en circones para migmatitas dentro del área de estudio (Fig. 3), reportadas previamente por Ducea *et al.*, (2004) y Peña-Alonso *et al.*, 2017, permitieron asignar edad a algunos de los sitios muestreados. El leucosoma del sitio PES-60, muestreado en lo que podrían ser ortogneises de edad jurásica (?) (Ducea *et al.*, 2004; Peña-Alonso *et al.*, 2017) y el neosoma (dispuesto como venas leucocráticas) de edad Cretácico (PES-60 y PES-28), muestreado en ortogneises jurásicos de dos localidades, se caracterizan por lineaciones magnéticas muy bien definidas buzantes hacia el sur con ángulo moderado a alto y foliaciones magnéticas poco definidas de rumbo ENE-WSW buzantes igualmente hacia el sur. Mientras que las diatexitas del Oligoceno (PES-01, PES-53, PES-54) presentan fábricas subhorizontales con lineación magnética cercana a la horizontal; en dos localidades (PES-53 y PES-54) la lineación buza ligeramente hacia el sur y en una tercera localidad (PES-01) está casi horizontal. Las fábricas subhorizontales son las que muestran consistencia con un modelo compatible con extensión y no compresión.

Los núcleos muestreados en la zona norte del área de estudio parecen corresponder con migmatitas desarrolladas en milonitas paralelas a la falla Chacalapa. En el sitio PES-42 correspondiente con neosoma



de migmatita estromática de edad Oligoceno (Latorre-Correa, en prep.), la foliación y lineación magnéticas están muy inclinadas buzando hacia el SW, siendo el rumbo de la foliación NW-SE

Aunque el número de sitios no es extenso, la interpretación de los resultados de este trabajo se ajusta con extensión norte-sur y no con compresión al noreste. Algunos modelos propuestos por otros autores para explicar extensión norte-sur pueden ser transtensión durante el Oligoceno o colapso gravitacional durante el Paleoceno.

### Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo otorgado por la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) para realizar la estancia en el Laboratorio de paleomagnetismo y magnetismo de rocas en el Centro de Geociencias-UNAM, durante la cual se realizó este trabajo. De igual forma, Figueroa-Guadarrama agradece ampliamente el apoyo durante la estancia, y la oportunidad de participar en este proyecto otorgada por Molina-Garza R.S., responsable del proyecto PAPIIT-DGAPA IN109215. A los dos árbitros anónimos por las observaciones y recomendaciones. Marcos Yuriar por el apoyo técnico en el laboratorio de Paleomagnetismo.

### Referencias

- Campa-Uranga, M.F. & Coney, P., 1983. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences* 20, 1040-1051.
- Corona-Chavez, P., Poli, S., y Bigioggero, B., 2006. Syn-deformational migmatites and magmatic-arc metamorphism in the Xolapa Complex, southern Mexico: *Journal of Metamorphic Geology* 24, 169-191, doi: 10.1111/j.1525-1314.2006.00632.
- Ducea, M.N., Gehrels, G. E., Shoemaker, S., Ruiz, J. Valencia, V.A., 2004, Geological evolution of the Xolapa Complex, Southern Mexico: Evidence from U-Pb zircon geochronology. *Geological Society of America Bulletin* 116, 1016-1025.
- Estrada-Carmona, J., Solari, L., Ortega-Obregon, C., 2016. Petrochronology of the migmatization event of the Xolapa Complex, Mexico, microchemistry and equilibrium growth of zircon and garnet. *International Geology Review* 58, Iss.1382-1397.
- Herrmann, U.R., Nelson, B.K. y Ratschbacher, L., 1994. The origin of a terrane: U/Pb zircon geochronology and tectonic evolution of the Xolapa Complex (southern Mexico). *Tectonics* 13, 455-474.
- Latorre-Correa, C.I., en preparación., Análisis de migmatitas del Oligoceno del terreno Xolapa, localizadas entre Puerto Escondido y San Gabriel Mixtepec, Oaxaca, México. Tesis de Maestría, Centro de Geociencias, UNAM.
- Peña-Alonso, T.A., Estrada-Carmona, J., Molina-Garza R.S., Solari, L., Levresse., LaTorre, C., 2017. Lateral spreading of the middle to lower crust inferred from Paleocene migmatites in the Xolapa Complex (Puerto Escondido, México): Gravitational collapse of a Laramide orogen? *Tectonophysics* 706-707, 143.163. Doi: 10.1016/j.tecto.2017.04.010.
- Ratschbacher, L., Riller, U., Meschede, M., Herrmann, U., y Frisch, W. (1991). "Autochthonous" suspect terranes: a second look on terrane boundaries in Southern Mexico. *Geology* 19, 1233-1236.
- Schaaf, P., Morán-Zenteno, D., Hernández-Bernal, M. S., Solís-Pichardo, G., Tolson, G., Köhler, H., 1995. Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: geochronological evidence. *Tectonics* 14, 1339-1350.
- Solari, L.A. Torres de León, R., Hernández Pineda, G., Solé, J., Solís-Pichardo, G., y Hernández-Treviño, T., 2007. Tectonic significance of Cretaceous-Tertiary magmatic and structural evolution of the northern margin of the Xolapa Complex, Tierra Colorada area, southern Mexico. *Bulletin: Geological Society of America* 119, 1265-1279. Doi: 10.1130/B26023.1.