

Distribución y caracterización de los diques del Geoparque Mixteca Alta-UNESCO como evidencia de un régimen tectónico extensional en el oeste de Oaxaca, México

Distribution and characterization of the MixtecaAlta-UNESCO Geopark dikes as evidence for an extensional tectonic regime western Oaxaca, Mexico

Karen Jazmín Barrientos-Zavala,* Boris Chako-Tchamabé,** Jhoanna Silis-Esquivel,*** Jesús Alcalá-Reygosa,† Gonzalo Fernández de Castro Martínez,§ Ana Pilar Marín-Guzmán,‡ Alejandro Montes de Oca^Δ

Recibido: 23/02/2023. Aprobado: 12/04/2023. Publicado: 26/05/2023.

Resumen. El Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta (GMUMA), localizado en la porción occidente del estado de Oaxaca, al sur de México, se destaca por una variedad de rasgos geológicos y geomorfológicos, algunos representados por cuerpos ígneos intrusivos. Entre ellos están los diques expuestos en las localidades de Santo Domingo Tonaltepec, Santo Domingo Yanhuitlán y San Pedro Añañé. Estos cuerpos tabulares cortan discordantemente las rocas del subsuelo, y suelen desarrollarse en enjambres de diques individuales con orientaciones paralelas, lineares o radiales bajo la influencia de otros eventos tectónicos o estructura geológicas.

En este trabajo se identifican y cartografían los diques del GMUMA a través del análisis de imágenes satelitales, complementado con observaciones en campo donde se cotejó su presencia y se identificaron los rasgos geológico-estructurales asociados. Así mismo, con ayuda del programa Stereo32 1.0.1, se graficaron un total de 66 rumbos de los diques y se elaboraron diagramas de rosas para visualizar la dirección preferencial de los diques y relacionarlo con el régimen tectónico de la región.

Se identificaron 3 grupos de diques con trazas longitudinales que varían desde unos pocos metros hasta 1 km y con

* Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), Ciudad del Carmen, Campeche, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4628-4577>. Email: ikarench12@gmail.com

** Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia 403, 58000, Morelia, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6356-5629>. Email: boris.chako@umich.mx. Autor de correspondencia.

*** Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), Ciudad del Carmen, Campeche, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5141>. Email: jsilis@pampano.unacar.mx

† Departamento de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Autónoma de Madrid (España). Calle Francisco Tomás y Valiente, 1. Campus de Cantoblanco. 28049. Madrid, España. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0550-3240>. Email: jalcalar@ghis.ucm.es

§ Departamento de Arte y Ciencias del Territorio, Universidad de Extremadura-UEX, Av. de las Letras, s/n, 10003. Cáceres, España. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2021-6277>. Email: gonfermar@comunidad.unam.mx

‡ Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), Ciudad del Carmen, Campeche, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3177-0281>. Email: apmarin@pampano.unacar.mx

^Δ Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), Ciudad del Carmen, Campeche. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9070-1558>; Tel: +52 1 938 105 3128; alejandromdov@gmail.com

grosos aproximados de entre 4 y 5 m, con una dirección preferencial hacia el noroeste. Los diques exhiben tres tipos de morfologías: planares, escalonados y trenzados, cuyas interpretaciones y direcciones permitieron establecer que los diques están asociados a un evento tectono-magmático de tipo extensivo que se mantuvo activo durante el Eoceno, con una dirección preferencial hacia el noroeste-sureste, similar a la orientación de las fallas Tamazulapan y Cieneguilla.

Palabras clave: Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, diques, Falla Tamazulapan, Falla Cieneguilla.

Abstract. The Mixteca Alta UNESCO Global Geopark (GMUMA) is in the western portion of the State of Oaxaca and stands out for having a variety of geological and geomorphological features, some of which represented by intrusive igneous bodies. Among them are the exposed dikes in the towns of Santo Domingo Tonaltepec, Santo Domingo Yanhuitlán, and San Pedro Añañé. These tabular bodies cut unconformably through the subsurface rocks and often develop as swarms of individual dikes with parallel, linear, or radial orientations under the influence of other tectonic events or geological structures.

INTRODUCCIÓN

Un dique se define como un cuerpo intrusivo tabular de 1 a 10 m de espesor que corta discordantemente la estratificación o la foliación de las rocas del subsuelo (Acocella y Neri, 2003), generalmente en un ángulo alto ($\geq 45^\circ$) y una extensión o propagación lateral que puede alcanzar desde unos pocos metros hasta cientos de kilómetros (Hoek, 1991). Los diques son el resultado final de un flujo de magma presurizado que se desplaza principalmente a través de fracturas existentes o de nuevas grietas creadas cuando el magma se abre paso en la roca adyacente para finalmente solidificarse (Daniels *et al.*, 2012). Los diques se desarrollan generalmente en contextos geológicos relacionados con: a) volcanes escudos en islas volcánicas relacionadas con la actividad de puntos calientes y lejos de los límites de placas que imponen un campo de esfuerzos regional; b) estratovolcanes con un control tectónico de esfuerzos local y regional, y c) volcanes escudos situados a lo largo de las grietas de dorsales oceánicas que imponen un fuerte control regional sobre los emplazamientos de los diques (Acocella y Neri, 2009). También ocurren como rellenos de fracturas de extensión pura (Delaney *et al.*, 1986) y pueden

In this research, the dikes present in the GMUMA were identified and mapped through the analysis of satellite images and taking into account field observations, where their presence was compared, and the associated geological-structural features were identified. Likewise, with the help of the Stereo32 1.0.1 program, a total of 66 directions of the dikes were graphed and rose diagrams were elaborated to visualize the preferential direction of the dikes and relate it to the tectonic regime of the region. Three groups of dikes were identified with longitudinal traces that vary from a few meters to 1 km and with approximate thicknesses of between 4 and 5 m, with a preferential direction towards the northwest. The dikes exhibit three types of morphologies: planar stepped and braided, whose interpretation and directions allowed us to establish that the dikes are associated with an extensive tectono-magmatic event that remained active during the Eocene, with a preferential direction towards the northwest-southeast, like the orientation of the Tamazulapan and Cieneguilla faults.

Keywords: Mixteca Alta UNESCO Global Geopark, dikes, Tamazulapan fault, Cieneguilla fault.

formar arreglos geométricos característicos, sean estos en grupos o enjambres de múltiples diques individuales con orientaciones paralelas, lineares o radiales entre sí. Normalmente, los diques están asociados a un mismo evento geológico y aquellos que pertenecen a un mismo enjambre suelen tener una composición química similar (Janosy, 1994). La propagación de los diques requiere que el magma ejerza suficiente tensión en la punta de desplazamiento para que este venza la resistencia de las fracturas de las rocas, lo que permitirá que el dique crezca a medida que el magma fluye hacia la punta. Por lo tanto, la propagación lateral de los diques dependerá de la fuente, presión y volumen de suministro de magma (Gonnermann y Taisne, 2015).

De igual manera, la propagación de los diques está determinada por los planos de esfuerzos principales en la roca huésped local y regionalmente, ya que tienden a formarse de forma perpendicular al eje de esfuerzo mínimo (σ_3) y paralelos al eje de esfuerzo máximo (σ_1), tal y como lo describen Geshi y Oikawa (2016). Esto significa que el régimen regional de estrés existente en el momento de emplazamiento de un dique puede reconstruirse a partir del comportamiento del mismo dique (Delaney *et al.*, 1986; Janosy, 1994; Nakamura,

1977). Así, y de acuerdo con Daniels *et al.* (2012), la orientación y la morfología de un dique reflejan también el proceso de emplazamiento donde la viscosidad, composición, temperatura y presión del magma, así como la distribución de los esfuerzos y las características físicas y resistencia de la roca encajonante, desempeñan un papel determinante en el ascenso del magma. Del mismo modo, Acocella y Neri (2009) sugieren que los diques, además de estar controlados por la orientación de los esfuerzos principales en la corteza, se propagan en función de la presencia de cualquier relieve topográfico, la forma del edificio volcánico y el control tectónico regional. La consecuencia de la variación de los factores antes mencionados dará como resultado la formación de tres diferentes tipos o configuración de diques: regional, circunferencial y radial (Hoek, 1991; Acocella y Neri, 2009). Por ejemplo, los diques regionales suelen ocurrir en enjambres alargados, la mayoría de las veces paralelos entre sí, y donde un campo de tensión lejano (es decir, regional) controla sus emplazamientos (Llambías y Sato, 1990). En general, los diques regionales ocurren como fracturas de extensión pura o de tracción (*i.e.*, grietas de Griffith), aunque también pueden usar fallas o fracturas existentes como canales para formarse. Otras veces su propagación ocurre en la corteza oceánica, donde su mecanismo de emplazamiento está relacionado con la divergencia de las placas, aunque también son muy comunes en áreas continentales donde generalmente abarcan desde pocos metros hasta cientos de kilómetros (Acocella y Neri, 2009; Gudmundsson y Marinoni, 1999). En los límites de las placas divergentes, ya sea en áreas continentales u oceánicas, el estrés extensional concentra la tensión en el eje de la grieta, donde generalmente se encuentran los volcanes (Acocella y Neri, 2009). En pocas palabras, la propagación de los diques regionales está controlada por el tectonismo regional, donde estos se propagan como fracturas llenas de magma en un plano de tensión principal (paralelo a σ_1 y perpendicular a σ_3) (Gudmundsson y Marinoni, 1999). En ausencia de una elevación natural del terreno (por ejemplo, montañas, cerros, montes), los diques se propagan paralelamente a la dirección del campo de tensión principal.

Por otro lado, los enjambres de diques circunferenciales ocurren como aglomeraciones con una geometría primaria dispuestos casi, pero no del todo, circular o elípticamente (Buchan y Ernst, 2018, 2019) o con patrones arqueados concéntricos (Acocella y Neri, 2009; Buchan y Ernst, 2018, 2019). Pueden ser asociados a varios entornos tectónicos como alrededor de los bordes de las calderas volcánicas o en los centros de complejos ígneos en las Grandes Provincias Ígneas (por ejemplo, Chadwick y Dieterich, 1995; Mäkitie *et al.*, 2014). Cabe mencionar que los diques circunferenciales, al igual que los diques regionales, están generalmente relacionados a la ausencia de un relieve topográfico significativo que afecte su campo de tensión. Sin embargo, a diferencia de los diques regionales, los diques circunferenciales no están controlados por el estrés o la tectónica regional. En ausencia de tal campo de estrés regional, el patrón del dique puede ser controlado por la presencia de irregularidades topográficas, como es el caso de las calderas o reservorios de poca profundidad, que controlarán su propagación y emplazamiento (Acocella y Neri, 2009).

Por su parte, los diques radiales se observan comúnmente alrededor de los estratovolcanes, ya que debido a la presión de la cámara magmática, que afecta el estado de esfuerzos en las regiones circundantes y la carga impuesta por el edificio controla las tensiones principales, orientándolas de manera radial (σ_1) y tangencial (σ_3) (Hyndman y Alt, 1987) alrededor del volcán (por ejemplo, Chadwick y Howard, 1991; Acocella y Neri, 2003; Acocella *et al.*, 2006; Muller y Pollard, 1977; Poland *et al.*, 2008).

En este estudio se analiza la distribución y características (forma y dirección de emplazamiento) de los diques que afloran dentro del área del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta (GMUMA), situado en el sector occidental del estado de Oaxaca, México (Figura 1b). El geoparque cubre un área de aproximadamente 415 km², limitada por las coordenadas 17°38'14" y 17°28' de latitud norte y 97°27'40" y 97°28'10" longitud oeste, por lo que abarca parte de las cartas topográficas de Tamazulápam E14-D25, Coixtlahuaca E14-D26, Santiago Yolomécatl E14-D35 y Asunción

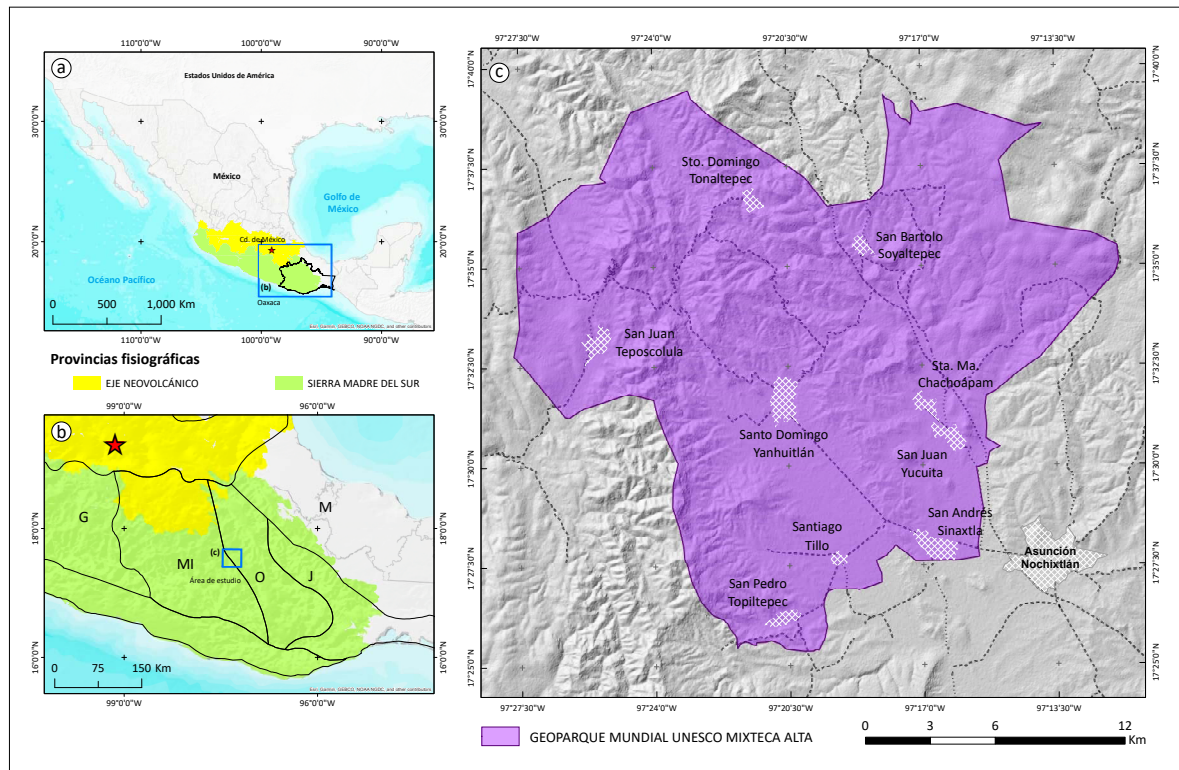


Figura 1. Localización de la zona de estudio: a) distribución de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) y la Provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur; b) distribuciones de los terrenos tectonoestratigráficos de la Sierra Madre del Sur (modificado de Morán-Zenteno et al., 2018). MI: Mixteco; O: Oaxaca; J: Juárez; M: Maya; XO: Xolapa; G: Guerrero; PM: Plataforma Morelos (propuesta por Ortega-Gutiérrez et al., 2012); c) polígono del Geoparque Mundial de la UNESCO Mixteca Alta.

Nochixtlán E14-D36 (Figura 1c). La formación de los diques que ocurren en el geoparque ha sido discutida de manera generalizada en conjunto con otros cuerpos ígneos presentes en la zona (por ejemplo, Ferrusquía-Villafraña, 1976; Martiny *et al.* 2000; Palacio *et al.* 2016; Santa María, 2009a), pero no existe un registro cartográfico completo de su distribución. Tampoco se conoce cómo la orientación y morfologías de estas estructuras magmáticas intrusivas están relacionadas con la evolución tectónica de la región. Por lo tanto, el presente trabajo busca establecer dicha relación ya que el resultado contribuirá al estudio de la evolución tectónica y magmática de la zona sur de México, incrementándose la riqueza y el interés geológico de la región y del GMUMA. Para ello, a partir de datos de análisis geoespaciales y de observación de

campo, se define el tipo de configuración de los diques presentes en el área de estudio, su patrón geométrico preferencial, así como su relación con las principales estructuras tectónicas del área y su implicación sobre la evolución magmática.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El GMUMA se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur (SMS), la cual se extiende desde el occidente del estado de Jalisco y Colima, al norte, hasta el oriente del estado de Oaxaca, al sur, pasando por los estados de Michoacán, Guerrero y Estado de México (Figura 1a). Está limitada al norte por la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). La geología y estratigrafía de la zona, resumidas en

las Figuras 2 y 3, respectivamente, indican que las rocas más antiguas corresponden a dos formaciones del Mesozoico (Montes de Oca, 2021). La primera es la Formación Teposcolula (Ortega-González, 1991) de color gris claro, con texturas que van desde *mudstone* a *packstone* con nódulos de pedernal, y también contiene foraminíferos bentónicos, rudistas, miliólidos y ostrácodos. La segunda es la Formación Yucunama, que tiene un espesor aproximado de 300 a 450 m (Ferrusquía-Villafranca, 1976), y está compuesta por margas nodulares con intercalaciones de areniscas y lutitas, y un horizonte

conglomerático con clastos calcáreos subredondeados en la cima (Castillo-Reynoso, 2018). Estas unidades Mesozoicas están sobreyacidas sucesivamente por: i) la Formación Tamazulapam (conglomerado con clastos subredondeados de tamaños que van desde 5 mm a 25 cm de composición calcárea, principalmente por calizas, margas, pedernal y areniscas, presenta una matriz arenosa de color rojiza y reportan espesores que oscilan entre los 20 a 200 m) (Santamaría-Díaz, 2009a); ii) la Formación Yanhuitlán (sucesión de 160 a 600 m de capas delgadas arcillo-limosas semiconsolidadas que

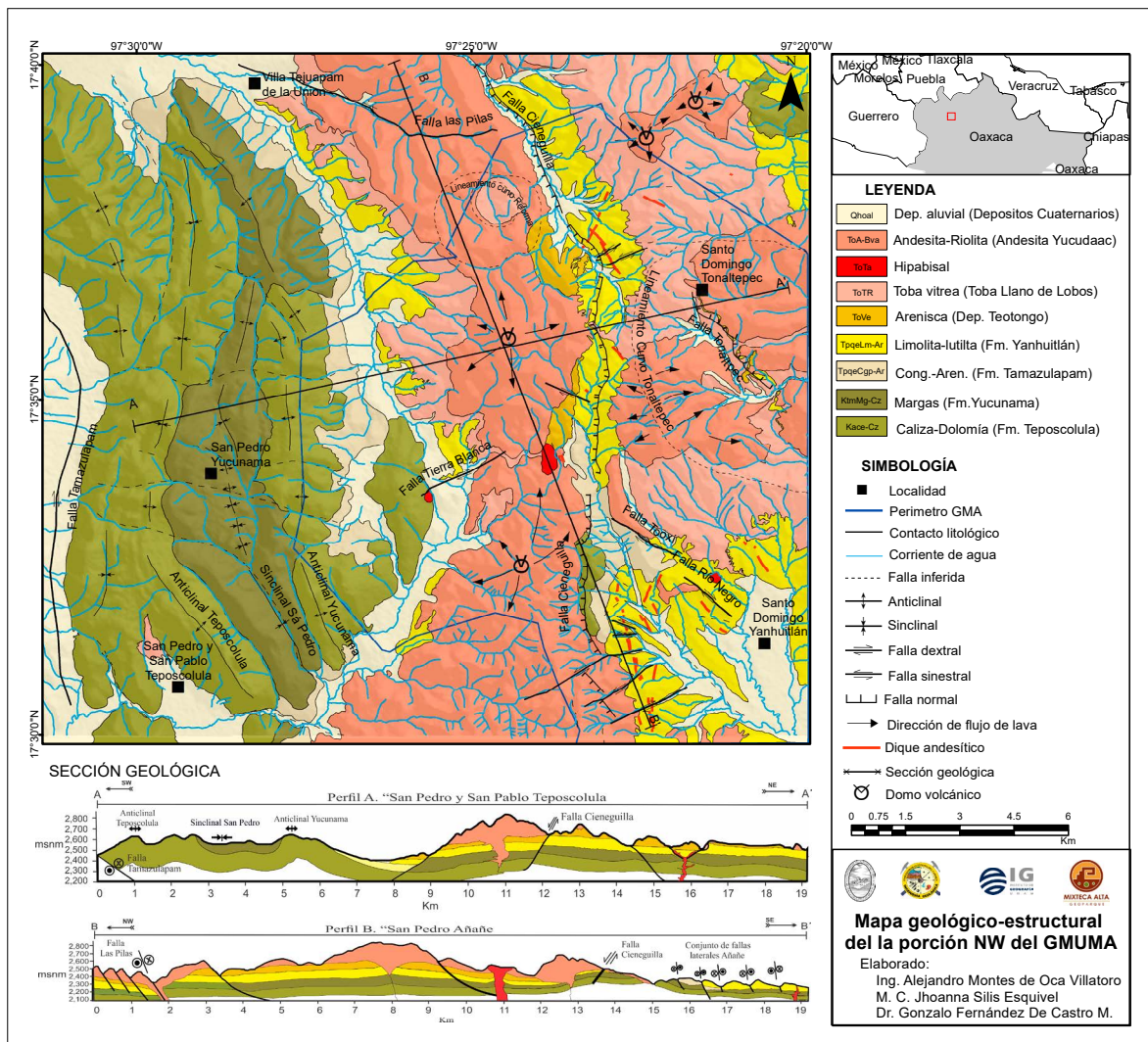


Figura 2. Mapa geológico-estructural de la porción NW del GMUMA. Actualizada de Montes de Oca (2021).

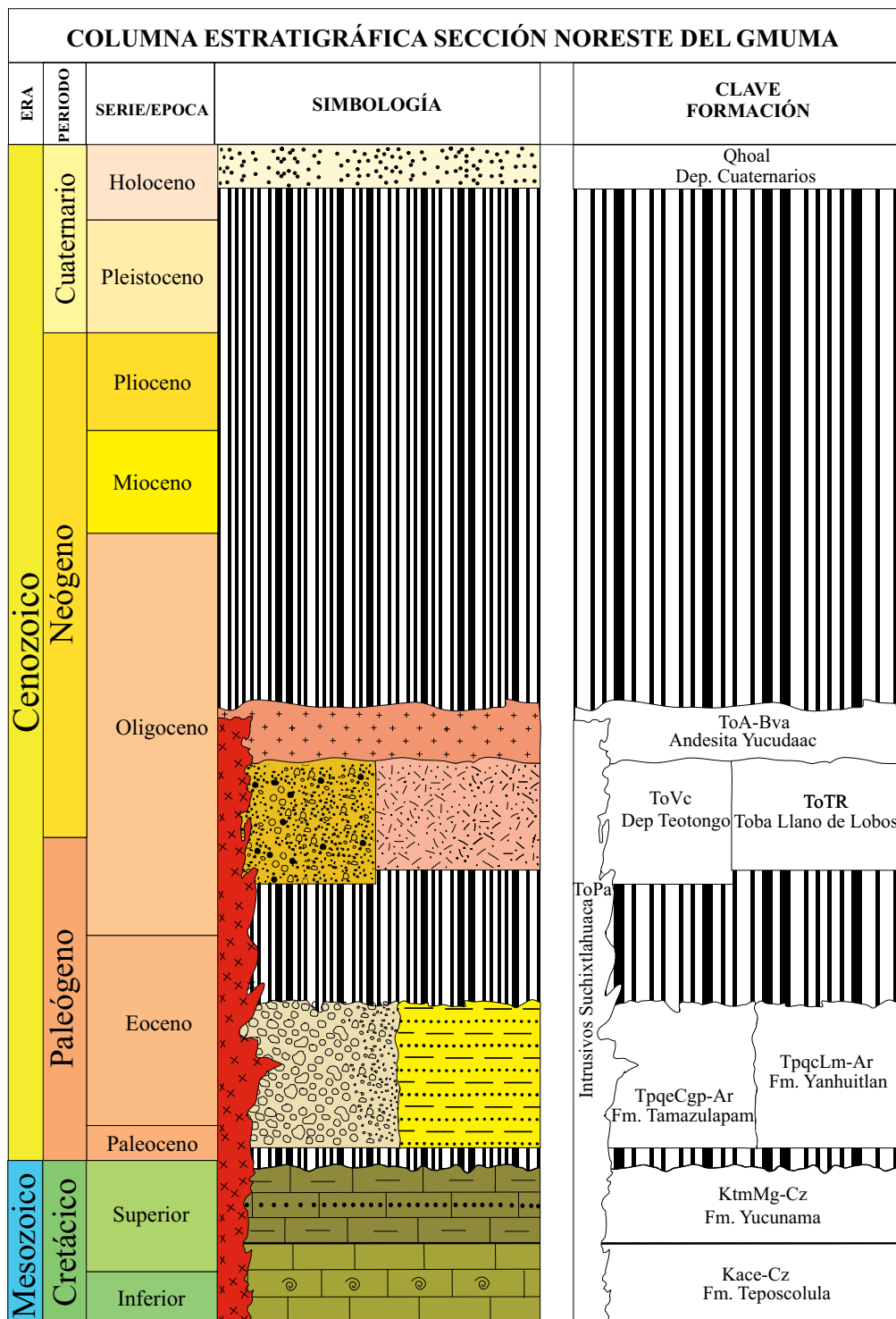


Figura 3. Columna estratigráfica de la porción noroeste del GMUMA. Tomado de Montes de Oca (2021).

presentan colores que van desde el rojo al amarillo) (Castillo-Reynoso 2018); iii) los Depósitos Teotongo (unidades volcanosedimentaria conformados por depósitos epiclásticos de tamaño arena depositado en un ambiente lagunar, depósitos piroclásticos, principalmente tobas líticas de composición intermedia) (Santamaría-Díaz, 2009b; Castillo-Reynoso, 2018), y (iv) la secuencia piroepiclástica Toba Llano de Lobos, que tiene un espesor de 300 a 350 m (Ferrusquía-Villafranca, 1976). Estas secuencias de rocas están a su vez cubiertas en varias partes por una serie de coladas de lavas andesíticas del Oligoceno con un espesor de 500 m a 1000 m y catalogados como Andesita Yucudaac (Ferrusquía-Villafranca 1970, 1976) o Andesita Indiferenciada (Castillo-Reynoso, 2018). También, existen varios cuerpos intrusivos llamados Intrusivos hipabisales Suchixtlahuaca (Figura 2) conformados por lacolitos, stocks, sills y diques de composición andesítico cuya edad varía entre 45.5 ± 1.7 Ma y 20.0 ± 0.9 Ma (Ferrusquía-Villafranca, 1976; Martiny *et al.*, 2000; Santamaría-Díaz, 2009b).

Tectónicamente hablando, la Sierra Madre del Sur es considerada como uno de los territorios de mayor complejidad estructuro-geológica del margen continental pacífico americano (Hernández-Santana *et al.*, 1995). De hecho, en la región de Oaxaca, se han registrado eventos geológicos intensos desde el Precámbrico hasta la actualidad, dentro de los más importantes que han afectado al sur de México. Diversos autores han propuesto varios modelos para describir la evolución geológica de este territorio (Keppie y Morán-Zenteno, 2005; Morán-Zenteno *et al.*, 2007; Rogers *et al.*, 2007; Pindell y Kennan, 2009; Ferrari *et al.*, 2014; Morán-Zenteno *et al.*, 2018) basados en observaciones de campo, datos de áreas claves en la corteza continental, así como inferencias sobre la cinemática de las placas oceánicas adyacentes. Sin embargo, a la fecha no existe un modelo que explique en su totalidad la evolución tectónica de la región sin que presente cuestionamientos en su planteamiento. Morán-Zenteno *et al.* (1999, 2000) indican que la distribución de las rocas magmáticas de la SMS y las variaciones en la composición, estratigrafía y relaciones aparentes con el entorno tectónico de las rocas corresponde a una geodinámica activa

caracterizada por las interacciones de las Placas de Norteamérica, el Caribe y Farallón, y el posterior desplazamiento del Bloque Chortis. Martiny *et al.* (2000) revelaron que las rocas plutónicas y volcánicas localizadas en el sur de México corresponden a un magmatismo Paleoceno-Mioceno, el cual se desarrolló en un tiempo caracterizado por varios eventos tectónicos relacionados con interacciones de las placas tectónicas como resultado del desprendimiento y desplazamiento lateral al suroeste del Bloque Chortis, y con la formación y evolución de la Placa del Caribe (Martiny *et al.*, 2000; Morán-Zenteno *et al.*, 1999). Otros eventos tectónicos que han afectado a la región en general incluyen el amalgamamiento y ruptura de la Pangea, la apertura del Golfo de México, la Orogenia Laramide, la subducción de la Placa de Farallón y actualmente la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana (Keppie y Morán-Zenteno, 2005; Morán-Zenteno *et al.*, 2007; Rogers *et al.*, 2007; Santamaría-Díaz, 2008; Pindell y Kennan, 2009; Ferrari *et al.*, 2014; Morán-Zenteno *et al.*, 2018). Sin embargo, se desconoce aún el papel que desempeñó esta redistribución de placas tectónicas en la determinación de los patrones de magmatismo en la región (Morán-Zenteno *et al.*, 1999).

A nivel local, la tectónica del área de estudio se puede resumir con la presencia de varias estructuras como el Anticlinal Teposcolula o las Fallas de Caltepec, Las Pilas, Oaxaca, y específicamente las Fallas Tamazulapam y Cieneguilla que se encuentran más cerca del GMUMA (Figura 2) (por ejemplo, López-Ticha, 1985; Centeno-García, 1988; Elías-Herrera *et al.*, 2005; Nieto-Samaniego *et al.*, 2006; Santamaría-Díaz *et al.*, 2008). La Falla Caltepec ha sido descrita como una falla transpresional dextral con rumbo N-S y NNW de edad Pérmica Temprana con registro de eventos tectonomagmáticos-metamórficos durante el Pérmico, y períodos múltiples de reactivación mesozoicos, cenozoicos y probablemente hasta recientes (Elías-Herrera *et al.*, 2005). Elías-Herrera y Ortega-Gutiérrez (2002) interpretaron la Zona de la Falla Caltepec como un límite importante que marca la yuxtaposición de los bloques Acatlán y Oaxaqueño que relaciona el ensamblaje final de la Pangea central occidental (choque de Gondwana contra Laurentia en un en-

torno convergente oblicuo en la época del Pérmico Temprano). Santamaría-Díaz (2008) interpretó la continuación de la Falla Caltepec al sur de Tejupan como la falla de Cieneguilla y en su lugar, reubicó la Falla Caltepec entre la falla Tamazulapam y Cieneguilla como una zona de falla normal y lateral derecha que tiene alrededor de 10 km de ancho representada por una amplia zona de deformación heterogénea y no por un trazo directo. La Falla Tamazulapam, por su parte, presenta dos direcciones de movimiento: como falla normal y como falla lateral derecha, con un importante componente vertical localizado al poniente del anticlinal Tamazulapam y Teposcolula, y pone en contacto a rocas del Cretácico con rocas del Paleoceno-Eoceno en la cobertura desde el sur del poblado Tamazulapam hasta Santa María Yolotepec (Santamaría-Díaz *et al.*, 2008; Ferrusquía-Villafranca *et al.*, 2016). Fue propuesta por primera vez por López-Ticha (1985) para describir una estructura mayor relacionada con una antigua consolidación de terrenos con basamentos propios y con una historia geológica diferente (Elías-Herrera *et al.*, 2005). Tiene un rumbo promedio N-S con echados promedios de entre 60° a 80° al SW y al NE y con una variación en su traza de 20° siguiendo la forma del anticlinal Tamazulapam. Presenta dos curvas, en las cuales el movimiento de rumbo-deslizamiento formó una zona de deformación transpresiva al norte, y otra de deformación transtensiva en el sur; lo anterior, relacionado a dos eventos tectónicos regionales que afectaron a la falla Tamazulapam: un evento transpresivo al NE-SW activo entre el Eoceno tardío y el Oligoceno temprano que afectó a las formaciones Chilapa, Yanhuitlán y Tamazulapam, Teposcolula y Tecocoyunca, y otro transtensivo, a finales del Oligoceno con dirección máxima de extensión al NE-SW (Santamaría-Díaz *et al.*, 2008; Ferrusquía-Villafranca *et al.*, 2016). A unos 15 km al este de la Falla Tamazulapam se ubican las trazas de la Falla Cieneguilla, descrita por Santamaría-Díaz *et al.* (2008) como falla normal con echado hacia el poniente con una traza continua de 22 km y ancho de 8 m y una continuación hacia el norte por otros 32 km como segmentos pequeños de falla. Estos autores propusieron la localización de la Falla Cieneguilla al sur de Tejupan, donde se

había localizado con anterioridad la continuación de la Falla Caltepec (Elías-Herrera *et al.*, 2005). Al norte corta a la Toba Llano de Lobos y Volcanoclásticos Teotongo y al sur a la formación Yanhuitlán, poniéndola en contacto con la Andesita Yucudaac. La Falla Cieneguilla, al igual que la Falla Tamazulapam, se activó durante un evento tectónico extensional entre el Eoceno tardío y el Oligoceno (Santamaría-Díaz *et al.* 2008).

METODOLOGÍA

Identificación de los diques

En este estudio se realizó la cartografía geológico estructural 1:50 000 del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, abarcando la porción noroeste-suroeste del mismo, es decir, al noroeste del municipio de Asunción Nochixtlán (Figura 1c). La identificación y cartografía de los diques del GMUMA se basaron principalmente en el análisis de imágenes satelitales a través de Google Earth que, a su vez, fue complementada por la información recolectada en los trabajos de campo. Cabe destacar que las características geológicas de la zona de estudio ayudaron y facilitaron dicha identificación en Google Earth. Por ejemplo, dado que la mayoría de los diques del área de estudio cortan la Formación Yanhuitlán y que existe tanto un elevado contraste litológico entre ambos tipos de rocas (sedimentaria para la Formación Yanhuitlán e ígnea para los diques), como un proceso de erosión diferencial muy avanzado en la región (Palacio-Prieto *et al.*, 2016; 2019), los diques afloran con un pequeño desnivel sobre dicha formación. Por otro lado, como se puede observar en la Figura 4, el contraste natural de color entre ambas litologías (Formación Yanhuitlán, rojizo, y diques, oscuro), así como la morfología (traza longitudinal y grosor relativamente reducido) de los diques hacen que estos últimos resalten y llegan a ser reconocibles fácilmente en Google Earth. Así, a partir de estos contrastes, se catalogaron todas las estructuras que tenían morfologías similares en el área.

Después de esta etapa de trabajo en gabinete, se realizaron dos salidas de campo para verificar que las estructuras reconocidas en las imágenes sateli-

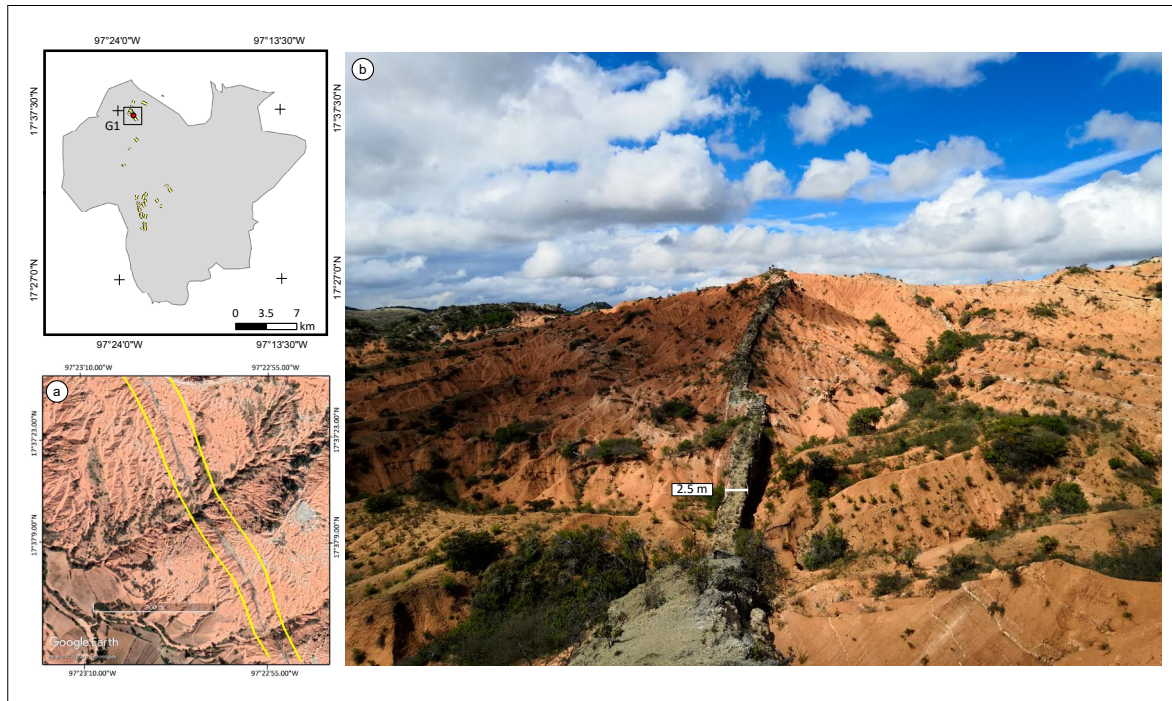


Figura 4. Imagen de Google Earth y de campo donde se puede apreciar el contraste de color y de competencia entre los diques y la formación Yanuitlan. Dicho constraste facilitó el reconocimiento de los diques en Google Earth.

tales fueran diques. Asimismo, se aprovechó para adquirir información sobre la litología, grado de alteración, dimensiones y geometría de los diques, así como fallas y diaclasas cuando eran presentes. Dicha información es útil para la interpretación y comprensión de la evolución tectónica y magmática en la región.

Distribución, configuración y análisis estructural de los diques

Para determinar la relación y el tipo de configuración que presentan los diques en el GMUMA, se tomó en cuenta la presencia de cualquier relieve topográfico que pudiera imponer un campo de tensión gravitacional local o condicionar el patrón geométrico resultante de los diques, así como la configuración tectónica de la región. Para ello, se creó un modelo de elevación digital (DEM), derivado de datos InSAR (obtenidos de la base de datos Alaska), donde se visualiza la morfología del terreno. A continuación, se incluyeron los datos vectoriales de los diques identificados en el

Geoparque para analizar su distribución espacial. De la misma manera, se pudieron reconocer los rasgos estructurales sobresalientes como fallas regionales, pliegues o diaclasas que pudieran servir como referencia para determinar la dirección de los esfuerzos tectónicos en el pasado y la actualidad y así comparar si existe alguna relación entre la alineación de las estructuras tectónicas mayores y aquellas correspondientes a los diques.

Desde Google Earth, se midieron con ayuda de un transportador la orientación de los rumbos de los diques cartografiados (Tabla 1). Posteriormente, dichos datos de los rumbos fueron manipulados con el programa Stereo32 1.0.1 para obtener los diagramas de rosetas de fracturas y conocer con mejor detalle sus rumbos preferenciales y su configuración.

Además, se realizó una revisión de las cartas topográficas (editadas por el INEGI) de Tamazulápam E14-D25, Coixtlahuaca E14-D26, Santiago Yolomécatl E14-D35 y Asunción Nochixtlán E14-D36, todas a escala 1:50, 000, con el fin de

Tabla 1. Rumbos y azimuts de diques magmáticos

No.	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
1	54°	27°	325°
2	22°	22°	319°
3	326°	332°	326°
4	25°	322°	316°
5	32°	302°	323°
6	25°	8°	327°
7	315°	328°	325°
8	321°	350°	
9	329°	8°	
10	333°	347°	
11	335°	331°	
12	332°	338°	
13	335°	351°	
14	330°	353°	
15	337°	356°	
16	330°	353°	
17	329°	350°	
18	316°	350°	
19	327°	350°	
20	325°	347°	
21	296°	331°	
22	341°	334°	
23		10°	
24		18°	
25		15°	
26		357°	
27		353°	
28		336°	
29		338°	
30		355°	
31		15°	
32		3°	
33		0°	
34		7°	
35		356°	
36		358°	
37		343°	

generar un mapa base escala 1:50,000, en el que se muestre el contexto topográfico, hidrográfico e hipsométrico regional del área del GMUMA. De este modo, se obtuvo una base cartográfica preliminar sobre el cual se resaltó la distribución de los diques para su posterior análisis e interpretación, con el objetivo de conocer cual régimen tectónico controló el patrón geométrico del enjambre y si dicho régimen fue local o regional. También se tomaron en cuenta las características geométricas de los diques individuales como el tamaño, forma y sus potenciales interacciones sistemáticas con los diques aledaños para evaluar la evolución de las fracturas en el entorno geológico.

RESULTADOS

Distribución espacial de los diques

El análisis de las imágenes de Google Earth de todo el geoparque permitió identificar que los diques afloran especial y solamente sobre un corredor N-S en el oeste del parque. A partir de la distancia relativa entre los diques, tienden en formar tres grupos principales (Figura 5a).

El primer grupo de diques está ubicado en la porción norte del área de estudio, es decir, al noroeste del municipio de Santo Domingo Tonaltepec. Se conforma por 22 diques que tienen una tendencia preferente hacia el NNW, aunque algunos están orientados al NE (Figura 5a).

El segundo grupo se encuentra al centro sur, cerca de los municipios de San Pedro Añañe y Santo Domingo Yanhuatlán (Figura 5a), donde se distinguen 32 diques de diferentes longitudes y grosores. El 95% de estos diques se encuentra localizado al oeste del municipio de San Pedro Añañe y están distribuidos a lo largo de una banda de dirección N-S de aproximadamente 4 km de longitud y 2 km de anchura. Asimismo, presentan una dirección NNW con espesores de 3 a 7 m, aunque algunos se desvían de esta tendencia hacia el NNE (Figura 5a).

Más al sur se encuentra un tercer grupo, formado por 5 diques, paralelamente distribuidos y con una tendencia hacia el NW (Figura 5a).

Con el programa Stereo 32 versión 1.0.1. se analizaron 66 datos estructurales de los diques con

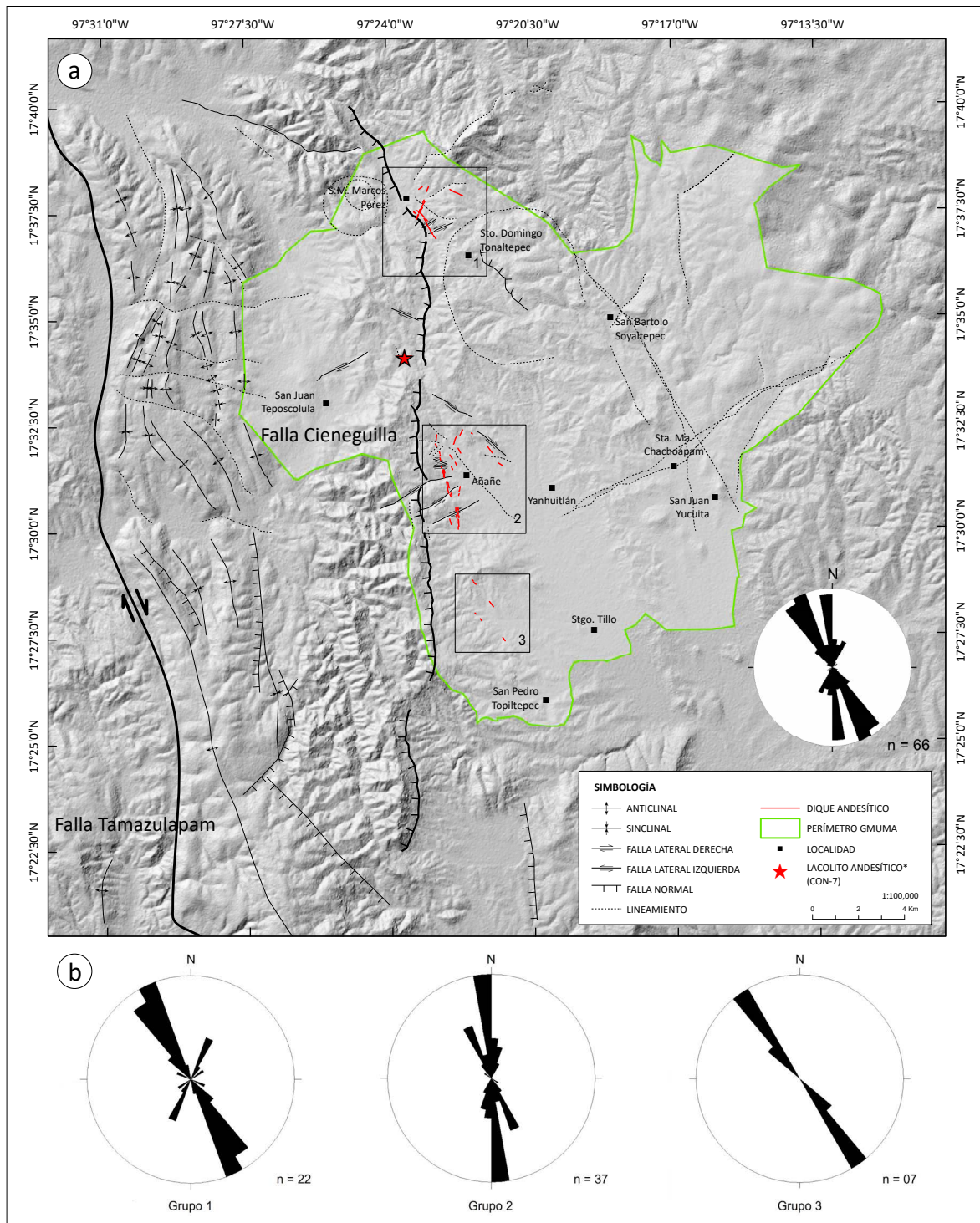


Figura 5. a) Mapa del área de estudio que muestra las principales estructuras geológicas de la región (fallas Tamazulapam y Cieneguilla) y la distribución de los diques en el GMUMA en tres grupos (véanse los cuadros 1, 2 y 3). Se presenta la ubicación del lacolito andesítico analizado por Martiny et al. (2000) b) Diagramas de rosas que representan el rumbo principal de cada grupo de diques en la región.

el objetivo de comparar sus orientaciones en el área de estudio y establecer cómo se interrelacionan. Como resultado, el diagrama de rosas representativo de todas las fallas (Figura 5a) indica rumbos preferenciales con una población dominante entre N10°W y N40°W, aunque esto no siempre es así. Por ejemplo, hay lugares dentro del enjambre donde los diques tienen una dirección oblicua que no excede los 35° NW. El grupo de diques ubicado en el sector septentrional de área de estudio (grupo 1 o cuadrante 1 en la figura 5a), así como los diques del grupo 3, se caracterizan por rumbos preferenciales entre N20°W y N40°W y otra pequeña variación entre N20°E y N30°E (Figura 5b). Por otro lado, el segundo grupo ubicado al centro sur presenta direcciones entre 0° y N30°W y con pequeñas desviaciones entre 0° y N20°E (Figura 5b).

Una particularidad de todos los diques es que la distribución entre el arreglo de fracturas en las que se formaron presenta una propagación en el plano sin arquearse o cambiar de dirección, siguiendo una tendencia sistemática donde las compensaciones entre los diques son comunes, es decir, mantienen una tendencia paralela y semi-paralela con una separación más o menos constante entre ellos (Figura 5a). Por otro lado, los enlaces geométricos –zonas de intersección física entre dos o más superficies de fracturas, por ejemplo, fracturas colindantes, cruzadas o las bifurcaciones en fracturas anastomosadas (Peacock *et al.*, 2016)– entre los segmentos son escasos. En la compleja red hidrográfica del área de estudio (Figura 6), la distribución de los diques proyecta direcciones similares al drenaje de la zona. Algunos diques, principalmente los del

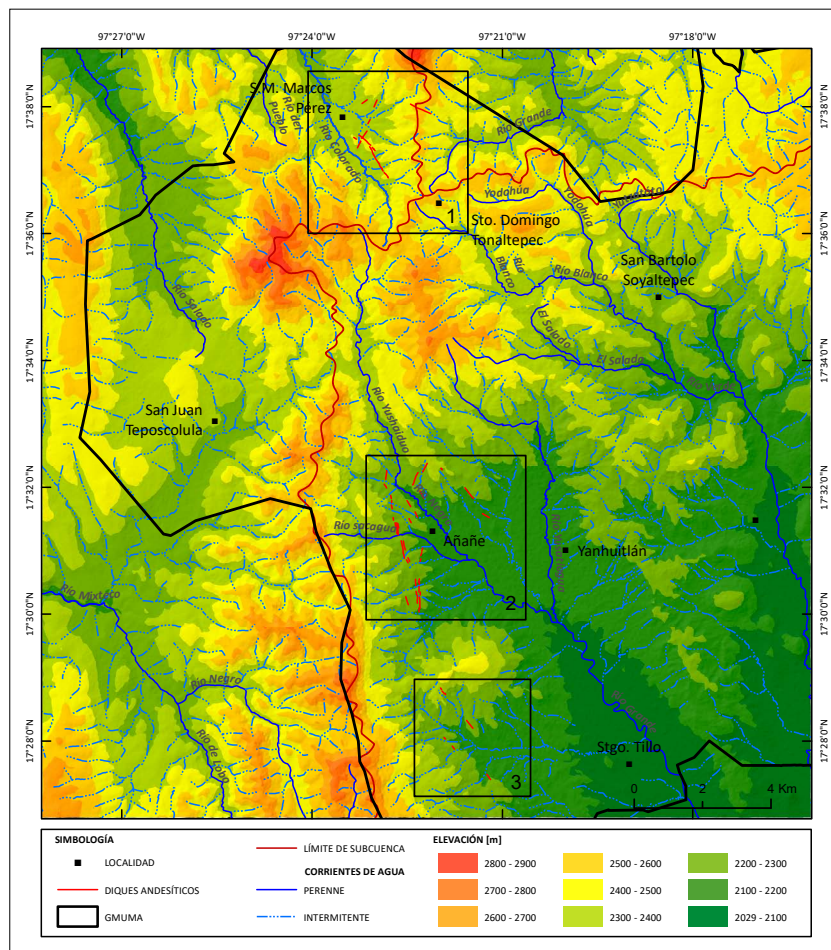


Figura 6. Mapa hipsométrico, red de drenaje y distribución de los diques. Cabe resaltar que los diques presentan una distribución paralela a los cauces principales.

grupo 1 y 3, tienen una orientación similar a la de las corrientes intermitentes, mientras que los diques cerca de San Pedro Añañe tienen una alineación semejante al límite de la subcuenca. De igual manera, el análisis del mapa hipsométrico (Figura 6) indica que los diques coinciden con el relieve montañoso del área de estudio. Por ejemplo, el segundo grupo de diques se distribuye por el piedemonte del valle Yanhuatlán, un valle poco pronunciado con bastantes irregularidades ubicado en la porción sureste del área, donde la vaguada es recorrida por el cauce de los ríos Sacagua y Negro (Figura 6). Su dirección predominante es NNW, relativamente paralelo a las llanuras, valles y piedemontes que tienen alineaciones predominantes hacia el NW, pero están alineados con las zonas más altas que se corresponden con una alineación de montañas medias ubicadas en el centro del área de estudio. Estas montañas medias mantienen una alineación NNW–SSE que corresponde a la línea de máxima pendiente (parteaguas o línea divisoria).

Características generales de los diques

El análisis de imágenes satelitales y las observaciones en campo permitió identificar ciertas características de los diques del Geoparque Mixteca Alta. De manera general, los diques presentan trazas longitudinales que varían desde unos pocos metros hasta 1 km y con grosores aproximados de entre 4 y 5 m. Presentan evidencias de deformación frágil (fracturas y fallas), así como diferentes estados de meteorización y erosión.

Por ejemplo, en la Figuras 7 se pueden apreciar prototipos de diques afectados por procesos de erosión en su cima (Figura 7a-b). Otra característica particular en algunos de los diques estudiados es la presencia de una aureola metamórfica que se extiende hacia la roca encajonante (Figura 7b y c), con un espesor variable pero generalmente no más allá de los 50 cm. De igual manera, las paredes de los diques presentan una amplia variedad de texturas y geometrías. Por ejemplo, en algunos diques se observa un arreglo de diaclasas curvoplanares que ha favorecido el desarrollo de una alteración en “piel de cebolla” o intemperismo esferoidal, proceso en el que capas concéntricas, denominadas como “conchas”, rodean a núcleos

de roca redondeados (*corestone*) (Ollier, 1971). En estos casos, las aristas de los nódulos se encuentran redondeadas que adoptan una forma esferoidal y, a su vez, los fragmentos están rodeados por capas de roca aproximadamente concéntricas, con espesores más o menos uniformes, que exhiben en el interior del cuerpo principal del mismo dique nódulos con dimensiones entre los 30 a 40 cm (Figura 7d).

El intemperismo esferoidal es frecuente dentro del área de estudio, no exclusivamente en los diques, ya que también se observa en otros cuerpos magmáticos como afloramientos andesíticos que corresponden a los geositios turísticos #5 y #33 del Geoparque Mixteca Alta y que se encuentran al noroeste del municipio de San Juan Teposcolula y al sur de Santo Domingo Tonaltepec, respectivamente.

Por otro lado, se hallan varios diques menos alterados que presentan una textura masiva, con cuerpos densos y muy pocas vesículas (Figura 7e). En ellos se pueden apreciar diaclasas definiendo un arreglo cuadrículado (Figura 7e). En algunas otras partes, cuando el dique está un poco más alterado, las diaclasas están mejor definidas y el dique tiene el aspecto de bloques de lava (Figura 7b y c).

El análisis morfoestructural revela que los diques de la zona de estudio afloran generalmente con formas planares, es decir, con paredes simples, paralelas y con forma tabular (Figura 8a, b, d), aunque en algunas localidades, pueden exhibir formas no planares. De hecho, de acuerdo con Hoek (1991), el patrón de diques no planares que se presenta con mayor frecuencia en el geoparque tiene paredes sinuosas (Figura 8c), mientras que otros muestran segmentos escalonados (Figura 8a, b) y trezados (Figura 8e). Los diques con paredes sinuosas (Figura 8c), se localizan principalmente en el grupo de diques 2 y 3, cerca de San Pedro Añañe, y se caracterizan por una apariencia curvilínea en sus paredes, y mantienen una distancia equidistante entre ellas. Por otro lado, los diques con geometría escalonada (Figura 8a,b) presentan saltos (distancia entre los escalones perpendicular a sus paredes) de más o menos 2 m. Algunos segmentos se encuentran unidos por puentes (Figura 8a) formados del mismo material magmático. Este tipo de geometría se encuentra presente en los tres grupos de diques, aunque es más frecuente en la

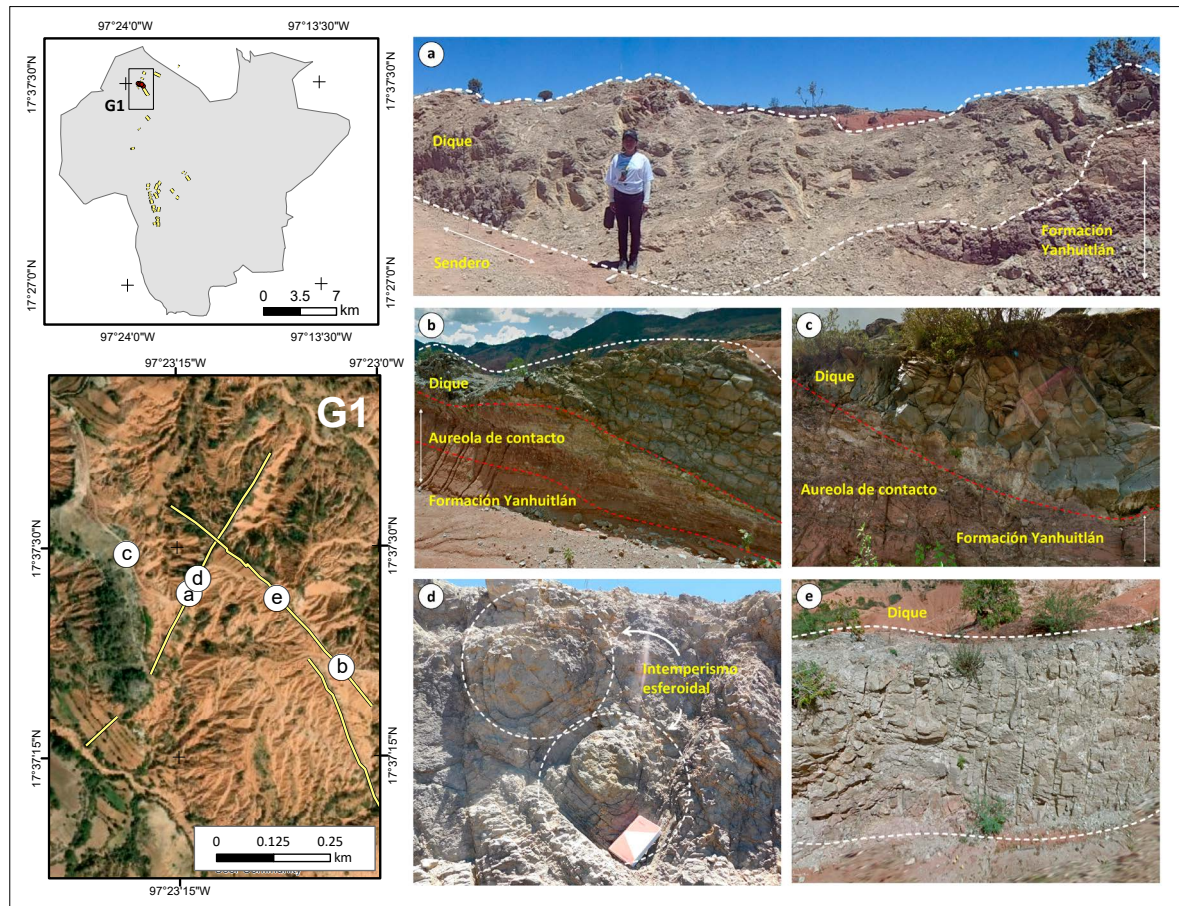


Figura 7. Particularidades que presentan algunos de los diques que se encuentran en el Geoparque Mixteca Alta UNESCO. Los diques en a) b) y c) han sido severamente afectados por el intemperismo y la erosión en su cima. En algunos diques, como b) y c) se observa una aureola de metamorfismo la cual está delimitada con las líneas a trazos en color rojo, mientras que d) presenta otro dique con intemperismo esferoidal. e) muestra el afloramiento de unos de los diques relativamente “sano” del geoparque.

parte norte de la zona de estudio. De hecho, el dique de mayor longitud identificado dentro del GMUMA tiene varios segmentos escalonados. En cuanto a los diques trenzados (Figura 8e) se caracterizan por la bifurcación y ramificación de 3 a 4 diques con aspecto sinuoso. El más representativo que identificamos en la zona de estudio se encuentra al sur de San Pedro Añáñe.

DISCUSIÓN

La mayoría de los diques estudiados en el GMUMA están distribuidos a lo largo de una banda de direc-

ción N-S de aproximadamente 4 km de longitud y tienen una disposición semi-paralela a paralela entre sí. Aunque no presentan una continuidad entre ellos, parecerán guardar una similitud en sus orientaciones, espesores, y geometría en cada uno de los tres grupos determinados (Figura 5). Esta distribución es característica de diques regionales, y de acuerdo con los parámetros presentados por Acoella y Neri (2009), los diques del GMUMA comparten características geométricas con aquellos desarrollados en un régimen extensional. En este tipo de régimen tectónico, la divergencia de los bloques ocasiona generalmente una reactivación y formación de fallas y fracturas acompañadas de

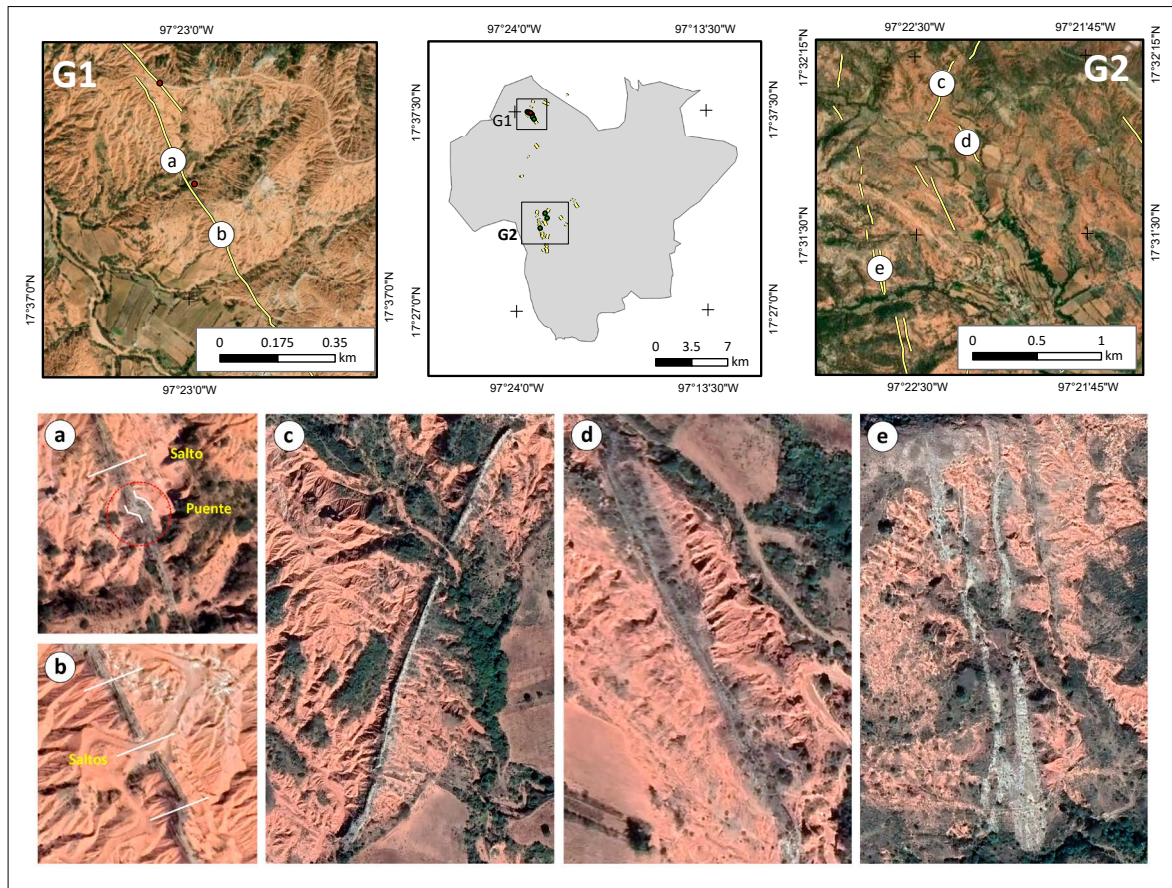


Figura 8. Morfologías de los diques presentes en el Geoparque Mixteca Alta UNESCO cortando la formación Yanhuitlán: a) dique escalonado con un puente que une dos segmentos rectos; b) ejemplo de diques escalonados con segmentos separados por saltos; c) ejemplo de dique sinuoso; d) ejemplo de dique planar o recto; e) sistema de diques anastomosados o trenzados. G1 y G2 se refieren a los diques Grupo 1 y Grupo 2 .

erupciones fisurales paralelas al campo de estrés regional, o la formación de diques (Hjartardóttir *et al.*, 2012). De hecho, como se presentó anteriormente en el apartado sobre el contexto geológico, los primeros trabajos han demostrado que las rocas plutónicas y volcánicas localizadas en el sur de México están relacionadas con varios eventos tectónicos conectados con interacciones de las Placas Tectónicas, resultado del desprendimiento y desplazamiento lateral al suroeste del Bloque Chortis, y la formación y evolución de la Placa del Caribe (Martiny *et al.*, 2000; Morán-Zenteno *et al.*, 1999). En el caso del noroeste del estado de Oaxaca, donde se encuentra nuestra zona de estudio,

el Cenozoico está caracterizado por una tectónica transtensional revelada por varias fallas de rumbo general N-S (Morán-Zenteno *et al.*, 2000) como las de Tamazulapam y Cieneguilla con las cuales los trazos de los diques estudiados comparten una dirección de rumbo similar (Figura 5). De acuerdo con Santamaría *et al.* (2008), ambas fallas tuvieron varias reactivaciones durante un evento tectónico extensional entre el Eoceno tardío y el Oligoceno temprano (35.9 Ma y 29 Ma), con movimientos transpresivos y transtensionales (Ferrari *et al.*, 2014; Morán-Zenteno *et al.*, 2018) controlados en parte por los límites tectónicos de los terrenos y las competencias mecánicas contrastantes entre ellos

(Morán-Zenteno *et al.*, 2000). Sin embargo, dado que la Falla Cieneguilla es la estructura regional más cercana a los diques, y aunado a que en la mayor parte de su extensión esta cuenta con un rumbo preferencial N-S, es factible establecer una relación entre la génesis de la falla y un magmatismo contemporáneo durante el cual el magma aprovechó las fracturas creadas para el emplazamiento de los diques, que en su mayoría poseen una orientación similar. Por otro lado, el carácter dendrítico a paralelo del drenaje de la región, y el hecho de que la distribución de los diques proyecta direcciones similares a dicho drenaje, muestra una evidencia de un control tectónico extensional en la región. Adicionalmente, se observó que muchos de los diques del Geoparque presentan segmentos escalonados con saltos de ~ 2 m o con segmentos unidos por puentes generados por el mismo material magmático (Figura 8a y b), mientras que algunos otros son trenzados (Figura 8e). Este tipo de desplazamiento lateral de porciones de diques indica un sistema de esfuerzos tectónicos post o syn-magmáticos. Por lo tanto, los diques con saltos marcados confirman los movimientos transpresivos y o transtensivos en el área de estudio indicados por Santamaria-Díaz *et al.* (2008). Estos diques con saltos demuestran también que estos movimientos ocurrieron poco después del emplazamiento de los diques (antes de que se enfriaran por completo) y, por consiguiente, sugiere un cambio temporal de la orientación del esfuerzo principal (Pollard *et al.*, 1982). Por otro lado, la presencia de diques con puentes y su relleno por el mismo material magmático sugieren una contemporaneidad entre el proceso magmático y la actividad tectónica.

A pesar de no contar con edades o con la composición geoquímica para los diferentes grupos de diques del área de estudio, se sabe que la edad de las rocas volcánicas que afloran en la región de Huajuapán de León y Tlaxiaco es de 34.8 ± 1.4 y 31.4 ± 0.8 Ma (Martiny *et al.*, 2000), mientras que las intrusiones magmáticas tienen edades aproximadas entre 40.5 ± 1.7 Ma (Martiny *et al.*, 2000) y 43.0 ± 1.2 (Cerca *et al.*, 2007), tras aplicar el método K-Ar en un lacolito andesítico que se encuentra en el centro de ambos grupos de diques (véase estrella

en la Figura 5a). Los diques estudiados, al igual que el lacolito, intrusieron a la Formación Yanhuítlán, de edad 49 ± 8 Ma (Ferrusquía-Villafranca, 1976), lo cual coincide con el principio de las relaciones de corte. Además, estas edades se corresponden con el patrón diacrónico del magmatismo en la Sierra Madre del Sur, asociado con el desplazamiento del Bloque Chortis descrito por Ferrari *et al.* (2014). Por lo tanto, la similitud de la orientación y la geometría de los diques-fractura y una edad similar en relación con otras estructuras sugieren que los diques pueden haber sido emplazados contemporáneamente, mientras que la variación en la dirección de algunos diques podría también confirmar diferentes eventos magmáticos relacionados con las distintas fases de reactivación de una u otra de las fallas Tamazulapán y Cieneguilla. Esta última hipótesis es plausible y puede explicar los diferentes grados y tipos de alteración presentados por los diques (Figura 7) ya que se espera que rocas de la misma composición y edad en un mismo contexto geológico y climático, como es el caso de los diques estudiados, se alteren de la misma forma.

CONCLUSIONES

El análisis de las imágenes satelitales de Google Earth revela tres grupos principales de diques en el geoparque, con trazas longitudinales orientados principalmente al NNW, aunque algunos se desvían hacia el NNE. Los diques están distribuidos a lo largo de una banda de dirección N-S de aproximadamente 4 km de longitud y tienen una disposición semi-paralela a paralela entre ellos, característica de los enjambres de diques regionales. Esta distribución indica que los diques del GMUMA se formaron durante un régimen tectónico extensional. La similitud en el rumbo de las trazas de los diques con aquellos de las fallas Cieneguilla y Tamazulapán, así como los reportes bibliográficos de reactivaciones tectónicas de dichas fallas sugieren un probable magmatismo contemporáneo a las reactivaciones y durante el cual el magma aprovechó las fisuras creadas para inyectarse.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto UNAM-DGAPA-PAPITT PE113820 denominado “Cartografía geológica y geomorfológica a escala 1:50,000 del Geoparque Mixteca Alta, Oaxaca como medio para la enseñanza y divulgación de las ciencias geológicas y geográficas”.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo resume el resultado de investigaciones realizadas por el primer autor para la obtención de su título de Licenciatura. Se agradece el apoyo de las autoridades de la Mixteca Alta por las facilidades y acompañamiento brindados durante los trabajos de campo. Y a los revisores anónimos por sus observaciones y sugerencias que permitieron mejorar la calidad del texto final de este trabajo.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Todos los autores declaran que no existe interés de ninguna índole que puedan influir y/o sesgar las aportaciones de este trabajo.

REFERENCIAS

- Acocella, V., y Neri, M. (2009). Dike propagation in volcanic edifices: overview and possible developments. *Tectonophysics*, 471(1-2), 67-77.
- Acocella, V., Porreca, M., Neri, M., Mattei, M., y Funiello, R. (2006). Fissure eruptions at Mount Vesuvius (Italy): insights on the shallow propagation of dikes at volcanoes. *Geology*, 34(8), 673-676.
- Acocella V, Neri M (2003) What makes flank eruptions? The 2001 Mount Etna eruption and its possible triggering mechanisms. *Bulletin of Volcanology*, 65, 517-529. <https://doi.org/10.1007/s00445-003-0280-3>.
- Buchan, K. L., y Ernst, R. E. (2019). Giant circumferential dyke swarms: catalogue and characteristics. *Dyke swarms of the world: A modern perspective*, 1-44.
- Buchan, K. L., y Ernst, R. E. (2018). A giant circumferential dyke swarm associated with the High Arctic Large Igneous Province (HALIP). *Gondwana Research*, 58, 39-57.
- Campa, M. F., y Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040-1051.
- Castillo-Reynoso, Ramírez V. E., Rivera Olguín E (2018). Tamazulapam E14-D25, Escala 1:50,000 Estado de Oaxaca. *Servicio Geológico Mexicano*.
- Centeno-García, E. (1988). *Evolución estructural de la falla de Oaxaca durante el Cenozoico: México, DF, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias*. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Cerca, M., Ferrari, L., López-Martínez, M., Martiny, B., y Iriondo, A. (2007). Late Cretaceous shortening and early Tertiary shearing in the central Sierra Madre del Sur, southern Mexico: Insights into the evolution of the Caribbean-North American plate interaction. *Tectonics*, 26(3).
- Chadwick Jr, W. W., y Dieterich, J. H. (1995). Mechanical modeling of circumferential and radial dike intrusion on Galapagos volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66(1-4), 37-52.
- Chadwick, W. W., y Howard, K. A. (1991). The pattern of circumferential and radial eruptive fissures on the volcanoes of Fernandina and Isabela islands, Galapagos. *Bulletin of Volcanology*, 53, 259-275.
- Daniels, K. A., Kavanagh, J. L., Menand, T., y Stephen, J. S. R. (2012). The shapes of dikes: Evidence for the influence of cooling and inelastic deformation. *Bulletin*, 124(7-8), 1102-1112. <https://doi.org/10.1130/b30537.1>
- Delaney, P. T., Pollard, D. D., Ziony, J. I., y McKee, E. H. (1986). Field relations between dikes and joints: Emplacement processes and paleostress analysis. *Journal of Geophysical Research*, 91(B5), 4920-4938.
- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Sánchez-Zavala, J. L., Macías-Romo, C., Ortega-Rivera, A., y Iriondo, A. (2005). La falla de Caltepec: raíces expuestas de una frontera tectónica de larga vida entre dos terrenos continentales del sur de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 83-109.
- Elías-Herrera, M., y Ortega-Gutiérrez, F. (2002). Caltepec fault zone: An Early Permian dextral transpressional boundary between the Proterozoic Oaxacan and Paleozoic Acatlán implications: *Tectonics*, 21(3), 4-1-4-18.
- Ferrari, L., Bergomi, M., Martini, M., Tunesi, A., Orozco-Esquivel, T., y López-Martínez, M. (2014). Late Cretaceous-Oligocene magmatic record in southern Mexico: The case for a temporal slab window along the evolving Caribbean-North America-Farallon triple boundary. *Tectonics*, 33(9), 1738-1765.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1976). Estudios geológico-paleontológicos en la región Mixteca PT 1 Geología

- del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca México. *Boletín del Instituto de Geología*, 97-155.
- Ferrusquía, I., Segura, L. R., y Rodrigues-Torres, T. (1970). Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca. *Excursión geológica México-Oaxaca: Sociedad Geológica Mexicana*, 97-119.
- Geshi, N., y Oikawa, T. (2016). Orientation of the eruption fissures controlled by a shallow magma chamber in Miyakejima. *Frontiers in Earth Science*, 4, 99. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00099>
- Gonnermann, H., y Taisne, B. (2015). Magma transport in dikes. En *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 215-224). Academic Press.
- Gudmundsson, A., y Marinoni, L. B. (1999). Geometry, emplacement, and arrest of dykes. En *Annales Tectonicae*, 13(1/2), 71-92.
- Hernández Santana, J. R., Ortiz Pérez, M. A., y Zamorano Orozco, J. J. (1995). Regionalización morfoestructural de la Sierra Madre del Sur, México. *Investigaciones geográficas*, 31, 45-67.
- Hjartardóttir, Á. R., Einarsson, P., Bramham, E., y Wright, T. J. (2012). The Krafla fissure swarm, Iceland, and its formation by rifting events. *Bulletin of Volcanology*, 74, 2139-2153.
- Hoek, J. D. (1991). A classification of dyke-fracture geometry with examples from Precambrian dyke swarms in the Vestfold Hills, Antarctica. *Geologische Rundschau*, 80, 233-248.
- Hyndman, D. W., y Alt, D. (1987). Radial dikes, laccoliths, and gelatin models. *The Journal of Geology*, 95(6), 763-774.
- Janosy, R. J. (1994). *Structural investigations of the early Paleozoic Victoria Land dike swarm in the Ferrar-Koettlitz Glacier region, southern Victoria Land, Antarctica*. Tesis de doctorado. Ohio State University.
- Keppie, J. D., y Morán-Zenteno, D. J. (2005). Tectonic implications of alternative Cenozoic reconstructions for southern Mexico and the Chortis Block. *International Geology Review*, 47(5), 473-491. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.5.473>
- Llambias, E. J., y Sato, A. M. (1990). El Batolito de Colangüil (29-31° S) cordillera frontal de Argentina: estructura y marco tectónico. *Andean Geology*, 17(1), 89-108.
- López-Ticha, D. (1985). Revisión de la estratigrafía y potencial petrolero de la Cuenca de Tlaxiaco. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 37(1).
- Mäkitie, H., Data, G., Isabirye, E., Mänttäri, I., Huhma, H., Klausen, M. B.,... y Virransalo, P. (2014). Petrology, geochronology and emplacement model of the giant 1.37 Ga arcuate Lake Victoria Dyke Swarm on the margin of a large igneous province in eastern Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 97, 273-296. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.04.034>
- Martiny, B., Martínez-Serrano, R. G., Morán-Zenteno, D. J., Macías-Romo, C., y Ayuso, R. A. (2000). Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the Oligocene magmatic rocks of western Oaxaca, southern Mexico. *Tectonophysics*, 318(1-4), 71-98. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00307-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00307-8)
- Montes de Oca-Villatoro, A. (2021) *Actualización cartográfica geológica- estructural de la porción Noroeste del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Carmen, Campeche.
- Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B. M., Solari, L., Mori, L., Luna-González, L., y González-Torres, E. A. (2018). Cenozoic magmatism of the Sierra Madre del Sur and tectonic truncation of the Pacific margin of southern Mexico. *Earth-Science Reviews*, 183, 85-114. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.010>
- Morán-Zenteno, D. J., Cerca, M., y Keppie, J. D. (2007). The Cenozoic tectonic and magmatic evolution of southwestern México: Advances and problems of interpretation. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(03\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(03))
- Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B., Tolson, G., Solís Pichardo, G., Alba Aldave, L., Hernández-Bernal, M. D. S., y Silva Romo, G. (2000) Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 27-58.
- Morán-Zenteno, D. J., Tolson, G., Martínez-Serrano, R. G., Martiny, B., Schaaf, P., Silva-Romo, G.,... y Solís-Pichardo, G. N. (1999). Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 12(6), 513-535. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(99\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(99)00036-X)
- Muller, O. H., y Pollard, D. D. (1977). The stress state near Spanish Peaks, Colorado determined from a dike pattern. *Pure and Applied Geophysics*, 115, 69-86. <https://doi.org/10.1007/BF01637098>
- Nakamura, K. (1977). Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation—principle and proposal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/BF01637099>
- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Silva-Romo, G., Eguiza-Castro, M. H., & Mendoza-Rosales, C. C. (2006). Latest Cretaceous to Miocene deformation events in the eastern Sierra Madre del Sur, Mexico, inferred from the geometry and age of major structures. *Geological Society of America Bulletin*, 118(1-2), 238-252.

- Ollier, C. D. (1971). Causes of spheroidal weathering. *Earth-Science Reviews*, 7(3), 127-141. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(71\)90005-55](https://doi.org/10.1016/0012-8252(71)90005-55)
- Ortega-González, J. V., y Lambarria-Silva, C. (1991). Informe geológico del prospecto Hoja Oaxaca, compilación geológica IGRS 1129: Petróleos Mexicanos (PEMEX). *Coordinación Divisional de Exploración, Gerencia de Exploración Región Sur, Subgerencia de Geología superficial y Geoquímica*, Reporte inédito.
- Palacio-Prieto, J. L. P., De Castro-Martínez, G. F., y González, E. M. R. (2019). Geosenderos en el Geoparque Mundial Unesco Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Cuadernos Geográficos*, 58(2), 111-125.
- Palacio-Prieto, J. L., Rosado-González, E., Ramírez-Miguel, X., Oropeza-Orozco, O., Cram-Heydrich, S., Ortiz-Pérez, M. A., ... y de Castro-Martínez, G. F. (2016). Erosion, culture and geoheritage; the case of Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca, México. *Geoheritage*, 8, 359-369. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0175-2>
- Peacock, D. C. P., Nixon, C. W., Rotevatn, A., Sanderson, D. J., & Zuluaga, L. F. (2016). Glossary of fault and other fracture networks. *Journal of Structural Geology*, 92, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.09.008>
- Pindell, J. L., & Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. *Geological Society, London, Special Publications*, 328(1), 1-55. <https://doi.org/10.1144/SP328>
- Poland, M. P., Moats, W. P., y Fink, J. H. (2008). A model for radial dike emplacement in composite cones based on observations from Summer Coon volcano, Colorado, USA. *Bulletin of Volcanology*, 70, 861-875.
- Pollard, D. D., Segall, P., y Delaney, P. T. (1982). Formation and interpretation of dilatant echelon cracks. *Geological Society of America Bulletin*, 93(12), 1291-1303.
- Rogers, R. D., Mann, P., y Emmet, P. A. (2007). Tectonic terranes of the Chortis block based on integration of regional aeromagnetic and geologic data.
- Santamaría-Díaz, A. (2009a). *Cartografía geológica de la región de Tamazulapam, Nochixtlán, Chalcatongo, Yosundua, en el sur de México*. Mexico: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Santamaría-Díaz, A. (2009b). Influencia de la falla de basamento no expuesta en la deformación Cenozoica: la falla de Caltepec en la región de Tamazulapam, en el sur de México. México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Santamaría-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S. A., y Nieto-Samaniego, Á. F. (2008). Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(3), 494-516.
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., y Speed, R. C. (1993). *Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico*. GSA Special Papers. <https://doi.org/10.1130/SPE278-p1>