

# Densidad, longitud y conectividad de fracturas en una zona de falla: el caso de la falla San Miguel de Allende

Alberto Vásquez-Serrano<sup>1\*</sup>, Maximiliano Valtierra-Portillo<sup>2</sup>,  
Elizabeth Rangel-Granados<sup>3</sup>, y Angel Francisco Nieto-Samaniego<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Procesos Litosféricos, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

<sup>2</sup> División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

<sup>3</sup> Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

<sup>4</sup> Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Blvd. Juriquilla 3001, Querétaro, Qro., C.P. 76230, México.

\* alberto-vasquez@ciencias.unam.mx

## RESUMEN

En este trabajo se analiza la cantidad, longitud, distribución y conectividad de las fracturas asociadas con la falla San Miguel de Allende (FSMA). Para dicho análisis, se estimaron parámetros como: densidad, dimensión de caja, dimensión de fragmentación y conectividad. Nuestros resultados muestran que dentro de la zona de daño de la FSMA ocurrieron al menos tres eventos de generación de fracturas. El primero (D1) está asociado con el evento orogénico del Cretácico Tardío-Paleógeno y formó fracturas subverticales rellenas de calcita, con orientaciones NE-SW y NW-SE. Los otros dos eventos (D2 y D3) se relacionan con la actividad Cenozoica de la FSMA en el Oligoceno-Mioceno, generando fracturas subverticales abiertas y rellenas de yeso y cuarzo amorfo, con orientaciones preferenciales NE-SW, NW-SE y N-S. Las fracturas en la zona de daño son principalmente extensionales, híbridas y de cizalla. Tienen una densidad promedio de 3000 fracturas/m<sup>2</sup>, una dimensión de caja de entre 1.31 y 1.84, y una dimensión de fragmentación de entre 1.86 y 3.81. Su conectividad supera el umbral de 2 conexiones por fractura (C=2) en el diagrama ternario de nodos I, Y, X, lo cual sugiere una buena conectividad entre las fracturas, mientras que el parámetro  $F_m$ , que caracteriza la arquitectura de la zona de falla y la permeabilidad, muestra que la zona de daño de la FSMA actúa como un conducto. Con base en nuestros resultados sugerimos que la reactivación de fracturas es un mecanismo efectivo de acomodo de la deformación y de aumento de la cantidad, conectividad y permeabilidad en la zona de las zonas de daño.

Palabras clave: conectividad; fracturas; zona de daño; falla San Miguel de Allende, México.

## ABSTRACT

We analyze the number, length, distribution, and fracture connectivity associated with the San Miguel de Allende fault (FSMA). For this analysis, we estimated parameters such as density, box dimension,

fragmentation dimension, and connectivity. Our results show that within the damage zone of the FSMA, three fracture generation events occurred. The first (D1) is associated with the Late Cretaceous-Paleogene orogenic event and formed subvertical calcite veins with NE-SW and NW-SE orientations. The other two events (D2 and D3) are related to the Cenozoic activity of the FSMA in the Oligocene-Miocene, generating subvertical open fractures, and gypsum and amorphous quartz veins, with NE-SW, NW-SE, and N-S preferential orientations. Fractures in the damage zone are mainly extensional, hybrid, and shear. They have an average density of 3000 fractures/m<sup>2</sup>, a box dimension between 1.31 and 1.84, and a fragmentation dimension between 1.86 and 3.81. Its connectivity exceeds the threshold of 2 connections per fracture (C=2) in the ternary diagram of nodes I, Y, and X, which suggests good connectivity between the fractures, while the parameter  $F_m$ , which characterizes the architecture of the fault zone and permeability, shows that the damage zone of the FSM acts as a conduit. Based on our results, we suggest that fracture reactivation is an effective mechanism for strain accommodation and increases the number, connectivity, and permeability of fractures in the damage zones.

Key words: Connectivity; fractures; damage zone; San Miguel de Allende fault; Mexico.

## INTRODUCCIÓN

En la corteza superior terrestre la deformación es principalmente frágil y está representada por fracturas y fallas de distinto tamaño, que cubren varios ordenes de escala (Ramsay, 1967; Cladouhos y Marret, 1996; Fossen, 2010). En el caso de las fallas, estas concentran la deformación mediante desplazamiento paralelo de sus paredes (Fossen, 2010). Asociado también con las fallas, sobre todo las de gran longitud (cientos de metros hasta cientos de kilómetros), es posible el desarrollo de una zona compleja con alta cantidad de fracturas llamada zona de daño (Fossen, 2010; Choi *et al.*, 2016). Las zonas de daño son un factor importante en una gran variedad de campos de la geología, como los

procesos de deformación asociados con fallamiento (Wilson *et al.*, 2003), la propagación de la rotura durante un sismo (Choi *et al.*, 2012) y la permeabilidad en la corteza (Caine *et al.*, 1996; Kim y Sanderson, 2010). Este último campo es fundamental en aplicaciones asociadas con el estudio de acuíferos, yacimiento de hidrocarburos y minerales, y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (Dockrill y Sipton, 2010; Rotevatn y Fossen, 2011; Ciloni *et al.*, 2015). A pesar de los avances en el conocimiento de las zonas de daño, aún se desconoce con detalle las variaciones en la cantidad, arreglo, distribución y conectividad de las fracturas, más aún si las fallas tienen una historia compleja de deformación, que implica varios episodios de actividad con distinta cinemática.

Uno de los sistemas de fallas más importantes de México es el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende, el cual ha tenido actividad en distintas etapas durante el Cenozoico (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2000; Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005). En la región de San Miguel de Allende, Guanajuato, este sistema está representado por fallas que tiene un rumbo preferencial N-S, y registran una cinemática de falla normal a partir del Mioceno (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). Una de las fallas más representativas en esta región es la falla San Miguel de Allende (FSMA), la cual tiene una longitud de más de 40 km y expone a rocas sedimentarias del Mesozoico en el bloque de piso (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). La excelente exposición de la zona de daño de la FSMA al norte de la ciudad de San Miguel de Allende brinda una excelente oportunidad para estudiar con detalle a las estructuras frágiles que cortan a las rocas sedimentarias del Mesozoico.

En este estudio se hace un análisis detallado de las fracturas que afectan al basamento mesozoico con propósito de conocer su cantidad, arreglo, distribución y las implicaciones en el complejo proceso de flujo de fluidos en zonas de daño dominadas por fracturas. Estas variables son analizadas a través de la aplicación de programas como FracPaQ (Healy *et al.*, 2017) y FracAnalysisV16 (Tolson, 2001). Con estos programas es posible obtener parámetros como: dimensión de caja, dimensión de fragmentación, orientación, conectividad y longitud de fracturas. En muchos trabajos, asociados principalmente con el conocimiento de la deformación frágil y la exploración de hidrocarburos y acuíferos, se ha probado con éxito la aplicación de estos parámetros (Nieto-Samaniego *et al.*, 2003, 2005b; Barton y LaPointe, 1995; Cladouhos y Marrett, 1996; Babadagli, 2002; Manzocchi, 2002; Vásquez-Serrano, 2013; Hooker *et al.*, 2015; Sanderson y Nixon, 2018; Laubach *et al.*, 2018; Rizzo *et al.*, 2017; Vásquez-Serrano *et al.*, 2019, 2021; Tarazona-Lizcano *et al.*, 2021; Liso *et al.*, 2022; Alcock *et al.*, 2023), lo cual hace atractivo su uso en el estudio detallado de las fracturas en zonas de daño de fallas kilométricas. Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser fundamentales en estudios futuros para conocer el papel de las fracturas en la generación de acuíferos en el basamento mesozoico y el potencial geotérmico de la región de San Miguel de Allende, Guanajuato.

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se ubica en la intersección de tres provincias fisiográficas: la Mesa Central, la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 1). Estas provincias tienen características geológicas particulares en cuanto a su estratigrafía e historia de deformación (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005a; Del Pilar-Martínez *et al.*, 2020; Cid-Villegas *et al.*, 2022; Nieto-Samaniego *et al.*, 2023). Dentro del sector sur de la Mesa Central existe vulcanismo relacionado con la Sierra Madre Occidental, el cual puede estar ligado a la extensión cortical producida por cambios en la velocidad de la subducción durante el Oligoceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999b; Cerca-Martínez *et al.*, 2000). Respecto a la Sierra Madre

Oriental, en su porción más occidental, está constituida por rocas sedimentarias del Jurásico-Cretácico que fueron deformadas durante la construcción del Orogéno Mexicano a finales del Cretácico Tardío (Eguiluz de Antuñano *et al.*, 2000; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Cuellar-Cárdenas *et al.*, 2012; Martini *et al.*, 2016; Fitz-Díaz *et al.*, 2018; Cid-Villegas *et al.*, 2022). Finalmente, la Faja Volcánica Transmexicana en el área de estudio se asocia con vulcanismo principalmente del Mioceno, el cual está ligado con la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana (Pérez-Venzor *et al.*, 1996; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Ferrari *et al.*, 2012).

## Estratigrafía en la región de San Miguel de Allende

En la región comprendida entre los estados de Guanajuato y Querétaro, en el centro de México, afloran rocas sedimentarias, vulcanosedimentarias y volcánicas cuya edad abarca del Cretácico al Cenozoico. Las rocas más viejas que afloran en esta región son rocas sedimentarias y vulcanosedimentarias del Cretácico Temprano, las cuales están constituidas por una intercalación de arenisca cuarzosa, grauvaca y lutita (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Cid-Villegas *et al.*, 2022). Sobreyaciendo a estas rocas se encuentra una sucesión de rocas calcáreas de estratificación delgada a media, intercalada con lutitas del Cretácico Tardío (Figura 1) (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Cid-Villegas *et al.*, 2022). Esta sucesión sedimentaria está cubierta de manera discordante por conglomerados (p. ej., Conglomerado Rojo de Guanajuato), andesitas (p. ej., Andesita El Cedro), riolitas (p. ej., Riolita Chichindaro) e ignimbritas del Eoceno-Oligoceno (Figura 1) (Echegoyén-Sánchez *et al.*, 1970; Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; Aranda-Gómez y MacDowell, 1998). En particular en los alrededores de la ciudad de San Miguel de Allende, una ignimbrita riolítica yace discordantemente sobre el basamento mesozoico, la cual ha sido correlacionada con otra ignimbrita que aflora en el sitio arqueológico de la Cañada de la Virgen y que se ha fechado en 28.6 Ma (Figura 1) (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996). Sobre estas rocas, en el bloque del bajo de la falla San Miguel de Allende hay un paquete de depósitos volcánicos y fluvio-lacustres del Oligoceno tardío hasta el Pleistoceno (Figura 1) (Carranza-Castañeda *et al.*, 1994; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999b; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). La sucesión continúa con derrames de lava y depósitos volcánicoclásticos de composición andesítica y dacítica que afloran al sur de la ciudad de San Miguel de Allende, los cuales se han fechado en 16.1 Ma (Pérez-Venzor *et al.*, 1996). Sobreyaciendo a este paquete volcánico, se encuentran los productos del volcán Palo Huérfano, fechados en 12.4 Ma (Pérez-Venzor *et al.*, 1996). Finalmente existen depósitos fluviales del Cuaternario que se ubican en las depresiones asociadas con fallas geológicas presentes en el área de estudio.

## Estructuras mayores en los alrededores de San Miguel de Allende

En la región de San Miguel de Allende, Guanajuato, existen tres grupos principales de fallas que tienen una orientación preferencial N-S, NE-SW y NW-SE (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999a; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Nieto-Samaniego *et al.*, 2012). Estas fallas cortan a rocas del Mesozoico y Cenozoico, y tiene una expresión bien definida en el relieve. Sumado a estas estructuras, en las rocas sedimentarias del Mesozoico existen una serie de pliegues y fallas inversas que tienen una dirección de transporte tectónico hacia el WSW, así como un conjunto de fracturas asociadas a dichas estructuras de acortamiento (Cid-Villegas *et al.*, 2022).

Una de las fallas con mayor longitud en el área de estudio es la falla San Miguel de Allende (FSMA), la cual tiene una orientación preferencial N-S y pertenece al sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). Su traza se ha dividido en tres segmentos: norte, centro y sur. Cada uno de los segmentos tiene distinto desnivel, siendo el segmento central el que tiene el desnivel

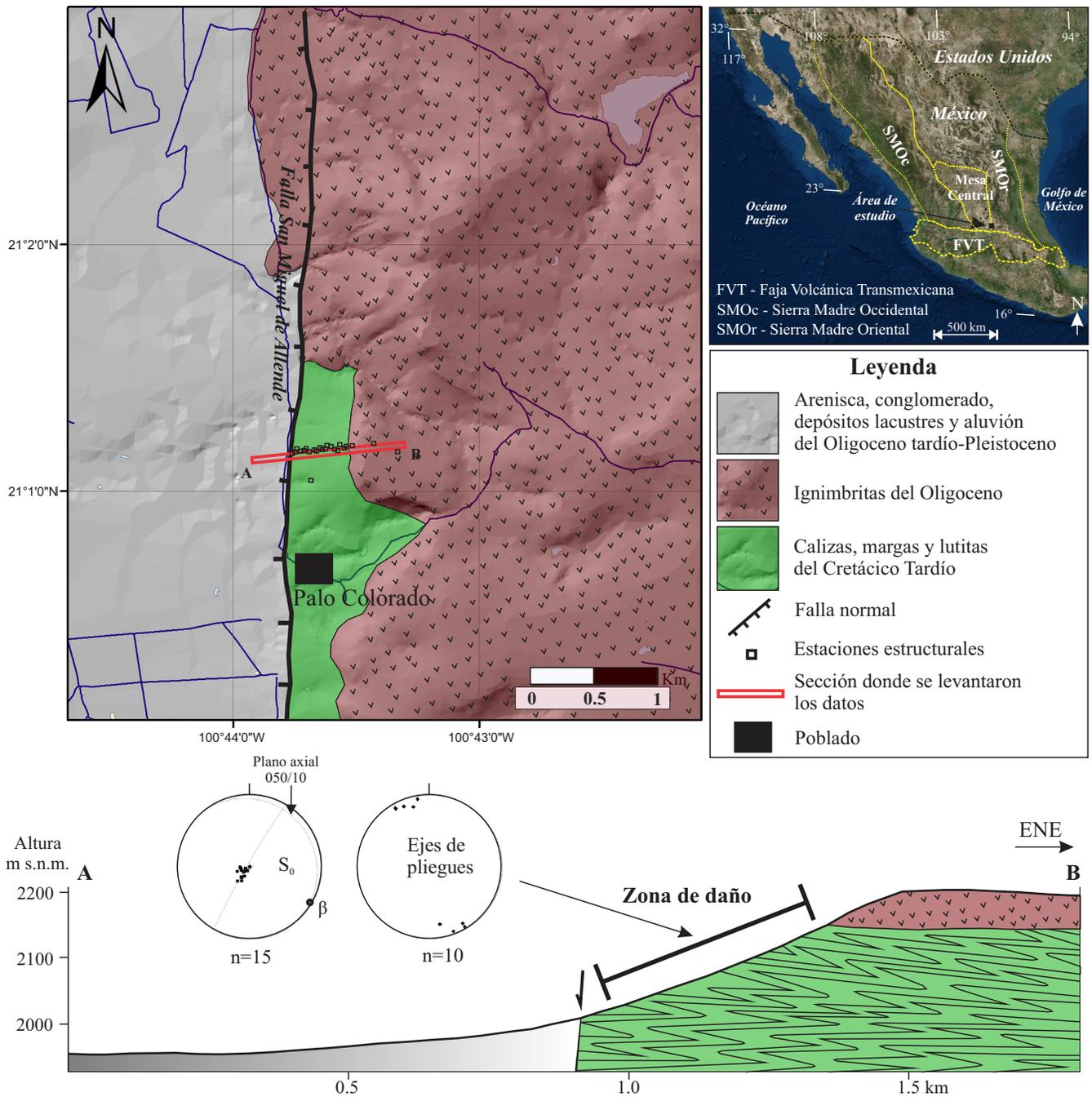


Figura 1. Localización del área de estudio y mapa geológico local, donde se observan las unidades de roca que son afectadas por la falla San Miguel de Allende en los alrededores del poblado Palo Colorado (10 km al norte de la ciudad de San Miguel de Allende). Así mismo se observa la orientación de la estratificación y los ejes de pliegues en las rocas calcáreas del Cretácico Tardío en el bloque de piso de la zona de daño.

más grande con 200 m (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001). La FSMA corta a rocas del Cretácico hasta el Pleistoceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; Carranza-Castañeda *et al.*, 1994), y se ha sugerido que es el límite de una cuenca fluvio-lacustre del Oligoceno-Pleistoceno ubicada hacia el oeste, en el bloque del bajo (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). En general, la FSMA tiene una cinemática normal, acomoda un desplazamiento vertical mínimo de 450 m en su parte central y ha tenido por lo menos dos fases de actividad durante el Oligoceno y el Mioceno medio (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). Asociado con el SFTSMA, también se ha identificado un conjunto de fallas ubicado hacia el oriente del área de

estudio en la región de la ciudad de Querétaro, donde las fallas tienen una orientación preferencial N-S y NNW-SSE. Algunas de estas fallas son: San Bartolomé, Tlacote, 5 de Febrero y Querétaro (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002).

Otro conjunto de fallas dentro del área de estudio tiene una orientación NE-SW con cinemática normal. Una de las fallas más importantes de este sistema se encuentra ubicada al sur de la ciudad de San Miguel de Allende y es conocida como falla Palo Huérfano. Esta falla corta a lavas del volcán Palo Huérfano de 12.1 Ma. Se ha propuesto que el sistema de fallas NE-SW ha tenido dos fases de

actividad, la primera durante el Oligoceno medio y la última en el Mioceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). Algunas de las fallas asociadas con este sistema en los alrededores de la ciudad de Querétaro (fuera del área de estudio) son: Ixtla, La Joya Huimilpan, Sur, Central y diques El Patol (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). Así mismo, se relacionan con la fosa tectónica de La Saucedal al sureste de la ciudad de Guanajuato (Del Río-Varela *et al.*, 2020).

Dentro de la región de la ciudad de San Miguel de Allende existe un grupo de fallas de longitudes menores a 10 km con orientación NW-SE que pertenecen al sistema de fallas del Bajío. Las fallas NW-SE cortan a rocas del Oligoceno-Mioceno al suroeste del área de estudio, y forman una depresión kilométrica conocida como la fosa del Bajío, la cual está controlada por la falla del Bajío. La actividad de este sistema se ha restringido al Oligoceno y Mioceno, siendo sincrónica con los sistemas de fallas N-S y NE-SW (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Botero-Santa *et al.*, 2015). Dicha actividad sincrónica ha sido explicada a través de una deformación triaxial en la Mesa Central (Del Pilar-Martínez *et al.*, 2020).

## METODOLOGÍA

La metodología de análisis de fracturas utilizada en este trabajo está dividida en dos partes. Por un lado, se tiene la adquisición de datos en el campo, donde el trabajo estuvo enfocado en la descripción y medición de aspectos relacionados con las fracturas como: cinemática, modos de fractura (fracturas extensionales, híbridas o de cizalla), orientación, relleno y relaciones de corte. Así mismo, se describieron las rocas que son afectadas por las fracturas midiendo la estratificación, el espesor de las capas y otras estructuras como planos axiales, ejes de pliegue, clivaje y fallas.

Nuestro trabajo consideró un transecto detallado dentro de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende (FSMA), dicho transecto

tuvo una orientación E-W iniciando en el núcleo de la falla hasta el contacto entre las rocas sedimentarias del Mesozoico y las ignimbritas oligocénicas (Figura 1). A lo largo del transecto se realizaron 23 estaciones estructurales, donde se tomaron fotografías de afloramientos en posición horizontal y/o subhorizontal que contenían fracturas. Las estaciones se eligieron con base en las recomendaciones de Vásquez-Serrano (2013), asociadas con la búsqueda de sitios que contengan una cantidad suficiente de fracturas, y que reflejen su arreglo y distribución. Las fotografías cubren una superficie de 0.9 m<sup>2</sup>, y están tomadas principalmente en las rocas sedimentarias del Mesozoico (Figura 2a). La selección de estas rocas fue debido principalmente a que registran las distintas actividades ocurridas en la FSMA. Las fotografías fueron tomadas con acercamiento para reducir la distorsión de la imagen y se buscaron superficies planas con pocas irregularidades.

La otra parte de la metodología se enfoca en el procesado de los datos obtenidos en el campo. Los datos de orientación de las estructuras medidas (estratificación, fallas, fracturas y pliegues) se procesaron en el programa Georient v9 (Holcombe, 2023). Con las fotografías tomadas, se elaboraron mapas de fracturas en el programa de dibujo Corel Draw X7™, considerando una apertura constante e igual para todas las fracturas (Figura 2b). Tanto el procesado de los datos de orientación como la elaboración de los mapas de fracturas también se pueden elaborar en otros programas como: Stereonet™ (orientación) o Illustrator™ (para mapas de fracturas). Los mapas elaborados en este trabajo fueron exportados como archivos vectoriales (\*.svg) e imágenes (\*.bmp) para su posterior análisis en los programas FracPaQ (Healy *et al.*, 2017) y FracAnalysisV16 (Tolson, 2001). A continuación, se detallan los parámetros obtenidos.

### Dimensión de caja

El análisis de la dimensión de caja se realizó mediante el programa FracAnalysisV16, el cual fue escrito por Tolson (2001) y es de libre uso. Este programa está basado en el método de conteo de cajas propuesto

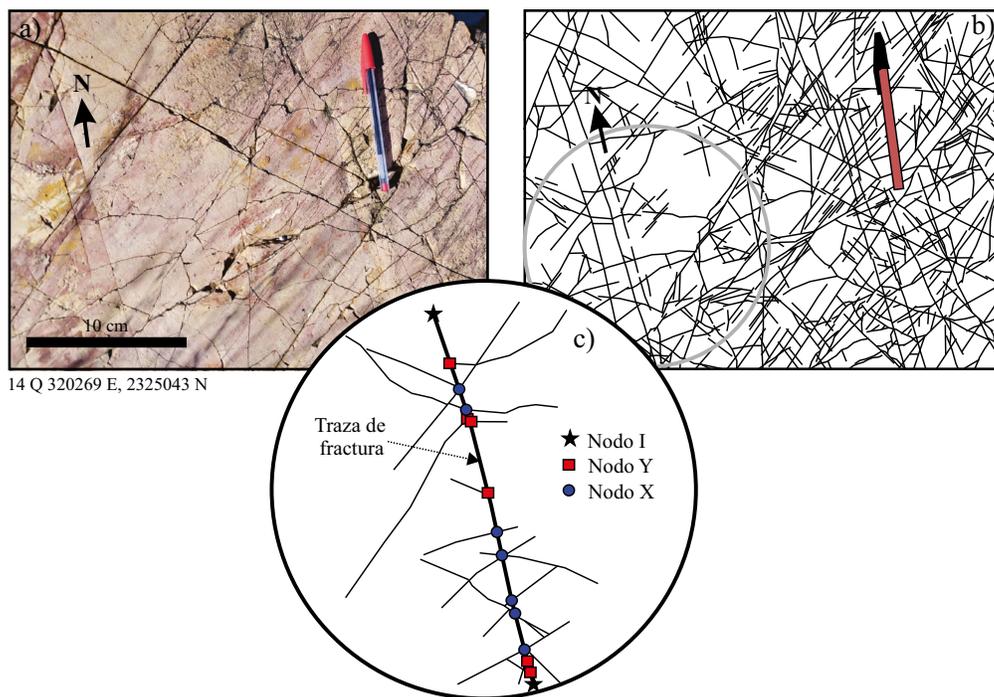


Figura 2. a) Ejemplo de fotografía tomada en la zona de daño de la falla San Miguel de Allende. b) Mapa elaborado en el programa de dibujo Corel Draw X7™. c) Definición de los nodos Y, X e I en una traza de fractura (modificado de Sanderson y Nixon, 2018).

por Barton y LaPointe (1995), en donde un mapa de fracturas se llena con una rejilla. En ésta, los cuadros de tamaño ( $r$ ) disminuyen progresivamente hasta cierto límite, para cada tamaño de cuadro se cuenta el número de cuadros ocupados por alguna fractura ( $N$ ). Si se hace un gráfico bilogarítmico del  $N$  vs.  $r$ , la pendiente de la línea que se ajusta a los datos será la dimensión fractal de caja ( $D_c$ ). El programa se caracteriza por trabajar con imágenes en formato de mapa de bits (\*.bmp) de cualquier color. El análisis inicia con la elección de la imagen; después se establece el tamaño de la caja grande y la caja chica, así como el número de iteraciones que va a realizar el programa. El tamaño de la caja pequeña estará determinado por el tamaño de la fractura más pequeña, mientras que la caja grande está asociada con la región sin fracturas más grande dentro de mapa analizado. En cuanto al número de iteraciones, es recomendable usar por lo menos 10 (Vásquez-Serrano, 2013). Finalmente se ejecuta el programa y se obtiene la dimensión fractal ( $D_c$ ) junto con la gráfica  $\log(N)$  vs.  $\log(r)$ . Los datos pueden ser guardados en una hoja de cálculo de Excel (\*.xls) para su uso posterior.

### Programa FracPaQ (Fracture Pattern Quantification)

FracPaQ es un paquete escrito en MATLAB para cuantificar patrones de fracturas en dos dimensiones a partir de mapas de fractura (Healy *et al.*, 2017). FracPaQ usa, como archivos de entrada, imágenes binarias que pueden tener una extensión \*.JPG/\*.JPEG o \*.TIF/\*.TIFF. Así mismo, puede usar archivos vectoriales (\*.svg) como los que se generan en programas de dibujo como Corel Draw™, y una lista de datos en un archivo de texto (\*.txt) con las coordenadas ( $x, y$ ) de los extremos de las trazas de las fracturas. Esta lista de datos se guarda en formato ASCII delimitado por tabulaciones. La información que proporciona el paquete está relacionada con las trazas individuales de las fracturas (orientación y longitud) y con el conjunto en general (conectividad, intensidad, densidad, entre otros). En este trabajo se consideran los siguientes parámetros obtenidos del paquete FracPaQ:

#### Diagramas de rosa

A partir de los mapas de fracturas, el paquete construye un diagrama de rosa a partir de la orientación de las trazas de fracturas y considerando que el eje "y" de la imagen es el eje N-S del mapa. Si es necesario, FracPaQ tiene la capacidad de hacer rotaciones para colocar de manera adecuada el eje N-S. La construcción del diagrama de rosa se hace a intervalos de 5°, 10°, 20° o 30°, según el usuario lo necesite. En el caso de este trabajo se usó un intervalo de 10°.

#### Distribución de longitudes

El paquete FracPaQ cuantifica la distribución de las longitudes de fracturas en un mapa mediante la elaboración de histogramas de longitud y gráficos bilogarítmicos de la longitud vs. la frecuencia acumulada. Los datos de longitud se comparan con tres funciones posibles: ley de potencia, log-normal y exponencial. Para conocer cuál de las tres funciones describe de mejor manera los datos de longitud, el paquete usa el estimador de máxima verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés) (Rizzo *et al.*, 2017). FracPaQ estima el mejor ajuste proporcionando a manera de porcentaje la función más cercana a 100 %, la cual será la que mejor describe los datos (Rizzo *et al.*, 2017; Healy *et al.*, 2017). En el caso de la función de ley de potencia, el paquete estima dos parámetros que caracterizan dicha función:  $\alpha$  (pendiente de la recta que dibujan los datos en un gráfico bilogarítmico de la longitud vs. su frecuencia acumulada) y  $x_{\min}$  (valor mínimo de los datos analizados). La variable  $\alpha$  representa el valor de la dimensión de fragmentación ( $D_f$ ) definida por Barton y LaPointe (1995). Para la función bilogarítmica, FracPaQ proporciona los parámetros de escala llamados  $\mu$  (media aritmética) y  $\sigma$  (desviación estándar). Finalmente,

para la función exponencial, se estima el parámetro  $\lambda$  asociado con la pendiente que los datos de longitud describen en los gráficos log-log de la longitud vs. su frecuencia acumulada (Rizzo *et al.*, 2017).

### Conectividad (I, Y, X)

La conectividad en sistemas naturales de fracturas es producto de una combinación de intersecciones (nodos X), separaciones (nodos Y) y extremos aislados (nodos I) (Figura 2c). Los nodos Y contribuyen de manera importante en la conectividad en los sistemas de fracturas y el incremento de su número está relacionado con una disminución de nodos aislados (I) (Odling, 1997; Manzocchi, 2002). El paquete FracPaQ construye un diagrama ternario con las proporciones de los tres tipos de nodos (X, Y e I). Dicho diagrama se basa en el esquema de Barton y Hsieh (1989), en el cual se gráfica la frecuencia relativa de los nodos como un punto. El diagrama ternario X-Y-I no solo caracteriza la conectividad de las fracturas, también define el número promedio de conexiones por fractura (C) (Manzocchi, 2002; Sanderson y Nixon, 2018). El diagrama generado con el paquete FracPaQ muestra dos líneas que representan valores críticos de conexiones por fractura. El valor  $C=2$  representa el límite donde inicia la generación de grupos de expansión de fracturas, mientras que el valor  $C=3.57$  es el valor usado comúnmente para simular la percolación de un sistema de fracturas con orientación aleatoria y de longitud fija (Balberg *et al.*, 1985). En general, un sistema de fracturas tendrá mejor conectividad cuando los puntos dentro del diagrama ternario se acercan más a la combinación de nodos X-Y (Sanderson y Nixon, 2018).

### Espesor de las capas y densidad de fracturas

En algunos trabajos se ha observado que el espesor de las capas controla en parte la cantidad de fracturas (Lamarche *et al.*, 2012; Fu *et al.*, 2022). Con un incremento en el espesor de las capas existe también un incremento en la densidad de las fracturas (número de fracturas por unidad de área), aunque no necesariamente de manera lineal (Lamarche *et al.*, 2012). Sin embargo, en otros trabajos se ha sugerido una relación contraria (Fu *et al.*, 2022), lo que muestra que aún no es clara la relación entre el espesor de las capas y la cantidad de fracturas. En este trabajo se explora la relación entre el espesor de las capas competentes, principalmente de calizas sin una fábrica penetrativa considerable (foliación), y parámetros como: densidad de fracturas, dimensión de caja, dimensión de fragmentación y conectividad. En el caso de la densidad de fracturas, esta variable se obtuvo haciendo una división del número de fracturas ( $N$ ) entre el área de la superficie de los mapas ( $m^2$ ). Nuestro análisis no considera la influencia de las capas incompetentes, ni de la fábrica (foliación) asociada con la generación de los pliegues en la deformación contractiva del Cretácico Tardío.

## RESULTADOS

### Fracturas en el segmento norte de la falla San Miguel de Allende

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias principalmente calcáreas del Cretácico (Cid-Villegas *et al.*, 2022), las cuales se encuentran dentro de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende (Figuras 1 y 3). Estas rocas son principalmente calizas de estratificación delgada a media (entre 5 y 100 cm), intercaladas con lutitas y margas. Esta sucesión de rocas registra un primer evento de deformación por acortamiento (D1) representado por pliegues isoclinales recumbentes con planos axiales subhorizontales inclinados hacia el ENE (Figura 1), y por fallas inversas que tienen inclinación hacia el ENE con transporte tectónico hacia el WSW (Figura 4). Asociado con estas estructuras también hay vetas de calcita paralelas y perpendiculares a los ejes de los pliegues (Figuras 1 y 4). Todas estas estructuras de acortamiento

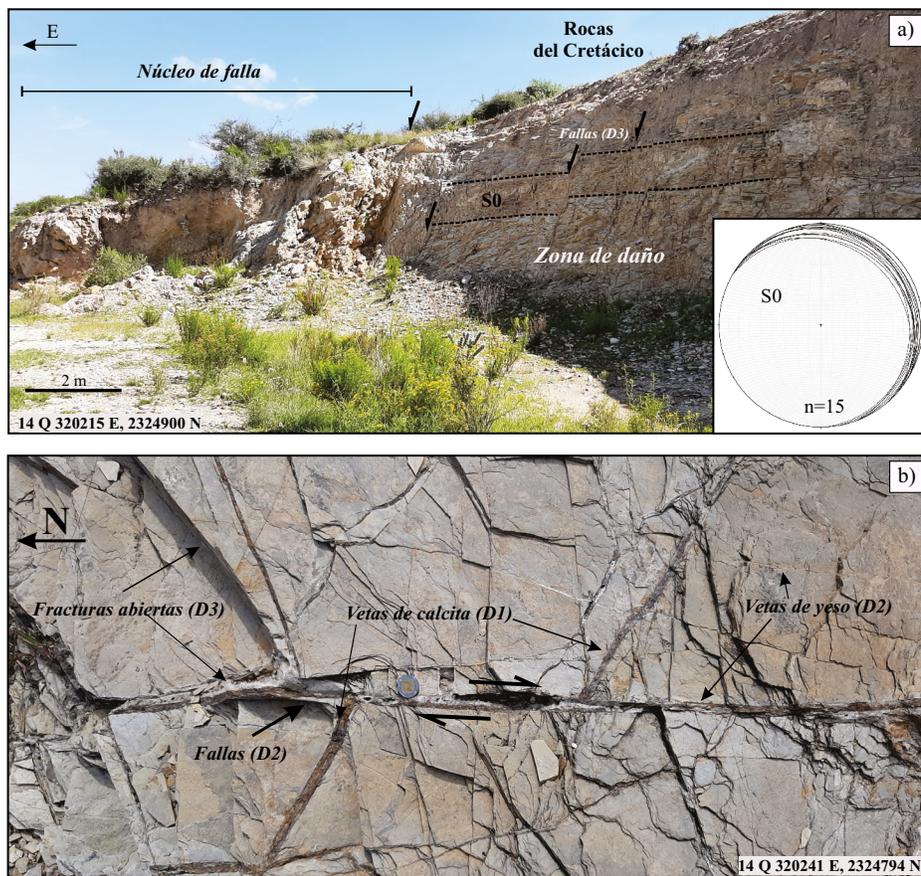


Figura 3. a) Afloramiento de la zona de falla a 2 km al norte del poblado Palo Colorado, donde es posible observar parte del núcleo y de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende. b) Fotografía tomada en una vista en planta de fracturas en la zona de daño. Nótese la cinemática de las fracturas de cizalla y su relación con el conjunto de las otras fracturas (extensionales e híbridas).

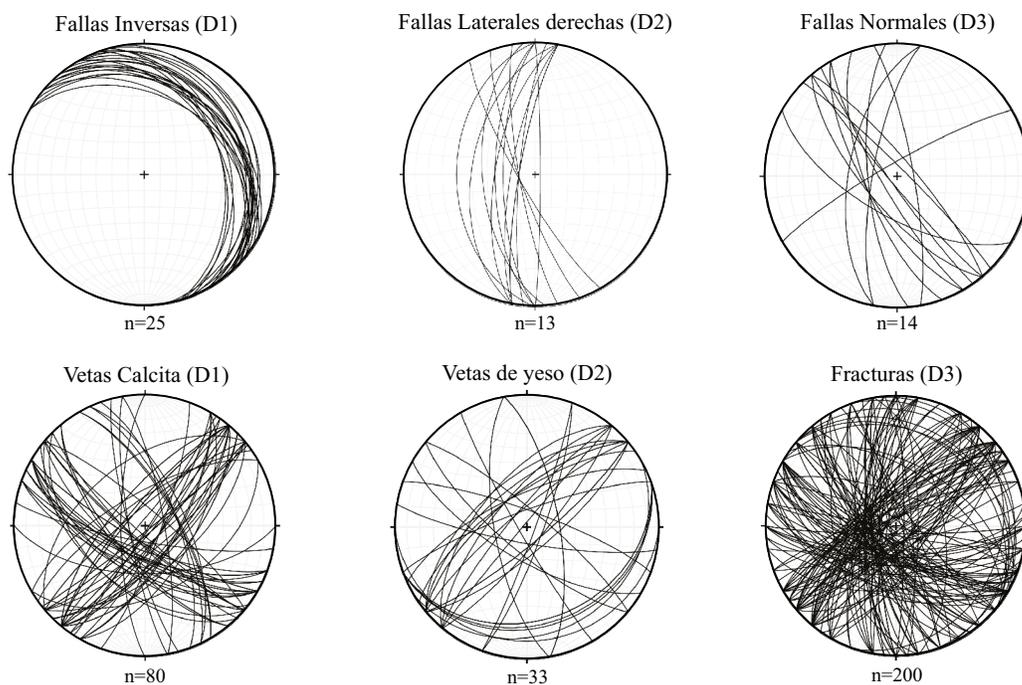


Figura 4. Redes de proyección esférica de fallas mesoscópicas (inversas, laterales y normales), vetas (calcita y yeso) y fracturas abiertas observadas en la zona de daño de la falla San Miguel de Allende.

son cortadas por una serie de fallas y fracturas que representan una deformación posterior asociada con la actividad de la falla San Miguel de Allende (D2). Las estructuras frágiles más antiguas relacionadas con dicha actividad son fracturas de cizalla subverticales con un rumbo ~N-S y cinemática lateral derecha (Figuras 3 y 4). Asociadas con estas estructuras existen una serie de vetas de yeso subverticales con una orientación preferencial NE-SW, aunque también hay con rumbos ENE-WSW y NW-SE (Figuras 3, 4 y 5). Estas vetas cortan a las fracturas rellenas de calcita o en algunos casos el yeso rellena vetas rotas de calcita.

El último evento de deformación frágil (D3) está registrado en las rocas del área de estudio por fallas normales que tiene un rumbo ~N-S, NE-SW y NW-SE (Figura 4). Ligado a estas estructuras se tiene un conjunto de fracturas subverticales abiertas que cuentan con las mismas orientaciones que las fallas (Figura 5).

En general, las fracturas dentro de la zona de daño son principalmente extensionales, híbridas y de cizalla. Las fracturas extensionales son subverticales, abiertas, y rellenas de yeso y calcita. En el caso de las fracturas rellenas de calcita, estas presentan dos orientaciones principales: NE-SW y NW-SE (Figura 4). El relleno en estas estructuras es masivo y no presentan una fábrica de crecimiento que muestre desplazamiento. En cuanto a las vetas de yeso, estas cortan a las vetas de calcita y tiene una orientación preferencial NE-SW, con algunas NNW-SSE (Figura 4). Las vetas de yeso NE-SW muestran en general una textura sintaxial. Por otro lado, las fracturas extensionales abiertas cortan a las vetas de yeso y calcita, y registran tres orientaciones preferenciales ~N-S, NE-SW y NW-SE (Figura 5). Estas estructuras son las que más frecuentemente afectan a las rocas calcáreas en la zona de daño.

Las fracturas de cizalla e híbridas son comunes en sitios cercanos al núcleo de la falla, y su orientación suele ser paralela a la falla principal (NNW-SSE) (Figura 3). En algunos sitios dentro de la zona de daño, las fracturas híbridas se observan rellenas de calcita teñida

de color café-rojizo y de cuarzo. Este relleno suele tener una textura con cristales escalenoédricos (del tipo “diente de perro”) o fibroso con crecimiento sintaxial. Finalmente, para las fracturas de cizalla, estas no registran apertura, y acomodan desplazamiento de 1 a 10 cm máximo, paralelo a sus paredes. Algunas de estas fracturas tienen un halo de color café-rojizo y blanquecino, sobre todo en la parte más próxima al núcleo de la falla.

#### Densidad, dimensión de caja y de fragmentación dentro de la zona de falla

En este trabajo se calculan algunos parámetros relacionados con la cantidad, distribución del tamaño y la manera en cómo las fracturas ocupan el espacio. Dichos parámetros se obtuvieron a partir de 23 mapas de fracturas, los cuales toman en cuenta a todas las fracturas antes mencionadas: extensionales (abiertas y rellenas), híbridas y de cizalla. La densidad de fracturas es una medida de la cantidad de fracturas por unidad de área; en nuestro estudio el valor más alto de este parámetro fue de 15222 fracturas/m<sup>2</sup>, mientras que el valor más bajo fue de 633 fracturas/m<sup>2</sup> (Tabla 1), y en promedio se tiene que para la zona de daño hay alrededor de 3000 fracturas/m<sup>2</sup>. No se observa una variación significativa de la densidad de fracturas con la distancia a partir del núcleo de la falla, solo existe un pico máximo en un sitio muy cercano a dicho núcleo, donde este parámetro alcanza su valor más alto (Figura 6b). En cuanto a la variación de la densidad con el espesor de las capas, no se observa un patrón claro, aunque algunas capas de menor espesor son las que registran los valores más bajos de la densidad de fracturas (Figura 7a). Sin embargo, también hay capas de poco espesor que tienen valores altos de este parámetro (Tabla 1).

La dimensión de caja es un parámetro que está relacionado con la cantidad de fracturas y su distribución en los mapas. Los valores de la dimensión de caja tienen un rango que va de 1.31 a 1.84 (Tabla 1). La variación de este parámetro dentro de la zona de daño muestra un

Tabla 1. Parámetros calculados para los mapas de fracturas de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende.

| Clave   | No. Fracturas | Área del mapa (m <sup>2</sup> ) | Densidad (núm./m <sup>2</sup> ) | Espesor de capas (cm) | Dimensión de caja (Dc) | Dimensión de fragmentación (Df) | Conectividad |      |      |
|---------|---------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|--------------|------|------|
|         |               |                                 |                                 |                       |                        |                                 | I            | Y    | X    |
| FSMA-01 | 492           | 0.09                            | 5467                            | 40                    | 1.80                   | 2.96                            | 661          | 326  | 215  |
| FSMA-02 | 396           | 0.09                            | 4400                            | 45                    | 1.69                   | 2.31                            | 514          | 179  | 192  |
| FSMA-03 | 223           | 0.09                            | 2478                            | 14                    | 1.52                   | 2.91                            | 288          | 97   | 157  |
| FSMA-04 | 133           | 0.09                            | 1478                            | 90                    | 1.47                   | 2.09                            | 145          | 108  | 91   |
| FSMA-05 | 520           | 0.09                            | 5778                            | 17                    | 1.71                   | 3.30                            | 695          | 327  | 284  |
| FSMA-06 | 334           | 0.09                            | 3711                            | 20                    | 1.65                   | 3.07                            | 438          | 190  | 235  |
| FSMA-07 | 71            | 0.09                            | 789                             | 9                     | 1.32                   | 2.29                            | 105          | 26   | 28   |
| FSMA-08 | 60            | 0.09                            | 667                             | 25                    | 1.31                   | 2.44                            | 91           | 20   | 19   |
| FSMA-09 | 538           | 0.09                            | 5978                            | 14                    | 1.72                   | 2.83                            | 669          | 349  | 326  |
| FSMA-10 | 133           | 0.09                            | 1478                            | 50                    | 1.48                   | 2.43                            | 149          | 74   | 84   |
| FSMA-11 | 183           | 0.09                            | 2033                            | 48                    | 1.61                   | 3.02                            | 261          | 97   | 73   |
| FSMA-12 | 219           | 0.09                            | 2433                            | 60                    | 1.62                   | 3.09                            | 313          | 115  | 186  |
| FSMA-13 | 318           | 0.09                            | 3533                            | 5                     | 1.60                   | 3.40                            | 415          | 194  | 230  |
| FSMA-14 | 71            | 0.09                            | 789                             | 22                    | 1.38                   | 2.65                            | 96           | 34   | 32   |
| FSMA-15 | 100           | 0.09                            | 1111                            | 25                    | 1.40                   | 2.75                            | 151          | 23   | 31   |
| FSMA-16 | 113           | 0.09                            | 1256                            | 20                    | 1.42                   | 2.25                            | 154          | 46   | 57   |
| FSMA-17 | 57            | 0.09                            | 633                             | 40                    | 1.33                   | 2.38                            | 74           | 20   | 23   |
| FSMA-18 | 213           | 0.09                            | 2367                            | 16                    | 1.53                   | 3.81                            | 287          | 136  | 91   |
| FSMA-19 | 209           | 0.09                            | 2322                            | 80                    | 1.59                   | 2.50                            | 323          | 58   | 114  |
| FSMA-20 | 1370          | 0.09                            | 15222                           | 25                    | 1.84                   | 3.32                            | 1703         | 1005 | 1542 |
| FSMA-21 | 218           | 0.09                            | 2422                            | 38                    | 1.68                   | 2.74                            | 247          | 291  | 345  |
| FSMA-22 | 159           | 0.09                            | 1767                            | 25                    | 1.53                   | 1.86                            | 202          | 84   | 157  |
| FSMA-23 | 83            | 0.09                            | 922                             | 10                    | 1.38                   | 2.21                            | 94           | 51   | 15   |

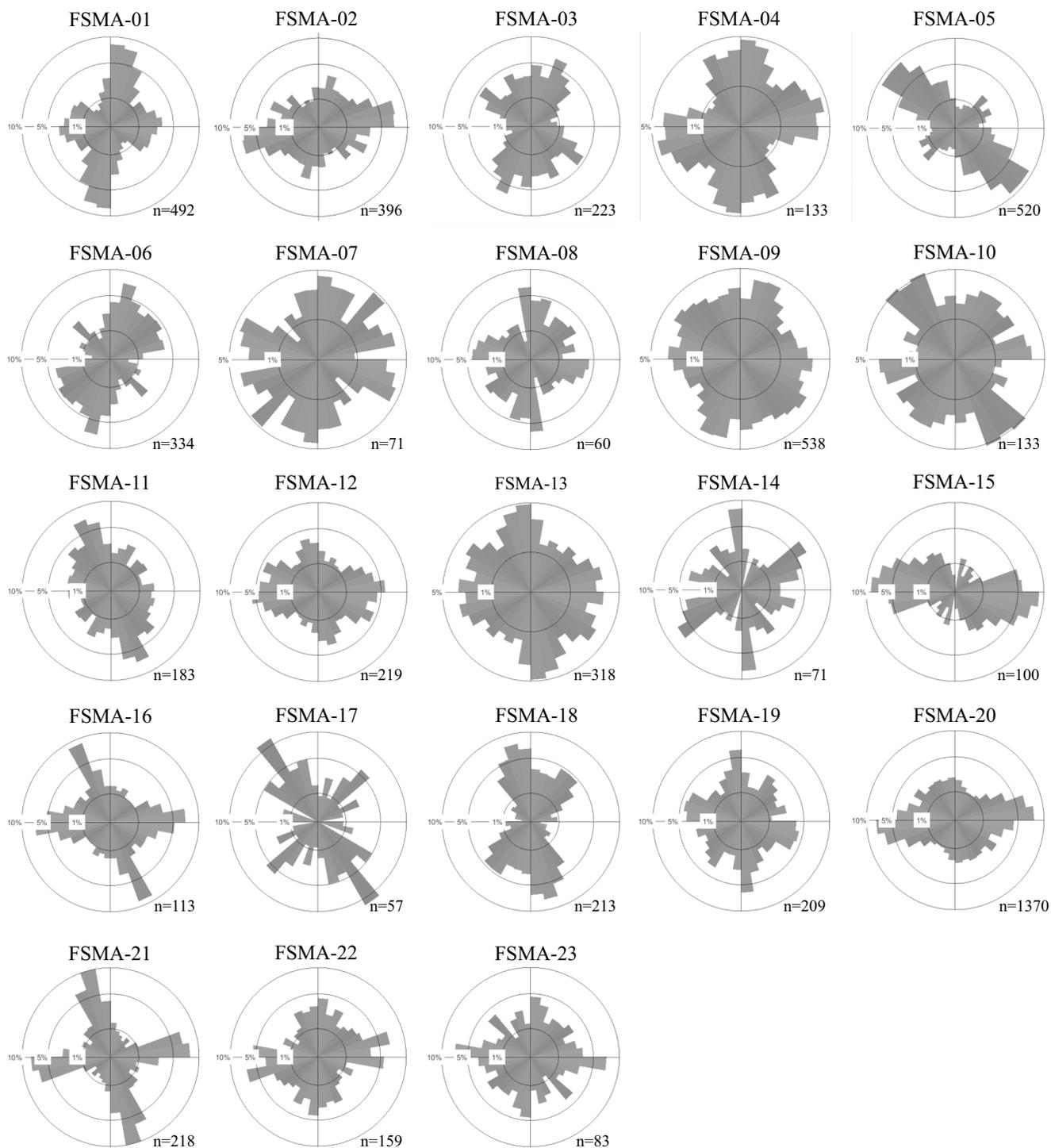


Figura 5. Diagramas de rosa de las 23 estaciones estructurales (obtenidas con el paquete FracPaQ) donde se elaboraron mapas de fracturas. Nótese las principales orientaciones de fracturas (NE-SW, NW-SE, N-S y E-W). FSMA-01 es la estación más alejada del núcleo de la falla y FTSM-23 es la estación más cercana al núcleo.

patrón constante, es decir no se observa una disminución o aumento con la distancia a partir del núcleo de la falla (Figura 6a), aunque el valor más alto se encuentra cerca del núcleo de la falla. Así mismo, el gráfico del espesor de las capas contra la dimensión de caja muestra que no hay variaciones significativas de dicho parámetro con la variación del espesor de las capas (Figura 7b).

Los análisis realizados en el paquete FracPaQ sugieren que la función de ley de potencia es la que mejor se ajusta a los datos de la

variación del tamaño de la longitud de las fracturas. Los porcentajes de ajuste que se obtuvieron para esta función tuvieron un rango de 98.1 a 99.7 %, mientras que las funciones lognormal y exponencial registraron porcentajes de 92.2 a 96.7 % y 87.9 a 97.8 %, respectivamente. El valor del exponente de la función de ley de potencia ( $\alpha$ ) está asociada con la dimensión de fragmentación, la cual se relaciona con la distribución del tamaño de las fracturas. Su valor depende de la cantidad de deformación frágil que acomodan las rocas y con la evolución de las

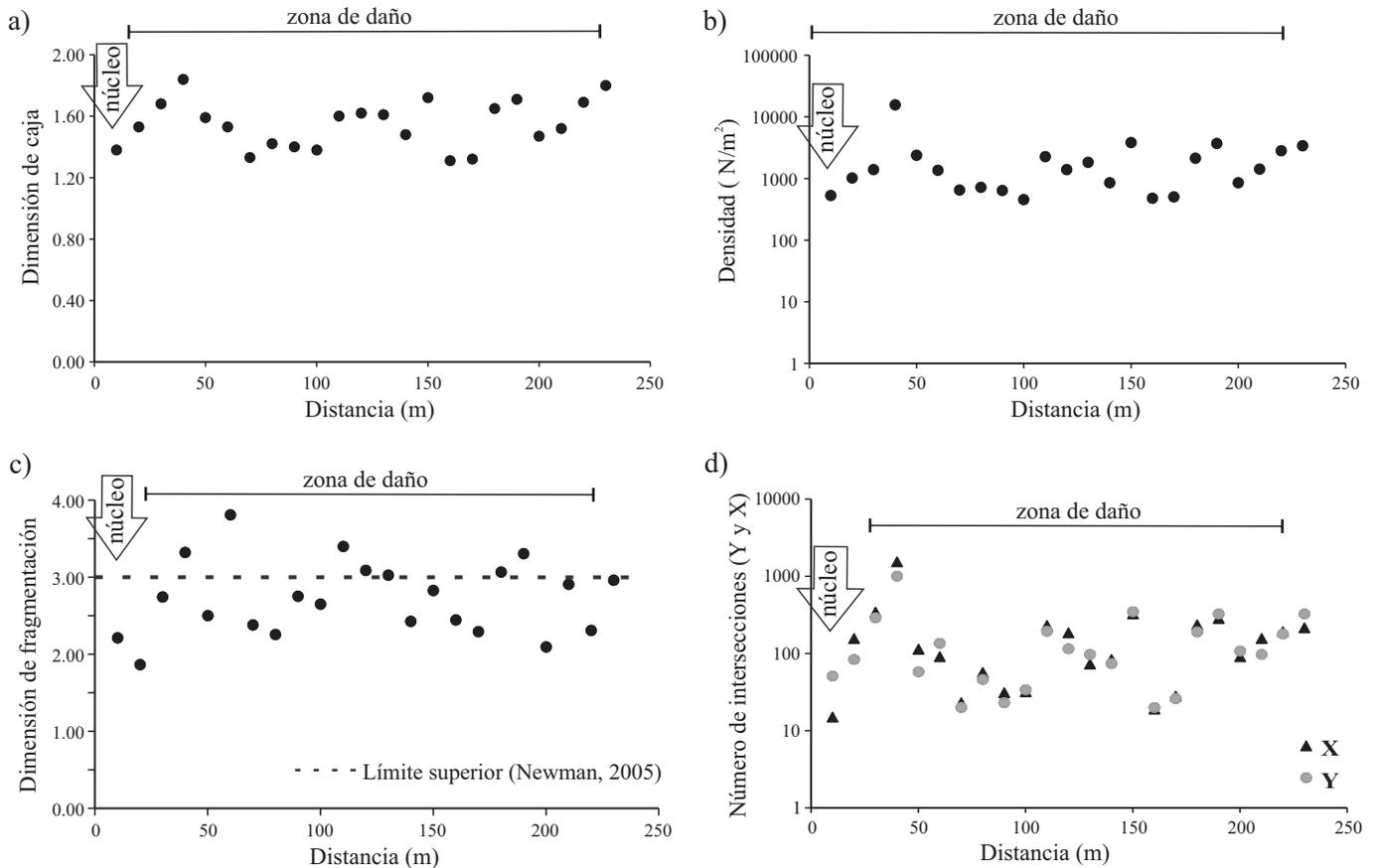


Figura 6. Variación de la dimensión de caja (a), densidad (b), dimensión de fragmentación (c) y número de intersecciones (nodos Y, X) (d) con la distancia a partir del núcleo de la falla San Miguel de Allende. Los patrones en los gráficos de dimensión de caja, fragmentación y densidad no muestran una variación clara con la distancia, aunque la dispersión es más grande en la dimensión de fragmentación. Un comportamiento similar a la densidad también se observa en el número de intersecciones. La línea punteada muestra el valor máximo de la dimensión de fragmentación en ejemplos naturales (Newman, 2005).

fracturas (Cladouhos y Marrett, 1996). En fracturas naturales se han reportado valores no mayores a 3 para este parámetro (Newman, 2005). Los valores obtenidos en este trabajo para la dimensión de fragmentación se encuentran entre 1.86 y 3.81 (Tabla 1), aunque la mayoría de los valores son inferiores a 3 (Figuras 6 y 7). Por otro lado, no existe una variación significativa de este parámetro con la distancia a partir del núcleo de la falla, aunque el rango es amplio (Figura 6c). Si se observa el gráfico de la variación de la dimensión de fragmentación con el espesor de las capas, es posible apreciar que los valores más altos de este parámetro están relacionados con algunos espesores pequeños de las capas (Figura 7c).

**Conectividad de fracturas**

La conectividad de las fracturas es una variable de primer orden en el conocimiento de la permeabilidad debida a las fracturas en las rocas (Manzocchi, 2002). En este trabajo se hizo un análisis de conectividad cuantificando la topología de las fracturas, a través del conteo de los nodos X, Y e I en el paquete FracPaQ. Los nodos más importantes son los Y-X debido a que conectan de manera más efectiva a las fracturas (Manzocchi, 2002; Sanderson y Nixon, 2018). El número de nodos Y-X dentro de la zona de daño tienen una gran variación (19 a más de 1500) sin mostrar un patrón claro con la distancia al núcleo de la falla, a pesar de que el número más alto se ubica cerca del núcleo (Figura 6d). En el caso de la relación de la conectividad con el espesor de las capas, los datos sugieren que en las capas de menor espesor (10–45 cm) existe una gran variación de la conectividad, mientras que para

espesores mayores a 50 cm se tiene un patrón más o menos constante con un número de nodos (Y y X) de entre 80 y 180 (Figura 7d, Tabla 1).

El diagrama ternario de X, Y e I sugiere que la mayoría de los mapas de fracturas se encuentra dentro de los campos de conectividad óptima ( $C=2$  y  $C=3.57$ ), con algunos mapas que están cerca del vértice donde dominan los nodos I (Figura 8). El mapa con mejor conectividad (núm. 23) es el que está más cerca del núcleo de la falla y que cuenta con la mayor cantidad de nodos X-Y (Figura 8).

**DISCUSIÓN**

**Formación y reactivación de fracturas en la falla San Miguel de Allende.**

Las rocas sedimentarias del Mesozoico en la zona de daño de la falla San Miguel de Allende están afectadas por un conjunto de fracturas (rellenas y abiertas) generadas por al menos tres eventos de deformación. El evento más antiguo de generación de fracturas (D1) está relacionado con la formación de pliegues y fallas inversas durante la formación del Orogéno Mexicano en el Cretácico Tardío-Paleógeno (Cuellar-Cárdenas *et al.*, 2012; Fitz-Díaz *et al.*, 2018). Las fracturas asociadas con este evento son principalmente extensionales e híbridas con relleno de calcita (Figuras 4 y 9); algunas de estas vetas de calcita se localizan en las charnelas de los pliegues y son paralelas a los ejes, mientras que otras son conjugadas y se relacionan con eje de acortamiento máximo del evento D1 (Figuras 4 y 9). El siguiente

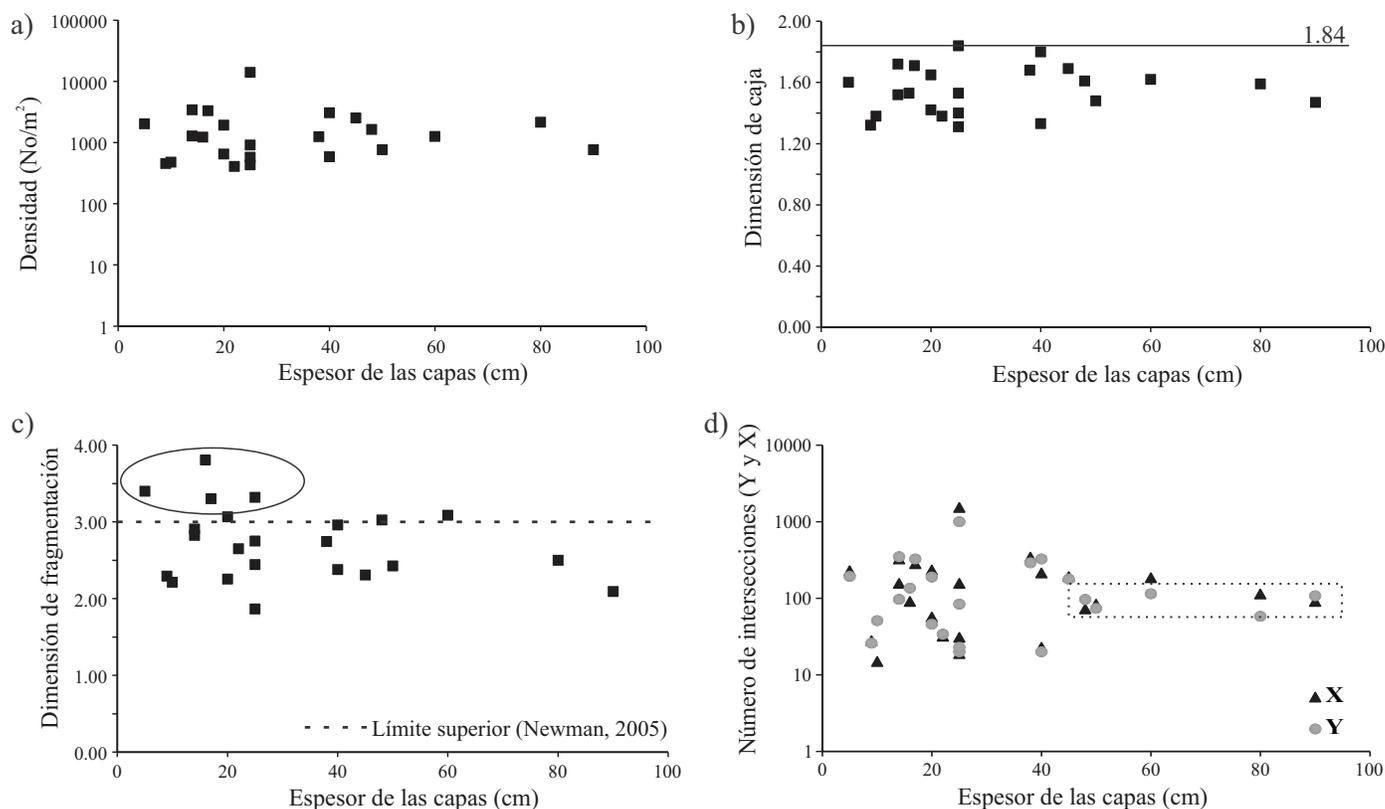


Figura 7. Variación de la densidad (a), dimensión de caja (b), dimensión de fragmentación (c) y número de intersecciones (nodos Y, X) (d) con el espesor de las capas. Tanto la densidad como la dimensión de caja siguen un patrón constante sin importar el espesor de las capas. En cuando a la dimensión de fragmentación se observa que la mayoría de los datos muestran valores inferiores a 3, teniendo algunas capas de menor espesor los valores mayores a 3, asociados con una mayor cantidad de fracturas pequeñas en comparación con las fracturas grandes. El gráfico de número de intersecciones (Y, X) muestra que en capas con espesores inferiores a 50 cm se tiene una dispersión notable, mientras que, a espesores mayores a 50 cm, el número de intersecciones (nodos Y, X) es más o menos constante alrededor de 100.

evento de generación de fracturas (D2) se relaciona con el primer evento de desplazamiento de la falla San Miguel de Allende como una falla lateral derecha (Figura 4). Las fracturas de este evento son principalmente de cizalla y extensionales, cortan a las fracturas rellenas de calcita del primer evento (D1) y se encuentran rellenas de yeso. La orientación preferencial de las fracturas extensionales corresponde a ejes de extensión NW-SE, lo cual es congruente con una cinemática de falla lateral derecha para la falla San Miguel de Allende y con el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende en la región de Taxco, Guerrero, para el Eoceno tardío-Oligoceno temprano (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). Bajo estas condiciones de deformación se reactivaron fracturas previas con orientación preferencial NE-SW y en menor proporción las que tienen una orientación NW-SE (Figura 10); evidencia de dicha reactivación es la rotura en las paredes de las vetas de calcita (contacto entre el relleno y la roca encajonante) pertenecientes a D1 y la precipitación de yeso en las fracturas reactivadas. Este fenómeno de rotura se debe al contraste de resistencia y rigidez entre el relleno de calcita y la roca huésped (Virgo *et al.*, 2014). Se ha observado que, en rocas calcáreas sin impurezas, el relleno de fracturas por calcita es un proceso efectivo de soldadura (Hooker *et al.*, 2014). Sin embargo, este no es el caso de las rocas en el área de estudio, ya que las rocas pueden tener algún contenido de arcillas (evidencia de ello es la presencia de una incipiente foliación en algunas capas de caliza) u otros elementos como clastos volcánicos y sedimentarios del tamaño de arena fina, lo cual aumenta el contraste mecánico y genera una soldadura débil (Nollet *et al.*, 2005; Virgo *et al.*, 2013). Con estas condiciones, las fracturas rellenas se pueden reactivar incluso si la orientación de estas

estructuras es muy desfavorable en relación con el campo de esfuerzos regional (Virgo *et al.*, 2014).

El último evento de generación de fracturas (D3) ocurrió durante el Mioceno Tardío, y está relacionado con la actividad de la falla San Miguel de Allende con una cinemática de tipo normal. De manera sincrónica dentro del área de estudio existe la actividad de fallas normales con rumbos NE-SW y NW-SE que también generaron fracturas (Figura 4) (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). Las fracturas del evento D3 son principalmente abiertas y de tipo extensional, híbridas y de cizalla. Aunque también hay presencia de fracturas rellenas de cuarzo amorfo en sitios cercanos al núcleo de la falla principal. Las vetas de cuarzo amorfo son más comunes en las ignimbritas del Oligoceno que sobreyacen discordantemente a las rocas calcáreas. Durante el evento D3 se reactivaron fracturas previas, generadas en los eventos D1 y D2 (Figura 10). En afloramientos dentro de la zona de daño, se observa la rotura de rellenos de calcita y de yeso, y en algunos casos la precipitación de un nuevo relleno de cuarzo amorfo. Al igual que la reactivación de las vetas de calcita durante el evento D2, en el evento D3 las vetas previas son reactivadas por el contraste mecánico entre el relleno y la roca encajonante, lo cual genera una anisotropía mecánica donde se concentra la deformación (Virgo *et al.*, 2014).

En los diagramas de reactivación de estructuras frágiles, elaborados a través del programa Reactiva (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2000; Tolson *et al.*, 2001), es posible observar la reactivación de fracturas previas bajo las nuevas condiciones de esfuerzo asociadas con los eventos D2 y D3 (Figura 10). La actividad de la falla San Miguel de

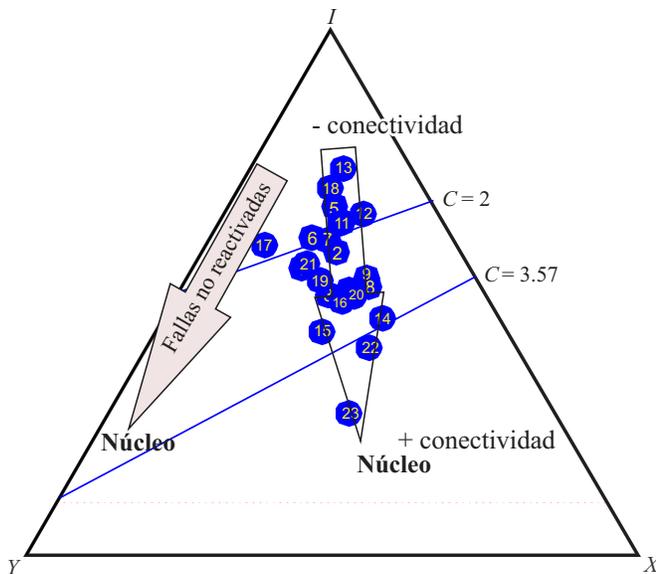


Figura 8. Diagrama ternario de conectividad  $I$ ,  $Y$ ,  $X$ , donde se muestran los datos obtenidos a partir de los mapas de fracturas. Los valores de  $C$  representan los umbrales de conexión entre fracturas descritos en la metodología. Las flechas indican la dirección hacia el núcleo de la falla, donde existe más conectividad. La flecha gris muestra el patrón de una falla sin reactivación, en donde dominan los nodos  $Y$  (Nixon *et al.*, 2020). Nótese que este patrón se aparta de lo observado en la zona de daño de la falla San Miguel de Allende, donde hay más nodos  $X$ . Así mismo, los números incluidos dentro de los símbolos hacen referencia a los sitios analizados (FSMA-01, 02... 23. Ver Figura 5). El número 01 se refiere al sitio más alejado del núcleo de la falla, mientras que el número 23 es el sitio más cercano al núcleo.

Allende con cinemática lateral derecha (D2) genera la reactivación de vetas de calcita (del evento D1) con una orientación preferencial NE-SW en condiciones donde los ejes de máxima extensión tienen una dirección NW-SE (Figura 10). Para el evento D3 (falla normal), se observa un eje de máxima extensión con dirección ENE-WSW y la reactivación de vetas de calcita (del evento D1) y de yeso (del evento D2) que tienen orientaciones preferenciales NE-SW y NW-SE (Figura 10).

### Variación de la densidad, distribución espacial y de tamaño de las fracturas

Las zonas de daño son una parte de las fallas donde la deformación esta acomodada principalmente a través de fracturas (extensionales, híbridas y de cizalla) (Caine *et al.*, 1996; Fossen, 2010; Peacock *et al.*, 2017). Su espesor depende de la cantidad de desplazamiento y de la longitud de las fallas (Fossen, 2010; Mayolle *et al.*, 2019). Una característica importante de las zonas de daño es la disminución progresiva del número de fracturas con la distancia a partir del núcleo de las fallas. Es conocido que el número de fracturas es mayor cerca del núcleo y disminuye al alejarse de éste de manera perpendicular al rumbo de la falla (Brogi, 2011; Fossen, 2010; Laubach *et al.*, 2018; Hansberry *et al.*, 2021). Este patrón en la distribución de fracturas dentro de las zonas de daño es alterado por la presencia de fracturas previas (Brogi, 2011). Se ha observado que el número de fracturas suele ser constate con el aumento de la distancia a partir del núcleo de la falla, como efecto de la presencia de fracturas previas (Brogi, 2011). Nuestro estudio es congruente con esta observación. Dentro de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende, la presencia de fracturas (vetas de calcita y yeso) asociadas con eventos previos de generación de fracturas (D1 y D2), es un factor relevante en el número de fracturas dentro de la zona de daño. El gráfico de la variación de la densidad de fracturas con

la distancia a partir del núcleo de la falla (Figura 6b) muestra que no hay cambios significativos en la densidad, aunque hay ciertos picos que se asocian con corredores (concentración de fracturas), típicos dentro de las zonas de daño (Martinelli *et al.*, 2020). El corredor que contiene el mayor número de fracturas se ubica cerca del núcleo de la falla y puede estar asociado con una mayor concentración de la deformación (Figura 6b). Otro factor que puede influir en la densidad de fracturas es el espesor de las capas. En algunos trabajos se ha observado que hay una variación positiva o negativa entre el espesor de las capas y el número de fracturas (Lamarche *et al.*, 2012; Fu *et al.*, 2022). Sin embargo, dentro de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende, no se observa una variación significativa de la densidad de fracturas con el espesor de las capas competentes (calizas). Sugerimos que esto se debe al efecto de la sobreposición y reactivación de fracturas en la zona de daño, debido a que en sitios donde se registra un solo evento de deformación con sistemas de fracturas menos complejos, si es posible observar un aumento o disminución de la cantidad de fracturas con la variación del espesor de las capas (Lamarche *et al.*, 2012; Fu *et al.*, 2022).

El patrón de densidad de fracturas es similar a lo que se observa con los valores de dimensión de caja y su variación con la distancia a partir del núcleo de la falla y con el espesor de las capas (Figuras 6 y 7). La dimensión de caja se relaciona de manera directa con la cantidad de fracturas como se ha sugerido en algunos trabajos (Barton y LaPointe, 1995; Vásquez-Serrano, 2013; Vásquez-Serrano *et al.*, 2021), lo cual es confirmado con lo observado en la zona de daño de la falla San Miguel de Allende (Figura 5).

El valor de la dimensión de fragmentación se relaciona con la distribución de la longitud de las fracturas (Barton y LaPointe, 1995). Valores altos de este parámetro sugieren una mayor cantidad de fracturas de longitud pequeña en relación con las fracturas de longitud grande. En algunos trabajos se ha sugerido que la dimensión de fragmentación puede ser una medida de la cantidad de deformación acomodada en las fracturas (Claudous y Marrett, 1996). Fracturas con mayor longitud son producto del crecimiento e interconexión de fracturas en un estado más evolucionado y por lo tanto acomodan más deformación (Claudouhos y Marrett, 1996). En estas condiciones el valor de la dimensión de fragmentación tenderá a ser pequeño, en comparación con las primeras etapas de fracturamiento (menos deformación), donde las fracturas son predominantemente de longitud pequeña. El valor más pequeño de la dimensión de fragmentación dentro de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende se encuentra en el sitio más cercano al núcleo de la falla (Figura 6), donde es mayor la cantidad de fracturas con mayor longitud. Los valores mayores a 3 para este parámetro están relacionados con espesores pequeños de algunas capas (Figura 7). La abundancia de fracturas pequeñas en algunas capas de menor espesor se puede deber a aspectos como la estratigrafía mecánica y el tipo de roca (McGinnis *et al.*, 2017; Fossen, 2010; Ferrill *et al.*, 2017). Capas de mayor competencia (calizas) pueden acomodarse de manera más afectiva la deformación frágil mediante la generación de fracturas. La longitud (tridimensional) de estas estructuras dependerá del espesor de las capas debido a que la estratificación es una anisotropía que limita su propagación (Fossen, 2010). Por otro lado, en las capas de menor competencia (margas y lutitas) la generación y desarrollo de fracturas es limitada, lo que podría inhibir el crecimiento de las fracturas (Fossen, 2010).

### Conectividad de fracturas y su relación con la permeabilidad en zonas de falla complejas.

Las fracturas son un parámetro importante para conocer si las fallas actúan como una barrera o como un conducto (Caine *et al.*, 1996; Newman y Mitra, 1994). La arquitectura de la zona de daño y la conectividad de fracturas son variables de primer orden en la

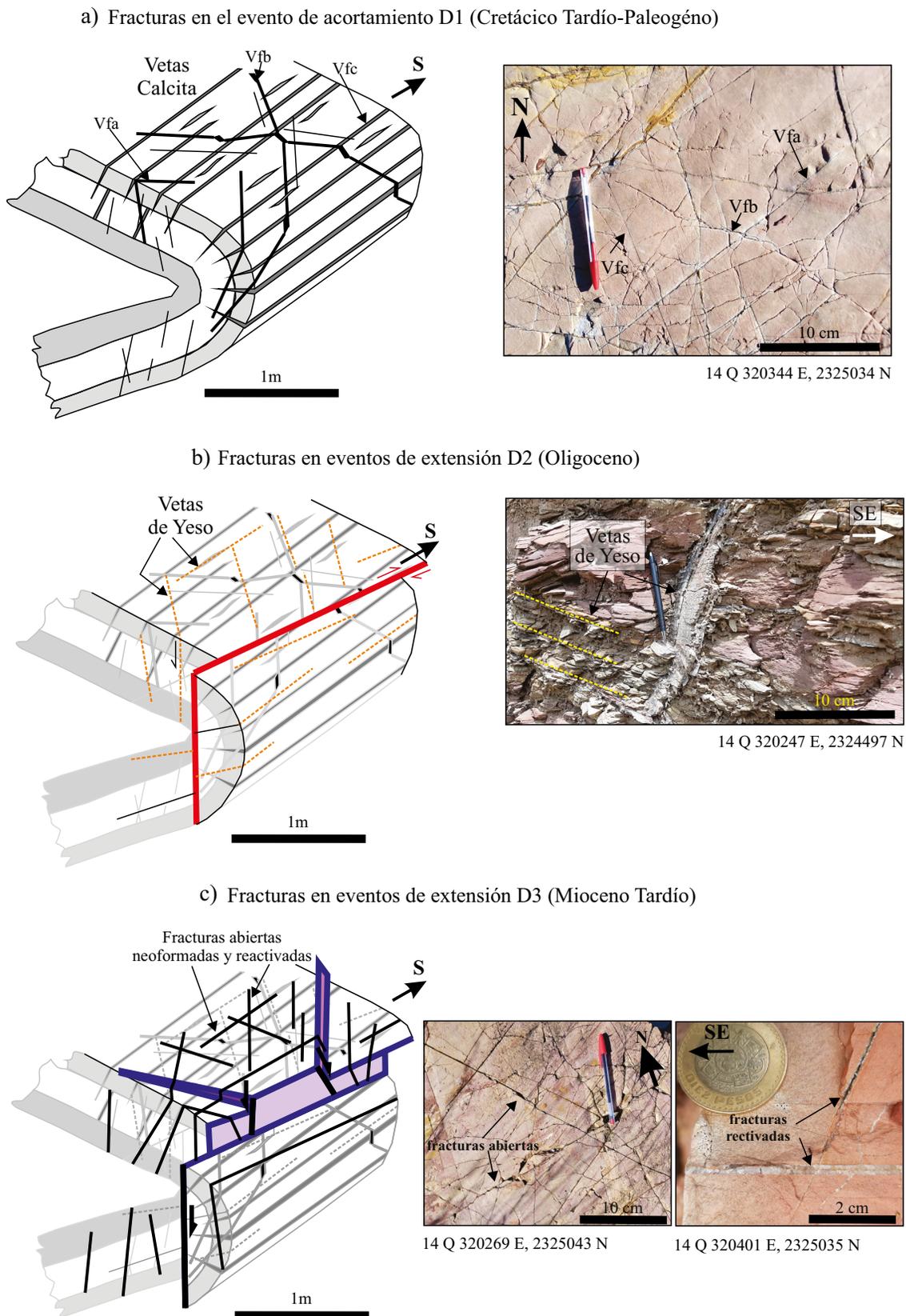


Figura 9. Esquema general de eventos de generación de fracturas dentro de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende. a) Generación de vetas de calcita relacionadas con la formación de pliegues y fallas inversas asociadas con acortamiento de la corteza durante el Cretácico Tardío-Paleogéno. b) Formación de vetas de yeso y fracturas abiertas en el primer periodo de actividad de la falla San Miguel de Allende como falla lateral durante el Oligoceno. c) Generación de fracturas abiertas en el Mioceno Tardío con la reactivación de la falla San Miguel de Allende como falla de tipo normal.

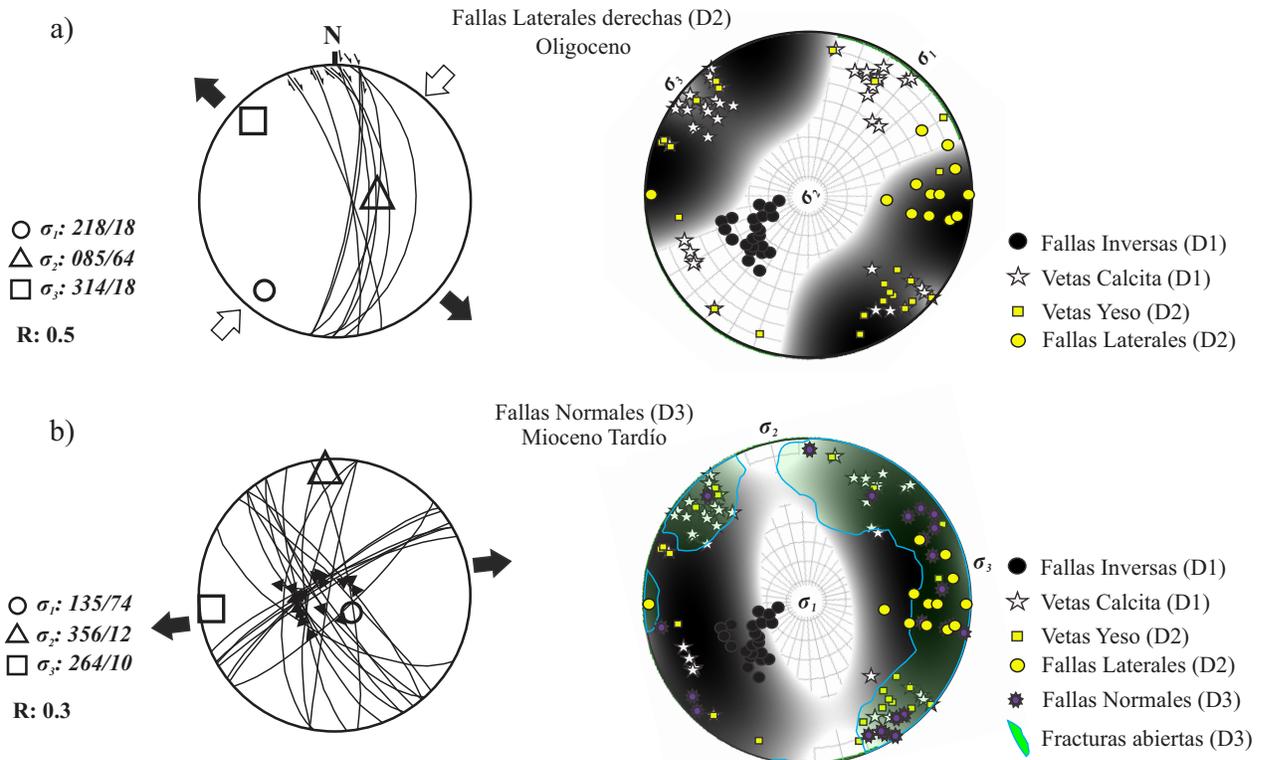


Figura 10. a) Orientación de los esfuerzos principales compresivos ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ) y dirección de los ejes principales de extensión, calculados con las fallas laterales derechas de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende. Así mismo, se muestra el diagrama de reactivación obtenido a partir del programa ReActiva (Tolson *et al.*, 2001), donde se observa que las vetas de calcita con orientación NE-SW son reactivadas durante la actividad de la falla San Miguel de Allende como falla lateral. b) Orientación de los esfuerzos principales y dirección de los ejes de extensión máximos, calculados con las fallas normales observadas en la zona de daño y que pertenecen a la última actividad de la falla en estudio. También se presenta el diagrama de reactivación para una falla normal, donde es posible observar la reactivación de vetas de calcita y yeso generadas en eventos previos de fracturamiento (D1 y D2). Es importante observar que fallas inversas y fallas laterales previas son susceptibles también de reactivarse. La dirección de los esfuerzos principales se obtuvo mediante el método de los diedros rectos en el software WinTensor (Delvaux y Sperner, 2003). Los parámetros usados en el programa ReActiva para los diagramas de reactivación fueron: coeficiente de fricción (roca intacta)=0.6; coeficiente de fricción (planos de anisotropía)=0.6; densidad ( $\text{km}/\text{m}^3$ )=2650; factor de presión de poros (roca intacta)=0.4; factor de presión de poros (plano de anisotropía)=0.4; profundidad (km)=5; cohesión (roca intacta, Mpa)=40; cohesión (planos de anisotropía, Mpa)=0; factor de forma de elipsoide (R): 0.5 y 0.3 para falla lateral y falla normal respectivamente. Estos valores se basan en los trabajos de Alaniz-Álvarez *et al.* (2002) y Botero-Santa *et al.* (2020).

generación de permeabilidad en las zonas de falla dentro de la corteza superior (Caine *et al.*, 1996; Manzocchi, 2002; Sanderson y Nixon, 2018). En un esquema de análisis de la conectividad usando la cantidad de nodos *I*, *Y*, y *X*; se ha observado que las fallas no reactivadas siguen un patrón descendente desde los nodos *I* hasta el vértice de los nodos *Y* en el diagrama triangular *I*, *Y*, *X* (Figura 8) (Nixon *et al.*, 2020; Hansberry *et al.*, 2021). Este patrón se pierde en el diagrama de conectividad obtenido para la zona de daño de la falla San Miguel de Allende, donde hay una mayor cantidad de nodos tipo *X*. Este efecto se lo da la presencia de estructuras previas (fracturas relacionadas con el evento de acortamiento D1) y la formación de nuevas fracturas por la reactivación de la falla San Miguel de Allende con distinta cinemática, siendo primero lateral (D2) y después normal (D3). Así mismo, es posible observar en el diagrama de conectividad que esta variable aumenta hacia el núcleo de la falla, alcanzando valores mayores al umbral de 3.57, el cual es usado como referencia para modelos de flujos de fluidos en medios fracturados con alta conectividad (Manzocchi, 2002). En general, la mayoría de las fracturas dentro de la zona de daño de la falla San Miguel de Allende caen por arriba de  $C=2$ , lo que sugiere una buena conectividad. Adicionalmente, la presencia de una mayor cantidad de nodos tipo *X* aumenta la conectividad efectiva de las fracturas dentro de la zona de daño (Manzocchi, 2002; Sanderson y Nixon, 2018).

Tomando en cuenta el espesor del núcleo de la falla San Miguel de Allende (30 m) y el espesor de la zona de daño (230 m), es posible establecer el valor del parámetro  $F_m$  ( $F_m = \text{espesor de la zona de daño} / \text{espesor total de la zona de falla}$ ), el cual caracteriza la arquitectura de la zona de falla y la permeabilidad de la estructura usando el modelo conceptual de Caine *et al.* (1996). El valor de  $F_m$  para la falla San Miguel de Allende es de 0.88. Dicho valor sugiere una combinación de deformación localizada y distribuida dentro de la zona de falla, lo cual se traduce en que la falla actúa en general como conducto en combinación con una barrera localizada en el núcleo (Caine *et al.*, 1996). Esto es congruente con lo observado en el campo, donde el núcleo está formado por una brecha silicificada y horizontes ricos en material fino (salbanda) que le dan un comportamiento impermeable, mientras que la zona de daño está constituida en su mayoría por fracturas abiertas (neoformadas y reactivadas), con lo cual se puede considerar permeable. Una evidencia importante de que la zona de daño actúa como conducto es la presencia de vetas (yeso y cuarzo amorfo) que reflejan el paso de fluidos contemporáneos con la actividad de la falla durante los eventos D2 (yeso) y D3 (cuarzo amorfo). Así mismo, es evidente que la presencia de fracturas preexistentes a la última actividad de la falla San Miguel de Allende aumenta la permeabilidad de la zona de daño. Este comportamiento también se ha observado en otros trabajos realizados en zonas de falla reactivadas (Petrie *et*

al., 2014), lo cual confirma lo propuesto en este trabajo. Otro aspecto importante que puede influir en la conectividad y permeabilidad de las zonas de daño es el hidrofracturamiento debido a la sobrepresión de fluido (Fossen, 2010). Sin embargo, en la zona de daño de la falla San Miguel de Allende no se observó evidencia de hidrofracturamiento, lo cual sugiere que este proceso no fue importante en la generación de fracturas y su conectividad.

## CONCLUSIONES

La falla San Miguel de Allende es una estructura kilométrica de larga vida que ha tenido actividad importante durante el Cenozoico, primero como falla lateral en el Oligoceno y después como falla normal en el Mioceno Tardío. Asociado con esta actividad se formaron una serie de fracturas dentro de la zona de daño. Estas fracturas son principalmente extensionales, híbridas y de cizalla. En las rocas calcáreas del Cretácico expuestas en el bloque de piso de la falla San Miguel de Allende es posible observar tres eventos de generación de fracturas, la primera relacionada con acortamiento de la corteza durante el Orógeno Mexicano, y las otras dos ligadas con su actividad cenozoica. La sobreposición de las distintas generaciones de fracturas, dentro de la zona de daño, homogeneizan la cantidad de fracturas y aumentan su conectividad. Así mismo, el mecanismo de reactivación de fracturas influye de manera sustancial en la distribución, cantidad y tamaño de las fracturas, y juega un papel importante en el acomodo de la deformación dentro de la zona de daño y aumenta la permeabilidad en las zonas de falla, actuando más como conductos que como barreras.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo en el trabajo de campo de Sofia Erandi Fernández Ortega y María Fernanda Sampayo Rodríguez, así mismo damos las gracias por el financiamiento para la realización de este trabajo por parte del proyecto PAPIIT IA100323 a cargo del Dr. Alberto Vásquez Serrano. Finalmente, agradecemos los comentarios valiosos de los revisores (Dr. Antonio Pola y anónimo) de este manuscrito.

## REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, Á.F., 2005, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 65-82.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Tolson, G., Nieto-Samaniego, Á.F., 2000, Assessing fault reactivation with the ReActiva Program: *Journal of Geoscience Education*, 48(5), 651-657, <https://doi.org/10.5408/1089-9995-48.5.651>.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Zaragoza- Reyes, M. A., Orozco-Esquivel, M. T., García-Ojeda, A. C., Vassallo, L. F., 2001, Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(2), 129-148.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Orozco-Esquivel, M.T., Vassallo, L.F., Xu, S., 2002, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: implicaciones en la deformación post-eocénica del centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 12-29.
- Alcock, T., Vinciguerra, S., Benson, P., 2023, Multiscale analysis of physical rock properties at Stromboli Volcano: what controls the frictional properties? *in* EGU General Assembly Conference Abstracts: Viena, Austria, European Geosciences Union, EGU-6624 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-6624>.
- Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F., 1998, Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District: *International Geology Review*, 40, 116-134.
- Babadagli, T., 2002, Scanline method to determine the fractal nature of 2-D fracture networks: *Mathematical geology*, 34, 647-670.
- Balberg, I., 1985, Universal percolation-threshold limits in the continuum: *Physical review B*, 31(6), 4053.
- Barton, C.C., Hsieh, P.A., 1989, Physical and hydrologic-flow properties of fractures, *in* 28<sup>th</sup> International Geological Congress Field Trip Guidebook, vol. 385, p. 36.
- Barton, C.C., La Pointe P.R., 1995, *Fractals in the Earth Sciences*: New York, Plenum Press, 265 pp.
- Botero-Santa, P.A., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, Á.F., López-Martínez, M., Levresse, G., Xu, S., Ortega-Obregón, C., 2015, Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 84-98.
- Botero-Santa, P.A., Xu, S., Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Álvarez, S.A., 2020, Efecto de las fracturas de enfriamiento en la formación de fallas normales: El ejemplo de Santa María Del Río, San Luis Potosí, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), e011019.
- Broggi, A., 2011, Variation in fracture patterns in damage zones related to strike-slip faults interfering with pre-existing fractures in sandstone (Calcione area, southern Tuscany, Italy): *Journal of Structural Geology*, 33(4), 644-661.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure: *Geology*, 24(11), 1025-1028.
- Carranza-Castañeda, O., Petersen, M.S., Miller, W.E., 1994, Preliminary investigation of the Geology of northern San Miguel de Allende area, northeastern Guanajuato, Mexico: *Brigham Young University, Geological Studies*, 40, 1-9.
- Cerca-Martínez, L.M., Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., 2000, The geologic evolution of the southern Sierra de Guanajuato, Mexico: a documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, 42(2), 131-151.
- Choi, J.H., Jin, K., Enkhbayar, D., Davvasambuu, B., Bayasgalan, A., Kim, Y.S., 2012, Rupture propagation inferred from damage patterns, slip distribution, and segmentation of the 1957 M<sub>W</sub>8.1 Gobi-Altay earthquake rupture along the Bogd fault, Mongolia: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B12).
- Choi, J.H., Edwards, P., Ko, K., Kim, Y.S., 2016, Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach: *Earth-Science Reviews*, 152, 70-87.
- Cid-Villegas, G., Alaniz-Álvarez, S.A., Xu, S., Vásquez-Serrano, A., Juárez-Arriaga, E., 2022, Deformación del Cretácico tardío en el límite de la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental, centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(2).
- Cilona, A., Aydin, A., Johnson, N.M., 2015, Permeability of a fault zone crosscutting a sequence of sandstones and shales and its influence on hydraulic head distribution in the Chatsworth Formation, California, USA: *Hydrogeology Journal*, 2(23), 405-419.
- Cladouhos, T.T., Marrett, R., 1996, Are fault growth and linkage models consistent with power-law distributions of fault lengths?: *Journal of Structural Geology*, 18(2-3), 281-293.
- Cuéllar-Cárdenas, M.A., Nieto-Samaniego, Á.F., Levresse, G., Alaniz-Álvarez, S.A., Solari, L., Ortega-Obregón, C., López-Martínez, M., 2012, Límites temporales de la deformación por acortamiento Laramide en el centro de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 179-203.
- Del Pilar-Martínez, A., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Ángeles-Moreno, E., 2020, Geology of the southern Mesa Central of Mexico: recording the beginning of a polymodal fault system: *Journal of Maps*, 16(2), 199-211.
- Del Río Varela, P., Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Ángeles-Moreno, E., de Jesús Escalona-Alcázar, F., Del Pilar-Martínez, A., 2020, Geología y estructura de las sierras de Guanajuato y Codornices, Mesa Central, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), 1-20.
- Delvaux, D., Sperner, B., 2003, Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program, *in* Nieuwland, D.A. (ed.), *New insights into structural interpretation and modelling*: Geological Society, London, Special Publications 212, 75-100.

- Dockrill, B., Shipton, Z.K., 2010, Structural controls on leakage from a natural CO<sub>2</sub> geologic storage site: Central Utah, USA: *Journal of Structural Geology*, 32(11), 1768-1782.
- Echegoyén-Sánchez, J., Romero-Martínez, S., Velázquez-Silva, S., 1970, Geología y yacimientos minerales de la parte central del distrito minero de Guanajuato: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín 75, México, D.F., 36 pp.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marrett, R., 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 1-26.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012, The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: *Tectonophysics*, 522, 122-149.
- Ferrill, D.A., Morris, A.P., McGinnis, R.N., Smart, K.J., Wigginton, S.S., Hill, N.J., 2017, Mechanical stratigraphy and normal faulting: *Journal of Structural Geology*, 94, 275-302.
- Fitz-Diaz, E., Lawton, T.F., Juárez-Arriaga, E., Chávez-Cabello, G., 2018, The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics: *Earth-Science Reviews*, 183, 56-84.
- Fossen, H., 2010, *Structural Geology*: New York, Cambridge University Press, first ed., 463 pp.
- Fu, X., Gong, L., Su, X., Liu, B., Gao, S., Yang, J., Qin, X., 2022, Characteristics and Controlling Factors of Natural Fractures in Continental Tight-Oil Shale Reservoir: *Minerals*, 12(12), 1616.
- Hansberry, R.L., King, R.C., Holford, S.P., Hand, M., Debenham, N., 2021, How wide is a fault damage zone? Using network topology to examine how fault-damage zones overprint regional fracture networks: *Journal of Structural Geology*, 146, 104327.
- Healy, D., Rizzo, R.E., Cornwell, D.G., Farrell, N.J., Watkins, H., Timms, N.E., Gomez-Rivas E., Smith, M., 2017, FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns: *Journal of Structural Geology*, 95, 1-16.
- Holcombe, R., 2023, GEOrient, structural geology and mapping software (programa informático), Holcombe Coughlin and Associates: Australia, disponible en <<https://www.holcombe.net.au/software/index.html>>
- Hooker, J.N., Laubach, S.E., Marrett, R., 2014, A universal power-law scaling exponent for fracture apertures in sandstones: *Bulletin*, 126(9-10), 1340-1362.
- Hooker, J.N., Larson, T.E., Eakin, A., Laubach, S.E., Eichhubl, P., Fall, A., Marrett, R., 2015, Fracturing and fluid flow in a sub-décollement sandstone; or, a leak in the basement: *Journal of the Geological Society*, 172(4), 428-442.
- Kim, Y.S., Sanderson, D.J., 2010, Inferred fluid flow through fault damage zones based on the observation of stalactites in carbonate caves: *Journal of Structural Geology*, 32(9), 1305-1316.
- Lamarche, J., Lavenue, A.P., Gauthier, B.D., Guglielmi, Y., Jayet, O., 2012, Relationships between fracture patterns, geodynamics and mechanical stratigraphy in Carbonates (South-East Basin, France): *Tectonophysics*, 581, 231-245.
- Laubach, S.E., Lamarche, J., Gauthier, B.D., Dunne, W.M., Sanderson, D.J., 2018, Spatial arrangement of faults and opening-mode fractures: *Journal of Structural Geology*, 108, 2-15.
- Liso, I.S., Cherubini, C., Parise, M., Rizzo, R.E. 2022, Improvement of structural data by means of FracPaQ software to implement groundwater flow model in karst settings, *en* EGU General Assembly Conference Abstracts: Viena, Austria, pp. EGU22-1913.
- Manzocchi, T., 2002, The connectivity of two-dimensional networks of spatially correlated fractures: *Water Resources Research*, 38(9), 1-1.
- Martinelli, M., Bistacchi, A., Mittempergher, S., Bonneau, F., Balsamo, F., Caumon, G., Meda, M., 2020, Damage zone characterization combining scan-line and scan-area analysis on a km-scale Digital Outcrop Model: The Qala Fault (Gozo): *Journal of Structural Geology*, 140, 104144.
- Martini, M., Solé, J., Garduño-Martínez, D.E., Puig, T.P., Omaña, L., 2016, Evidence for two Cretaceous superposed orogenic belts in central Mexico based on paleontologic and K-Ar geochronologic data from the Sierra de los Cuarzos: *Geosphere*, 12(4), 1257-1270.
- Mayolle, S., Soliva, R., Caniven, Y., Wibberley, C., Ballas, G., Milesi, G., Dominguez, S., 2019, Scaling of fault damage zones in carbonate rocks: *Journal of Structural Geology*, 124, 35-50.
- McGinnis, R.N., Ferrill, D.A., Morris, A.P., Smart, K.J., Lehrmann, D., 2017, Mechanical stratigraphic controls on natural fracture spacing and penetration: *Journal of Structural Geology*, 95, 160-170.
- Newman, J., Mitra, G., 1994, Fluid-influenced deformation and recrystallization of dolomite at low temperatures along a natural fault zone, Mountain City window, Tennessee: *Geological Society of America Bulletin*, 106, 1267-1280.
- Newman, M.E., 2005, Power laws, Pareto distributions and Zipf's law: *Contemporary physics*, 46(5), 323-351.
- Nieto-Samaniego, Á.F., Macías-Romo, C., Alaniz-Álvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 117-122.
- Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Cerca-Martínez, M., Reyes-Zaragoza, M.A., Concha-Dimas, A., 1999a, Carta geológica-minera San Miguel de Allende, F14C54, escala 1: 50,000: México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.
- Nieto-Samaniego, Á.F., Ferrari, L., Alaniz-Álvarez, S.A., Labarthe-Hernández, G., Rosas-Elguera, J., 1999b, Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 111, 347-363.
- Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Tolson, G., Xu, S., Pérez-Venzor, J.A., 2003, Estimación de densidades, distribuciones de longitud y longitud total de fracturas; un caso de estudio en la Falla de Los Planes, La Paz, BCS: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 1-9.
- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Tolson, G., Oleschko, K., Korvin, G., Xu, S. S., Pérez-Venzor, J. A., 2005a, Spatial distribution, scaling and self-similar behavior of fracture arrays in the Los Planes Fault, Baja California Sur, Mexico: *Pure and Applied Geophysics*, 162, 805-826.
- Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Camprubí Cano, A., 2005b, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 285-318.
- Nieto-Samaniego, Á.F., Ojeda-García, A.C., Alaniz-Álvarez, S.A., Xu, S.-S., 2012, Geología de la región de Salamanca, Guanajuato, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 411-425.
- Nieto-Samaniego, A.F., Del Pilar-Martínez, A., Suárez-Arias, A.M., Ángeles-Moreno, E., Alaniz-Álvarez, S.A., Levresse, G., Xu, S., Olmos-Moya, P., Báez-López, J.A., 2023, Una revisión de la geología y evolución tectónica cenozoicas de la Mesa Central de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 40(2), 187-213.
- Nixon, C.W., Nærland, K., Rotevatn, A., Dimmen, V., Sanderson, D.J., Kristensen, T.B., 2020, Connectivity and network development of carbonate-hosted fault damage zones from western Malta: *Journal of Structural Geology*, 141, 104212.
- Nollet, S., Urai, J.L., Bons, P.D., Hilgers, C., 2005, Numerical simulations of polycrystal growth in veins: *Journal of Structural Geology*, 27(2), 217-230, doi:10.1016/j.jsg.2004.10.003.
- Odling, N.E., 1997, Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway: *Journal of Structural Geology*, 19(10), 1257-1271.
- Peacock, D.C.P., Dimmen, V., Rotevatn, A., Sanderson, D.J., 2017, A broader classification of damage zones: *Journal of Structural Geology*, 102, 179-192.
- Pérez-Venzor, J.A., Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F., Solorio-Munguía, J.G., 1996, Geología del volcán Palo Huérfano, Guanajuato, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 174-183.
- Petrie, E.S., Petrie, R.A., Evans, J.P., 2014, Identification of reactivation and increased permeability associated with a fault damage zone using a multidisciplinary approach: *Journal of Structural Geology*, 59, 37-49.
- Ramsay, J.G., 1967, *Folding and Fracturing of Rocks*: New York, McGraw-Hill, 568 pp.
- Rizzo, R.E., Healy, D., De Siena, L., 2017, Benefits of maximum likelihood estimators for fracture attribute analysis: Implications for permeability and up-scaling: *Journal of Structural Geology*, 95, 17-31.
- Rotevatn, A., Fossen, H., 2011, Simulating the effect of subseismic fault tails and process zones in a siliciclastic reservoir analogue: Implications for aquifer support and trap definition: *Marine and Petroleum Geology*, 28(9), 1648-1662.
- Sanderson, D.J., Nixon, C.W., 2018, Topology, connectivity and percolation in

- fracture networks: *Journal of Structural Geology*, 115, 167-177.
- Tarazona-Lizcano, Y., Vargas-López, M. C., Velandia, F., 2021, Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander-Colombia: *Boletín de Geología*, 43(3), 107-123.
- Tolson, G., 2001, FracAnalysisV16; software de acceso libre para el cálculo de dimensión de cajas en fracturas, disponible en <<https://www.geologia.unam.mx/comunidad-igl/tolson-g>>.
- Tolson, G., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A. F., 2001. ReActivaV24Es, a Plotting Program to Calculate the Potential of Reactivation of Preexisting Planes of Weakness (programa informático): Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, disponible en <<https://www.geologia.unam.mx/comunidad-igl/tolson-g>>.
- Vásquez-Serrano A., 2013, Análisis fractal de fracturas geológicas en un análogo expuesto de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados y su aplicación en modelos de flujo de fluidos: México. D.F., México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 153 pp.
- Vásquez-Serrano, A., Camacho-Rangel, R., Arce-Saldaña, J. L., Morales-Casique, E., 2019, Análisis de fracturas geológicas en el pozo Agrícola Oriental 2C, Ciudad de México y su relación con fallas mayores: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(1), 38-53.
- Vásquez-Serrano, A., Arce, J.L., Rangel, E., Morales-Casique, E., López-Arroyo, S.M., 2021, Arreglo de fracturas geológicas en rocas miocénicas de la cuenca de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38(1), 1-17.
- Virgo, S., Abe, S., Urai, J.L., 2013, Extension fracture propagation in rocks with veins: Insight into the crack-seal process using Discrete Element Method modeling, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 5236-5251, doi:10.1002/2013JB010540.
- Virgo, S., Abe, S., Urai, J.L., 2014, The evolution of crack seal vein and fracture networks in an evolving stress field: Insights from Discrete Element Models of fracture sealing: *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 119(12), 8708-8727, doi: 10.1002/2014JB011520.
- Wilson, J.E., Chester, J.S., Chester, F.M., 2003, Microfracture analysis of fault growth and wear processes, Punchbowl Fault, San Andreas system, California: *Journal of Structural Geology*, 25(11), 1855-1873.

Manuscrito recibido: agosto 18, 2023

Manuscrito corregido recibido: noviembre 21, 2023

Manuscrito aceptado: noviembre 22, 2023