

Análisis Estructural de fallas cenozoicas del sur del Distrito Minero de Guanajuato

Structural Analysis of Cenozoic faults from southern Guanajuato Mining District

Verónica Guadalupe Álvarez-Campos¹, Maricruz Rivera-Figueroa¹, Isidro Loza-Aguirre¹

¹ Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato. ExHacienda de San Matías S/N Col. San Javier C. P. 36020, Guanajuato, Gto., México.
isidro.loza@ugto.mx

Resumen

Durante el Cenozoico, el estado de Guanajuato se vio afectado por diversos sistemas de fallas, principalmente de orientación NW-SE. La zona de estudio del presente trabajo se encuentra localizada en la parte sur del Distrito Minero de Guanajuato (DMG), caracterizado por un importante sistema de vetas epitermales. El DMG se ubica al sur de la Sierra de Guanajuato, donde las rocas que afloran están constituidas por un conjunto mesozoico marino de edad Jurásico-Cretácico y por un conjunto cenozoico continental. Dentro de los principales sistemas de fallas están el Sistema de Falla del Bajío (SFB), dividido en dos segmentos, el primero se extiende desde Celaya hasta Salamanca con una dirección E-W, y el segundo de dirección NW-SE desde Salamanca hasta el norte de León; y las Fallas del Distrito Minero de Guanajuato, entre las que se encuentran cuatro estructuras principales: La Veta Madre (de rumbo NW-SE e inclinación al SW), La Falla La Leona (de rumbo preferencial N30°W inclinada al NE), La Falla El Cubo-Villalpando (de rumbo N20°-30°W e inclinación al SW) y La Falla Las Gachas (de rumbo N20°-40°W inclinada al SW). Las rocas piroclásticas que afloran en el DMG están asociadas al mismo evento volcánico del primer pulso ignimbrítico, del Oligoceno, en el sector sur de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMO).

En este trabajo, se presenta un mapa geológico del sur del DMG modificado de Baez (2014) y un análisis de datos estructurales tomados en campo de planos de estratificación y pseudoestratificación, así como de las fallas geológicas. Durante el trabajo de campo se realizaron descripciones de las diferentes unidades de roca reconocidas en el área de estudio. Además, se colectaron datos estructurales con el uso de una brújula brunton y el software FieldMove en una Tablet. Se utilizó la regla de la mano derecha para efectuar las mediciones de planos de estratificación, pseudoestratificación y fallas, y se midió el rake de las estrías. Para el análisis estructural se utilizaron los softwares Stereonet y Win-Tensor. El análisis de los datos de estratificación y pseudoestratificación muestra un cambio en la inclinación de las capas de las formaciones Bufo y Calderones con respecto a las de la Formación Losero, lo que podría asociarse a que ocurrió fallamiento posterior al depósito de esta última unidad y anterior a las primeras, o a que ocurrió fallamiento contemporáneo con la actividad volcánica. En cuanto al análisis de las fallas, estas presentan una orientación principal de rumbo NW-SE y en menor proporción NE-SW, su deslizamiento principal es de tipo normal con una componente lateral. Se obtuvieron dos direcciones de extensión perpendiculares entre sí, la más antigua de dirección NE-SW registrada en las fallas que afectan a las unidades desde el Conglomerado Guanajuato hasta la Formación Calderones, y la más joven, de dirección WNW-ESE registrada en la Formación Cedros. La primera dirección representa el evento de extensión del Oligoceno temprano reconocido previamente en la Mesa Central (MC) y alrededores, asociado a la dinámica de subducción en la costa pacífica. La extensión más joven, de rumbo WNW-ESE, había sido interpretada en trabajos previos, pero es hasta el presente trabajo que se documenta su ocurrencia. Este evento pudiera ser la expresión en el sur del DMG de un evento de deformación 3D del Oligoceno tardío documentado al norte, en el interior de la MC.

Palabras clave: Distrito Minero de Guanajuato; sistemas de fallas cenozoicos; análisis estructural.

Introducción

El Distrito Minero de Guanajuato (DMG), situado en la región sur de la Sierra de Guanajuato, presenta una compleja historia geológica dominada por la actividad tectónica del Cenozoico. Esta zona se caracteriza por tener un importante sistema de vetas epitermales asociado a fallas geológicas que ha influido notablemente en la evolución estructural del área. Las unidades litológicas que afloran comprenden desde rocas mesozoicas hasta depósitos volcánicos y sedimentarios cenozoicos, todos ellos afectados por deformación extensional. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal analizar los sistemas de fallas que afectan el sur del DMG mediante el análisis geométrico y cinemático de las fallas y la caracterización geológica de las formaciones. El área de estudio está ubicada en el sur del DMG, dicha área abarca las localidades de El Cedro y Calderones del municipio de Guanajuato (Figura 1).

Tomando como base el trabajo de Baez (2014), se realizó un mapa geológico de la zona delimitando las formaciones geológicas y trazando los datos estructurales tomados en campo, complementando con fotointerpretación. Dichos datos estructurales, de estratificación o pseudoestratificación y de fallas, fueron separados por la formación geológica en que se tomaron, analizando la orientación e inclinación y dirección de extensión para poder establecer la evolución de la zona por medio de la definición de eventos.

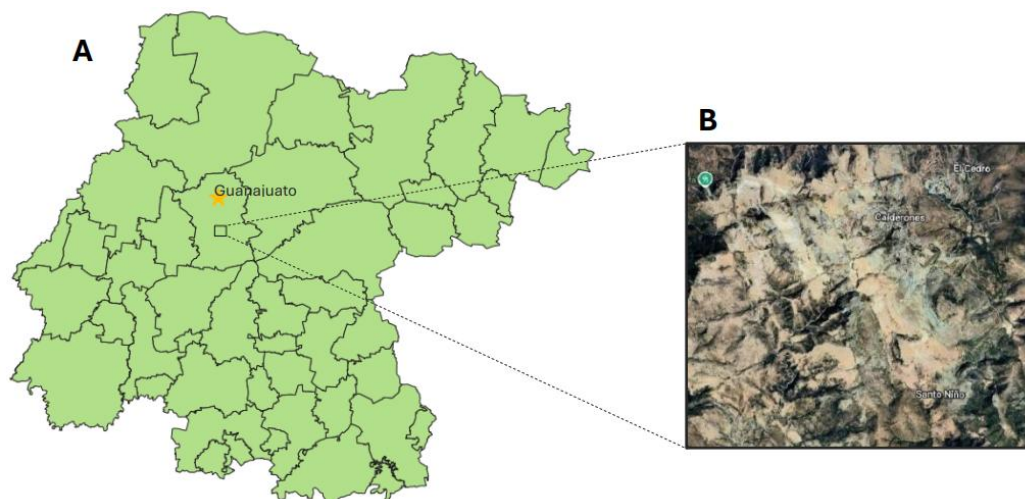


Figura 1. (A) Ubicación del área de estudio con respecto al estado de Guanajuato, mapa tomado del INEGI (2024). (B) Imagen de satélite indicando el área de estudio.

A través de este estudio se busca aportar al conocimiento de la geometría y cinemática de las fallas y los eventos de deformación en el sur del DMG, así como entender cómo estos eventos se corresponden o no a eventos definidos en el centro de México, contribuyendo así al conocimiento de la evolución geológica regional.

Marco teórico

En el área de estudio afloran rocas ígneas y rocas sedimentarias, que fueron afectadas por fallamiento normal, oblicuo y lateral, a continuación se hace a continuación una revisión de términos de importancia para entender el presente trabajo.

Rocas ígneas

Las rocas ígneas provienen del enfriamiento de un magma (roca fundida) y, dependiendo de donde ocurra este enfriamiento, se formarán rocas intrusivas o extrusivas. Cuando el magma se solidifica dentro de la corteza, da origen a rocas ígneas plutónicas o intrusivas. Pero, cuando cristaliza en la superficie se formarán rocas volcánicas o extrusivas (Casal & Navarrete, 2024).

En el área de estudio se observa roca Andesita. Esta es una roca ígnea extrusiva, aunque también puede presentarse como subvolcánica. Es de composición química intermedia, textura porfídica y a veces afanítica, además, mineralógicamente se compone de anfíbol, plagioclasas y piroxenos principalmente. La andesita es la roca más común que se relaciona con procesos de subducción y volcanismo (Tarbuck & Lutgens, 2005; Figura 2a).

Otro tipo de roca volcánica de importancia para el presente trabajo es la Riolita. Esta tiene composición química félsica y su textura principal es afanítica, compuesta principalmente de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasas ricas en sodio (Tarbuck & Lutgens, 2005; Figura 2b).

La roca predominante en el área de estudio es la Ignimbrita. Estas son rocas ígneas piroclásticas que están formadas por fragmentos de cristales y rocas en una matriz de ceniza. Las ignimbritas se forman debido a flujos piroclásticos de alta temperatura que se van acumulando y compactando por su propio peso antes del enfriamiento (Cas & Wright, 1988).

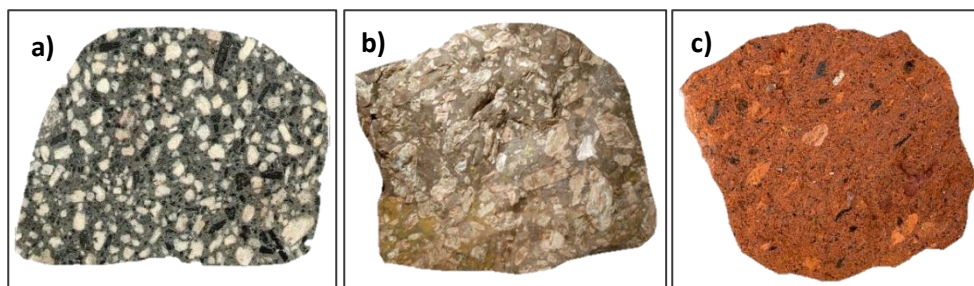


Figura 2. Ejemplos de tipos de rocas ígneas: a) andesita porfídica, b) riolita con textura porfídica, c) ignimbrita (Maldonado, 2021).

También se observaron diques en el área de estudio. Estos son cuerpos tabulares más o menos verticales y discordantes producidos cuando el magma se inyecta en fracturas (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación, compactación y cementación de partículas que se han generado por procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la superficie terrestre y que afectan a los distintos tipos de rocas (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La arenisca y el conglomerado son rocas sedimentarias detríticas que afloran en el área de estudio. Estas están constituidas de fragmentos de minerales y de rocas, siendo los minerales de arcilla y el cuarzo los constituyentes fundamentales de la mayoría (Tarbuck & Lutgens, 2005). La arenisca contiene al menos el 50% de granos del tamaño de arena (0.063-2 mm). Por su parte, el conglomerado es una roca de grano grueso, que consiste predominantemente en clastos redondeados del tamaño de grava (> 2 mm) (Tarbuck & Lutgens, 2005).

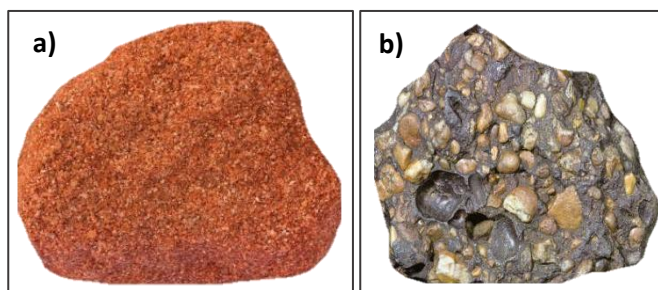


Figura 3. Ejemplos de rocas sedimentarias detríticas: a) arenisca, b) conglomerado (Maldonado, 2021).

Fallas geológicas

Las rocas en el área de estudio están afectadas por fallas. Una falla geológica es una fractura a lo largo de la cual se ha producido un movimiento paralelo a la superficie de fractura. El movimiento puede ser vertical, horizontal o una combinación de ambos (movimiento oblicuo), de donde surge la clasificación de las fallas en: fallas de movimiento vertical, de movimiento horizontal y de movimiento oblicuo. Estos tres tipos de fallas se observaron en el área de estudio. En las fallas con desplazamiento vertical, el movimiento es fundamentalmente paralelo al buzamiento de la superficie de falla (Figura 4). A la superficie rocosa que está inmediatamente por encima de la falla se le denomina *techo* (o bloque del alto) y a la superficie de roca inferior, *muro* (o bloque del bajo) (Tarbuck & Lutgens, 2005). Algunas fallas tienen solo unos pocos centímetros de longitud, mientras que otras tienen cientos de kilómetros (Rowland *et al.*, 2007).

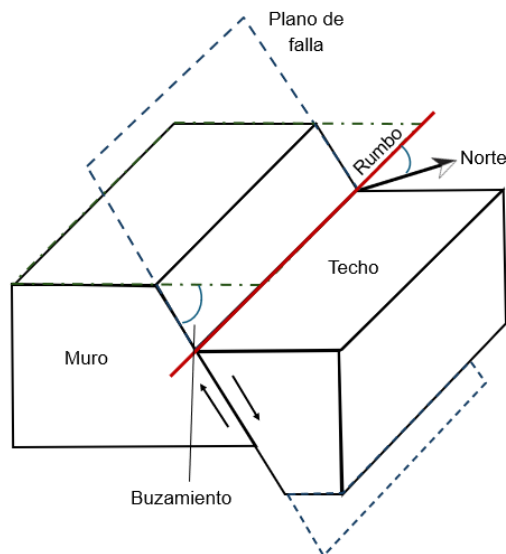


Figura 4. Esquema que ilustra las partes de una falla geológica.

Entre las fallas identificadas en el área de estudio se encuentran fallas normales. Estas ocurren cuando el bloque de techo se desplaza hacia abajo en relación con el bloque de muro (Figura 5a). Debido al movimiento descendente del techo, las fallas normales acomodan el alargamiento, o la extensión, de la corteza (Tarbuck & Lutgens, 2005).

También se observaron en el área de estudio las fallas de desplazamiento horizontal, también conocidas como fallas laterales o de desgarre. En este tipo de fallas, el movimiento es paralelo al rumbo del plano (Figura 5b). Se distinguen dos tipos: dextral, aquella en la que las rocas de un bloque de falla parecen haberse desplazado hacia la derecha al observarse desde el otro bloque de falla; y sinistral, que muestra el sentido de desplazamiento opuesto (Rowland *et al.*, 2007).

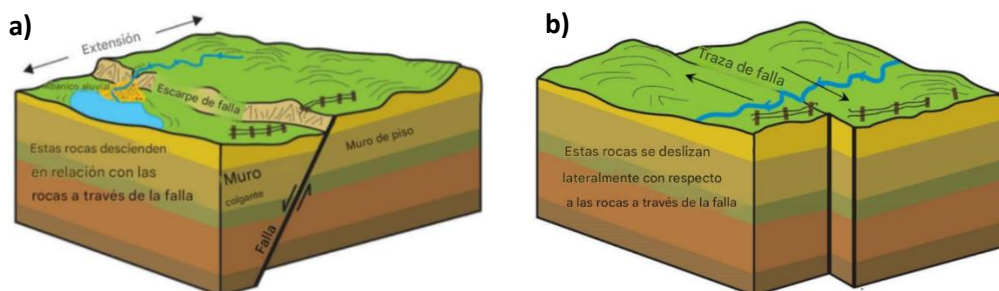


Figura 5. Representación del movimiento de los bloques en a) una falla normal y b) una falla lateral derecha (Earle, 2019).

Es importante señalar que en el área de estudio se identificaron algunas fallas oblicuas. Este tipo de fallas exhiben una combinación de desplazamientos verticales y horizontales.

Marco Geológico Regional

El área de estudio está ubicada dentro del Distrito Minero de Guanajuato (DMG), este importante distrito se ubica al sur de la Sierra de Guanajuato (SG), entidad orográfica que constituye el límite meridional de la Mesa Central (MC). La Mesa Central de México es una provincia fisiográfica que se caracteriza por ser una región elevada, con cotas promedio ~2000 m s.n.m. Dentro de ella se reconocen dos partes, la norte y la sur, separadas por un sistema de fallas denominado sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT). La expresión orográfica de las partes norte y sur de la MC es distinta, siendo la norte más erosionada con una topografía suave, mientras que la sur presenta serranías aisladas separadas por cuencas rellenas de sedimentos continentales fluviales y lacustres (Nieto-Samaniego *et al.*, 2023).

Al sur, en la frontera de la MC con la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) se ubican las sierras de Guanajuato y Codornices, cuyo frente es un semigraben (un graben es una depresión del terreno limitada por fallas normales) que tiene por falla principal al sistema de fallas del Bajío, el cual se divide en dos segmentos: el primero se extiende desde Celaya hasta Salamanca con una dirección E-W, y el segundo de dirección NW-SE desde Salamanca hasta el norte de León; dicho sistema de fallas forma el límite tectónico entre la MC y la FVTM (Nieto-Samaniego *et al.*, 2023). La SG es una serranía de forma alargada con dirección NW-SE, que se extiende por aproximadamente 100 km de largo y 35 km de ancho desde la región Comanja de Corona, Jalisco, hasta La Saucedá, Guanajuato (Figura 6; del Río-Varela *et al.*, 2020).

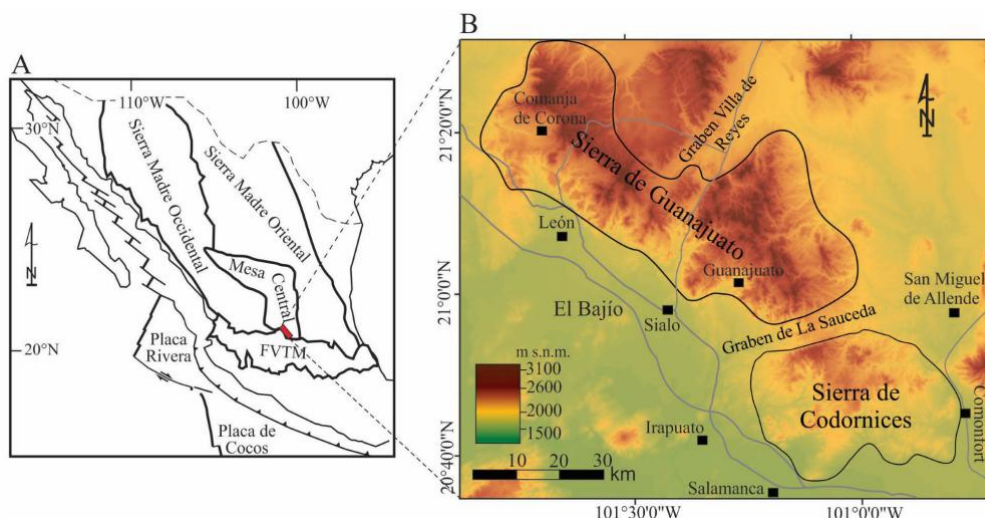


Figura 6. (A) Ubicación de las sierras de Guanajuato y Codornices relativa a las provincias fisiográficas adyacentes. FVTM: Falla Volcánica Transmexicana. (B) Modelo digital de elevación del (INEGI (2015). Extraída de Del Río-Varela et al. (2020).

Las rocas que afloran en la SG están constituidas por un conjunto mesozoico de edad Jurásico-Cretácico, que incluye al denominado Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato, junto con cuerpos intrusivos, que afloran principalmente en el núcleo de la sierra, y por un conjunto cenozoico continental, que incluye a conglomerados eocénicos; rocas plutónicas del Ypresiano; rocas volcánicas del Rupliano: como ignimbritas félsicas a intermedias, así como riolitas y andesitas, entre otras; rocas del Chattiano, que consisten en depósitos clásticos, ignimbritas y basaltos; y rocas del Mioceno, que incluye una unidad subvolcánica y rocas volcánicas (del Río-Varela *et al.*, 2020). Dentro de los principales sistemas de fallas están el Sistema Falla del Bajío (SFB) y las Fallas del Distrito Minero de Guanajuato. El SFB consta de un conjunto de fallas de rumbo E-W y NW-SE, que forman un semigraben que se extiende desde León hasta Celaya, con el bloque hundido al SW y que limita las sierras de Guanajuato y Codornices. Dentro de este sistema se han registrado tres episodios de actividad: el primero es de edad eocénica, el segundo episodio ocurrió en el Oligoceno, y el tercer episodio se manifiesta en el desplazamiento de las rocas del Mioceno. Dentro de las fallas del DMG se encuentran cuatro estructuras principales: La Veta Madre (de rumbo NW-SE e inclinación al SW), La Falla La Leona (de rumbo preferencial N30°W inclinada al NE), La Falla El Cubo-Villalpando (de rumbo N20°-30°W e inclinación al SW) y La Falla Las Gachas (de rumbo N20°-40°W inclinada al SW) (del Río-Varela *et al.*, 2020).

Las rocas ignimbríticas que afloran en el DMG forman parte de un evento volcánico de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMO). Como Sierra Madre Occidental se define tradicionalmente a la provincia fisiográfica del occidente de México, caracterizada por un altiplano con una elevación promedio de más de 2 000 m, y aproximadamente 1 200 km de largo por 200-400 km de ancho, la cual se extiende desde la frontera con los Estados Unidos hasta la FVTM y limitada al oeste por el Golfo de California y al este por la MC. Como provincia volcánica terciaria la SMO se extiende más allá de la provincia fisiográfica, abarcando también a la Mesa Central y parte de Chihuahua oriental (Ferrari *et al.*, 2005). La SMO está compuesta en su mayoría por rocas volcánicas como ignimbritas, andesitas y riolitas. La secuencia de ignimbritas de la SMO, conocida también como el Supergrupo Volcánico Superior (SVS) está compuesta por una potente secuencia de tobas de flujos piroclásticos, tobas de caída y lavas de composición silícica a intermedia, y en menor proporción, flujos de composición máfica particularmente expuestos en los bordes de la provincia volcánica. El primer y más extenso pulso ignimbrítico se dio con un impresionante sincronismo a principio del Oligoceno en toda la provincia y un segundo pulso ocurrió en el Mioceno temprano en la parte suroeste de la SMO (Ferrari *et al.*, 2005). Las rocas piroclásticas que afloran en el área de estudio están asociadas al mismo evento volcánico del primer pulso ignimbrítico, del Oligoceno, en el sector sur de la SMO. Una buena parte de la SMO ha sido afectada por una deformación predominantemente extensional durante diferentes episodios que se remontan al Oligoceno o, quizás, hasta el final del Eoceno (Ferrari *et al.*, 2005).

Geología del área

En el área de estudio afloran el Conglomerado Guanajuato del Eoceno y rocas volcánicas del Rupeliano (Oligoceno temprano) como: las formaciones Losero, Bufa, Calderones y Cedro. Además, entre las numerosas estructuras que cortan a dichas unidades, se encuentran La Veta Madre, de rumbo NW-SE e inclinación al SW, y La Falla Las Gachas, de rumbo N20°-40°W inclinada al SW. La descripción de las unidades que aquí se presentan están basadas en el trabajo de Nieto-Samaniego *et al.* (2015) y las referencias ahí citadas.

Conglomerado Guanajuato (CG)

Esta unidad se compone de una sucesión de conglomerados y areniscas continentales que afloran en los alrededores de la ciudad de Guanajuato. Su espesor es de 1400 m en el DMG (del Río-Varela *et al.*, 2020). Estratigráficamente sobreyace al complejo basal de la Sierra de Guanajuato y subyace a la cubierta volcánica cenozoica. El contacto con el complejo basal es por falla y solo en algunas localidades es posible observarlo como discordancia angular. Las capas del CG se encuentran basculadas debido a fallamiento extensional pos-Laramide que inició desde el Eoceno hasta el Oligoceno (Miranda-Avilés *et al.*, 2016). Se le asigna una edad de 49.3 ± 1.0 Ma (K/Ar, de roca completa), obtenida a partir de un flujo de lava basáltico intercalado con el conglomerado (Aranda-Gómez & McDowell, 1998).

Formación Losero

Se trata de una arenisca tobácea fácil de reconocer porque presenta una estratificación bien desarrollada y un color marrón, colores verde y rosa. Esta formación contiene fragmentos líticos angulares a subangulares y abundantes cristales como plagioclasa y cuarzo; la pirita es común, y se observan fragmentos de piedra pómez. El espesor varía de 5 a 30 m, con zonas más gruesas ubicadas cerca de la falla El Carrizal. No existen edades isotópicas de esta unidad publicadas en la literatura. La posición estratigráfica indica una edad eocena porque se encuentra por encima del conglomerado Guanajuato y debajo de la Formación Bufa.

Formación Bufa

Esta formación está formada por flujos piroclásticos con al menos tres horizontes principales. El horizonte basal está formado por ignimbritas altamente soldadas, de color rosa a beige, que desarrollaron fracturas por enfriamiento que, en ocasiones, forman prismas columnares. Las ignimbritas presentan estructuras en forma de fiame; los fenocristales que se encuentran en esta roca son de cuarzo, sanidina y plagioclasa, que alcanzan el 10% del volumen de la roca. La matriz es de grano fino con pómez colapsada y, en general, parece estar recrystalizada, formando un material criptocrystalino. El segundo horizonte es de ignimbrita color marrón a rosado. Este horizonte contiene fragmentos líticos angulares a subangulares de andesita e ignimbrita con diámetros <1 cm. Se observan fenocristales euhédricos a subhédricos de cuarzo, sanidina, plagioclasa y biotita. La piedra pómez presenta un colapso y soldadura moderada a ligera. La matriz es de grano fino y comúnmente presenta una alteración argílica incipiente. El tercer horizonte no aparece en todos los afloramientos de la Formación Bufa. Este horizonte está formado por depósitos de pómez y ceniza, y presenta una gradación normal. El tamaño de partícula varía de ceniza fina a gruesa. Dado el contenido mencionado de fenocristales, se considera de composición félsica. La Formación Bufa se superpone concordantemente a la Formación Losero, y se indica una edad de 33.53 ± 0.48 Ma (Nieto Samaniego *et al.*, 2015).

Formación Calderones

Se describe esta unidad como arenisca, conglomerado, brecha y toba, de composición andesítica, con algunas intercalaciones de tobas dacíticas. La Formación Calderones fue considerada como un depósito intracaldera y ha sido dividida en cuatro miembros. El miembro inferior es una megabrecha asociada a los márgenes de la caldera; el segundo miembro es una arenisca volcánica gruesa de color rojizo a marrón; el tercer miembro es una arenisca volcánica fina de color verde; y el miembro superior es un depósito masivo de flujo piroclástico. La Formación Calderones sobreyace concordantemente a la Formación Bufa y subyace a la Formación Cedro. Se determinó una edad de 31.33 ± 0.29 Ma.

Formación Cedro

Está formada por flujos de lava andesíticos, presenta comúnmente una estructura masiva, pero en algunos afloramientos se presenta una notoria pseudoestratificación. Cerca del cerro El Nayal se encuentran depósitos de caída piroclástica. Las lavas son grises o marrón rojizas cuando están frescas, pero comúnmente parecen ser verde oscuras debido a la intensa alteración hidrotermal. Las lavas de la Formación Cedro descansan sobre la Formación Calderones y debajo de la Riolita Chichíndaro. Se estimó un espesor mínimo de 400 m en el área de El Cubo. Hay muchos diques andesíticos, y estos son similares a las lavas de la Formación Cedro; los diques cortan las formaciones Bufo, Calderones y Cedro, pero no a las unidades suprayacentes. Se considera que los diques alimentan los flujos de lava andesíticos de la Formación Cedro. Para esta unidad se han obtenido edades de algunos flujos de lava que afloran al suroeste del DMG. La primera edad es de 30.6 ± 0.4 Ma (matriz rocosa) y la otra, de 30.7 ± 0.6 Ma (roca completa).

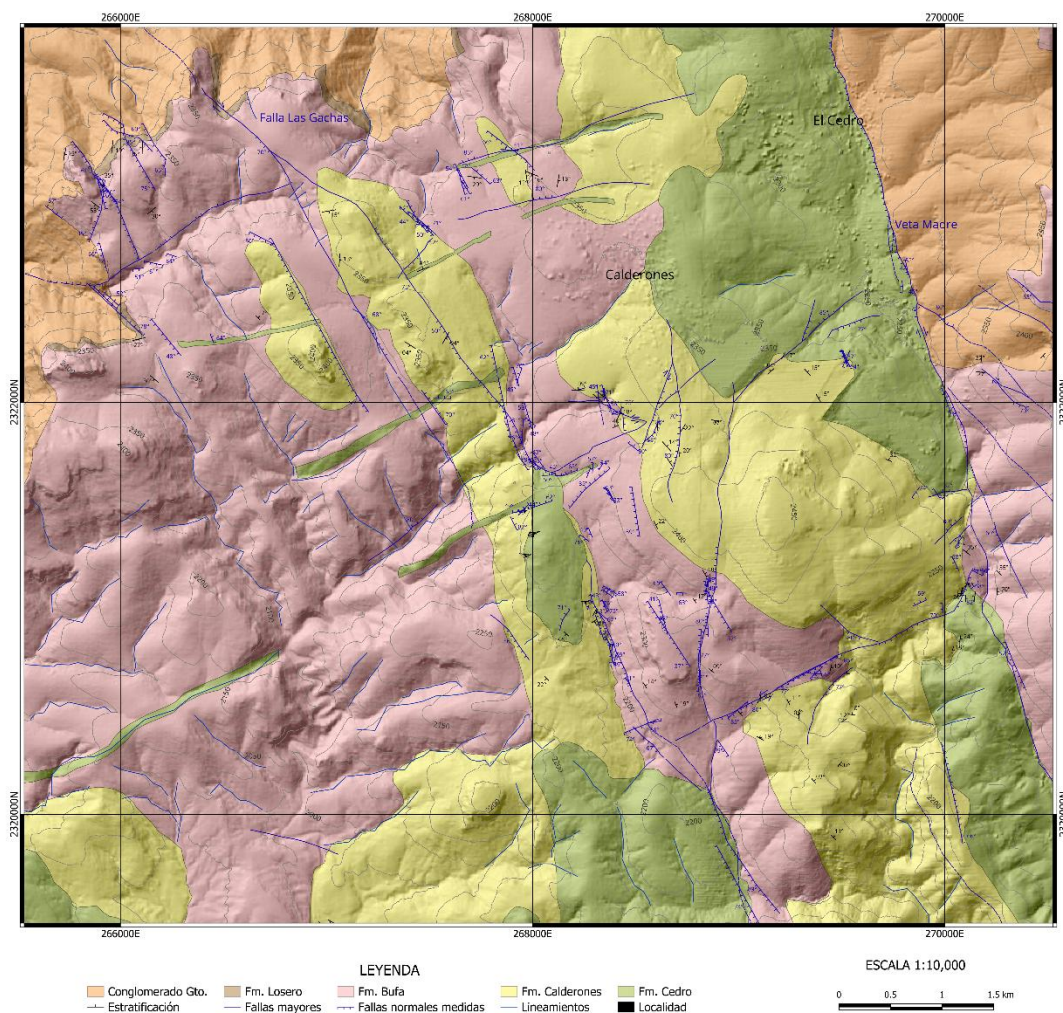


Figura 7. Mapa del área de estudio, modificado de Baez (2014).

Análisis estructural

Los datos recolectados de estratificación y pseudoestratificación se muestran en la Figura 8. Se puede observar que en general, el ángulo de inclinación de las estructuras de las tres formaciones es bajo (no mayor a 30° - 35°). La Formación Losero, presenta una dirección preferencial NE-SW con inclinación al SE. Por el contrario, la pseudoestratificación en la Formación Bufo muestra una orientación preferencial NW-SE con inclinaciones al NE. Siguiendo este mismo rumbo e inclinación, NW-SE con echados principalmente al NE, se encuentra una mayor cantidad de estratos pertenecientes a la Formación Calderones; esta unidad tiene, además, otro grupo secundario de estructuras, de dirección NE-SW e inclinación al SE.

En los diagramas de concentración de polos de planos de estratificación se observa que los de los planos medidos en Fm Loseros están más alejados del centro del estereograma en comparación con los de los planos de Fm. Calderones que se ubican más hacia el centro del estereograma. Esto significa que la mayoría de los planos de pseudoestratificación en Loseros tienen mayores inclinaciones que los de Calderones.

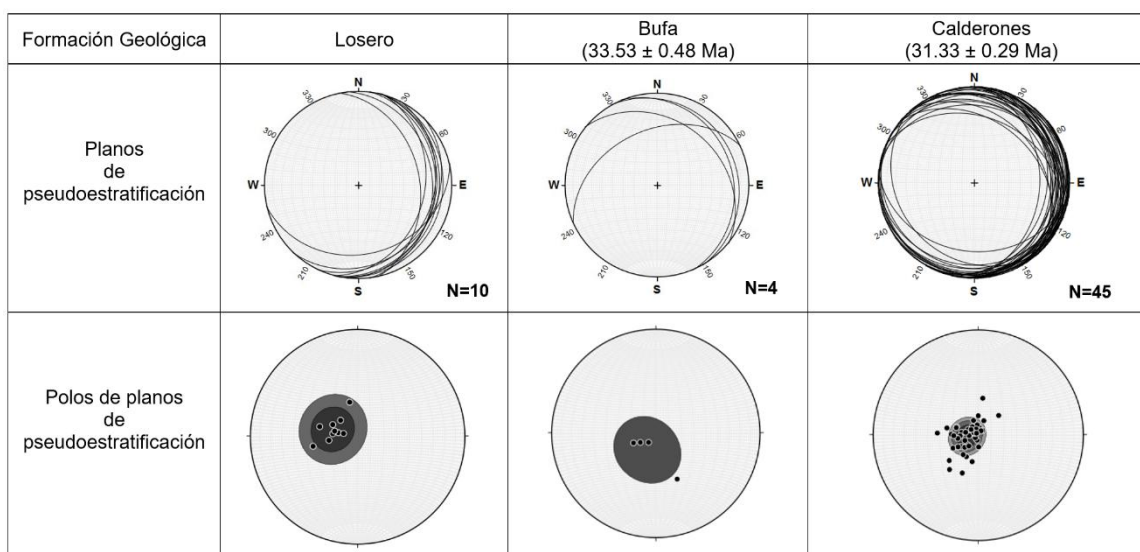


Figura 8. En la fila superior se presentan estereogramas de los datos de estratificación y pseudoestratificación recolectados en campo, clasificados por formación geológica. En la segunda fila se muestran los Polos de los planos de estratificación y pseudoestratificación.

En la Figura 9 se presentan los datos de fallas medidos en campo. En general, se observan dos poblaciones de fallas, una principal de rumbo NW-SE y una menor de rumbo NE-SW. La cinemática de las fallas medidas en las diferentes formaciones se caracteriza por fallas normales principalmente, y algunas con una componente lateral, lo que se puede apreciar en los estereogramas en los que se presentan las estrías de falla.

La mayor cantidad de datos de falla fueron medidos en la Formación Bufo (33.53 ± 0.48 Ma), estos presentan un rumbo preferencial NW-SE a N-S e inclinaciones tanto al NE como al SW, predominando los NW-SE con inclinación al SW. Las estrías de estas fallas, aunque se concentran hacia partes centrales de la población principal de fallas, también una gran cantidad de ellas presenta mayor dispersión, lo que implica que la mayoría de las fallas son de tipo normal pero una proporción importante es oblicua y en menor medida se presentan algunas laterales. La dirección de extensión obtenida a partir del análisis cinemático de las fallas y estrías medidas en la Fm Bufo es NE-SW.

Los datos de fallas medidos en la Formación Calderones (31.33 ± 0.29 Ma) presentan dos tendencias, el primer conjunto de datos posee una orientación NW-SE e inclinaciones al NE y SW, y el segundo una tendencia NE-SW con inclinaciones en ambas direcciones también. Las estrías de las fallas medidas en esta unidad se observan dispersas en el estereograma, pero concentrándose en las partes centrales, lo que indica que estas fallas son principalmente normales a oblicuas. Para este conjunto de datos se obtuvo del análisis cinemático una dirección de alargamiento NE-SW a NNE-SSW, siendo esta orientación ligeramente distinta a la obtenida de los datos medidos en la formación anterior.

Dentro de la Formación Cedro (30.6 ± 0.4 Ma), fueron medidos un total de 6 planos de falla, en el diagrama de contornos de concentración de polos se observa un rumbo preferencial N-S a NNW-SSE con inclinaciones al E-NE. Las estrías se ubican hacia las partes medias y bordes del estereograma, lo que refleja que estas fallas son principalmente oblicuas a laterales. El análisis cinemático de estos datos arroja una dirección de extensión de rumbo WNW-ESE, representando una diferencia sustancial de la dirección de alargamiento en comparación con la registrada en las unidades anteriores.

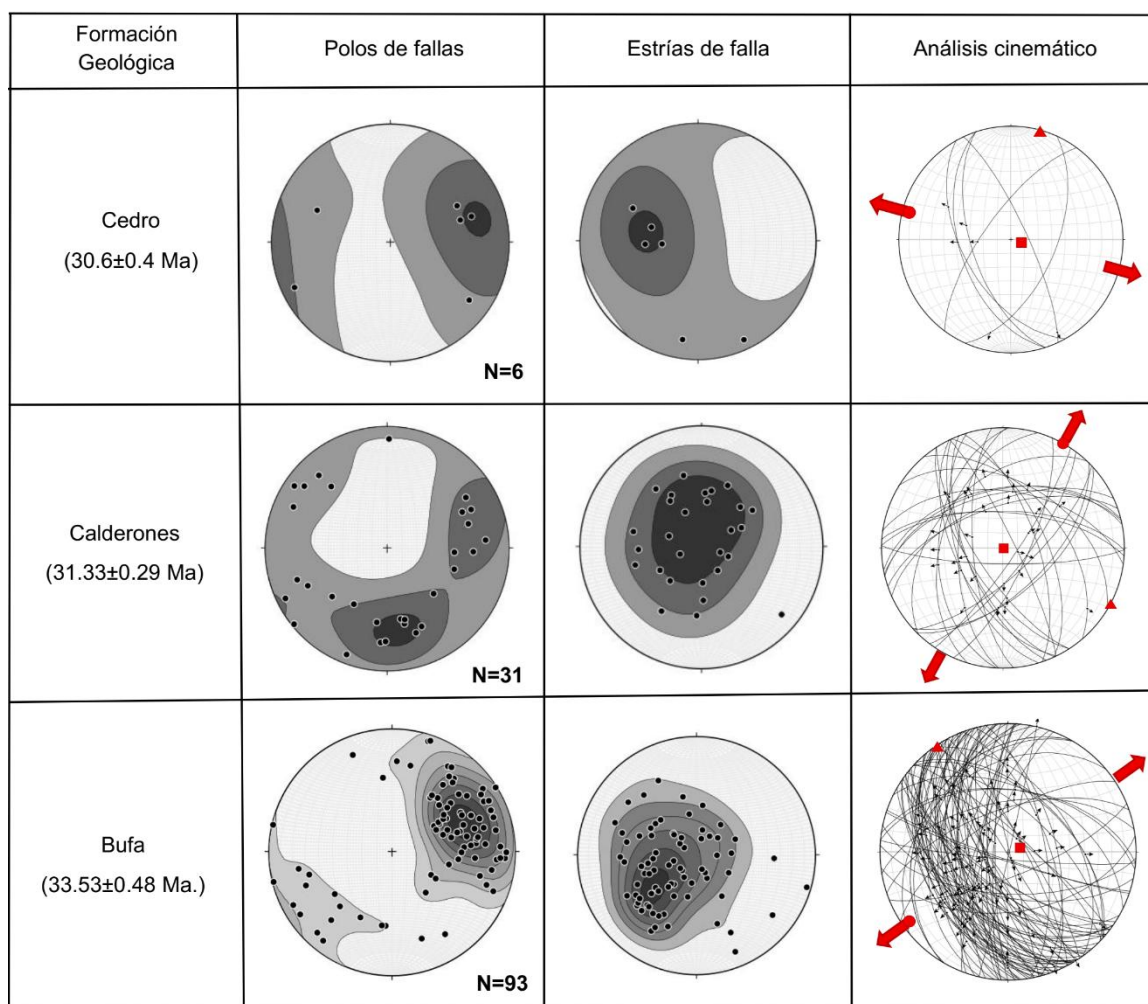


Figura 9. Análisis geométrico y cinemático de los datos de fallas recolectados en campo. Clafiscados por edad de depósito de cada formación geológica.

Interpretación

Es notable el hecho de que el rumbo de la estratificación cambia de NE a NW conforme se asciende en la columna estratigráfica, de la Formación Losero hasta la Formación Calderones. Esto podría deberse a que las fallas que afectaron a la Fm Losero fueron principalmente de rumbo NE-SW, con extensión NW-SE, mientras que las que afectaron al resto de las unidades, como Bufo y Calderones, sean de rumbo principal NW-SE, producto de extensión NE-SW. Es necesario recolectar datos de fallas en la Fm Loseros para poder argumentar más al respecto. Otra variante que podría estar influyendo en esta diferencia es que los datos de estratificación de Fm Losero fueron tomados principalmente en el norte del área de estudio, mientras que los datos de las otras formaciones fueron colectados de sitios ubicados más aleatoriamente dentro del área de estudio.

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los planos de pseudoestratificación en Loseros tienen mayores inclinaciones que los de Calderones. Esto se pudiera explicar con la ocurrencia de un evento de deformación post-Loseros y anterior a Calderones, o con la actividad sincrónica de deformación y vulcanismo a partir del depósito de Fm Loseros, antes de 33 Ma.

La mayoría de las fallas fueron medidas en la Fm Bufo, y de estas, la mayoría tienen una orientación NW-SE, esto pudiera deberse a un sesgo en la colecta de datos estructurales o puede estar reflejando particularidades del estilo de deformación que afectó a esta unidad. Es diferente el caso de Fm Calderones donde ambas poblaciones, tanto NW-SE como NE-SW, parecen estar presentes por igual. Si el causante del predominio de estructuras NW-SE en Fm Bufo fuera el estilo de deformación, esto implicaría que la deformación post-Bufo (posterior a 33.5 Ma) pudo haber sido biaxial, ajustándose al modelo andersoniano de fallamiento normal. Mientras que la ocurrencia por igual de fallas de rumbo NW-SE y NE-SW en Fm Calderones, implicaría que la deformación post-Calderones (posterior a 31.3 Ma) fue tridimensional.

Conclusión

El análisis estructural realizado de los datos recolectados en el área de estudio permitió identificar diferencias en las tendencias de inclinación de las diferentes unidades de roca, así como fallas cenozoicas de tipo normal con componentes laterales. Las fallas se encuentran predominantemente orientadas en sentido NW-SE, que afectaron a diversas unidades geológicas desde el Eoceno hasta el Oligoceno. Las diferencias en la magnitud de la inclinación de las capas entre las formaciones Losero, Bufo y Calderones, evidencian la ocurrencia sincrónica de la deformación y la actividad volcánica, como había sido propuesto en trabajos previos (Nieto-Samaniego et al., 2015). Mientras que, las diferencias entre los rumbos de las capas, NE-SW en Loseros, a NW-SE en Calderones, pudiera reflejar un cambio en la dirección de alargamiento máximo, de NW-SE posterior al depósito de Loseros y anterior a Calderones, a un alargamiento NE-SW posterior a Calderones. La posibilidad de un evento de extensión de rumbo NW-SE post-Loseros y pre-Calderones no había sido propuesto anteriormente en la región. Asimismo, del análisis cinemático se concluye que: la dirección de extensión en el área de estudio muestra un cambio desde una orientación NE-SW, registrada en las formaciones Bufo y Calderones, hasta NW-SE, que arrojan las fallas medidas en la Formación Cedro. La extensión NE-SW en el Oligoceno ya había sido documentada en trabajos previos, mientras que un evento posterior NW-SE había sido inferido (Nieto-Samaniego et al., 2015), más este trabajo es el primero que documenta la extensión NW-SE posterior al emplazamiento de la formación Cedro. Es así que, integrando los resultados del análisis cinemático de las fallas medidas en las diferentes unidades que afloran en el área de estudio con las observaciones de las diferencias en el rumbo y la inclinación entre las diferentes unidades, se puede interpretar que: posterior al emplazamiento de la formación Losero y antes del depósito de Bufo (33.5 Ma), en el Eoceno tardío – principios del Oligoceno, ocurrió extensión de rumbo NW-SE; después, posterior al depósito de Bufo y Calderones (31.3 Ma), y previo al emplazamiento de la formación Cedro, en el Oligoceno temprano, el estado de esfuerzos favoreció el alargamiento de rumbo NE-SW. Y posterior al emplazamiento de Cedros (30.6 Ma), en el Oligoceno medio o tardío, ocurrió un importante cambio en la configuración de esfuerzos que produjo alargamiento de dirección NW-SE. Además, se interpreta la ocurrencia de deformación triaxial posterior al emplazamiento de Fm Calderones, esto es, después de 31.3 Ma. Mientras que la deformación anterior a este tiempo y posterior a 33.5 Ma, la registrada en Fm Bufo, fue biaxial.

En una reciente revisión de la geología y evolución de la Mesa Central, Nieto-Samaniego *et al.* (2023) establecen que en el sur de la MC ocurrieron cuatro fases principales de fallamiento posteriores a la deformación por acortamiento: la más antigua del Paleoceno-Eoceno temprano, caracterizada por fallamiento lateral, una segunda en el Eoceno, una tercera fase en el Oligoceno temprano y una cuarta en el Oligoceno tardío-Mioceno, las últimas tres caracterizadas por fallamiento normal a oblicuo. Los resultados del presente trabajo se ajustan en mayor o menor medida a la segunda, tercera y cuarta fases de fallamiento descritas por Nieto-Samaniego *et al.* (2023): alargamiento bidimensional en el Eoceno tardío de rumbo NW-SE registrado en la Fm. Losero, extensión de rumbo NE-SW en el Oligoceno temprano – medio, siendo bidimensional la registrada en la Fm Bufo, y tridimensional la registrada en Fm Calderones, y alargamiento NW-SE en el Oligoceno medio o tardío registrado en Fm Cedro. Las diferencias de los rangos de edad entre las diferentes fases de deformación reconocidas indican que la deformación no ocurrió de manera generalizada y sincrónica.

Los datos obtenidos, junto con el análisis geométrico y cinemático de las estructuras geológicas, respaldan las interpretaciones previas de un ambiente tectónico extensional activo durante el Cenozoico en el sur del Distrito Minero de Guanajuato. Además, se propone una fase de alargamiento NW-SE previa al depósito de Fm Bufo, en el Eoceno tardío – principios del Oligoceno, no reconocida con anterioridad, y la ocurrencia de deformación triaxial en el sur del DMG, estilo de deformación que no había sido reportado en la zona. Estos resultados no solo enriquecen la comprensión de la compleja estructura y su evolución en el DMG, sino que también aportan al conocimiento de la historia de la deformación en el centro de México.

Es importante señalar que una mayor cantidad de datos estructurales en las formaciones Conglomerado Guanajuato, Loseros y Cedro enriquecerían el entendimiento de la estructura e historia de la deformación en el sur del DMG.

Bibliografía

- Aranda-Gómez, J. J., & Mcdowell, F. W. (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(2), 116–134. <https://doi.org/10.1080/00206819809465201>
- Baez-López, J. A. (2013). Estratigrafía de la parte sur del distrito minero de Guanajuato, MÉXICO. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cas, R. A. F., & Wright, J. V. (1988). Volcanic Successions Modern and Ancient, A geological approach to processes, products and successions. Chapman & Hall ed.
- Casal, G., & Navarrete, C. (2024). GEOLOGÍA. Vol. 1, 1.a ed., Editorial Universitaria de la Patagonia.
- del Río-Varela, P., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Ángeles-Moreno, E., 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). <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a071019>
- Earle, S. (2019). Physical Geology, Second Edition, BCcampus Open Education.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA*, LVII(3). <https://doi.org/10.18268/BSGM2005v57n3a5>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2015). Mapa del estado de Guanajuato, tomado de Publicaciones y mapas. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551132173>
- Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J., Omaña, L., & Loza-Aguirre, I. (2016). Los depósitos clásticos pos-Laramide de la Sierra de Guanajuato: Implicaciones de su composición en la evolución tectono-sedimentaria y paleogeográfica. *Estudios Geológicos*, 72(2), e058. <https://dx.doi.org/10.3989/egol.42480.417>

- Nieto Samaniego, A. S., Báez-López, J. A., Levresse, G., Alaniz Alvarez, S. A., Ortega-Obregón, C., López-Martínez, M., Noguez-Alcántara, B., & Solé-Viñas, J. (2015). New stratigraphic, geochronological, and structural data from the Southern Guanajuato Mining District, México: Implications for the Caldera hypothesis. *International Geology Review*. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1072745>
- Nieto-Samaniego, A. S., del Pilar-Martínez, A., Suárez-Arias, A. M., Ángeles-Moreno, E., Alaniz-Álvarez, S. A., Levresse, G., Xu, S., Olmos-Moya, M. J. 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. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2023.2.1736>
- Rowland, S., Duebendorfer, E., & Schiefelbein, I. (2007). *Structural analysis & Synthesis* (3.a ed.). Maldon, Oxford, Carlton: Blackwell Publishing.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Earth: An Introduction to Physical Geology* (8.a ed.), Pearson Educación S.A. Madrid.