



Boletín de Geología

ISSN: 0120-0283

ISSN: 2145-8553

Universidad Industrial de Santander

Salgado-González, Daniel; Muñoz-Ospina, José David;
Naranjo-Sierra, Edwin; Cardona-Ríos, John Jairo
Características estructurales de los depósitos vetiformes La
Ye y Mangos, Distrito Minero El Bagre (Antioquia, Colombia)**
Boletín de Geología, vol. 43, núm. 3, 2021, Septiembre-Diciembre, pp. 125-141
Universidad Industrial de Santander

DOI: <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021006>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349670760006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Características estructurales de los depósitos vetiformes La Ye y Mangos, Distrito Minero El Bagre (Antioquia, Colombia)

Daniel Salgado-González^{1*} ; José David Muñoz-Ospina¹ ; Edwin Naranjo-Sierra² 
John Jairo Cardona-Ríos¹ 

Forma de citar: Salgado-González, D.; Muñoz-Ospina, J.D.; Naranjo-Sierra, E.; Cardona-Ríos, J.J. (2021). Características estructurales de los depósitos vetiformes La Ye y Mangos, Distrito Minero El Bagre (Antioquia, Colombia). *Boletín de Geología*, 43(3), 125-141. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021006>

Resumen

Las minas La Ye y Mangos, se encuentran localizadas en la parte norte de la Cordillera Central de Colombia, al noreste del departamento de Antioquia, en el municipio de Zaragoza y al interior del Distrito Minero El Bagre (DMB). Estas minas subterráneas, son depósitos vetiformes de Au-Ag hospedados en una zona de cizalla sinistral-inversa al interior de rocas graníticas Carboníferas del *stock* El Carmen. Con la integración de características estructurales (fallas de carácter regional, local, estructuras vetiformes, zonas de cizalla y la estructura combinada entre la veta y la cizalla), se determinó una tendencia general NNW-SSE con buzamientos entre 60°-70°SW para la veta La Ye y una tendencia general NNW-SSE con buzamientos entre 30°-40°NE para la veta Mangos. Adicionalmente, con base en los tensores de esfuerzos calculados a partir del procesamiento sistematizado de planos de falla y superficies estriadas, y desde las relaciones de corte de las principales fallas, se identificaron al menos tres eventos deformativos: D1 correspondiente a una transpresión sinistral NNW-SEE pre-mineralización, D2 asociado a una transpresión dextral NNE-SSW y D3 vinculado a una transpresión sinistral NW-SE que generó espacios dilatacionales propicios para la circulación de fluidos mineralizantes.

Palabras clave: Mina La Ye; Mina Mangos; Vetiforme; Zona de cizalla; Eventos deformativos; Tendencias estructurales; Cinemática.

Structural characteristics of the La Ye and Mangos lode gold type deposits, El Bagre mining district (Antioquia, Colombia)

Abstract

The La Ye and Mangos mines are located in the northern part of the Central Cordillera of Colombia, northeast of the Antioquia department, in the Zaragoza municipality and inside the El Bagre Mining District (DMB). These underground mines are lode Au-Ag type deposits hosted in a sinistral-reverse shear zone within the Carboniferous granite rocks of the El Carmen Stock. With the integration of structural characteristics, a general NNW-SSE trend with dips between 60°-70°SW were determined for the La Ye vein and a general NNW-SSE trend with dips between 30°-40°NE for Mangos vein. Additionally, based on the stress tensors and cross-cutting relationships of the main faults, at least three deformation events were identified: D1 corresponding to a pre-mineralization NNW-SEE sinistral transpression, D2 associated with a NNE-SSW dextral transpression and D3 tied to a NW-SE sinistral transpression that generated dilatational spaces favorable to the circulation of mineralizing fluids.

Keywords: La Ye mine; Mangos mine; Lode deposits; Shear zone; Deformation events; Structural trends; Kinematics.

¹Programa de Geología, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. (*) daniel.salgado.g@hotmail.com; josedavidmunozospina@gmail.com; john.cardona_r@ucaldas.edu.co

²Operadora Minera, Medellín, Colombia. edwin.naranjo@operadoraminera.com.co

Introducción

La zona de estudio se encuentra localizada sobre la Cordillera Central de Colombia, al noreste del departamento de Antioquia, en el municipio de Zaragoza y al interior del Distrito Minero El Bagre (DMB) (Figura 1). Esta región colombiana ha sido ampliamente reconocida por sus explotaciones de oro aluvial y mineralizaciones vetiformes (Leal-Mejía, 2011; Londoño-Herrera *et al.*, 2009; Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri, 2018; Shaw, 2000; Shaw *et al.*, 2019).

Las manifestaciones vetiformes de este distrito están influenciadas por la zona de falla Otú-Pericos y se encuentran hospedadas en rocas plutónicas

Carboníferas denominadas como *Stock El Carmen* (Leal-Mejía, 2011). Naranjo-Sierra *et al.* (2016) describieron la mina La Ye como un depósito vetiforme de Au-Ag encajado en una zona de cizalla de deformación frágil-dúctil, producida por un evento deformativo que generó milonitización de la roca encajante. Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri (2018) concuerdan con esta misma descripción para la mina Mangos, también expresan que esta deformación se evidencia por la existencia de estructuras sigmoidales, *boudinage* y contactos veta-caja reactivados con presencia de salbanda (*gauge*). Starling (2015) propone al menos cuatro eventos deformativos: D1, D2, D3 y D4. Los eventos D2 y D3 están asociados a la mineralización (Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri, 2018).

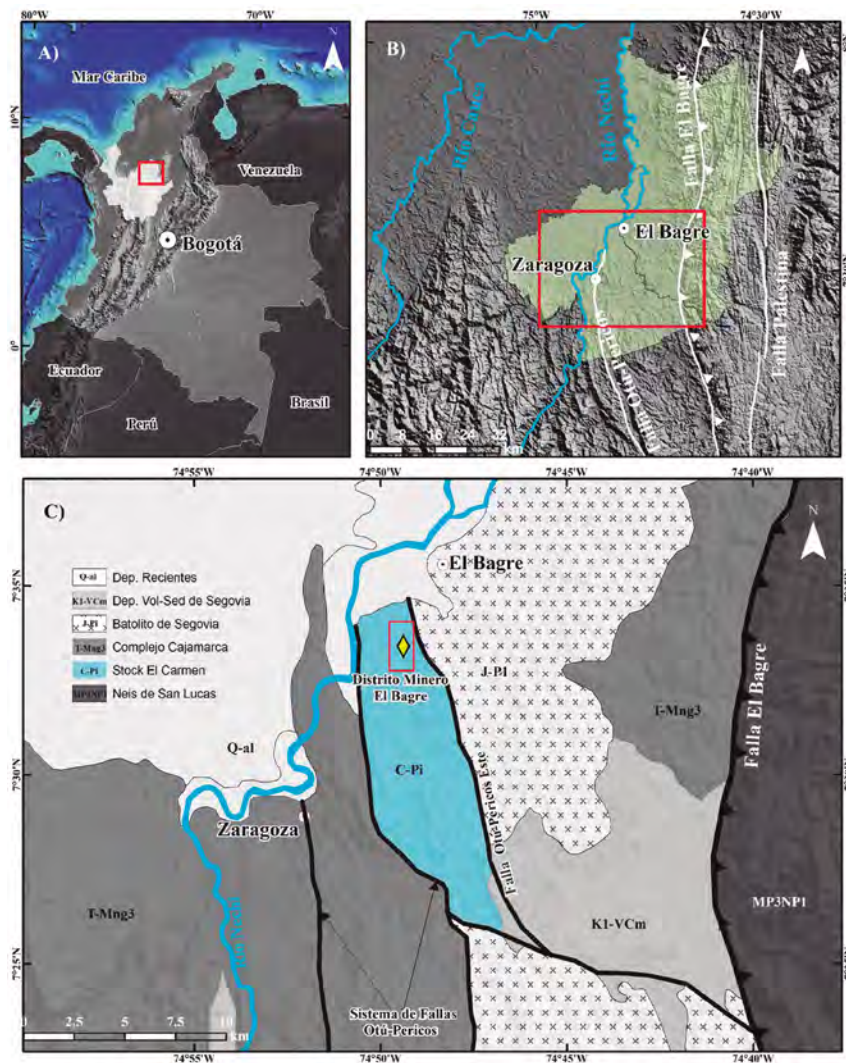


Figura 1. A. Ubicación regional del área de interés. B. Ubicación de la zona de interés entre los municipios de El Bagre y Zaragoza. C. Geología regional de la zona de interés, en el rectángulo rojo se encuentra limitada el área de trabajo, Distrito Minero El Bagre (DMB).

Debido al control estructural de estas manifestaciones vetiformes de Au-Ag, este estudio pretende determinar las características estructurales asociadas a los altos tenores, detallando los eventos deformativos propuestos a partir de las características estructurales ocurrientes en el régimen frágil, por ende, no se tomarán en cuenta los datos de foliación y lineaciones. Además, este análisis estructural detallado de los depósitos vetiformes de ambas minas, es el primero que se realiza en el distrito minero y busca convertirse en una herramienta útil en el entendimiento geológico y la exploración mineral al interior de este distrito.

Marco geológico

Ambiente geológico

La zona de estudio se encuentra localizada hacia la parte norte de la Cordillera Central y está dominada estructuralmente por la zona de falla Otú-Pericos. Hacia el occidente, esta zona de falla pone en contacto rocas plutónicas Carboníferas del *Stock El Carmen* con rocas Permo-triásicas agrupadas regionalmente como Complejo Cajamarca (Gómez-Tapias *et al.*, 2015; Londoño-Herrera *et al.*, 2009). La cinemática de esta zona de falla es pobremente conocida, sin embargo, movimientos dextrales como también sinestrales parecen haber ocurrido (Horner, 2018). Hacia el este del área de estudio, la zona de falla El Bagre pone en contacto rocas Precámbricas de la Serranía de San Lucas con rocas graníticas Jurásicas del Batolito de Segovia (Gómez-Tapias *et al.*, 2015; Spikings *et al.*, 2015). Esta zona de falla ha sido históricamente interpretada como una falla de cabalgamiento (Gómez-Tapias *et al.*, 2015). Hacia el sureste se encuentran los depósitos Volcando-sedimentarios de Segovia y hacia el norte se encuentran las rocas sedimentarias de la Formación Caucasia, la Formación Tarazá y los depósitos recientes de los ríos Nechí y Tigüí, que enmascaran la traza de la falla Otú-Pericos y cubren discordantemente las rocas graníticas del Batolito de Segovia y el *Stock El Carmen* (Gómez-Tapias *et al.*, 2015; Londoño-Herrera *et al.*, 2009).

Geología de los depósitos

Estos depósitos vetiformes se encuentran dominados composicionalmente por cuarzo y en menor proporción por carbonatos, sericita, clorita, pirita, sulfuros de metales base, oro y telururos de Au-Ag y Pb (Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri, 2018; Naranjo-Sierra, 2019). Los análisis

mineralógicos detallados y secuencia paragenética propuesta por los trabajos de Naranjo-Sierra *et al.* (2016), Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri (2018) y Naranjo-Sierra (2019) para estas vetas, muestran dos eventos mineralizantes. El evento E1 conformado por pirita y volúmenes significativos de cuarzo y el evento E2 o principal evento mineralizante, conformado por pirita, galena, calcopirita, oro y una gama de telururos (altaíta, silvanita y calaverita). Las concentraciones promedio de As y Sb son bajas (<2 ppm), la asociación Au-Ag-Te es un rasgo distintivo de estas vetas y la relación Au/Ag varía entre 1:2 a 1:3. El cuerpo hospedante, cerca al contacto con las vetas, exhibe un halo de alteración hidrotermal (1 cm - 1 m) de espesor dominado por la cloritización de biotitas (Varona-Bravo *et al.*, 2016). La alteración dominante en la veta es la sericitización (Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri, 2018; Naranjo-Sierra, 2019).

Metodología

Se realizó una recopilación bibliográfica de los trabajos realizados en la zona de estudio. Posteriormente, la base de datos estructural (actualizada al 25 de mayo de 2019) fue suministrada por la empresa Operadora Minera S.A.S. Esta base de datos, está dividida en cuatro órdenes de la siguiente manera: orden uno, corresponde a datos de estructuras de nivel regional (Ej. falla Otú-Pericos), el orden dos corresponde a datos de las vetas principales (Ej. veta La Ye y Mangos), el orden tres hace referencia a fallas locales con escala distrital (Ej. falla Mangos, La Ye, Naranjal entre otras) y el orden cuatro a fallas menores con desplazamientos cortos (<1 m). Se realizó un control de calidad para el total de datos proporcionados (1439), donde se verificó la congruencia entre los cuadrantes de rumbo y buzamiento. Los diagramas de contornos y polos fueron elaborados por medio del *software Dips*® y parametrizados con proyección equiangular, hemisferio inferior de la esfera y distribución tipo *Fisher*. Se incluyeron sus variaciones, comenzando desde la tendencia general hasta los cambios particulares evidenciados en algún nivel o bloque específico.

La construcción de las elipsoides de esfuerzos fue realizada por medio del *software Win Tensor*® (Delvaux y Sperner, 2003) procesando datos de indicadores cinemáticos (estrías) y planos de falla de tercer orden por el método de inversión (Angelier, 1984; Delvaux y Sperner, 2003; Muñoz-Martín y de Vicente, 2010;

Reches, 1983), para determinar las direcciones de compresión y extensión a las que fue sometida el área de estudio.

Las interpretaciones estructurales fueron complementadas con los estudios geofísicos de Bayona-Peláez (2018), disponibles para el Distrito Minero El Bagre (DMB). Adicionalmente, se realizó un análisis a partir de un modelo sólido 3D (*Face-Dip*) construido en *Leapfrog Geo 5.0*® relacionando la disposición en rumbo y buzamiento de las vetas con las concentraciones de Au.

Resultados

Variación en rumbo y en buzamiento de la veta

Las diferentes variaciones en rumbo y buzamiento de las estructuras vetiformes principales de ambas minas fueron analizadas a diferentes escalas de detalle, empezando desde la tendencia general para cada veta, hasta las tendencias evidenciadas a diferentes profundidades en cada uno de los bloques de falla al interior de las minas como se describe a continuación.

Mina La Ye: esta mina, presentó un avance en profundidad de seis niveles a la fecha de realización de este estudio, lo que equivale hasta el último nivel a 200 m bajo la superficie aproximadamente. La tendencia general de la veta es N15°W/64°SW, esta se encuentra cortada por cuatro zonas de fallas principales (falla Ciénaga-Grande, falla Lápida, falla Naranjal y falla La Ye). Las fallas definen cuatro bloques estructurales que de norte a sur corresponden a: bloque A (Lápida-Ciénaga Grande), bloque B (Lápida-Naranjal), bloque C (Naranjal-La Ye) y bloque D (La Ye Sur) (Figura 2A). No se evidenciaron variaciones significativas en el rumbo entre cada uno de los bloques de fallas. Sin embargo, el ángulo de buzamiento presentó una variación importante al aumentar desde 48°SW en el bloque D (extremo sur) hasta 76°SW en el bloque A (extremo norte).

Se realizó una comparación de la tendencia general con las tendencias obtenidas de cada nivel en cada bloque de falla, observando una verticalización de la veta en el bloque A (entre las fallas Ciénaga Grande y Lápida), aumentando la inclinación desde el nivel 1 (23 m.s.n.m) con 71°SW hasta el nivel 6 (-201 m.s.n.m) con 84°SW. En el bloque C con tendencia general

N20°W/60°SW y delimitado por falla Naranjal y falla La Ye, el buzamiento para el nivel 1 (23 m.s.n.m) siguió siendo bajo, 56°SW, el rumbo en los niveles 2 (-32 m.s.n.m) y 3 (-92 m.s.n.m) varía 12° al W con respecto a la tendencia general de la veta (N15°W). En el nivel 4 (-135 m.s.n.m) se observaron dos tendencias N17°W/63°SW y N20°E/63°SE siendo la primera similar a la tendencia general y la última totalmente contraria en rumbo, pero manteniendo la inclinación en el buzamiento.

Mina Mangos: esta mina, presentó un avance de cinco niveles, alcanzando una profundidad de 90 m bajo la superficie aproximadamente. La tendencia general de la veta es N4°W/34°NE y se encuentra cortada por siete zonas de falla (falla 900N, falla Mangos, falla San Pedro, falla 440N, falla 170N, falla 35Sur y falla Icacales) que definen seis bloques estructurales: bloque E (entre las fallas 900N y Mangos), bloque F (entre las fallas Mangos y San Pedro), bloque G (entre las fallas San Pedro y 440N), bloque H (entre las fallas 440N y 170N), bloque I (entre las fallas 170N y 35Sur) y el bloque J (entre las fallas 35Sur e Icacales) (Figura 2B).

Se reconocieron tres conjuntos de tendencias para los bloques, agrupadas en función de la frecuencia en que se presentan: el primer conjunto de tendencias presenta una dirección NNW-SSE buzando al NE-SW (bloques E y J), además de esto se observó una segunda tendencia con orientación N-S y buzamiento al E en los bloques F e I y la última con disposición general NNE-SSW buzando al SE-NW en los bloques G y H.

Con base en la variación de la profundidad, en el bloque E con tendencia general N6°W/34°NE se observó una variación significativa en rumbo de 31° en sentido antihorario en el nivel 1 (12 m.s.n.m) y para los demás niveles se sigue la tendencia general del bloque; para el caso del bloque F con tendencia general N-S/33°E se observó una variación en rumbo de 29° en sentido antihorario en el nivel 2 (-14 m.s.n.m). Para el bloque G con tendencia general N21°E/33°SE se determinó una horizontalización en profundidad iniciando con 36°SE de inclinación en el nivel 1 y terminando con 26°SE en el nivel 4 (-64 m.s.n.m). Para el bloque H con tendencia general N7°E/33°SE se apreció una variación en rumbo de 10° en sentido horario en el nivel 1. Para el bloque I con tendencia general N-S/41°E y J N18°W/37°NE no se apreciaron diferencias ni en rumbo ni en profundidad con respecto a la tendencia general de cada bloque.

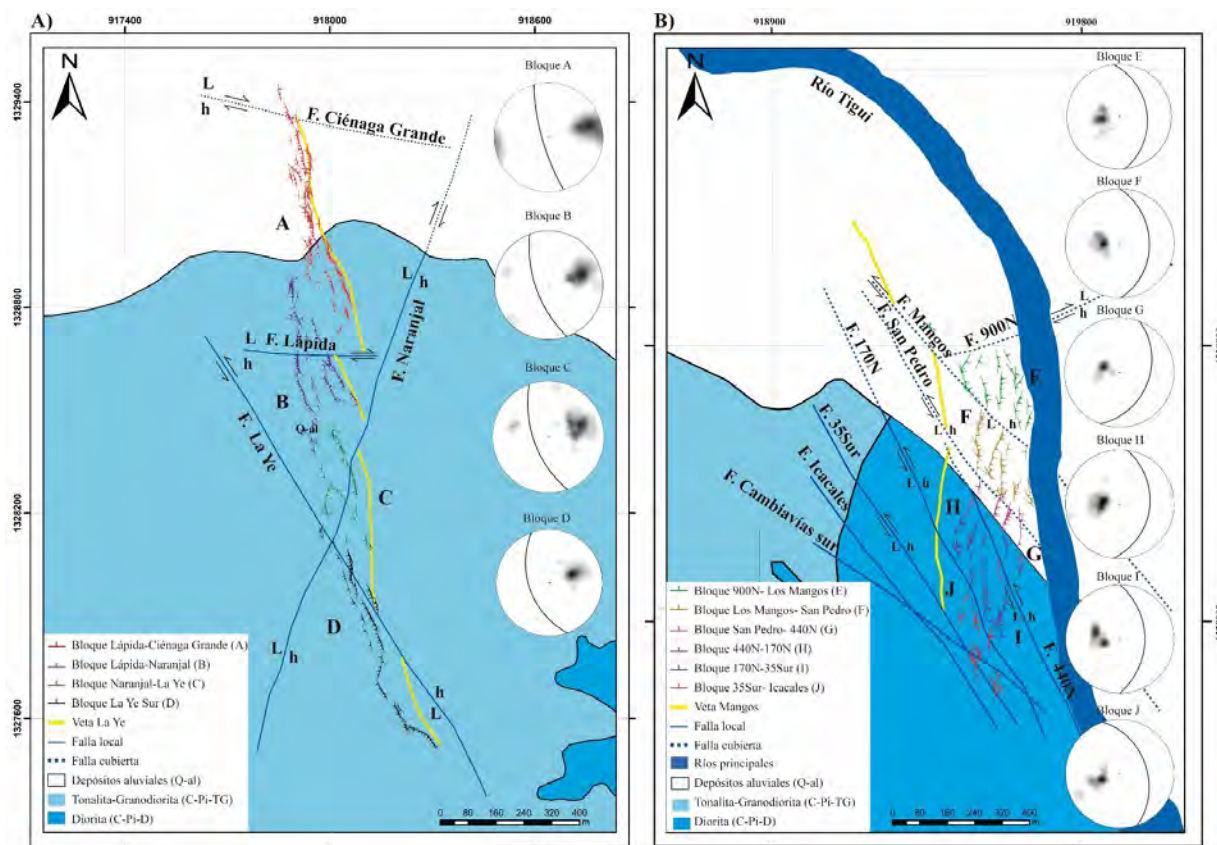


Figura 2. A. Espacialización de los datos estructurales y fallas locales de la mina La Ye. **B.** Espacialización de los datos estructurales y fallas locales de la mina Mangos. Ambas figuras presentan los estereogramas que señalan la tendencia general en cada uno de los bloques. Diagramas de contornos: proyección equiangular, hemisferio inferior de la esfera y distribución tipo Fisher.

Variación estructural en zonas de apertura y cierre

Debido a que los depósitos vetiformes de ambas minas se encuentran parcialmente emplazados en zonas de cizalla, la configuración de esta relación tuvo que ser tenida en cuenta, diferenciando así: 1) veta La Ye (Vye) y veta Mangos (Vm) como zonas de apertura con mineralización, 2) zonas de cizalla denominadas *Shear Ye* (Sye) y *Shear Mangos* (Sm) como zonas de cierre y 3) zonas de apertura parcial denominada *Mixed Ye* o *Mixed Mangos* (Mye y Mm respectivamente). Para el análisis de las tendencias se agruparon las estructuras (Vye y Mye) y (Vm y Mm) como zonas de apertura y favorables para la circulación de fluidos.

Mina La Ye: en esta mina la estructura Vye+Mye presenta una tendencia general N17°W/63°SW y Sye una tendencia N17°W/57°SW. Particularmente, se observó un incremento del ángulo de buzamiento

para Vye+Mye en el bloque A, desde el nivel 1 (23 m.s.n.m) hasta el nivel 6 (-201 m.s.n.m) de 65°SW a 84°SW respectivamente, como se identificó en el análisis realizado en el aparte de variación en rumbo y en buzamiento; mientras que para Sye, el buzamiento mostró un comportamiento contrario, disminuyendo desde 80°SW en el nivel 3 (-92 m.s.n.m) hasta 44°SW en el nivel 6.

En el bloque C, para el nivel 3 (-92 m.s.n.m) se presentaron dos tendencias para la relación Vye+Mye N30°W/57°SW y N80°W/84°SW ambas con giro izquierdo con respecto a la tendencia general de Vye+Mye. Por otra parte, en el nivel 4 (-135 m.s.n.m) la estructura Sye evidencia una tendencia N20°E/63°SE totalmente contraria (giro derecho) a la general (N17°W/57°SW) para este tipo de estructura. En el bloque D nivel 4 (-135 m.s.n.m) la estructura Sye presentó una tendencia N18°E/58°NW contraria (giro derecho) a la general para este tipo de estructura.

Mina Mangos: en esta mina la relación Vm+Mm presenta una tendencia general N6°W/36°NE y para Sm N15°E/36°SE. En cuanto a la relación Vm+Mm en cada uno de los bloques con respecto a la tendencia general se obtuvo una variación significativa de 27° en sentido horario en el rumbo del bloque G (N21°E/33°SE) y en el bloque J (N18°W/37°NE) se determinó una variación de 12° en el rumbo en sentido antihorario. Por otra parte, para la relación Sm se apreciaron giros del rumbo de 10° en sentido antihorario y 5° en sentido horario para el bloque E con una tendencia N5°E/37°SE y el bloque G con una tendencia N20°E/32°SE respectivamente; para el bloque I que presenta una tendencia N2°W/40°NE, se obtuvo un giro en rumbo de 17° en sentido antihorario.

Con base en la variación en profundidad, se observaron cambios en el bloque F donde la estructura Sm gira en sentido antihorario en los niveles N1 (12 m.s.n.m) y N5 (-89 m.s.n.m), en el bloque G se presenta este mismo comportamiento en el nivel 4 (-63 m.s.n.m) con una tendencia N11°W/29°NE para Sm. Este tipo de giros antihorarios también son evidenciados en los bloques H e I niveles N2 (-13 m.s.n.m) y N3 (-38 m.s.n.m) respectivamente.

Variación de las estructuras de reactivación al interior de la zona de cizalla

Este tipo de estructuras cortan los demás órdenes, generando fracturamiento y fallamiento en las vetas, pero no se encuentran bien definidas ya que no evidencian tendencias principales como si ocurre en las estructuras de segundo y tercer orden.

Mina La Ye: las estructuras de reactivación en esta mina presentan una tendencia principal N78°W/52°NE. Éstas se verticalizan desde el bloque A hacia el D, pasando de 52°NE de inclinación a 68°NE respectivamente. También, muestran una rotación del rumbo a medida que aumenta la profundidad en los bloques B y C, en el caso del bloque B evidencia una rotación de 34° en rumbo en sentido antihorario desde el nivel 1 con tendencia N51°W/71°NE hasta el nivel 4 con tendencia N86°W/65°NE y en el bloque C una rotación de 37° en rumbo en sentido horario desde el nivel 1 con tendencia N83°W/58°NE hasta el nivel 4 que presenta una tendencia N46°W/57°NE.

Mina Mangos: esta mina presenta como tendencia principal en las estructuras de reactivación (N37°W/81°NE), esta tendencia general da un giro progresivo en el rumbo en sentido antihorario y

una disminución en el ángulo de buzamiento desde el bloque E (N36°W/86°NE) hasta el bloque J (N50°W/61°NE) exceptuando el comportamiento del bloque H que presenta un giro en rumbo en sentido horario y una verticalización, mostrado por su tendencia general N19°W/84°NE. A medida que aumenta la profundidad, en el caso del bloque E (N36°W/86°NE), el nivel 2 (-14 m.s.n.m) presenta un giro en el rumbo en sentido horario de 16° (N20°W/87°NE); para el bloque F (N39°W/71°NE) los niveles 2, 4 (-64 m.s.n.m) y 5 (-90 m.s.n.m) presentan una variación en el rumbo, pero es significativa solo en este último con un giro antihorario de 11° (N50°W/65°NE); para el bloque G (N42°W/70°NE) se presenta una variación significativa en el nivel 2 con un giro de 16° en sentido horario (N26°W/75°NE). El bloque H (N19°W/84°NE) presenta un giro en sentido antihorario de 35° en el nivel 3 (-39 m.s.n.m) con una tendencia N54°W/61°NE). Para el resto de bloques no se tiene un avance significativo por lo que no hay suficientes niveles para realizar la comparación.

Cinemática

Este análisis fue desarrollado para las cuatro fallas principales presentes en la mina La Ye (falla Ciénaga Grande, Lápida, Naranjal y La Ye) y las seis fallas de la mina Mangos (900N, Mangos, San Pedro, 440N, 170N y 35Sur). Se procesaron datos estructurales correspondientes a estrías de falla, agrupados según el valor del *pitch* y el tipo de movimiento (ver Tabla 1), cabe resaltar que se eligió la componente predominante del movimiento para el procesamiento en el *software*. Además, se tuvieron en cuenta relaciones de corte, trabajos anteriores (Horner, 2018; Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri, 2018; Naranjo-Sierra, 2019; Starling, 2015) y estudios geofísicos (Bayona-Peláez, 2018).

En la mina La Ye, se presentan dos fallas con disposición aproximada N80-85°W/40-45°NE, como es el caso de la falla Ciénaga Grande y la falla Lápida, ambas con cinemática dextral. Para estas fallas se obtuvieron por el método de inversión (Angelier, 1984; Delvaux y Sperner, 2003; Muñoz-Martín y de Vicente, 2010; Reches, 1983) dos direcciones de compresión: 1) NW-SE y 2) NNE-SSW.

Con una disposición estructural totalmente diferente, se encuentra la falla Naranjal (N30°E/52°NW) y la falla La Ye (N35°W/61°NE), la primera con cinemática inversa y la segunda con cinemática sinistral. Se obtuvieron por el método de inversión (Angelier, 1984;

Delvaux y Sperner, 2003; Muñoz-Martín y de Vicente, 2010; Reches, 1983) dos direcciones de compresión: 1) NW-SE y 2) NNE-SSW para falla Naranjal y una dirección de compresión 1) NW-SE para falla La Ye.

En la mina Mangos, las fallas se dividen en dos direcciones preferenciales, una con rumbo NW-SE y otra con rumbo NE-SW. Las fallas Mangos, San Pedro, 440N, 170N y 35Sur representan la primera dirección, caracterizándose por su cinemática sinistral y por

presentar altos grados de inclinación al NE. Por otro lado, la falla 900N representa la segunda dirección y se caracteriza por presentar un alto grado de inclinación hacia el SE y una cinemática dextral. La mayoría de estas fallas presentan una reactivación como fallas normales, evidenciada en las estructuras lineales como estrías de falla de 90° cortando las demás estrías. Esta reactivación provoca el hundimiento de los bloques al NE como es el caso de San Pedro, 440N, 170N y 35Sur.

Tabla 1. Separación de datos de estrías de acuerdo con el *pitch* para cada una de las fallas.

Falla	Grupo	Pitch	Tipo de movimiento
Ciénaga Grande	1	0°-8°	Dextral-Inversa
	2	50°-65°	Inversa-Dextral
	3	90°	Inverso
Lápida	1	0°-5°	Dextral-Inversa
	2	40°-62°	Inversa-Dextral
	3	90°	Inverso
Naranjal	1	0°-5°	Dextral-Inversa
	2	90°	Inversa-Dextral
	3	110°-115°	Inverso-Sinistral
La Ye	1	0°-5°	Sinistral-Normal
	2	45°-55°	Normal-Sinistral
	3	90°	Normal
900N	1	0°-5°	Dextral
	2	45°-70°	Inversa-Dextral
	3	90°	Inversa
Mangos	1	0°-8°	Sinistral
	2	45°-75°	Inversa-Dextral
	3	45°-75°	Normal-Sinistral
	4	90°	Normal
San Pedro	1	0°-5°	Sinistral
	2	40°-75°	Inversa-Dextral
	3	40°-75°	Normal-Sinistral
	4	90°	Normal
440N	1	0°-10°	Sinistral
	2	45°-75°	Normal-Sinistral
	3	45°-75°	Inversa-Dextral
	4	90°	Normal
170N	1	0°-5°	Sinistral
	2	40°-75°	Inversa-Dextral
	3	40°-75°	Normal-Sinistral
	4	90°	Normal
35Sur	1	0°-10°	Sinistral
	2	40°-75°	Inversa-Dextral
	3	40°-75°	Normal-Sinistral
	4	90°	Normal

Determinación de paleoesfuerzos y eventos deformativos

La obtención de los tensores de esfuerzos para cada una de las fallas fue realizado a través del *software Win Tensor*® (Delvaux y Sperner, 2003), este da relevancia o peso al número de datos ingresados para cada tipo de movimiento. Por ejemplo, si se tienen cinco datos para fallas totalmente rumbo-deslizantes y 20 datos para fallas inversas, el tensor de esfuerzos resultante tendrá un componente mayoritariamente inverso, por este motivo, y para el propósito de este análisis, se determinaron los siguientes dos conjuntos de datos (ver Tabla 1), teniendo en cuenta la disposición estructural de cada una de las fallas y las direcciones de compresión ubicadas en el mismo cuadrante: el primer conjunto corresponde a los tensores de esfuerzos que evidenciaron una compresión NNE-SSW (N5-10°E) como es el caso del grupo 3 de la falla Ciénaga Grande y la falla Lápidas y el grupo 2 de la falla 900N (Figura 3B). El segundo conjunto se formó con los datos de los grupos 1 y 2 de las fallas Ciénaga Grande, Lápidas y La Ye, los grupos 2 y 3 de la falla Naranjal y el grupo 1 de las fallas Mangos, San Pedro, 440N, 170N y 35Sur ya que presentan direcciones de compresión ubicadas en el mismo cuadrante, dando como resultado una dirección de compresión predominante en sentido NW-SE (N40-50°W).

Complementando este análisis, se utilizaron los lineamientos geofísicos presentes en el DMB (Bayona-Peláez, 2018). Se logró observar que las tendencias generales determinadas tanto para las vetas como para las fallas que la limitan, son un patrón recurrente fácilmente observable en la respuesta geofísica del terreno. Además, es posible interpretar las relaciones de corte entre los diferentes lineamientos e indicar así la temporalidad de los paleoesfuerzos que los formaron. Se aprecian entonces en la Figura 3A las estructuras NW-SE cortando estructuras E-W, aspecto que se vuelve importante al relacionar la ocurrencia de diferentes eventos deformativos. En la Figura 3B se aprecian las direcciones de compresión establecidas, por último, se aprecian cada una de las estructuras generadas como producto de las direcciones de compresión (Figura 3C).

De esta manera, considerando las direcciones de compresión y las relaciones de corte, se ha interpretado que la zona de cizalla es resultado de un primer

evento de deformación pre-mineralización (D1), con una dirección de compresión E-W (Starling, 2015) (Figura 4A). Según las relaciones de temporalidad definidas en este estudio, la compresión NNE-SSW se interpretó como el evento D2 (Figura 4B), ya que tiene estructuras asociadas cortando la zona de cizalla y que muy probablemente permitieron la circulación de fluidos y con ello un primer evento de mineralización. La compresión NW-SE se interpretó como el evento D3 (Figura 4C) debido a que contiene indicadores cinemáticos de reactivación de fallas pre-existentes D2 y estructuras cortando la zona de cizalla. Según Naranjo-Sierra *et al.* (2016), Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri (2018), la combinación entre la generación de nuevas estructuras y la reactivación de las fallas (evento D3) seguramente permitió un segundo evento mineralizante con mayores tenores de oro.

Controles estructurales sobre la mineralización

Para cada uno de los bloques de ambas minas, se realizó un análisis teniendo en cuenta las variaciones en el buzamiento de la estructura (zona de cizalla) desde la superficie hasta el último nivel de avance de la mina, utilizando sólidos de variación de buzamiento (*Face-Dip*) construidos en *Leapfrog Geo 5.0*®.

Mina La Ye: la proyección para el bloque A concuerda con lo visto en el análisis anterior de tendencias estructurales, mostrando buzamientos más altos con respecto al resto de los bloques. La geometría de la veta evidenció dos franjas SW-NE con buzamientos cercanos a 80°SW y el resto de zonas con buzamientos entre 50-70°SW.

Se realizaron un total de cinco perfiles para este bloque, determinando que las principales concentraciones de mineralización (*High-Grades*) se encontraron en un rango de buzamiento entre 55°-65°SW. Uno de los mejores ejemplos, se observó en el bloque C, donde la geometría de la veta presentó dos franjas, una con buzamientos cercanos a 80°SW y otra con buzamientos entre 40° y 50°SW que van desde el SE hasta el NW (Figura 5A). Los *High-Grades* se presentaron en un rango de 40° a 50°SW (Figura 5B). Igual que en los bloques anteriores, los buzamientos altos de la estructura (80°SW) se encuentran por encima y por debajo de las principales zonas de mineralización.

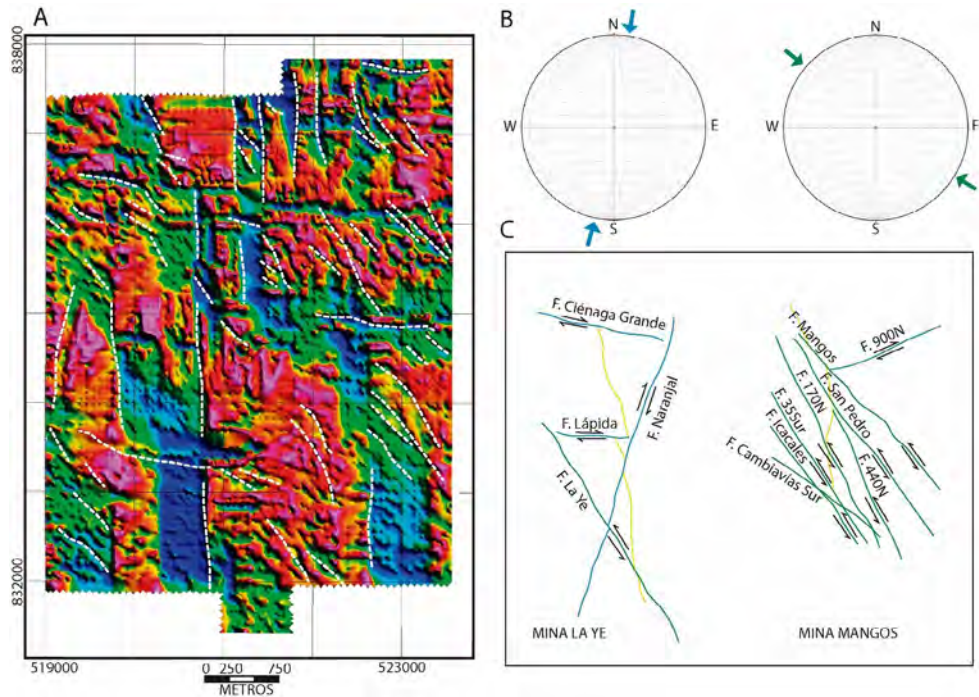


Figura 3. A. Mapa de relieve magnético sombreado para el Distrito Minero El Bagre (DMB) modificado de Bayona-Peláez (2018) que contiene en líneas punteadas blancas estructuras alineadas en dirección N-S; NW-SE; E-W. B. Direcciones de compresión preferenciales determinadas por el método de inversión, las flechas de color azul indican el evento deformativo D2 y las flechas de color verde indican el evento deformativo D3. C. Esquema ilustrativo de las fallas existentes en cada mina, la línea amarilla indica la veta de explotación para ambas minas, las fallas de color azul indican su formación en D2 y las fallas de color verde indican su formación en D3.

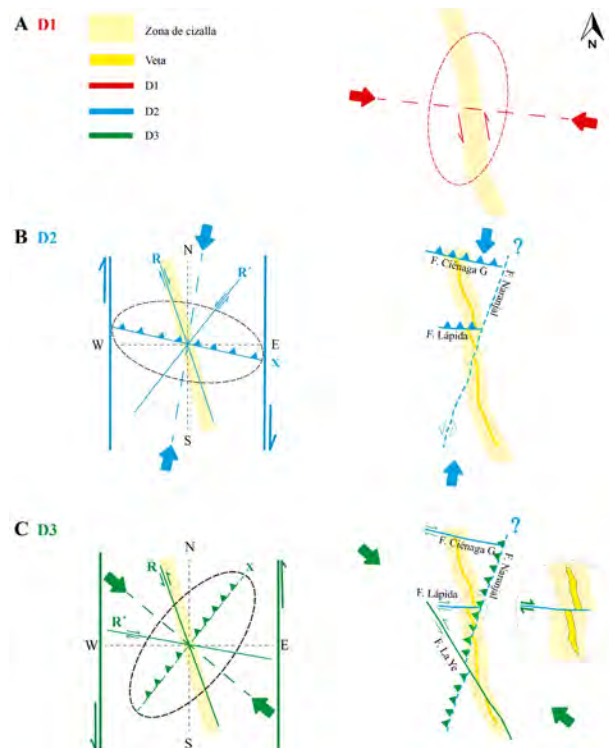


Figura 4. Esquema ilustrativo de eventos deformativos. A. Transpresión sinistral con compresión SEE-NWW, D1 (Starling, 2015). B. Transpresión dextral con compresión NNE-SSW, D2. C. Transpresión sinistral con compresión NW-SE, D3.

Mina Mangos: en el bloque E de mina Mangos, se aprecian franjas de inclinaciones mayores a 60° E seguidas de una disminución en dicha inclinación; esta inflexión entre 20° - 35° se encuentra alojando los altos tenores de mineralización (*High-Grades*). La existencia de mineralización en zonas donde el

buzamiento es mayor a 60° es nula (Figura 6). La evidencia de este comportamiento, puede observarse en el corte transversal 1 (Figura 6) donde ocurre una inflexión entre los niveles 1 y 2 concordando con la existencia de altos tenores. Este tipo de evidencias, son similares a las observadas en la mina La Ye.

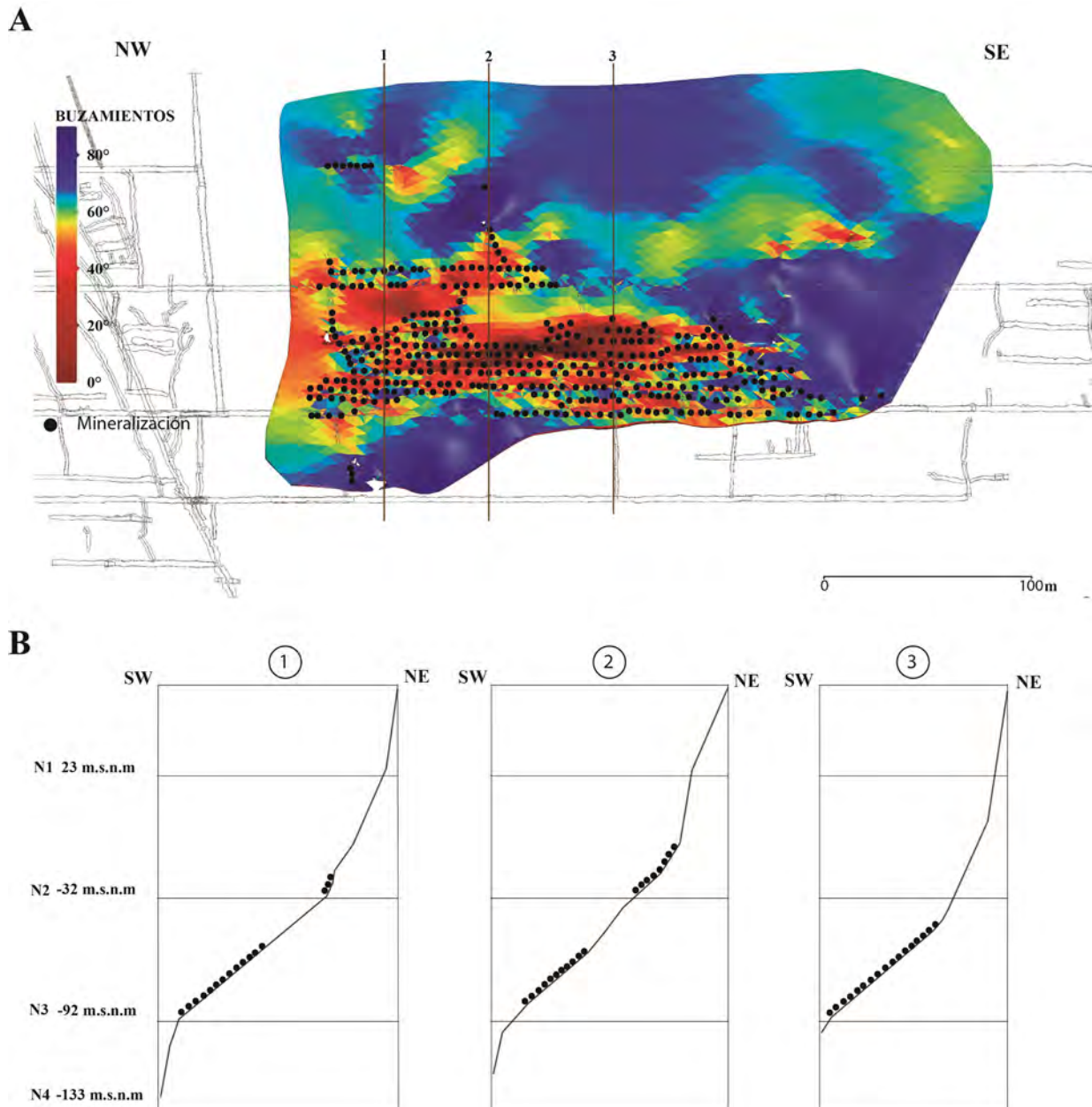


Figura 5. A. Face-Dip vista frontal para el bloque C, mina La Ye. **B.** Perfiles verticales donde se aprecia la existencia de altos tenores relacionados a la inflexión del buzamiento de la estructura.

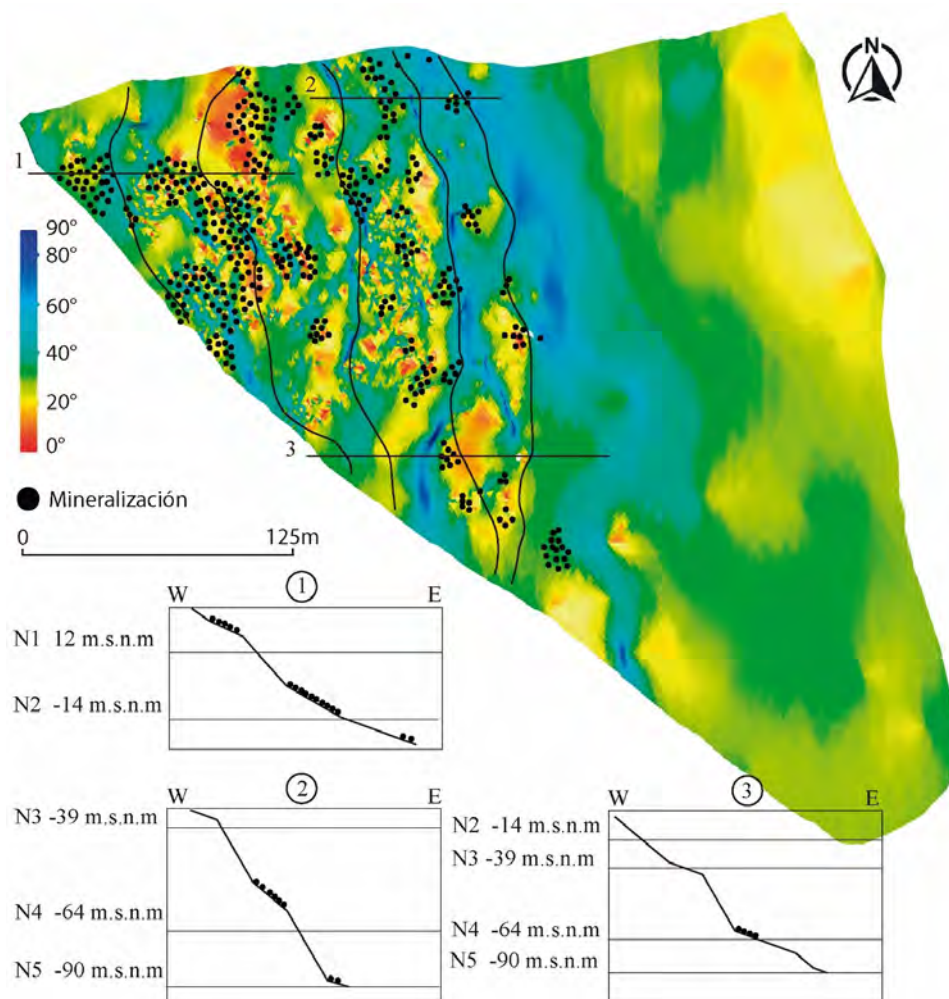


Figura 6. Face-Dip vista en planta para el bloque E, mina Mangos. Se observa la poca o nula existencia de altos tenores en las zonas de alto ángulo de buzamiento y al contrario, la existencia de éstos, en las zonas de menor buzamiento.

Discusión

Con los resultados obtenidos se plantean las posibles explicaciones de la verticalización de la veta al interior de los bloques de la mina La Ye, la determinación de eventos deformativos que propiciaron la generación de estas manifestaciones vetiformes en ambas minas y la relación entre la geometría de la zona de cizalla con la existencia de *High-Grades*.

Disposición estructural y variación en el ángulo de buzamiento de las vetas

Abad (2007) observó un segmento de la falla Otú-Pericos con una disposición N40°W/55°SW de carácter sinistral inverso en la carretera Zaragoza-El Bagre poniendo en contacto las rocas metamórficas del Paleozoico, con las rocas graníticas del Batolito

de Segovia de edad Jurásica, estableció una zona de influencia de 60 m aproximadamente y observó estructuras características de zonas de deformación dúctil, como pliegues y estructuras sigmoidales, a la vez que interpretó elipsoides de deformación. Sin embargo, no especificó si el área de influencia es a lo largo, ancho o a la redonda, adicionalmente observó una inflexión de la falla hacia el oeste, que sumado al carácter sinistral de la misma generaría espacios extensionales idóneos para la circulación de fluidos. Según los datos obtenidos, la tendencia general para la zona de cizalla de la mina La Ye (N15°W/64°SW) estaría relacionada a la dinámica regional de la falla Otú-Pericos, soportando también las observaciones realizadas por Abad (2007).

Con base en los datos, es evidente una verticalización de la veta La Ye hacia el norte, teniendo buzamientos

bajos (40°SW) en el bloque D y altos (80°SW) en el bloque A. Esta variación podría explicarse por: 1) variaciones composicionales de la roca caja que generaron diferentes respuestas a los esfuerzos generados por los diferentes eventos de deformación (respuesta reológica a la deformación) y 2) la verticalización obedece al plegamiento de la veta, producto del descenso del bloque A (bloque yacente falla Ciénaga Grande), que en este caso estaría actuando como un indicador cinemático (pliegue de

arrastre); muy probablemente esto ocurrió durante la reactivación de las fallas Ciénaga Grande y Lápida en el evento D3 (Figura 7). Ambas propuestas estarían en contraposición con lo mencionado por Starling (2015), puesto que este autor sugiere que los buzamientos subverticales al norte son producto del plegamiento de la veta después de haberse formado en la misma dirección que las vetas Icacales, Los Mangos y veta Cordero debido al levantamiento de la zona intermedia durante el evento D1.

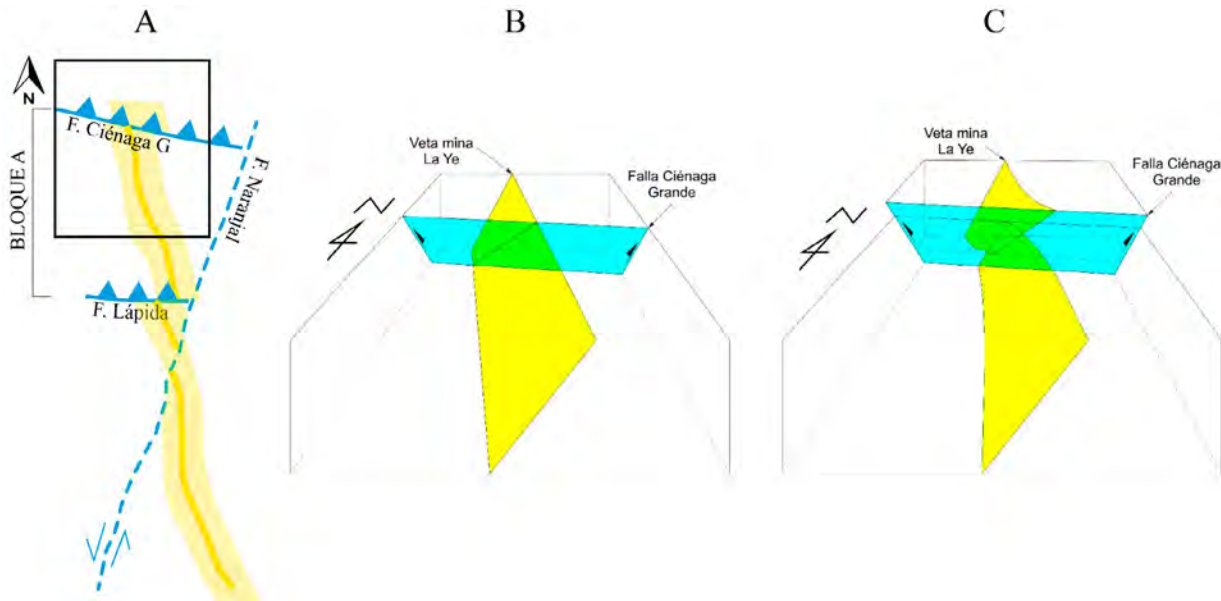


Figura 7. Modelo explicativo para la verticalización del bloque A. **A.** Vista planta. **B.** Bloque diagrama de la veta La Ye y la falla Ciénaga Grande sin desplazamiento. **C.** Bloque diagrama de la veta La Ye y la falla Ciénaga Grande con desplazamiento, se puede observar la verticalización al norte de la veta.

Eventos deformativos

Starling (2015) reconoce al menos cuatro eventos deformativos: D1, evento de compresión E-W (pre-mineralización) donde se generó la zona de cizalla; D2 evento de transpresión dextral NNE-SSW que generó zonas de falla NWW-SEE inversas (Ej. falla Lápida) y zonas de falla NNE-SSW sintéticas (dextrales) sub-paralelas al sentido de transpresión; un evento D3, de transpresión sinistral NNW-SSE que controló la mineralización y generó fallas sintéticas (sinistrales) a la dirección de transpresión (Ej. falla La Ye), así como fallas inversas NNE-SSW (Ej. falla Naranjal); por último propone una compresión E-W en un evento post-mineralización D4.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la disposición general de las vetas, sería el resultado de una compresión E-W, en concordancia con lo propuesto por Starling (2015) para el evento D1 (pre-mineralización), mientras

que para el evento D2 coincide con una transpresión dextral ($\text{N}5\text{-}10^{\circ}\text{E}$) sugiriendo la formación de fallas inversas con direcciones predominantes NWW-SEE (Ej. fallas Lápida y Ciénaga Grande) y asociada al primer evento mineralizante del distrito, conformado por importantes volúmenes de sílice, pirita y escaso oro (Naranjo-Sierra y Alvaran-Echeverri, 2020). Esta interpretación difiere con lo propuesto por Starling (2015) referente a la formación de la falla Naranjal ya que según este estudio se formaría como una falla antitética de componente sinistral que corresponde a una falla tipo R' en el modelo de Riedel (1929).

El evento D3 corresponde a una transpresión sinistral con generación de fallas sintéticas a la cizalla principal, las cuales son de carácter sinistral (Ej. fallas La Ye, Mangos), y a la reactivación de fallas preexistentes de dirección NEE-NWW que inicialmente eran inversas y en este evento muestran una componente

predominantemente dextral inversa (Ej. fallas Lápida y Ciénaga Grande); finalmente fallas con un movimiento sinistral inverso (Ej. falla Naranjal) se reactivaron como fallas con un movimiento inverso sinistral. Asociado a este evento, se tiene la principal etapa mineralizante con pirita-galena-calcopirita-teluros-oro (Naranjo-Sierra y Alvaran-Echeverri, 2020).

La circulación de fluidos mineralizantes en la reactivación de la falla Naranjal y en las fallas NNW podría explicarse por medio del mecanismo de válvula de falla, en el sentido de Sibson *et al.* (1988), producto

del esfuerzo de cizallamiento acumulado, la presión hidrostática del fluido supera la presión litostática creando una extensa permeabilidad en la fractura, el fluido geopresionado en profundidad fluye a lo largo de la zona de ruptura y las fracturas subsidiarias asociadas. La caída abrupta de la presión del fluido hacia valores hidrostáticos bajos desencadena la precipitación de minerales en la base de la zona de fractura y en estructuras lenticulares menores (desbordamientos) (Sibson *et al.*, 1988). Estructuras de relleno como consecuencia de la reactivación inversa de la falla Naranjal se pueden apreciar en la Figura 8.

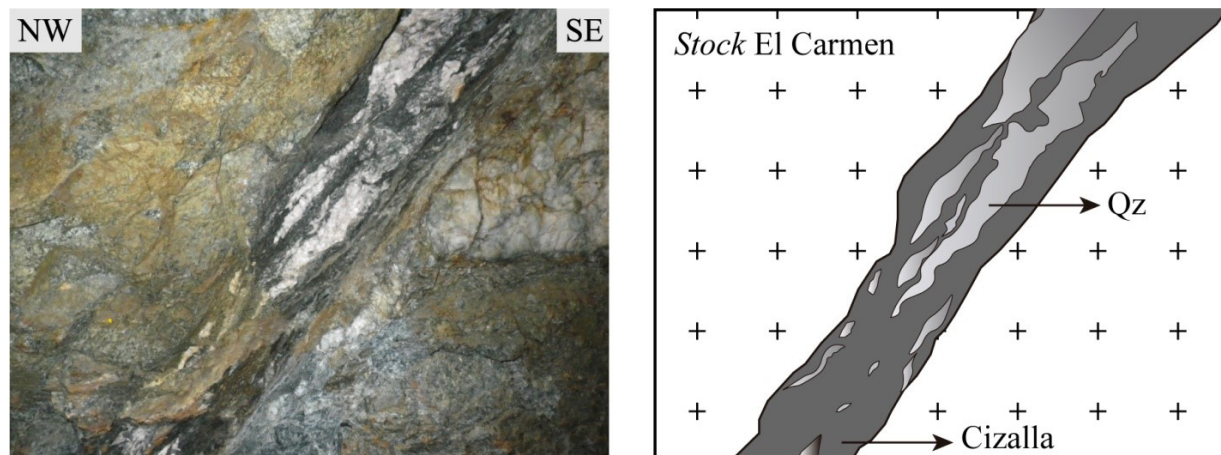


Figura 8. Relleno de cuarzo en la reactivación inversa de la falla Naranjal.

Con la información y los resultados obtenidos para este estudio, se encontraron indicios de un posible evento deformativo posterior a D3, sin embargo, en este trabajo no fue posible la identificación clara de eventos posteriores a D3, puesto que no se cuenta con los datos suficientes y los analizados sugieren la presencia de más de un evento deformativo. Starling (2015) sugiere la existencia del evento deformativo D4 que correspondería con la reactivación dextral de la falla Naranjal de la cual se tiene un paquete de datos de estrías con indicadores cinemáticos dextrales inversos (ver grupo 1, Tabla 1) y en el cual el comportamiento de las demás fallas permanecería invariable. Dado que la información no es concluyente se recomienda realizar un estudio más detallado que involucre análisis microtectónicos para determinar con claridad eventos posteriores al D3.

Edad relativa de los eventos deformativos

Leal-Mejía (2011) por medio de datación U-Pb (SHRIMP) presentó una edad Carbonífera (322-

310 Ma) para el Stock El Carmen. Adicionalmente, las dataciones K-Ar y Ar-Ar de alteración hidrotermal de las vetas, arrojaron edades de 280 Ma y 276 Ma respectivamente. Si se relaciona la edad de formación del stock y la edad de la mineralización podría inferirse que los eventos deformativos D1, D2 y D3 se originaron en un rango de ± 40 Ma. Teniendo en cuenta la edad de la mineralización, se hace posible la existencia de numerosas reactivaciones post-mineralización y con ellas la ocurrencia de varias direcciones de esfuerzos a lo largo de la evolución tectónica de la zona.

Relación entre la geometría de la estructura de cizalla y la mineralización

Según Fossen (2016) las fallas ideales de rumbo-deslizamiento serían perfectamente rectas. Sin embargo, incluso en los modelos experimentales más simples se producen fallas subsidiarias o segmentos de fallas que son oblicuos a la tendencia general. Tales anomalías generalmente se explican por la superposición de segmentos de fallas individuales que forman una

escala o una curva. Las estructuras contraccionales o extensionales se forman en tales curvas o escalones, dependiendo del sentido de movimiento.

La formación de espacios dilatacionales propicios para la circulación de fluidos mineralizantes podría deberse a diferentes causas. Una de ellas, es la existencia de fallas de transferencia donde las estructuras de enlace consisten principalmente en fracturas extensionales y fallas laterales de deslizamiento (Blenkinsop, 2004; Brogi y Fabbrini, 2009). Por otra parte, un enrejado de estructuras comunicadas entre sí permitiría la acumulación mineral (Jiang *et al.*, 1997). En la mina La Ye el cruce de la veta con la falla La Ye genera una zona de alto tenor según lo expresado por Horner (2018). Morton *et al.* (2012) plantearon un modelo donde las irregularidades o asperezas locales en el plano de falla dan como resultado la unión de espacios vacíos que permiten un flujo de fluido rápido y de alto volumen a la superficie de la Tierra, resultados similares fueron obtenidos por McKeagney *et al.* (2004) y Blenkinsop (2004).

Por medio de los perfiles verticales elaborados a partir de la vista frontal del modelo sólido estructural (*Face-Dip*), se observó una relación entre la variación del ángulo de buzamiento y la existencia de altos tenores. Las zonas de inflexión en el buzamiento coinciden con la distribución de altos tenores. La generación de espacios dilatacionales locales propiciados por las curvaturas en

buzamiento y el movimiento oblicuo de las estructuras, durante el evento deformativo D3 (Figura 9D). Además, las curvaturas izquierdas observadas en el rumbo de Sye durante el análisis (especialmente en los bloques C y D), generaron también espacios favorables para la circulación de fluidos en una cinemática sinestral.

Las zonas de dilatación se deberían formar aproximadamente perpendiculares al vector de movimiento de los bloques; si el vector indica un movimiento en rumbo (Figura 9B), la zona dilatacional sería sub-vertical mientras que si este vector indica un movimiento netamente inverso la dilatación sería sub-horizontal (Figura 9C). En el caso de estudio se presenta un movimiento oblicuo generado por la transpresión sinestral D3 (sinestral inverso), esto generó una zona de dilatación con un *plunge* bajo hacia el sur (Figura 9D).

En las zonas de cizalla transtensionales o transpresionales de acuerdo con Fossen (2016), ocurre la generación de duplexes debido a curvaturas en el rumbo de las estructuras, estos duplexes pueden ser extensionales o contracciones dependiendo del sentido de movimiento de la falla. Observaciones en la espacialización de los datos de segundo y cuarto orden en este estudio, muestran patrones que podrían ser asociados a la posible formación de duplexes extensionales al interior de la zona de cizalla y al evento de transpresión sinestral D3 (Figura 10).

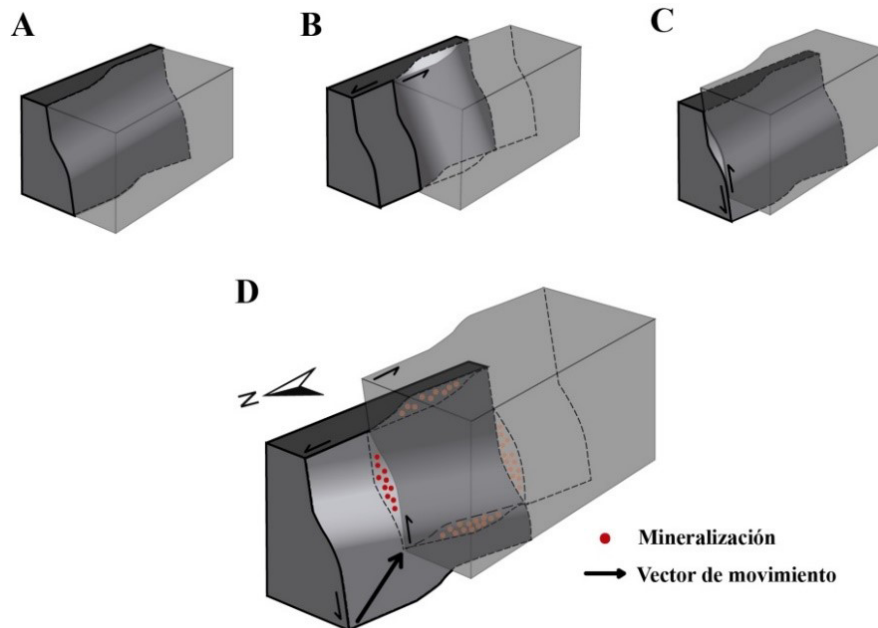


Figura 9. Esquema de formación de estructuras dilatacionales a partir de variaciones en el rumbo y buzamiento en el evento D3. **A.** Zona de fractura con curvatura izquierda sin desplazamiento. **B.** Movimiento sinestral que genera curvatura dilatacional en rumbo. **C.** Movimiento inverso que genera curvatura dilatacional en buzamiento. **D.** Transpresión sinestral que genera zona dilatacional con componente en rumbo y buzamiento.

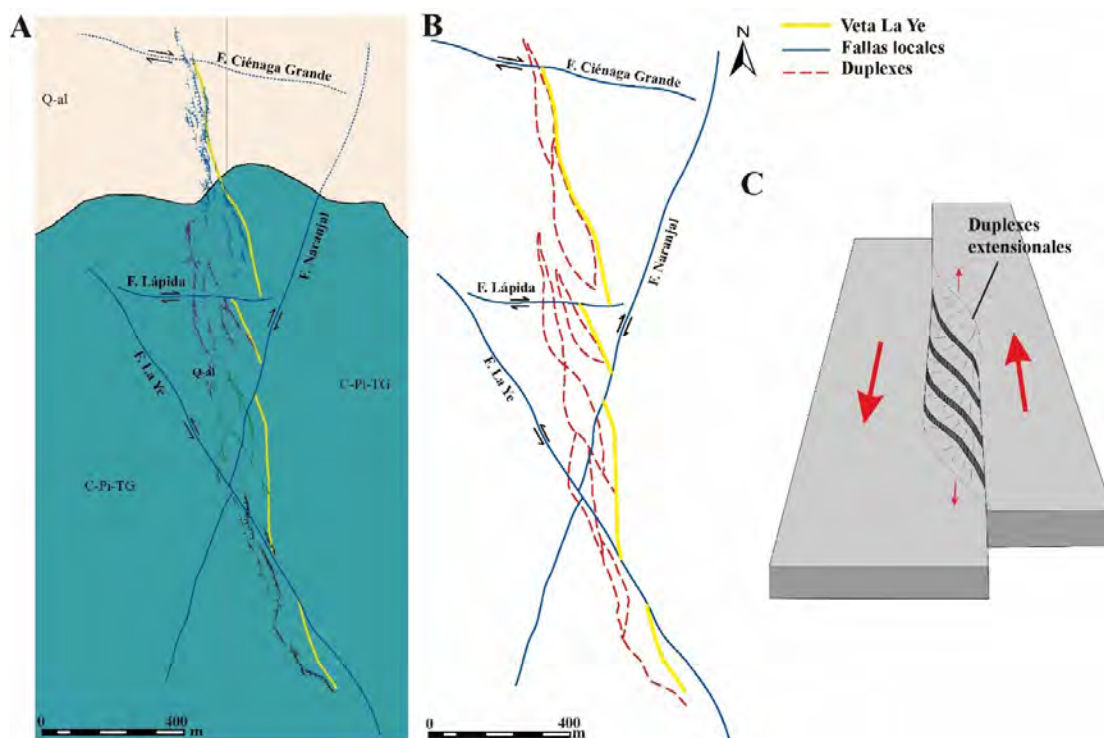


Figura 10. Esquema explicativo de la posible generación de duplexes al interior de la zona de cizalla. **A.** Espacialización del segundo orden. **B.** Esquema de posibles duplexes formados a lo largo de la zona de estudio. **C.** Esquema de zona transtensional donde se generan duplexes en una cizalla sinistral (modificado de Fossen, 2016).

Conclusiones

La tendencia general de la estructura principal (zona de cizalla) es $N15^{\circ}W/64^{\circ}SW$ para la mina La Ye y $N4^{\circ}W/34^{\circ}NE$ para la mina Mangos, presentando rumbos similares, pero buzamientos totalmente opuestos, por lo que se relaciona la zona de cizalla de la mina La Ye a fallas de cabalgamiento y a la dinámica regional de la falla Otú-Pericos para este sector, mientras que la zona de cizalla para la veta Mangos se relaciona a fallas de retrocabalgamiento. Es clara la verticalización de la veta en los bloques del norte de la mina La Ye con respecto a los bloques del sur, variando de 48° a 76° SW respectivamente, debido a que los bloques A y B se encuentran limitados por fallas con componentes mayoritariamente inversos.

La estructura de cizalla (Sye) presenta rumbos contrarios a la estructura Vye+Mye y concuerda con zonas de poca o nula mineralización en los lugares en donde se presentan giros a la derecha, ya que éstos generaron zonas contraccionales en el evento D3 que no permitieron la circulación de fluidos, mientras que los giros a la izquierda generaron zonas dilatantes que sí permitieron la circulación y la precipitación de la mineralización.

Como resultado de los análisis de cinemática, geofísica y relaciones de campo se ha interpretado que la zona ha estado sometida a tectónica transpresiva con cambios a través del tiempo de las direcciones de compresión que han formado los distintos eventos deformativos. Se presentan así tres eventos deformativos: D1 correspondiente a una transpresión sinistral NWW-SEE relacionado a un evento premineralización; D2 equivalente a una transpresión dextral que generó una compresión NNE-SSW y finalmente un evento D3 correspondiente a una transpresión sinistral, dando como resultado una compresión NW-SE.

Los tenores altos de Au están asociados a zonas de inflexión tanto en buzamiento como en rumbo que generaron estructuras dilatacionales favorables para la circulación de fluidos en el evento D3, debido a la transpresión sinistral que generó desplazamientos oblicuos en la reactivación de la zona cizalla principal.

La veta principal en la mina La Ye presenta un escalonamiento derecho generado por una transpresión sinistral que generó el evento D3 y ocasionó que fallas formadas durante el evento D2 con componente predominantemente inverso, se reactivaran como fallas dextrales inversas (Ej. fallas Lápida y Ciénaga Grande).

Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren agradecer especialmente a la compañía Operadora Minera S.A.S por el acceso a la información y permitir la publicación de este trabajo. También, al grupo de exploración de esta compañía, quienes aportaron valiosos comentarios en el desarrollo de este estudio y a la Universidad de Caldas por facilitar sus equipos y laboratorios, también a los evaluadores Guillermo Arturo Camargo Cortes y Ramón Guillermo Pérez Vázquez por brindarnos observaciones precisas en la redacción final de este estudio.

Referencias

- Abad, A.M. (2007). Informe técnico sectores El Carmen y La Ye, El Bagre, Zaragoza, Antioquia, Colombia. AngloGold Ashanti y Mineros S.A.
- Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5835-5848. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05835>
- Bayona-Peláez, D. (2018). Reporte geofísico: Estudio de magnetometría por vehículos aéreos no tripulados. El Bagre, Zaragoza, Antioquia, Colombia. Informe interno. Mineros S.A.
- Blenkinsop, T.G. (2004). Orebody geometry in lode gold deposits from Zimbabwe: implications for fluid flow, deformation and mineralization. *Journal of Structural Geology*, 26(6-7), 1293-1301. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.11.010>
- Brogi, A.; Fabbrini, L. (2009). Extensional and strike-slip tectonics across the Monte Amiata-Monte Cetona transect (Northern Apennines, Italy) and seismotectonic implications. *Tectonophysics*, 476(1-2), 195-209. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.020>
- Delvaux, D.; Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geological Society, London, Special Publications*, 212, 75-100. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>
- Fossen, H. (2016). *Structural geology*. Cambridge University Press.
- Gómez-Tapias, J.; Montes-Ramírez, N.; Nivia, A.; Diederix, H. (2015). Mapa geológico de Colombia. Escala 1:1000.000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.
- Horner, J. (2018). Second opinion on exploration activities, El Bagre Mining District, department of Antioquia, Colombia. Internal report. Mineros S.A.
- Jiang, Z.; Oliver, N.H.; Barr, T.D.; Power, W.L.; Ord, A. (1997). Numerical modeling of fault-controlled fluid flow in the genesis of tin deposits of the Malage ore field, Gejiu mining district, China. *Economic Geology*, 92(2), 228-247. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.2.228>
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach. Ph.D Thesis, Universidad de Barcelona, España.
- Londoño-Herrera, C.; Montoya-García, J.C.; Ordóñez-Carmona, O.; Restrepo-Álvarez J.J. (2009). Características de las mineralizaciones vetiformes en el Distrito Minero Bagre-Nechí, Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 26, 29-38.
- McKeagney, C.J.; Boulter, C.A.; Jolly, R.J.H.; Foster, R.P. (2004). 3-D Mohr circle analysis of vein opening, Indarama lode-gold deposit, Zimbabwe: implications for exploration. *Journal of Structural Geology*, 26(6-7), 1275-1291. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.11.001>
- Morton, N.; Girty, G.H.; Rockwell, T.K. (2012). Fault zone architecture of the San Jacinto fault zone in Horse Canyon, southern California: A model for focused post-seismic fluid flow and heat transfer in the shallow crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 329-330, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.02.013>
- Muñoz-Martín, A.; de Vicente, G. (2010). Análisis de esfuerzos tectónicos fallas y sismos. *Reduca (Geología)*, 2(6), 1-91.
- Naranjo-Sierra, E.; Alvaran-Echeverri, M.; Zapata-Cardona, E. (2016). Análisis metalogenético preliminar del depósito vetiforme en la mina La Ye, Antioquia, Colombia: características geológicas,

- isotópicas y estructurales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(3), 316-328.
- Naranjo-Sierra, E.; Alvarán-Echeverri, M. (2018). Características geológicas, isotópicas y estructurales del depósito vetiforme Los Mangos, Antioquia-Colombia. *Boletín de Geología*, 40(1), 93-108. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018006>
- Naranjo-Sierra, E. (2019). Estudio metalogénico de los depósitos vetiformes La Ye, Los Mangos y el prospecto Cordero-Balvina en la zona norte del Distrito Minero El Bagre, Antioquia-Colombia. Tesis de Maestría, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Naranjo-Sierra, E.; Alvaran-Echeverri, M. (2020). Fluid inclusion study of shear zone hosted lode gold type deposits: El Bagre mining district, Antioquia-Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 24(3), 245-257. <https://doi.org/10.15446/esrj.v24n3.80653>
- Reches, Z. (1983). Faulting of rocks in three-dimensional strain fields: II. Theoretical analysis. *Tectonophysics*, 95(1-2), 133-156. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90264-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90264-0)
- Riedel, W. (1929). Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. *Centralblatt für Mineralogie, Geologie, und Paleontologie*, 8, 354-368.
- Sibson, R.H.; Robert, F.; Poulsen, K.H. (1988). High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 16(6), 551-555. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0551:HARFFP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0551:HARFFP>2.3.CO;2)
- Shaw, R.P. (2000). Gold mineralization in the Northern Andes: magmatic setting vs. metallogeny. *XI International Mining Congress*, Bogotá, Colombia.
- Shaw, R.P.; Leal-Mejía, H.; Melgarejo, J.C. (2019). Phanerozoic metallogeny in the Colombian Andes: a tectono-magmatic analysis in space and time. In: F. Cediél, R.P. Shaw (eds.) *Geology and tectonics of Northwestern South America* (pp. 411-549). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_6
- Spikings, R.; Cochrane, R.; Villagomez, D.; Van der Lelij, R.; Vallejo, C.; Winkler, W.; Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: from Pangea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290-75 Ma). *Gondwana Research*, 27(1), 95-139. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Starling, A. (2015). Structural review of La Ye and Icaales-Los Mangos mines. Internal Field Report prepared for Mineros S.A. and Operadora Minera S.A.S. El Bagre, Zaragoza, Antioquia, Colombia.
- Varona-Bravo, D.S.; Naranjo-Sierra, E.; Toro, L.M. (2016). Características geoquímicas y petrográficas del stock El Carmen en el Distrito Minero El Bagre. Informe interno. Mineros S.A.
-
- Fecha de recibido: 01 de febrero de 2021
Fecha de aprobado: 19 de agosto de 2021
-