



Vigilada Mineducación

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL DEPÓSITO VETIFORME
EPITERMAL EN EL NE DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO – MINA LOS BALSOS,
YOLOMBÓ – ANTIOQUIA.

CRISTIAN CAMILO CATAÑO SOTO

Tesis

Asesor de tesis:

Maria Isabel Marín Cerón

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2023

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
OBJETIVOS.....	10
GENERAL	10
ESPECÍFICOS	11
ZONA DE ESTUDIO	11
DISEÑO METODOLÓGICO	14
TRABAJO DE CAMPO.....	14
MUESTREO	15
ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	16
PROYECCIÓN DEL MODELO.....	16
RESULTADOS.....	17
LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	17
MUESTREO	18
Granodiorita	18
Diorita	19
Saprolito.....	19
Vetas y venillas.....	20
Alteración fílica	20
Alteración argílica	20
CARTOGRAFÍA A DETALLE	24
ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO ESTRUCTURAL	30

Discontinuidades	30
Fallas	31
Vetas	31
Venillas	31
PROYECCIÓN DE VETAS.....	33
Sistema 1	33
Sistema 2.....	33
Sistema 3.....	34
Sistema 4.....	34
DISCUSIÓN	36
CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Polígono que delimita el área de trabajo de la mina Los Balsos y ubicación en el Batolito Antioqueño.	12
Figura 2. Planos topográficos solapados de la labor principal de la mina Los Balsos	17
Figura 3. Muestras de litologías representativas.....	21
Figura 4. Evidencia fotográfica de las estructuras importantes.....	22
Figura 5. Cartografía a detalles de los niveles A y D escala 1:500 y 1:200	26
Figura 6. Cartografía a detalles de los hallazgos importantes escala 1:50	28
Figura 7. Estereografía de los datos estructurales.....	32
Figura 8. Modelo morfológico de las estructuras vetiformes.....	34

Agradecimientos

Quiero aprovechar este espacio para expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me han acompañado y apoyado en el camino hacia la culminación de mi proyecto de grado; sus contribuciones, ya sean grandes o pequeñas, han sido fundamentales para lograr este importante hito en mi vida académica, un logro lleno de esfuerzo, sacrificio y sobre todo amor por la profesión. En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, quienes han sido mi roca durante todo este proceso, a mi abuela Bertha por criarme y fundarme los valores que me han convertido en el hombre que soy hoy, a mis padres Claudia y Aicardo, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi fuente de inspiración; su confianza en mí y su sacrificio han sido la fuerza detrás de cada logro, no tengo palabras suficientes para expresar mi gratitud hacia ustedes. Asimismo, quiero extender mi agradecimiento a la Mina los Balsos, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo mi proyecto de grado en su establecimiento; su colaboración y disposición han sido fundamentales para la realización exitosa de mi investigación, agradezco a todo el personal por su apoyo principalmente a Otoniel, Rogelio, Edison y Julián. A mi mejor amigo Jeffry, no tengo palabras para expresar lo mucho que influenció en este proyecto, me sostuvo emocionalmente durante todo el proceso y estoy seguro de que sin su apoyo no hubiese podido llegar hasta este punto, gracias por ser realmente un hermano en mi vida; no puedo dejar de mencionar a mi amiga Liza, quien ha sido una invaluable compañera, juntos realizamos las bases del proyecto y sin su ayuda no tendría el alcance que logró. Finalmente, deseo agradecer a la profesora María Isabel Marín por su paciencia, orientación y apoyo incondicional a lo largo de mi vida universitaria, su dedicación a la enseñanza y su compromiso con mis logros académicos han sido fundamentales para mi formación como profesional. Siempre estaré agradecido por su sabiduría y su constante motivación.

RESUMEN

Es importante comprender la morfología de una mineralización vetiforme cuando se busca realizar una estimación de recursos; conocimiento que apoya la posterior toma de decisiones en los procesos de exploración y extracción, especialmente cuando los factores estructurales juegan un papel significativo en la acumulación mineral. En aras de brindar una herramienta que optimice los procesos de exploración del proyecto Mina Los Balsos, se llevó a cabo un modelo morfológico de la mayoría de las estructuras interceptadas por su tunelería, que sirva de base para entender el comportamiento espacial de las vetas, su jerarquización, interacción espacial y su relación con eventos regionales, información que para proyectos posteriores pueda ser complementada con datos petrográficos. La zona de estudio se encuentra en el NE del batolito antioqueño, en la región más joven del cuerpo, donde están incluidos depósitos vetiformes de cuarzo, acompañados por sulfuros, que se encuentran desplazados por la zona de interferencia de la Falla Palestina. Estas estructuras presentan muchas falencias en la caracterización geométrica y estructural, debido a que es una zona de difícil acceso, que está siendo explotada en su mayoría por proyectos informales y la poca información técnica de dominio público. Es por esto por lo que se llevó a cabo la cartografía a detalle sustentada con muestras y datos estructurales, digitalizada en mapas (1:500 y 1:50) que representan la base para los modelos prospectivos, donde se proponen futuros “targets” de exploración, que a su vez facilitan la toma de decisiones de importancia económica e investigativa.

Palabras clave: morfología, vetas, caracterización, estructural, modelo.

ABSTRACT

It is important to understand the morphology of a vein-type mineralization when seeking to estimate resources, as this knowledge supports subsequent decision-making in exploration and extraction processes, especially when structural factors play a significant role in mineral accumulation. In order to provide a tool that optimizes the exploration processes of the Los Balsos Mine project, a morphological model is being developed for the majority of structures intercepted by its tunneling, which serves as a basis for understanding the spatial behavior of veins, their hierarchization, spatial interaction, and their relationship with regional events. This information can be complemented with petrographic data in future projects. The study area is located in the northeastern part of the Antioquian batholith, in the youngest region of the body, where quartz vein deposits accompanied by sulfides are present and displaced by the interference zone of the Palestina Fault. These structures suffer from significant deficiencies in geometric and structural characterization, mainly due to the challenging accessibility of the area, which is mostly exploited by informal projects and lacks technical information in the public domain. That is why detailed mapping supported by samples and structural data was carried out, digitized into maps (1:500 and 1:50) that serve as the basis for prospective models. These models propose future exploration targets, which in turn facilitate economically and scientifically significant decision-making.

INTRODUCCIÓN

Los depósitos epitermales son comunes en los niveles más superficiales de los sistemas hidrotermales y generalmente están encajados en conjuntos de rocas ígneas intrusivas o volcánicas antiguas (Valencia et al., 2006). En las zonas más someras estos sistemas evidencian características diagnósticas como: brechas de erupción hidrotermal, depósitos “hot spring”, depósitos piroclásticos, mantos de alteración de tipo “steam heated”, “stockworks” y sistemas vetiformes (Simmons et al., 2005; Conrado, 2014).

Las estructuras vetiformes se identifican como formaciones direccionadas, post-magmáticas hidrotermales, que también pueden estar relacionadas a zonas de falla, producto de una metasomatosis en donde la fractura da espacio para el ascenso y descenso de material en estado líquido. Estas formaciones siempre muestran una relación directa con la geología estructural de la zona, en donde su mineralización depende de las estructuras en intersección. También es importante mencionar que las fases tectónicas posteriores a la formación de la veta pueden generar desplazamientos de estas (Corbett y Leach, 1998).

El entendimiento de la geometría de una mineralización vetiforme de interés, es un paso fundamental en la estimación de recursos, ya que ayuda a tomar la decisión más adecuada, tanto en el método extractivo a implementar como en los procesos de exploración, y más cuando los factores estructurales juegan un rol significativo en la acumulación mineral. A la hora de delimitar las estructuras mineralizadas, juega un papel importante la comprensión de la capacidad de almacenamiento de estas y cómo sus características afectan de manera directa su calidad económica y su rentabilidad de explotación (Hronsky, 2019).

El batolito antioqueño, dentro del cual se encuentra la zona de estudio, se entiende como un cuerpo intrusivo relativamente trapezoidal con una homogeneidad petrográfica alta; al cual se le puede asociar muy poca deformación

en la roca encajante. En cuanto a su estructura interna, es relativamente homogénea y maciza, pero puede presentar zonas de debilidad locales relacionadas al flujo magmático (González, 2001; Duque et al., 2019). Tanto el batolito como la roca encajante son afectadas por un sistema de fallas en dirección (N60°W), y un sistema de fracturas perpendiculares a las primeras, de extensión menor, pero que tienen gran importancia en las geoformas posteriores (Londoño, 1998).

En la zona comprendida entre los municipios de Yalí y Yolombó, se encuentra el batolito antioqueño intruído por posibles depósitos epitermales de baja sulfuración, conclusión a la que se llega por la alta presencia en ellas de Cuarzo, Pirita y Galena. Los filones presentan una clara agrupación de los rumbos en dirección NE, con un rumbo secundario en dirección NW, similares a los presentes en el área de San Roque; mostrando un aumento significativo en el tamaño de los cristales de Ccuarzo (ganga) en la zona SW. Las estructuras en Filones del área son con frecuencia lenticulares, con ensanchamiento y reducción de los espesores a través de gran parte de su longitud (Rodríguez y Pernet, 1983).

En el límite entre los municipios Yolombó y Yalí, se encuentra la Mina los Balsos, un proyecto minero de bajos tenores de Oro y Plata, que se lleva a cabo en la parte NE del batolito Antioqueño, en donde se explotan vetas epitermales de baja sulfuración, con rumbos, en su mayoría NE y secundarios en dirección NW, además de presentar grosores que van desde 1 cm hasta 1,2 metros; las vetas están estudiadas de manera muy somera y localizada, debido a que es una zona de difícil acceso, con problemas de orden público y con deficiencias económicas (Los Balsos et al., 2021).

Al no pertenecer al Batolito de Segovia, el cual tiene filones con una importancia económica sobresaliente, que actualmente son explotados a gran escala (González et al., 2010); la zona de estudio tiene muchas falencias en la caracterización geométrica, petrográfica y estructural de sus mineralizaciones, además de que la poca información obtenida es en su mayoría muy empírica y

producto de la minería artesanal (Los Balsos et al., 2021). Es por esto por lo que se propone una caracterización morfológica del depósito epitermal vetiforme de la zona, respecto a las vetas interceptadas por los avances de la mina los Balsos, con el fin de entender su distribución y de esta manera facilitar lossus procesos extractivos y optimizar su exploración (Rodriguez y Pernet, 1983).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Como la geología estructural condiciona la morfología de los depósitos y su rentabilidad en la mina Los Balsos del municipio de Yolombó-Antioquia?

HIPÓTESIS

La distribución espacial de la mineralización de la mina Los Balsos está condicionada principalmente por los procesos distensivos, asociados a la dinámica de cizalla de la falla Palestina y sus ramales.

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar un modelo de distribución espacial con sus dinámicas, del sistema vetiforme en el [NE] del Batolito Antioqueño, específicamente en el municipio de Yolombó, Antioquia, que sea de utilidad en las labores de explotación y exploración de la Minas los Balsos.

ESPECÍFICOS

- Levantar topográficamente la tunelería del proyecto minero con el fin de ubicar espacialmente los datos a tomar.
- Cartografiar litología y estructuras, para luego ser descritas, agrupadas y en el caso de las vetas jerarquizadas
- Proyectar las estructuras ya descritas y agrupadas a lo largo del plano horizontal, con el fin de generar el modelo.

ZONA DE ESTUDIO

En el nordeste Antioqueño se encuentra la Mina los Balsos S.A.S, un proyecto minero a mediana escala delimitado por las coordenadas (Tabla 1) con un área de 7.96 hectáreas, comprendidas dentro del título Mineros Ancestrales de la Floresta de 104 hectáreas. En el municipio de Yolombó, cercano al corregimiento la Floresta, dentro de la vereda Quebraditas (Figura 1a) haciendo parte de la zona más joven del Batolito Antioqueño y a menos de 20 km del sistema de Fallas Palestina y sus ramales que configuran el cinturón polimetálico de Antioquia (Figura 1b). Ubicada en una de las zonas más jóvenes del cuerpo intrusivo, producto de pulsos magmáticos sin-colisionales en donde datos U-Pb arrojan edades del Cretácico Superior (Duque et al., 2019)

La Mina los Balsos es la continuación de un proyecto minero ancestral de socavón que inició de manera rudimentaria y artesanal en 1980 a manos de habitantes del corregimiento, pero no fue sino hasta el 2015 que la cuarta generación realizó el proceso de formalización y legalización como empresa minera. Actualmente emplea 183 personas y se estima que al menos 200 familias dependen de manera directa o indirecta, además de ser la principal fuente económica del corregimiento.

El proyecto cuenta con 4.780 metros lineales de tunelería, de los cuales 4.105 se encuentran funcionales actualmente, su bocamina (punto más alto del proyecto) se ubica a 1060 m.s.n.m. mientras el Nivel L (punto más profundo) llega a (950 m.s.n.m.) con poco más de 110 metros de profundidad. El proyecto opta por 2 medios principales de explotación, corte relleno para las vetas de alto tonelaje, pero baja ley y avance directo en veta para las de alta ley con bajo tonelaje.

La mina se enfoca en la explotación de vetas de cuarzo lechoso con grosores que van desde los 3 cm hasta 1.7 m con contenidos de Sulfuros (Pirita, Galena, Calcopirita) que van desde el 1 hasta el 20 %, para la extracción de Oro y Plata por medio de procesos de cianuración. Además, se estima que en promedio se extraen 150 toneladas diarias de carga, con leyes que varían entre los 3 y 12 (gAu / Ton).

Tabla 1. a) Coordenadas de la labor minera Los Balsos, b) coordenadas del título minero ancestrales de la Floresta, con sistema base de georreferenciación MAGNA – SIRGAS / Colombia Bogotá Zone

a)

Polígono de trabajo - Mina los Balsos		
Punto	Coordenadas Planas IGAC	
	X	Y
A	915192,222	1225894,983
B	915210,231	1225894,950
C	915436,040	1225732,452
D	915446,132	1225779,456
O	915358,911	1225683,571
E	915350,870	1225663,576
F	915112,839	1225709,040
G	915169,244	1225913,035
H	915136,197	1225896,088
I	915092,192	1225905,174

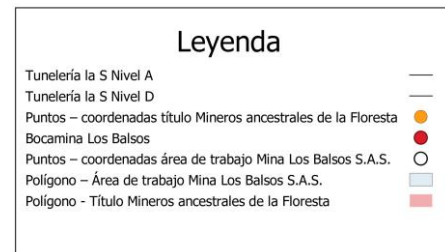
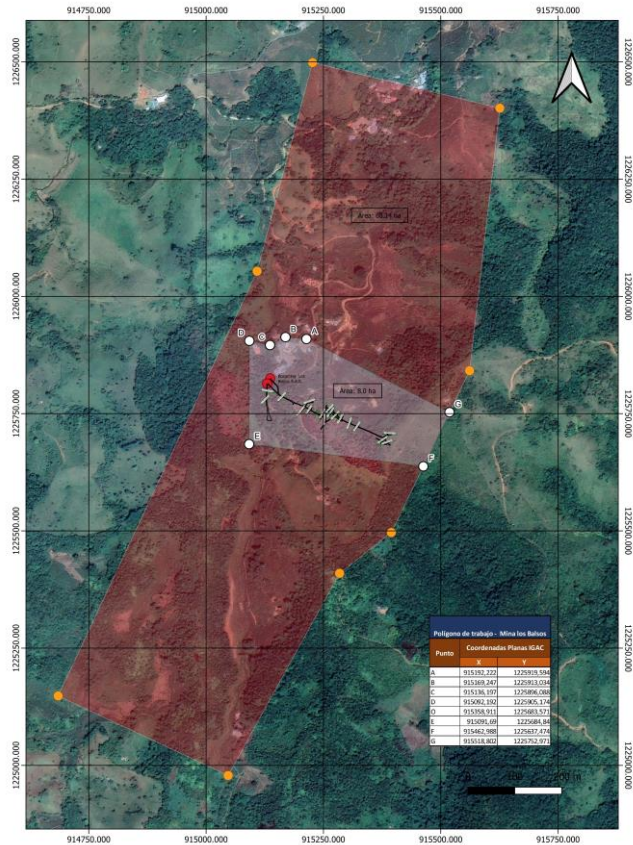
b)

Polígono - Título Mineros ancestrales de la Floresta		
Punto	Coordenadas Planas IGAC	
	X	Y
1	915108,739	1226053,530
2	914684,739	1225147,940
3	915046,943	1224978,270
4	915284,544	1225496,720
5	915394,834	1225496,440
6	915561,568	1225841,470
8	915625,916	1226401,350
0	915226,893	1226498,440

Figura 1. a) Polígono que delimita el área de trabajo de la mina Los Balsos. Sistema base de georreferenciación MAGNA – SIRGAS / Colombia Bogotá Zone.

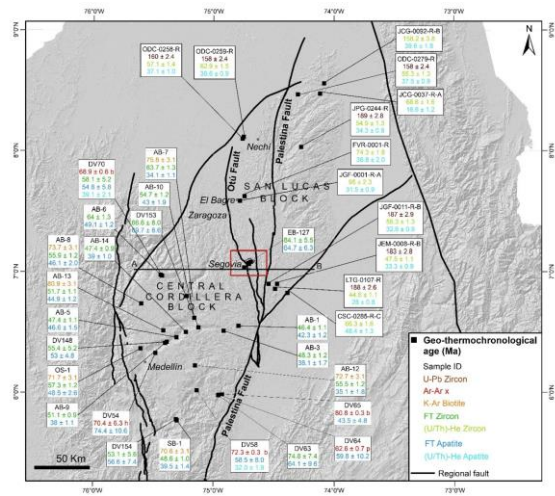
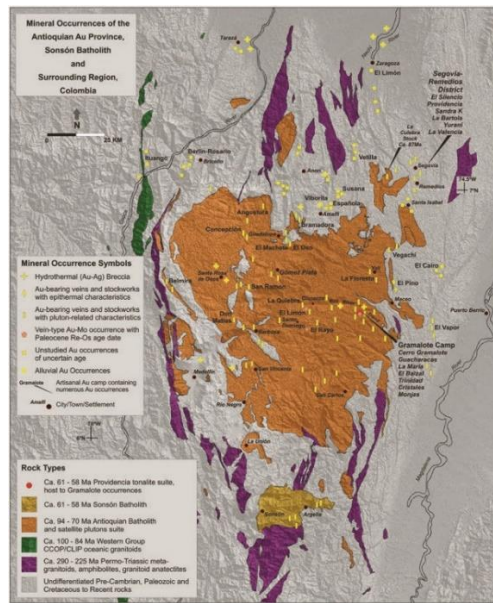
b) Distribución de las mineralizaciones del Cretácico medio al Eoceno presentes en el Batolito Antioqueño, enmarcando las ocurrencias de [Au] de La Floresta y Yalí, c) Mapa con compilación de datos geo y termocronológicos a escala regional para dos bloques litotectónicos en el norte de la Cordillera Central.

a)



b)

c)



Fuente:

Figura 1.b. Modificada de Shaw et al. (2019) y Figura 1.c. Modificada de Malo A., (2020).

DISEÑO METODOLÓGICO

TRABAJO DE CAMPO

Se tuvo acceso a información base de la empresa minera Los Balsos, proyecto que corta a través de su tunelería la mayoría de las estructuras y litologías de interés. Debido a que la mina no contaba con una adecuada georreferenciación, se llevó a cabo el levantamiento planimétrico de 1.432 metros lineales por medio del método “cinta y brújula” (Mejía et al., 2016), con el fin de ubicar espacialmente y digitalizar la tunelería en AutoCAD 2D 2020, definiendo con la ayuda de GPS, tres coordenadas externas a las cuales se amarraron los datos tomados en campo.

Luego se ingresó manualmente las distancias promedio y los ángulos horizontales obtenidos en la campaña topográfica, también se ubicaron 63 puntos georreferenciados a lo largo del levantamiento, en puntos estratégicos, cercanos a cambios litológicos, presencia estructuras como fallas, vetas y alteraciones con el fin de disminuir el error a la hora realizar la cartografía con detalle y a escala, Martín et al., (2017).

Dada la falta de información a detalle de la zona de estudio, se recopiló información general del Batolito Antioqueño, tanto de su formación como de sus eventos de mineralización (González, 2001; González et al., 2010; Shaw et al., 2019; y Duque et al., 2019), que se tomaron como referencia para asociar las diversas estructuras y litologías encontradas durante la realización de la cartografía a detalle (escala 1:500, 1:200 y 1:50). Esta cartografía se construyó a través de 1.050 metros lineales que fueron previamente seleccionados dentro de los 1.432 levantados topográficamente, descartando los segmentos en donde el difícil acceso limitan la cartografía. Durante el proceso se detallaron todas las vetas, fallas y litologías que se interceptan con las labores mineras seleccionadas (García et al., 2017), para luego ser escaneadas, georreferenciadas y digitalizadas en QGIS Desktop 3.16.2, desarrollando una Geodatabase (GDB) con capas de polígonos, líneas y puntos, agrupadas y clasificadas en vetas, fallas, discontinuidades sin indicadores cinemáticos, alteraciones, roca caja y presencia de sulfuros.

MUESTREO

A lo largo del proceso cartográfico se tomaron 52 muestras de mano de todas las estructuras y litologías encontradas, entre ellas se seleccionaron las 10 más representativas, las cuales se cortaron hasta obtener secciones delgadas con el fin de confirmar la mineralogía visible en las muestras macro. Las placas se encuentran

en procesos de digitalización con el fin de continuar el proceso de caracterización del depósito en proyectos futuros (Londoño y Marín-Cerón, 2016).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Con los datos estructurales agrupados en fallas, vetas, vetillas y discontinuidades se graficaron en diagramas de rosas y polos para evidenciar las tendencias y también en histogramas para la dispersión de los datos. Luego se clasificaron las agrupaciones con base en los rangos entre los cuales se encuentran los rumbos y buzamientos, para así tener una base a la hora de asignar una estimación tanto cronológica como jerárquica de las estructuras y eventos propuestos en la cartografía (Babín y Gómez, 2010). Dichas agrupaciones se realizaron en rango no mayores a 30° con respecto a su rumbo, agrupaciones a las que se le asignaron el nombre de “sistemas” con el fin facilitar la asociación a la hora de mencionarlas en el análisis posterior (Cárdenas, 2009).

PROYECCIÓN DEL MODELO

Con toda la información obtenida en el proceso cartográfico y en la agrupación estructural, se realizó una proyección horizontal de las vetas con base a la jerarquización y orden cronológico estimado de todas las series encontradas. Realizando una exageración horizontal de las estructuras en QGIS Desktop 3.16.2, asignándole un color a cada serie y conservando el posible orden de los eventos estipulado en procesos anteriores, también se realiza un modelo 3D simplificado en AutoCAD 3D 2020 con el fin de ayudar a visualizar su comportamiento espacial (Cárdenas, 2009). Los resultados se compararon con modelos del DMSR (Distrito minero de Segovia – Remedios) que también están condicionados por la zona de

influencia de la falla Palestina y ramales como la Otú-Pericos y Nus, para así darle peso a las discusiones y conclusiones (Ordoñez et. al., 2020).

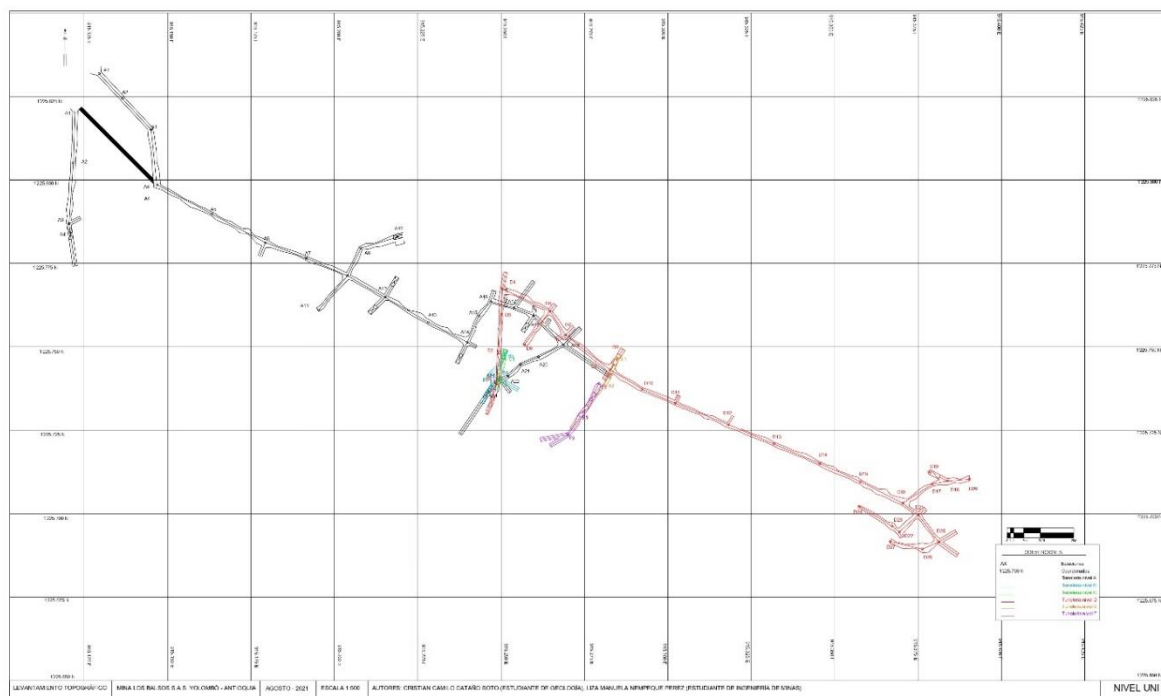
RESULTADOS

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Se realizó el levantamiento planimétrico de 1.432 metros lineales a través de los seis niveles (nivel A al nivel F) de la labor principal, plasmando en seis mapas (escala 1:500) las dimensiones georreferenciadas entre los 1071 y 1048 m.s.n.m., ubicando estratégicamente 63 puntos (A1 al L4) donde la tunelería tiene cambios de rumbo, presenta intersecciones, o muestra evidencias de puntos de interés (posibles vetas, venillas, fallas y cambios litológicos). Por otra parte, en los tramos relativamente rectos, donde la litología es constante, se ubicaron mínimo cada 10 metros, para facilitar la referenciación de la cartografía a detalle y minimizar el error obtenido en la toma de los datos (Figura 2).



Figura 2. Planos topográficos solapados de la labor principal de la mina Los Balsos. Se muestran los niveles A-F , con las estaciones determinadas (A01 hasta D27) y los verticales de accesos entre niveles. Sistema base de georreferenciación MAGNA – SIRGAS / Colombia Bogotá Zone.



MUESTREO

Se tomaron y georreferenciaron 52 muestras de mano a lo largo de los 1.430 metros levantados con topografía, en los puntos donde se encontraron cambios litológicos de la roca caja, alteraciones de importancia y vetas principales, clasificadas como: dioritas (7), granodioritas (6), saprolito (7), vetillas y vetas de cuarzo con contenidos variables de sulfuros (26); además de alteración fílica (4) y de alteración argílica (2) (Figura 3).

Granodiorita

Se recolectaron seis muestras de mano de granodiorita, rocas intrusivas de grano grueso, con diámetros entre los 5 - 10 cm y con evidencia predominante de cuarzo y plagioclasa, feldespatos en menor medida y entre los máficos Biotita y/o Anfíbol. También, tres muestras tienen oxidación relacionada al contacto con el agua que corre a través de las discontinuidades (figura 3a). Su presencia está acotada entre los primeros 70 metros de tunelería, en contacto con el saprolito superficial.

Diorita

Se clasificaron siete muestras como dioritas, rocas intrusivas de grano grueso, las cuales presentan menos cuarzo visible y un porcentaje más significativo de silicatos oscuros, dándole una tonalidad más coloreada, además, muestran alto contenido de plagioclasa y hornblenda en relación con una baja presencia de biotita y cuarzo. Las muestras tienen un diámetro entre los 4 y 10 cm, todas sin evidente meteorización y sin discontinuidades ni oxidación (Figura 3b). Es la litología predominante a lo largo de toda la tunelería y es, además, la roca caja en la cual se presentan las vetas más delgadas y con mayor contenido de sulfuro.

Saprolito

Entre las muestras tomadas siete de ellas fueron clasificadas como saprolito, con evidencia de fábrica plutónica de grano grueso, disgregable al esfuerzo con la mano y con un porcentaje inferior al 20% de roca firme e inalterada (Figura 3c) Está altamente oxidado y se encuentra en abundancia a lo largo de los primeros 30 metros de tunelería, así como en las zonas donde se da mayor densidad de discontinuidades (fracturas, vetas y fallas) con mayor flujo de agua subterránea.

Vetas y venillas

En total se tomaron veintiséis muestras, entre vetas y venillas (14 y 11, respectivamente), a lo largo de todas las intersecciones de la tunelería con las estructuras que contienen más del 5% de sulfuros (Pirita, Calcopirita y Galena). Todas presentaron cuarzo de origen hidrotermal como mineral principal (más del 80%) y valores que varían entre el 5 y el 20% de sulfuros, predominantemente Pirita (Figura 3d). En cuanto a la densidad de sulfuros disminuye en relación con el ancho promedio de la veta, las venillas presentan bajo tonelaje y alto tenor, mientras que las vetas poseen alto tonelaje y bajo tenor. También se encontró que las vetas con mayor volumen de sulfuros están acompañadas por alteración fílica en el respaldo (E). Por último, se tomó una muestra de venillas que contienen sólo zeolita, llenando discontinuidades que a su vez presentan indicadores cinemáticos dextrales.

Alteración fílica

En contacto con la mayoría de las vetas se encontró alteración Fílica (cuarzo – sericítica), donde se tomaron cuatro muestras entre 8 y 12 cm de diámetro, alto contenido de cuarzo secundario y sericita, resistencia media a ser fracturadas por el martillo y acompañando la mayoría de las vetas con alto volumen de sulfuro en el costado (E). En dos de ellas se puede evidenciar pequeños cristales de pirita inferiores a un milímetro, diseminados a través de la alteración (Figura 3e).

Alteración argílica

En dos puntos de intersección entre la tunelería y la veta principal del nivel A, se tomaron dos muestras de alteración argílica, rocas de tonalidad oscura con

alta resistencia a ser fracturadas por el martillo, a las cuales no se les alcanza a distinguir fácilmente los cristales de manera individual, al mismo tiempo están atravesadas por múltiples fracturas milimétricas que, en su mayoría, están llenas de cristales cúbicos subhedrales de Pirita (Figura 3f).

Figura 3. Muestras representativas de las rocas caja, alteraciones, vetas y saprolitos encontrados a lo largo del muestreo.

1. Granodiorita



2. Diorita



3. Saprolito



4. Vetas y venillas



5. Alteración fílica



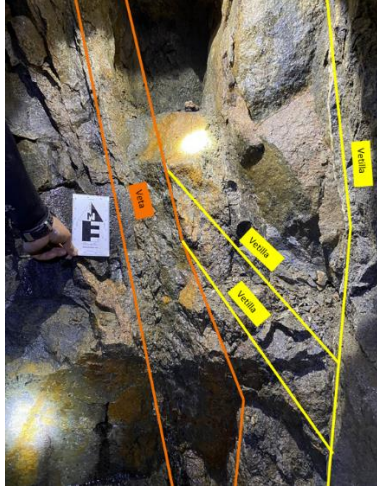
6. Alteración argílica



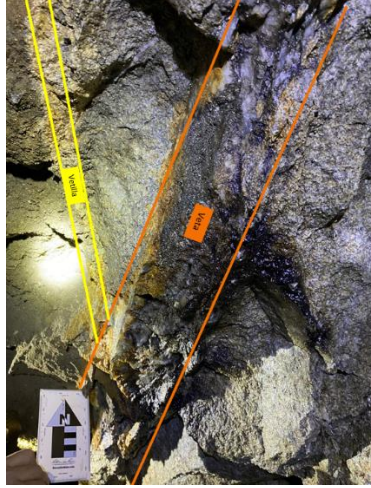
Durante el proceso de muestreo se identificaron zonas en donde la tunelería corta la intersección entre vetas y venillas, estas fueron fotografiadas y en donde era necesario se señalaron los bordes de las estructuras con el fin de permitir su jerarquización. Se evidenció que la continuidad de las estructuras vetiformes, en su mayoría, termina al entrar en contacto con otras de mayor grosor y con rumbos más cercanos al (N) (Figura 4).

Figura 4. Tramos de intersección entre vetas y vetillas en donde se evidencian puntos importantes de la cartografía: a) vetillas que conectan tangencialmente las vetas de mayor jerarquía. b) vetilla que termina en veta de la serie 1 de mayor grosor. c) vetillas que terminan en veta de la serie 2 de mayor grosor. d) y e) puntos en donde una veta de la serie 2 es cortada y desplazada por otra de la serie 1. f) vetillas que terminan en veta de la serie 3 de mayor grosor. g) cambio de 53 grados en el rumbo general de una veta de la serie 1. h) pliegue de arrastre a la largo de una veta con comportamiento dúctil. i) discontinuidad con indicador cinemático dextral de comportamiento frágil.

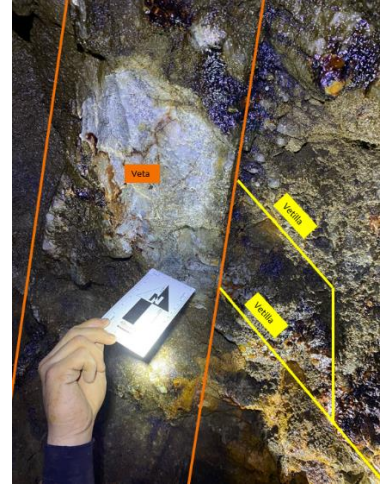
a)



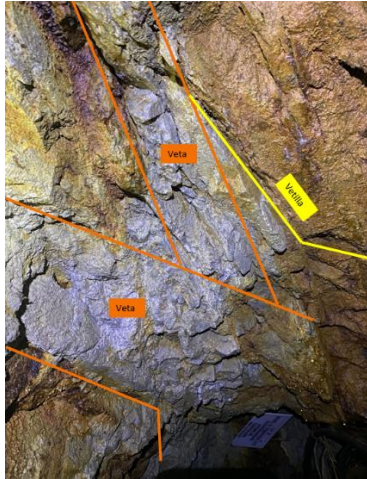
b)



c)



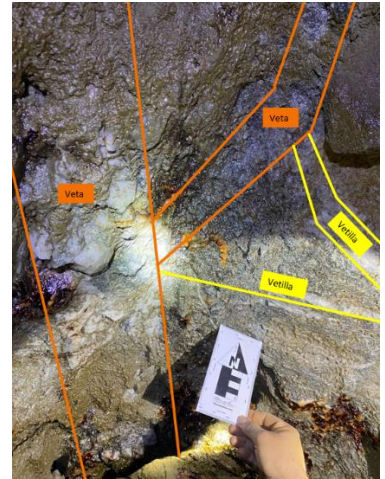
d)



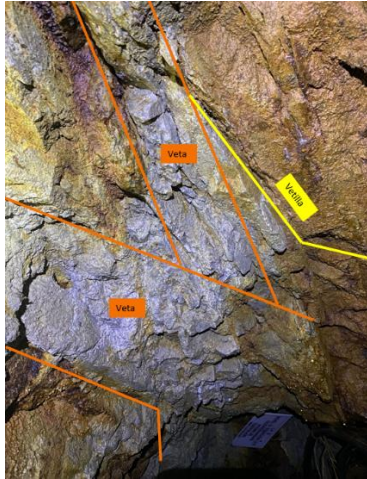
e)



f)



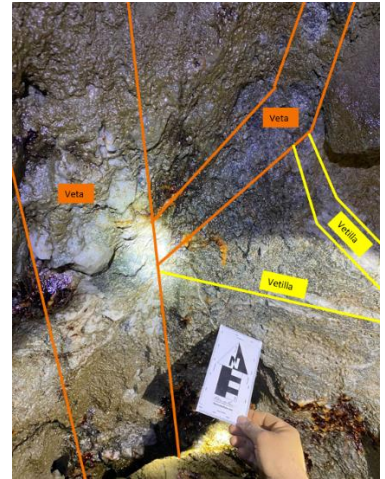
g)

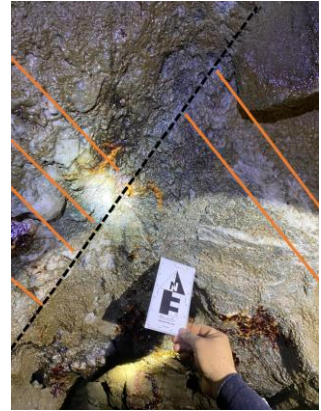


h)



i)





CARTOGRAFÍA A DETALLE

De los 1.432 metros lineales obtenidos en la topografía se realizó cartografía a detalle a 1.050 m, descartando 382 m los cuales tienen sostenimiento (estructura metálica que sostienen el macizo rocoso) que evita la visualización de la litología o no se encuentran en zonas accesibles y seguras. Como producto se obtuvieron dos mapas, nivel A (Figura 5a) y nivel D (Figura 5b) (a escala de detalle 1:200). En ellos se identificaron 7 fallas, 33 vetas (estructuras vetiformes rellenas de cuarzo y sulfuros, con más de 5 cm de ancho promedio), 63 vetillas (estructuras vetiformes rellenas de cuarzo y/o sulfuros, con espesores entre 0.5 y 4 cm en promedio), 22 discontinuidades en la roca caja sin indicadores cinemáticos evidentes (dos de ellas rellenas con zeolita), 6 zonas de alteración fílica acompañando a las vetas, 3 zonas de alteración argílica y 2 zonas de falla.

Durante el proceso de cartografía se pudo obtener varias relaciones litológicas, morfológicas y estructurales representativas. El área de contacto entre la alteración Argílica y Fílica, es la zona donde se encuentra la mayor densidad de venillas y presenta una jerarquía atípica de las estructuras vetiformes, venillas secundarias (sistema 4) con rumbos entre los 40 y 60 con respecto al norte, y

terminación en venillas primarias con rumbos entre los 20 y 30 grados (sistema 1), que a su vez finalizan en vetas con rumbos entre los 5 y 10 grados, todas con buzamientos muy rectos, cercanos a 90 (Figura 6a).

En la figura 6b se evidencia la continuidad de la alteración argílica acompañando a la veta a lo largo del respaldo E de la misma, en donde su ubicación y morfología tienen congruencia con la presente en la figura 6a. En ella también se encuentran las fallas llenas de zeolita con indicadores cinemáticos, las cuales a su vez cortan las discontinuidades estableciendo un posible orden cronológico de los eventos.

En el (SW) de la figura 6c se puede ver la morfología común de las estructuras vetiformes de la zona, vetas con rumbos entre los 20 y 30 grados con respecto al norte (Serie 1), que dan paso a venillas con rumbos entre los 40 y 50 grados (Serie 4), acompañadas por zonas de alteración fílica al respaldo E de las mismas, también evidente en la figura 6g. Caso contrario ocurre en la figura 5d en donde se encuentra una veta de gran espesor (60 cm) pero con bajo contenido de sulfuros (menos de 15%). En esta veta, con un rumbo atípico (60°/80 SE) (Serie 2), la estructura fue proyectada para identificar puntos de intersección con las vetas cercanas de alta ley, obteniendo las coordenadas de potenciales clavos de bonanza mineralizados (Figura 5c).

A lo largo de la figura 6e es claro el indicador cinemático más grande de la cartografía, en donde una veta principal es desplazada 53 grados al este (Figura 4g), producto de una falla aparentemente dextral que la corta. Adicionalmente se evidencia un cambio litológico en donde la diorita hace contacto tajante con un saprolito félsico. El rumbo de esta falla coincide a su vez con el rumbo predominante de la zona de falla de 13 metros de espesor, presente en el Nivel D, 60 metros por debajo de la anterior (Figura 6h)

En la figura 6f se evidencia una relación directa entre las zonas de alta densidad de estructuras vetiformes y extensas áreas de saprolito, en donde siete

venillas y dos vetas (todas con gran variedad de rumbos) se cortan entre sí a lo largo de una roca caja de muy baja resistencia, relacionable al paso de agua subterránea que se percola a lo largo de las estructuras y al fracturamiento previo a la actividad hidrotermal.

Figura 5.a. Cartografía a detalle del nivel A. que contiene los datos estructurales, fallas, zonas de falla, discontinuidades, vetas, vetillas, litologías de roca caja y alteraciones, además de la proyección horizontal de 7 de sus vetas. A escala 1:500, con sistema base de georreferenciación MAGNA – SIRGAS / Colombia Bogotá Zone.

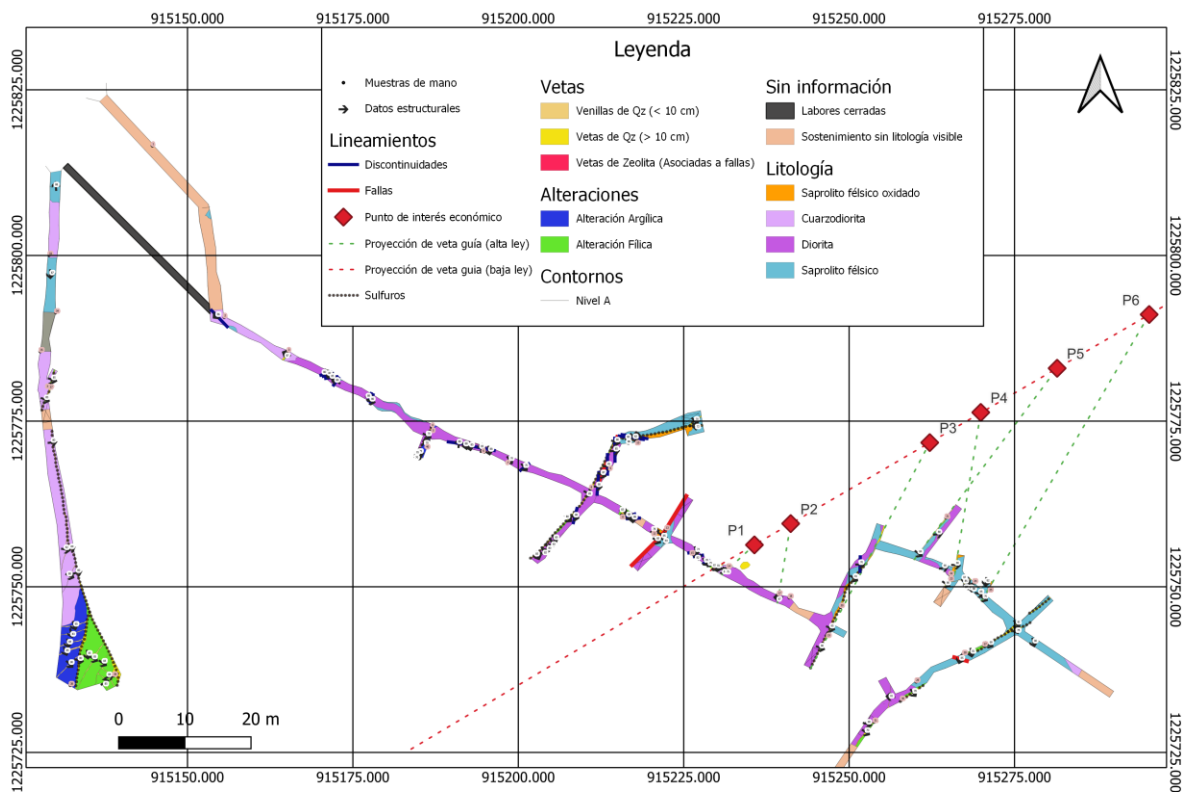


Figura 5.b. Cartografía a escala 1:500 del nivel D que contiene los datos estructurales, fallas, zonas de falla, discontinuidades, vetas, vetillas, litologías de roca caja y alteraciones. Sistema base de georreferenciación MAGNA – SIRGAS / Colombia Bogotá Zone.

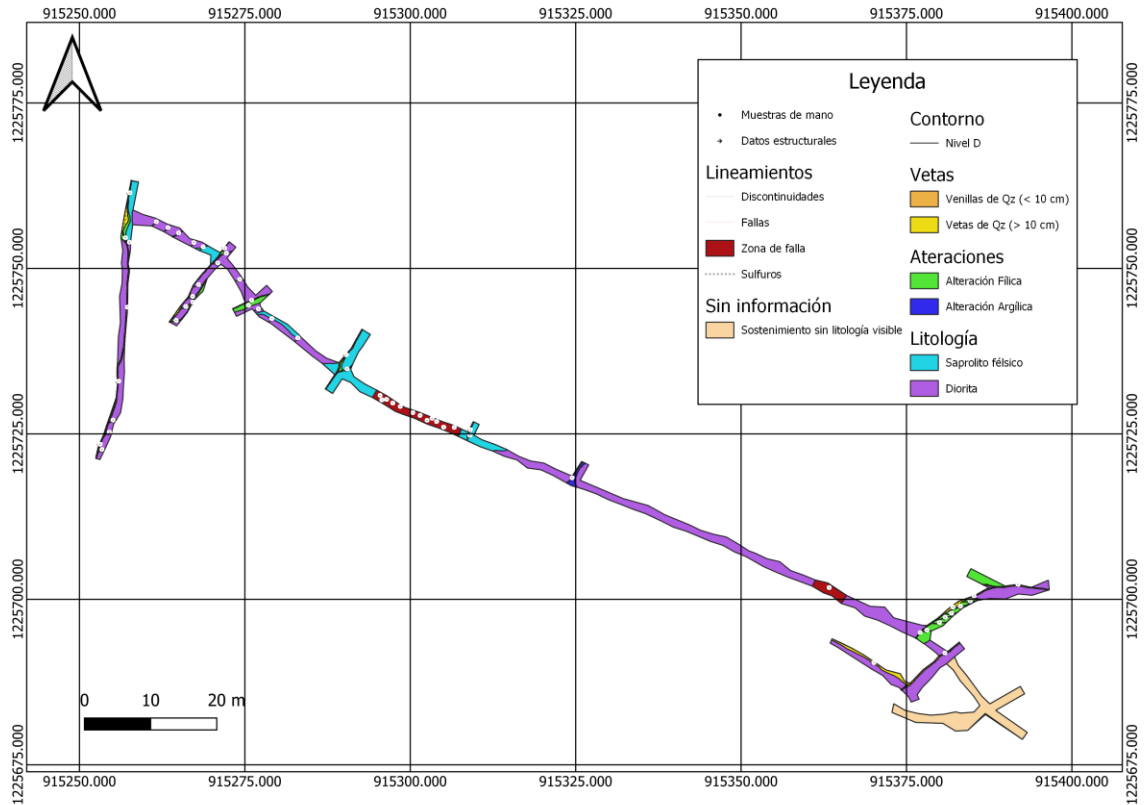


Figura 5.c. Cartografía a escala 1:200 del nivel A que contiene los datos estructurales, fallas, zonas de falla, discontinuidades, vetas, vetillas, litologías de roca caja y alteraciones, en donde se hace énfasis en la proyección horizontal de siete de sus vetas y en donde se identifican los puntos de intersección entre ellas. Sistema base de georreferenciación MAGNA – SIRGAS / Colombia Bogotá Zone.

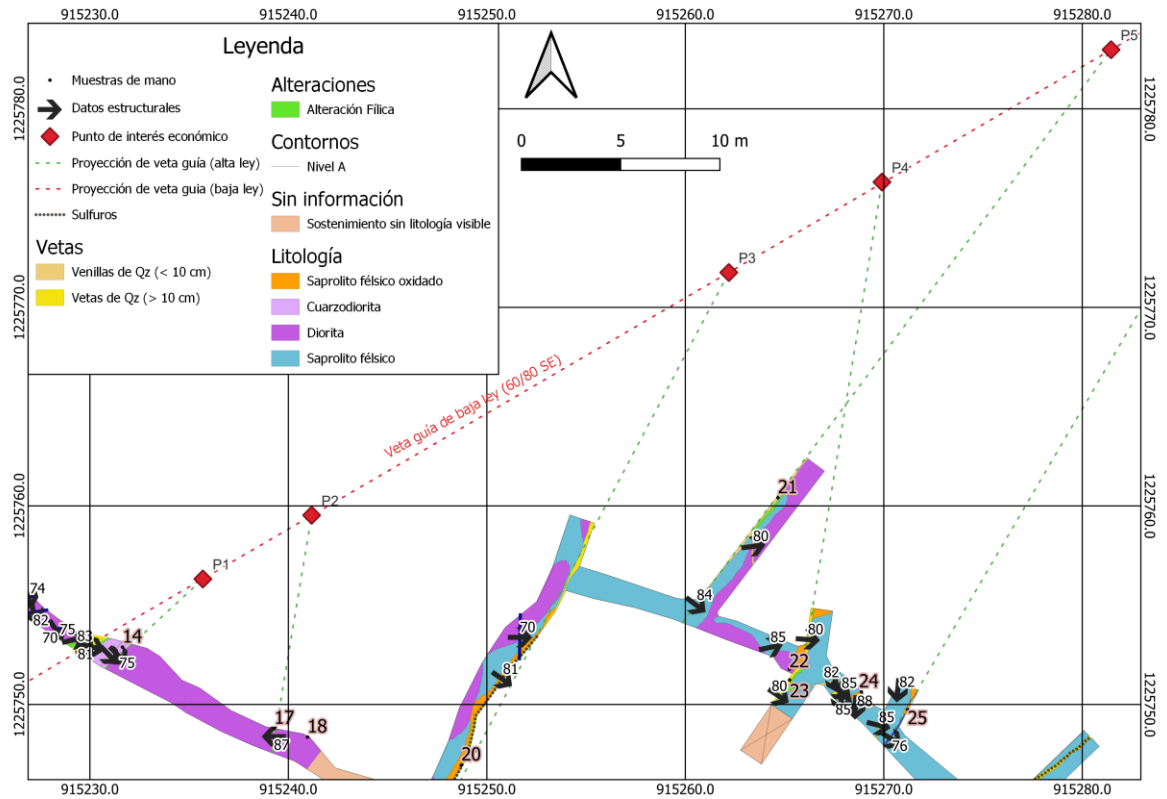
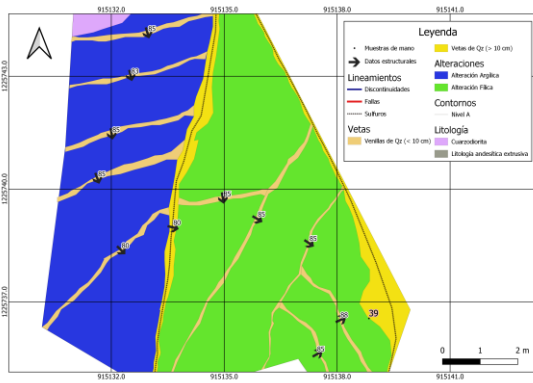
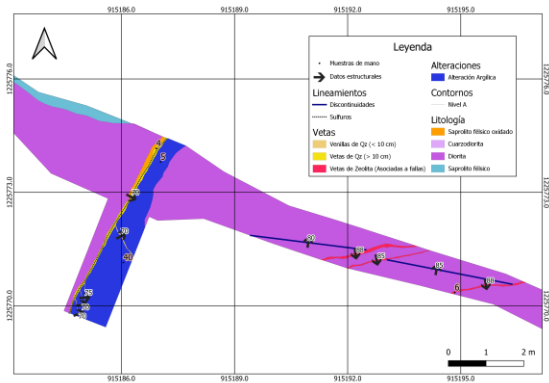


Figura 6. Cartografía a escala 1:50 de los niveles A y B. a) zona de mayor densidad de venillas y contacto entre las alteraciones Fílica y Argílica; b) fallas rellenas de Zeolita; c) relación morfológica entre vetas y venillas; d) proyección de la veta guía de baja ley; e) relación entre discontinuidades y fallas; f) relación entre vetas y saprolito; g) relación entre vetas y alteración argílica; y h) zona de falla principal con datos estructurales. Sistema base de georreferenciación MAGNA – SIRGAS / Colombia Bogotá Zone.

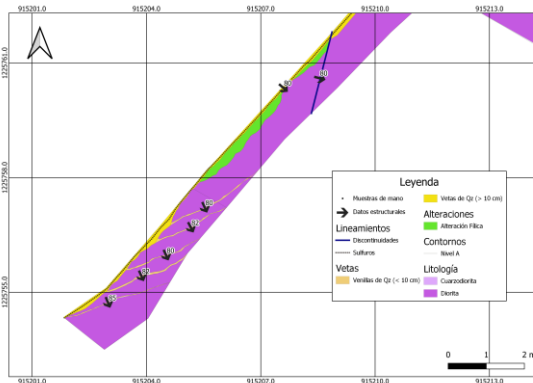
a)



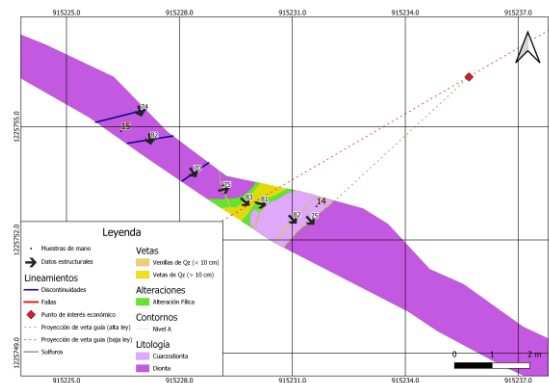
b)



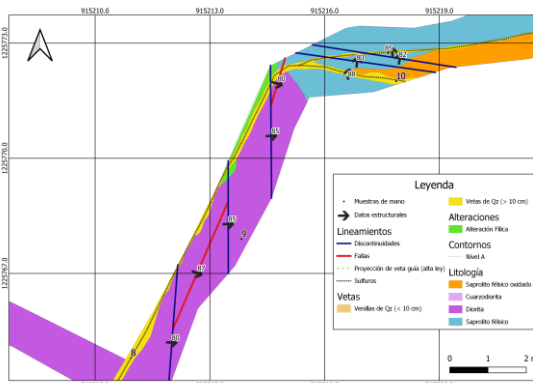
c)



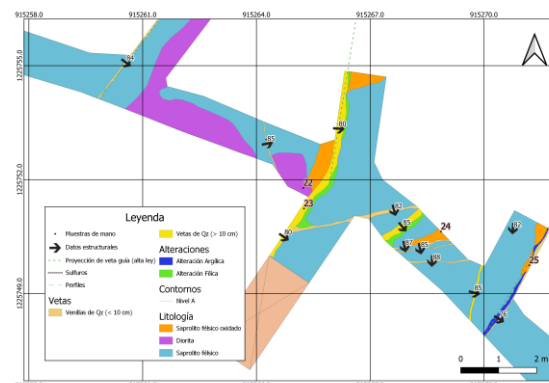
d)



e)



f)

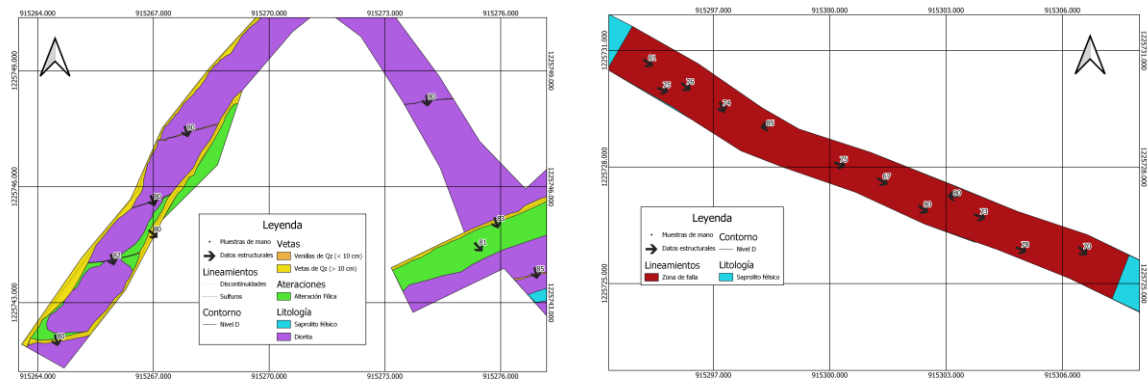


g)



h)





ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO ESTRUCTURAL

Con el fin de caracterizar y agrupar las estructuras encontradas en el área de estudio, se realizaron diagramas de rosas, diagramas de polos e histogramas con los datos de rumbo, buzamiento y dirección de buzamiento tomados en campo. La base de datos incluye 22 datos estructurales de discontinuidades, 17 de fallas y zonas de falla, 48 datos en vetas y 69 en vetillas (Figura 7).

Discontinuidades

Son los datos estructurales más erráticos, difíciles de agrupar y con el histograma más disperso, lo cual indica que los eventos y esfuerzos de formación pueden ser muy variados. Los datos más frecuentes (33%) están comprendidos entre los rumbos 350 y 20° con respecto al norte, buzando al N entre los 85 y 90°.

Fallas

Tanto las fallas aisladas como la zona de falla de 12 metros de espesor de la tunelería en el Nivel D presentan una tendencia marcada, en donde el 55% de los datos estructurales están entre los 10 y 40 ° de rumbo con respecto al norte y buzamientos rectos (87 a 89°) al este. Todos los indicadores cinemáticos infieren un comportamiento de rumbo dextral. Se puede asociar una tendencia secundaria en donde el 20% de las fallas presentan un rumbo entre los 60 y 90 °, con buzamientos e indicadores muy cercanos a los anteriores.

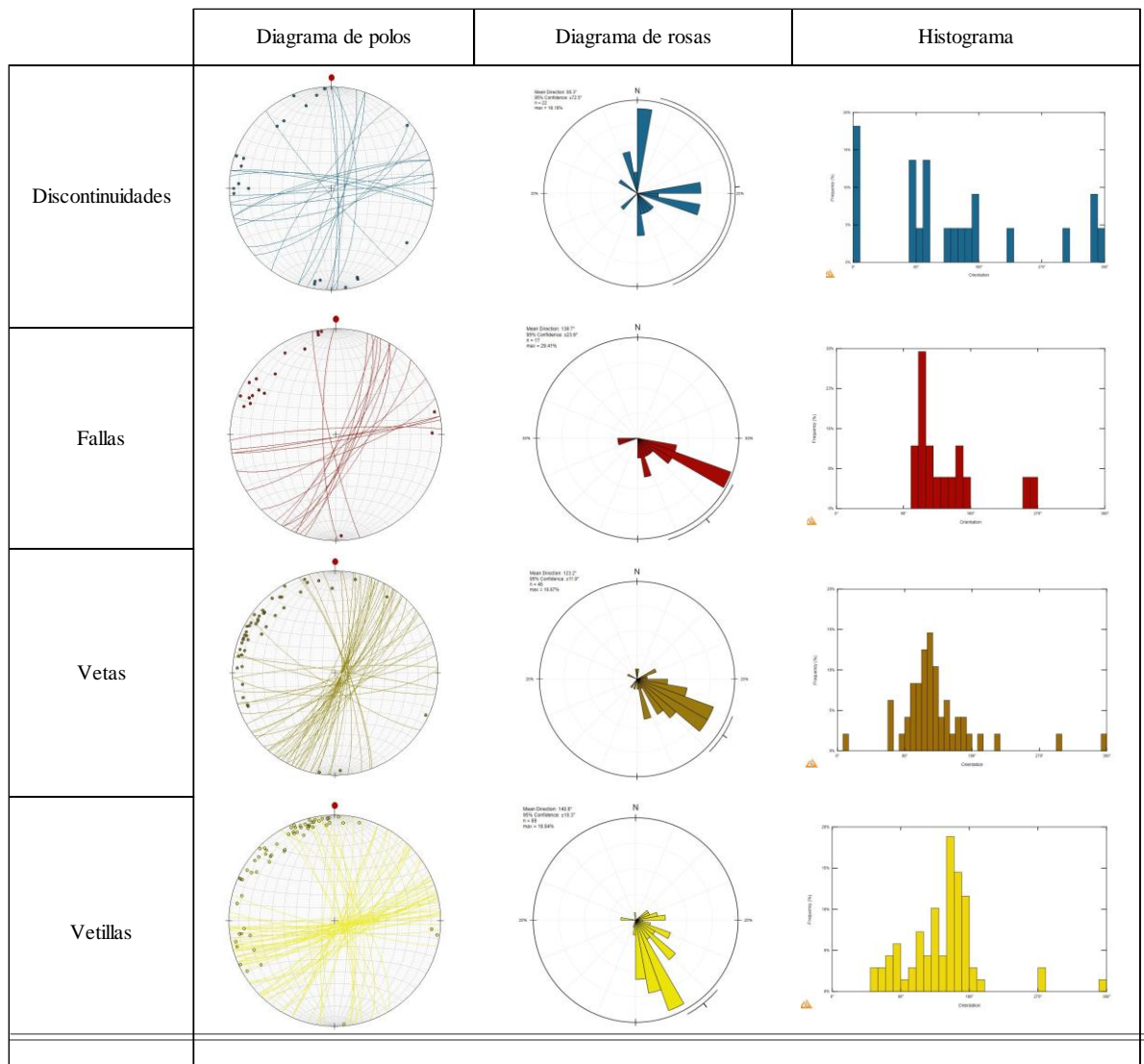
Vetas

La tendencia estructural de las vetas es congruente, en donde el 38% de los datos presentan rumbos comprendidos entre los 30 y 60° con respecto al norte, buzamientos relativamente rectos entre 83 y 89° dirección al SE. También se evidencia una tendencia secundaria y cercana a la anterior, en donde el 23% de los datos tiene un rumbo definido entre los 0 y 29°, además de buzamientos reales entre 87 y 90° con direcciones al SE.

Venillas

Aún con la gran densidad de datos se encuentra una tendencia marcada con el 45% de rumbo acotado entre 60 y 90°, además de buzamientos entre los 80 y 90° con direcciones SE. Como agrupación secundaria se tiene el 20% de los datos con rumbo entre 30 y 59° con buzamientos comprendidos en el mismo rango de los anteriores.

Figura 7.a. Estereografía de los datos estructurales. Diagramas de polos, diagramas de rosas e histogramas de discontinuidades, fallas, vetas y vetillas.



PROYECCIÓN DE VETAS

Con los datos obtenidos en los resultados anteriores se realizó una proyección y agrupación de las estructuras vetiformes en series, con base a su rumbo, el grosor y el porcentaje de sulfuros, el buzamiento no se toma como relevante debido a que sólo las vetillas presentan inclinaciones inferiores a los 80° con respecto a la horizontal (Figura 8a).

Sistema 1

En esta agrupación se encuentran las vetas de mayor abundancia a lo largo de la zona de estudio, son las que presentan mayor contenido de sulfuros en promedio (10% – 20%) y por consiguiente las más explotadas a lo largo de la historia de la mina, se caracterizan por estar acompañadas por alteración en el flaco (E) tanto fílica como argílica, grosores comprendidos entre 0.5 - 1.5 m y rumbos que varían entre N15E – N25E y buzando al (E) entre (87° y 90°). Todas son continuas y tienden a cortar y desplazar estructuras de los otros sistemas (Figuras 4d y 4e).

Sistema 2

Las vetas agrupadas en este sistema son generalmente gruesas (1m – 1.7m), presentan bajos contenidos de sulfuros menores al 10% y de bajo interés económico hasta el momento, rumbos más cercanos al (E) entre (N35E – N60E), en ambos flancos presenta alteración fílica y su continuidad se ve interrumpida y desplazada (entre 10 y 30 cm) por vetas del sistema 1 (Figuras 4d y 4e).

Sistema 3

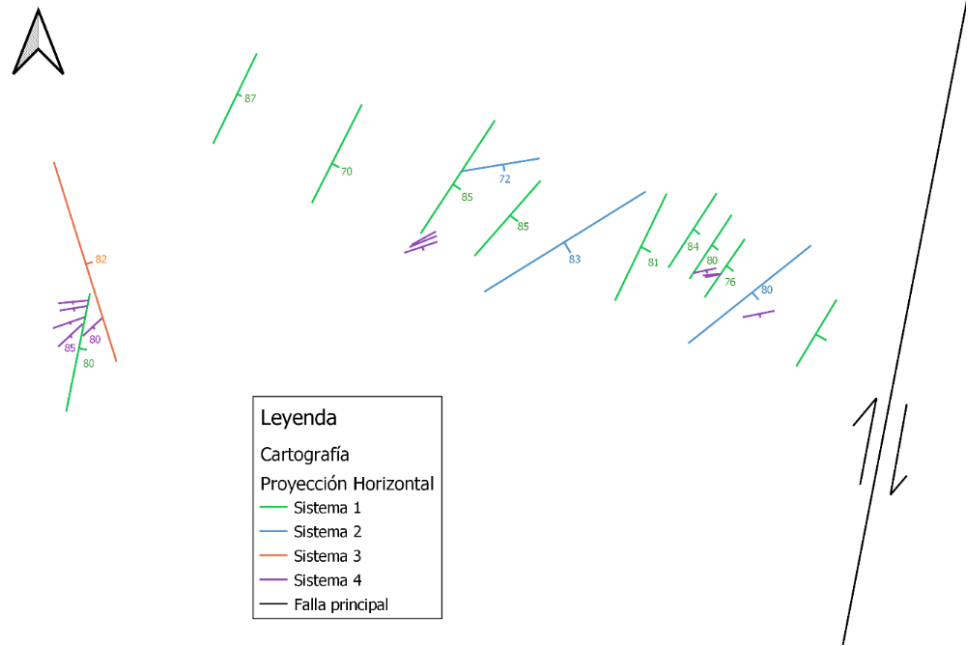
De este sistema sólo se encontraron 2 estructuras, con rumbo N10W y buzamiento muy cercano a los 90° y grosores muy erráticos a lo largo de la veta (0.2 m – 1 m), son las únicas que presentan tanto alteración fílica como argílica a lo largo de una misma estructura y debido a la poca cantidad de datos, no se evidenció su comportamiento al interactuar con vetas del sistema 1 y 2.

Sistema 4

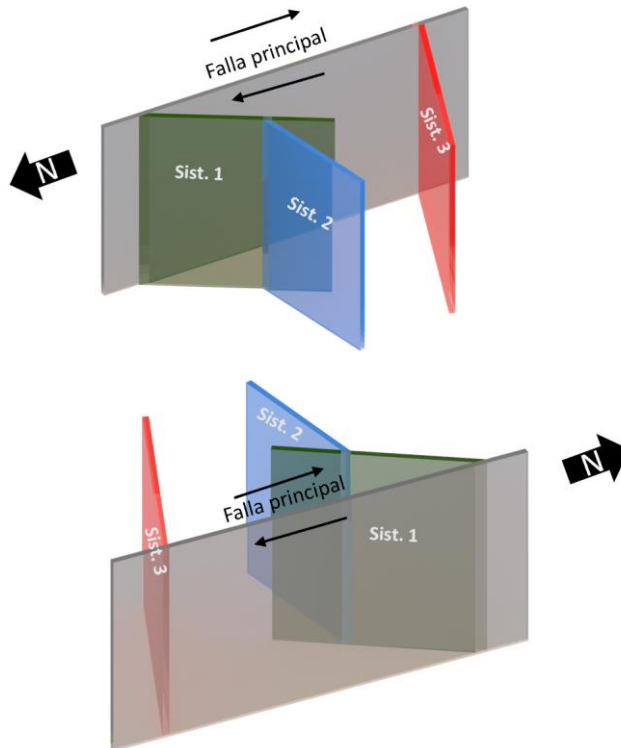
Son las estructuras más abundantes a lo largo del proyecto, su grosor va entre 0.01 y 0.05 m, son delgadas, irregulares, con altos porcentajes de sulfuros y bajos contenidos de cuarzo lechoso; en su mayoría se encuentran conectando vetas de los sistemas anteriores entre sí, con rumbos comprendidos entre (N70E – N85E) y buzamientos más bajos (45 – 85°) (Figuras 6a, 6c, 6g) y (Figuras 4a, 4b, 4c).

Figura 8. a) Modelo horizontal de los sistemas de vetas y la falla principal (Falla Palestina), b) Modelo 3D simplificado de los sistemas de vetas y la falla principal (Falla Palestina).

a)



b)



DISCUSIÓN

Uno de los objetivos más importantes de este proyecto es establecer una relación coherente entre la información litológica y la cartografía estructural, que esté sustentada con bibliografía relacionada de entornos cercanos o más regionales y así mejorar la precisión y confiabilidad de las estimaciones, de esta manera contribuir al desarrollo de prácticas de extracción de minerales más efectivas (Lillo, J., 2013).

Durante el proceso de muestra a lo largo de la tunelería, se identificó una composición predominantemente félsica a intermedia de la roca caja en la litología local. La presencia de granodioritas, dioritas y saprolitos félsicos, leucocráticos con cristales de medios a gruesos, así como estructuras vetiformes de cuarzo lechoso con espesores promedio de 1 cm a 1.50 m y alteraciones hidrotermales félsica y argílica asociadas a los flancos. Estas conclusiones son consistentes con la información estratigráfica previa de Antioquia Gold Ltda. (2017) y Ordóñez (2020) en áreas cercanas a la zona de estudio, ubicadas a 35 y 50 km, respectivamente y con condiciones estructurales y litológicas similares. Los informes reconocen desde lo macro (cordillera central) al Complejo Cajamar, constituido principalmente por rocas metamórficas, haciendo énfasis en su vertiente oriental, dominada por esquisto cuarzo-sericítico y cuarcita; que a su vez fueron intruídos hace aproximadamente 160 Ma por el Batolito de Segovia, por el Stock de Santa Isabel (aprox. 145 Ma) y por el Batolito Antioqueño (aprox. 98 Ma), este último con composición intermedia (Cuarzodiorita, Granodiorita y Diorita principalmente). También, es una zona influenciada estructuralmente por diversos sistemas de fallas, siendo de los más relevantes la Falla Otú que divide el terreno Chibcha del terreno Tahamí, la Falla El Bagre y la Falla el Nus, esta última se extiende en dirección NS, pasando a menos de 20 km de la Mina Los Balsos. Es por esto que este modelo geológico es fácilmente relacionable con los datos obtenidos localmente durante la cartografía, teniendo en cuenta no sólo la cercanía entre áreas de estudio, sino

también la similitud entre las composiciones litológicas y estructurales observada en macro.

Las vetas y vetillas están compuestas principalmente por cuarzo lechoso, con bajos contenidos de sulfuros (< 20%) y buzamientos muy cercanos a los 90° dirección E, en donde las paredes de la roca caja se encuentran parcialmente fundidas “quemadas”. Largo (2021) y Antioquia Gold Ltda. (2017), describen depósitos a 35 km del área de estudio con un comportamiento orogénico y litológico similar, definiéndolos como depósitos mesotermiales, con temperaturas de formación comprendidos entre los 200 y 300 °C. La mayoría de las estructuras vetiformes que se encontraron en la mina Los Balsos se pueden jerarquizar con base a dos factores: el grosor, en donde los filones con un ancho promedio bajo pierden continuidad cuando se encuentran en la trayectoria de una veta de mayor espesor; y el rumbo, en donde los cuerpos mineralizados cercanos al N10E presentan contenidos significativamente grandes de sulfuro (hasta 20 %), el cual, en el 90% de los casos va disminuyendo a medida que la dirección se acerca a los 90E. Esta información es congruente, con las dinámicas expuestas por Lillo (2013), en donde las discontinuidades generadas por procesos de falla con dinámicas de rumbo tienden a generar sistemas jerarquizados de vetas, relacionables a diferentes esfuerzos, en donde el eje formado por el de mayor magnitud tiene más probabilidades de albergar grandes filones mineralizados, todo esto posterior a la actividad hidrotermal.

Durante la cartografía, se observaron diversos indicadores cinemáticos que sugieren una estrecha relación entre la mineralización y los esfuerzos que fracturan y desplazan la roca caja. Estos indicadores son de naturaleza predominantemente frágil y presentan un comportamiento dextral, trasladando las estructuras no más de 3 m. Esto sugiere que se trata de un sistema secundario asociado a una falla de mayor intensidad e interferencia. Ordoñez (2009) describe estructuralmente las mineralizaciones del DMSR (Distrito Minero Segovia – Remedios) como condicionadas principalmente por 3 fallas post-cretácicas y sus diversas

agrupaciones en sistemas o ramificaciones secundarias de menor intensidad, la mayoría con buzamiento al E. Estas estructuras son: la falla Otú-Pericos de cinemática sinestrolateral con tendencia regional N10W e inflexiones locales N30W Álvarez et al, (2007); la falla El Bagre, igualmente sinistral e inversa con rumbo N20E; y la falla Nus, con comportamiento dextral N10W, buzamientos cercanos a los 90° y que culmina como ramal de la Falla Palestina, Cárdenas (2009). Si se comparan los rumbos de las estructuras macro con las encontradas localmente en la zona de estudio, se encuentra una clara relación entre la dirección de la mayoría de las vetas más anchas y de mayor porcentaje de sulfuros, con la tendencia NS de los planos de falla encontrados a escala regional. Adicionalmente, al observar al S de la falla Otú, se encuentra el punto en donde esta se convierte en un ramal de la Falla Palestina, esta última con rumbo predominante de N10E, una franja de debilidad que va entre los 0.5 a 35 km de ancho y movimiento dextral Chica (2003), cinemática y dirección que se asemejan aún más a las estructuras vetiformes que se interceptan por la tunelería de la mina los Balsos.

Cabe mencionar que las mineralizaciones de la zona de estudio aparentan estar controladas estructuralmente, por una zona de falla de rumbo con dinámica dextral y que se extienden en direcciones comprendidas entre los N15E y N40E, características congruentes con la dinámica general de la Falla Palestina (dextral N10E) que se encuentra a menos 10 km de la zona estudiada descrita por Arcila, M. et al. (2020) y Cortes, R. (1990). Por otra parte, las estructuras vetiformes se van distribuyendo en ramales de menor magnitud que cambian su rumbo gradualmente hasta llegar a valores cercanos a los N90E, esto podría tener una relación directa con la falla Monteloro la cual se encuentra a menos de 10 km del proyecto, esta tiene comportamiento normal y un rumbo S30E, la cual a su vez también está condicionada por la dinámica de la falla Palestina, Ingeominas (1999) y (2001). Por último, es importante mencionar que aún es necesario encontrar más indicadores cinemáticos tanto a lo largo de la tunelería como de afloramientos superficiales que

estén más cercanos a las estructuras y confirmen con mayor precisión la asociación a estos sistemas.

Las agrupaciones de las vetas con base a su dato estructural promueven la postulación de un modelo basado en sistemas, entendiéndolos como grupos con rumbos, buzamientos, grosores y contenidos de sulfuros similares. Ordoñez (2009) y (2020) describe agrupaciones de las estructuras mineralizadas encontradas en el DMSR, en donde el sistema el Silencio (con rumbo muy cercano al de la falla principal) conjunta los depósitos de mayor concentración de sulfuros y a su vez de mayor contenido de oro diseminado, paralelamente a medida se van a alejando de la falla, se van presentando estructuras secundarias de menor importancia económica, menor grosor y baja continuidad. Si se compara esta información con la obtenida en la mina Los Balsos, se encuentra una similitud en la dinámica geométrica de las estructuras, en donde las más similares a la orientación de la falla principal (posiblemente la falla Palestina) presentan mayor potencial económico y a medida que van perdiendo grosor y contenido de sulfuros, se van ramificando en vetas secundarias cada vez más perpendiculares a la estructura principal.

Teniendo como marco de referencia a Contreras, G. (2005) se propone una agrupación en sistemas de las estructuras vetiformes, con base a su semejanza con la falla principal inferida, sus datos estructurales y su contenido de sulfuros, de la siguiente manera: Sistema 1 y el de mayor importancia económica que agrupa vetas con grosores que van desde los 0.4 m hasta 1.5 m, contenidos de sulfuros superiores al 10%, rumbos comprendidos entre (N15E – N25E) y buzamientos en dirección al E con ángulos muy cercanos a los 90°; el Sistema 2, con grosores promedio entre 1 y 1.5 m, porcentajes de sulfuro inferiores al 10%, rumbos que van desde (N35E – N60E) y buzamientos muy rectos hacia el E; el Sistema 3 con espesores entre (0.2 – 1 m), contenido de sulfuros en su mayoría superiores al 10%, que se extiende en dirección N10W, muy rectas como las descritas anteriormente y buzando al E; Por último se propone el sistema 4, compuesto por venillas inferiores a 5 cm de grosor, con porcentajes de sulfuros superiores al 30%, rumbos

comprendidos entre (N70E – N85E), y buzamientos más variados (45°E – 85°E). Es importante mencionar que hay una aparente relación entre los sistemas Silencio y Vertical descritos por Ordoñez (2009) y los sistemas recién agrupados 1 y 2 respectivamente, comprendidos en rumbo e importancia económica similar, con la excepción de los ángulos de buzamiento más altos en el Sistema 1 que en el Sistema Silencio.

Los mineros artesanales de la zona explican que históricamente en los puntos donde se cruzan dos o más vetas se han encontrado “güevos” (clavos de bonanza mineralizados) con altos valores en ley, esto último tiene congruencia con el comportamiento típico de las estructuras vetiformes, descrito por Lillo, J (2013), en donde la intercepción de varias estructuras generan zonas de fracturamiento que favorecen la acumulación flujos hidrotermales que a su vez crean cuerpos semicilíndricos con altas concentraciones de sulfuros y alta importancia económica. Relacionando este conocimiento empírico corroborado por estudios académicos y la información estructural obtenida anteriormente en la mina Los Balsos, se llevó a cabo la proyección de la estructura principal y de mayor continuidad del Sistema 2, con 5 de la vetas que presentan mayor contenido de sulfuros pertenecientes al Sistema 1, con el fin de ubicar espacialmente 5 puntos de posibles clavos mineralizados que podrían representar la base de un procesos de exploración más robusto, puntos de alta rentabilidad y fácil explotación debido a sus buzamientos muy cercanos a los 90° que le darán un comportamiento vertical casi recto a los clavos de bonanza mineralizados.

Por último, con el fin de dar luz a una estimación geocronológica, se encontraron varias similitudes morfológicas y mineralógicas entre los depósitos de la zona de estudio y los descritos por Malo, A. (2020), en donde asocia al “Sistema Vertical” del DMSR con un evento secundario de mineralización hidrotermal durante el Eoceno, que arrojan edades entre los 58 y 38 Ma usando termocronómetros AFT y ZHe de bajas temperaturas, con intervalos de enfriamiento entre los 240 °C y 110 °C, que no sólo afectó al Batolito de Segovia sino también al Batolito Antioqueño.

El “Sistema Vertical” lo describen con rumbos cercanos a los 350°, buzamientos muy verticales, que contiene vetas de cuarzo con altos contenidos de Piritita, Calcopiritita y Galena, de alto interés económico que se encuentra cortadas y desplazadas por un evento más reciente y de poco o nulo contenido de (Au). Es importante notar la diferencia de más de 30° entre el rumbo predominante de este sistema con los presentes en el área de estudio; pero, también cabe mencionar que para varios autores (Ordoñez et al., 2005; Sánchez et al., 2007; Álvarez, 2013) con estudios en zonas controladas por la Falla Otú, es común que las estructuras de mayor orden (tipo Sistema Vertical) transporten los fluidos minerales, mientras las secundarias, producto de R – R’ de las primarias, reciban y cristalicen los fluidos; pero aún es necesario llevar a cabo estudios geocronológicos y petrográficos más robustos y específicos para confirmar estas estimaciones.

CONCLUSIONES

Se analizaron y proyectaron las estructuras cortadas por la tunelería del proyecto minero Los Balsos, del corregimiento la Floresta, a la luz de las estructuras regionales y su interferencia en la morfología del depósito; al ver las vetas y las fallas de manera general se puede concluir que tiene congruencias con la morfología de la Falla Palestina y sus ramales (Falla Otú-Pericos y Falla Nus), en donde las estructuras de mayor grosor y contenido de sulfuros están más cercanas al rumbo general de estas (N10E) y a medida que esta dirección se va acercando a los 90E van perdiendo espesor, continuidad e importancia económica; lo cual podría estar más relacionado a una respuesta riedel antieriedel, que genera discontinuidades producto de los esfuerzos de la falla principal, que posteriormente fueron rellenadas por la mineralización de la actividad hidrotermal.

Los resultados muestran que se pueden agrupar en sistemas las estructuras vetiformes en base a sus características morfológicas y sus rumbos, que las

agrupaciones definen una posible cronología y jerarquización de estas, donde el sistema 3 y 4 podrían ser un evento de mineralización hidrotermal más antiguo con bajos porcentajes de sulfuros; que posteriormente fueron cortados y desplazado por el sistema 1 de mayor importancia económica y su ramal secundario de vetillas (sistema 4), Adicional, con la información obtenida a lo largo de la cartografía y los datos históricos de la zona complementada por modelos realizados en zonas cercanas, se puede inferir que los puntos en donde se intersectan vetas del sistema 1 con el sistema 2 tiene altas probabilidades de presentar clavos de bonanza o puntos de mineralización importantes a lo largo de la zona de estudio; puntos que por los buzamientos altos (85° - 90°) y la falta de fallas de bajo buzamiento a profundidad, deben tener continuidad vertical importante. Proponiendo la sección comprendida por la figura 5c del nivel A, como la de mayor prospección económica, marcando en ella 6 puntos de posibles clavos de bonanza que serán explotados a futuro.

En general, los datos y conclusiones obtenidos generan bases sólidas para un modelo prospectivo, brindando datos confiables y sustentados que pueden indicar el comportamiento del depósito a lo largo del macizo rocoso, siendo una herramienta muy útil a la hora de tomar decisiones económicas en el proyecto con respecto a la dirección de las labores. También cabe resaltar que es de vital importancia complementar el modelo morfológico con petrografía enfocada en las texturas de los cristales, llevada a cabo sobre las secciones delgadas obtenidas en las vetas, dado que podrían confirmar o replantear nuevas relaciones cronológicas entre las estructuras vetiformes.

REFERENCIAS

- Antioquia Gold Ltda. (2016). Technical Report on Updated Mineral Resource Estimate and Preliminary Economic Assessment.
- Arcila, M. García, J., Montejo, J., Eraso, J., Valcarcel, J., Mora, M., Viganó, D., Pagani, M. y Díaz, F., 2020. Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model.<https://doi.org/10.32685/9789585279469>
- Álvarez, M. (2013). Petrología, geoquímica isotópica e metalogenia dos depósitos de ouro El Silencio e La Gran Colombia, Distrito Mineiro Segovia-Remedios, Colombia. Master thesis, Universidade de Brasilia, Brasil.
- Babín, R., & Gómez, D., 2010. Problemas de Geología Estructural 9. Análisis estructural mediante diagramas de contornos. Reduca (Geología). Serie Geología Estructura 2(1), 148–192.
- Cárdenas, A. (2009). Características y Aproximación a la Génesis del Sistema Vetiforme Cogote en el Distrito Minero Segovia-Remedios. medellin.
- Chica, A., Buitrago, J., Monsalve, G., & Morales, J. (2003) Codificación sismológica de un segmento de la falla Cauca – Almaguer y sus aplicaciones en el departamento de Antioquia. Boletín Ciencias de la Tierra, 27 (102): 53-69.
- Conrado, V., 2014. Caracterización detallada de la mineralización en veta Eureka, y su comparación con otras mineralizaciones del Distrito Cerro Negro, Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina [Tesis Doctoral] Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ciencias Naturales y Museo.
- Contreras, G. (2005). Paragénesis Mineral y Consideraciones acerca del Modelo Evolutivo en el Distrito Aurífero Segovia-Remedios.
- Corbett, G., Leach, T., 1998 Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. Porphyry-Related Low Sulfidation Gold Systems 5, 126 – 177.

- Cortes, R. (1990). Observaciones y Descripciones Petrologicas y Estructurales asociadas al tramo meridional de la Falla Palestina. *Geología Colombiana*, 17.
- Duque, J., Bustamante, C., Solari, L., Gómez, A., Toro, G., & Hoyos, S., 2019. Reviewing the Antioquia batholith and satellite bodies: a record of Late Cretaceous to Eocene syn- to post-collisional arc magmatism in the Central Cordillera of Colombia. *Andean Geology* 46(1), 82–101
- García, A., Rosique, M., & Torres, M. (2017). Topografía y cartografía minera (2.^a ed.). CRAI - Universidad Politécnica de Cartagena, 137 – 145.
- González, H., 2001. Mapa geológico del departamento de Antioquia, Geología, recursos minerales y amenazas potenciales, escala 1:400.000. Ingeominas.
- González, J., Terán, B., & Ordóñez, O., 2010. Geología de la parte oriental del distrito minero Segovia - Remedios. *Boletín de ciencias de la tierra* 28, 61–76.
- Hronsky, J., 2019. Deposit-scale structural controls on orogenic gold deposits: an integrated, physical process-based hypothesis and practical targeting implications. *Mineralium Deposita* 55, 197–216.
- Ingeominas. (1999). Mapa geológico del departamento de Antioquia - Escala 1:400.000. Ingeominas.
- Ingeominas. (2001). Mapa geológico del departamento de Antioquia - Escala 1:400.000 - Memoria explicativa. Ingeominas.
- Largo, D. (2020). Asistencia practica en exploración y mina para las minas Guaico y Guayabito del proyecto Cisneros, municipio de Santo Domingo, departamento de Antioquia. Universidad De Caldas.
- Lillo, J., & Oyarzun, R. (2013). Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera - Principios Básicos. Ediciones GEMM.
- Londoño, A., 1998. Geformas Asociadas al Batolito Antioqueño. *Geología de Colombia INGEOMINAS* 23, 133–143.
- Londoño, N., & Marín-Cerón, M. (2016). Uso del análisis digital de imágenes (ADI) como herramienta para el estudio petrográfico en rocas metamórficas.

- Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT, Medellín Colombia. <http://hdl.handle.net/10784/9195>
- Malo, A. (2020). A review on the Segovia Batholith and its thermal history, implications for metallogenesis in the Segovia-Remedios Mining District. Universidad EAFIT.
- Ordóñez, O., Pimentel, M., (2001). Consideraciones geocronológicas e isotópicas del Batolito Antioqueño. Boletín Ciencias de la Tierra.
- Ordóñez, O., Valencia, M., Álvarez, M., Sánchez, L., Castaño, L., Echeverri, B. (2005). Metalogenia y evolución tectonomagmatica del distrito minero SegoviaRemedios. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.13140/2.1.4782.8486>
- Ordóñez, O., Muñoz, O., Echeverry, S., Cárdenas, A., (2009). Aspectos estructurales y relaciones de algunos sistemas vetiformes del distrito minero Segovia-Remedios. Boletín Ciencias de la Tierra.
- Ordóñez, O., Cortés, E., García, J., González, M., Ibarra, B., Peñarete, G., Tibaquirá, J., Vásquez, D. (2020). Estudio geológico del distrito minero Segovia-Remedios en la zona de influencia de la falla Otú. Boletín Ciencias de la Tierra, 22: 100-110.
- QGIS Project. (2020).QGIS 3.10 User Guide, 107 – 162. <https://docs.qgis.org/3.10/pdf/es/QGIS-3.10-UserGuide-es.pdf>
- Rodríguez, C., Y Pernet, A., 1983. Recursos minerales de Antioquia. Ingeominas 26(3), 42–47.
- Martín, D., Costafreda, J., Marín, A., & León, A. (2017). Curso básico de dibujo con AutoCAD. Fundación Gómez - Pardo. https://oa.upm.es/50865/1/Curso_AutoCAD.pdf
- Mejía, A., Ospina, F., Sierra, A., & Zapata, O. (2016). Propuesta de modernización de enseñanzas de topografía en la facultad de minas - Cuaderno de planimetría (2.^a ed.). Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 29 – 78.

- Sánchez, L., Ordóñez-Carmona, O., Castaño, L. (2007). Revisión de modelos de fracturamiento y controles estructurales como guías de exploración de filones auríferos en el Distrito Minero Segovia Remedios. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 21, 49-58.
- Shaw, R., Leal, H., & Melgarejo, J., (2019). Chapter 6 Phanerozoic Metallogeny in the Colombian Andes: A Tectono-magmatic Analysis in Space and Time. *Geology and Tectonics of Northwestern South America*, 411–488.
- Simmons, S., White, N., John, D., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits, Society of Economic Geologists, *Economic Geology 100th Anniversary* 485 – 522.
- Valencia, M., Ochoa, C., Noguez, B., Ruiz, J., y Pérez, E., 2006. Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. d LVIII(1), 281–290.