

CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y PETROGRAFICA DE LAS  
MINERALIZACIONES VETIFORMES PRESENTES EN LOS PROSPECTOS  
SANTA ELENA Y SANTA MARÍA EN EL DISTRITO MINERO NECHÍ, SUR DE  
BOLÍVAR

DANIEL ANDRÉS GIRALDO OSORIO  
JEAN KARLO LOAIZA QUICENO

Director  
MSc. Edwin Naranjo Sierra

UNIVERSIDAD DE CALDAS  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS GEOLÓGICAS  
PROGRAMA DE GEOLOGÍA  
MANIZALES-COLOMBIA  
2021

CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y PETROGRAFICA DE LAS  
MINERALIZACIONES VETIFORMES PRESENTES EN LOS PROSPECTOS  
SANTA ELENA Y SANTA MARÍA EN EL DISTRITO MINERO NECHÍ, SUR DE  
BOLÍVAR

DANIEL ANDRÉS GIRALDO OSORIO  
JEAN KARLO LOAIZA QUICENO

Trabajo de grado para optar por el título de  
GEÓLOGO



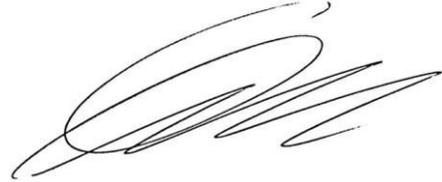
Director

MSc. Edwin Naranjo Sierra



UNIVERSIDAD DE CALDAS  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS GEOLÓGICAS  
PROGRAMA DE GEOLOGÍA  
MANIZALES-COLOMBIA  
2021

FIRMA DE APROBACIÓN

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

---

DIRECTOR

EDWIN NARANJO SIERRA

## **DEDICATORIA**

### **Daniel Andrés Giraldo Osorio**

*A Dios por guiarme en cada paso que doy, a mis padres Yolanda Osorio y Rodrigo Giraldo por ser el motor de mi vida, a mi novia Valeria Marín por impulsarme a ingresar y culminar mi carrera universitaria y por último a mis hermanos Martín Julián Giraldo y Alejandro Giraldo por sus consejos en momentos difíciles.*

### **Jean Karlo Loaiza Quiceno**

*A Dios por permitirme disfrutar otro día más de vida, a mis padres María Orfany Quiceno y Carlos Alberto Loaiza por todo su apoyo y amor incondicional durante todos estos años y a mi hermano Jeffrey Loaiza Quiceno por brindarme su ayuda y estar presente en los momentos difíciles.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Operadora Minera por el apoyo logístico, acceso a la información y financiación en el proyecto. A Edwin Naranjo Sierra por todo su apoyo y conocimientos que nos brindó en el transcurso del desarrollo de esta tesis.

Por último, a la profesora July Quiceno Colorado y al profesor Diego Loaiza por sus comentarios y ayudas en la etapa de laboratorio y a cada una de las personas que de una u otra manera contribuyeron para la culminación de este trabajo investigativo.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....                          | 14 |
| 2. ANTECEDENTES .....                          | 15 |
| 3. JUSTIFICACIÓN .....                         | 17 |
| 4. OBJETIVOS.....                              | 18 |
| 4.1 GENERAL .....                              | 18 |
| 4.2 ESPECÍFICOS.....                           | 18 |
| 5. METODOLOGÍA .....                           | 19 |
| 6. MARCO GEOLÓGICO .....                       | 21 |
| 7. GEOLOGÍA LOCAL.....                         | 23 |
| 8. MINERALIZACIÓN.....                         | 26 |
| 8.1 VETA SANTA ELENA.....                      | 26 |
| 8.2 VETA SANTA MARÍA.....                      | 30 |
| 9. ALTERACIONES HIDROTERMALES .....            | 34 |
| 9.1 ROCA CAJA.....                             | 34 |
| 9.2 VETA SANTA ELENA Y VETA SANTA MARÍA.....   | 35 |
| 10. TEXTURAS DE CUARZO Y TEXTURAS DE MENA..... | 37 |
| 11. GEOQUÍMICA MULTIELEMENTAL.....             | 39 |
| 11.1 VETA SANTA ELENA .....                    | 39 |
| 11.2 VETA SANTA MARÍA.....                     | 42 |
| 12. DISCUSIÓN.....                             | 45 |
| 12.1 EVOLUCIÓN DEL FLUIDO HIDROTERMAL.....     | 45 |
| 12.2 TRANSPORTE Y DEPOSITACIÓN DEL ORO .....   | 45 |
| 12.3 MODELO GENÉTICO PARA LAS VETAS .....      | 46 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 12.4 IMPLICACIONES REGIONALES ..... | 47 |
| 13. CONCLUSIONES .....              | 49 |

## LISTA DE TABLAS

**Tabla 1.** Matriz de correlación para las asociaciones de Au-Ag, Au-Te, Te-Pb, Te-Se, Te-Bi ..... 41

**Tabla 2.** Matriz de correlación para las asociaciones de Au-Ag, Au-Te, Te-Pb, Te-Se, Te-Bi ..... 44

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa geológico regional de la zona de estudio..... 22
- Figura 2.** Geología local de la zona de estudio y localización de las muestras analizadas. Base cartográfica tomada y modificada de Gómez-Tapias, *et al.*, (2015).  
..... 24
- Figura 3.** Características generales de las vetas. A) Estructura vetiforme fuertemente cizallada con fragmentos de roca caja (ortoneis) con alteraciones a clorita (Chl) al interior de la mina Santa Elena. B) Segmento de veta del sector de Santa María con fragmentos de roca caja de composición granodiorítica alterados a clorita (Chl) y mineralización de pirita (Py) y galena (Gn) diseminada. C) Segmento de veta de cuarzo (Qz) lechoso con mineralización de pirita (Py) en parches en el sector de Santa Elena. D) Segmento de veta de cuarzo (Qz) lechoso a semitraslúcido con mineralización de pirita (Py) y galena (Gn) diseminada y en vetillas, con carbonatos (Cb) rellenando oquedades y fragmentos de roca caja granodiorítica alteradas a clorita (Chl) ..... 25
- Figura 4.** Características generales de la mineralización presente en la veta Santa Elena. A) Oro (Au), pirita (Py) y galena (Gn) asociados al segundo evento de mineralización (E2) llenando fracturas en piritas (Py1) asociada al primer evento mineralizante (E1). 10X. NP.LR. B) Oro (Au), pirita (Py), galena (Gn) y calcopirita (Cpy) asociadas a (E2) llenando fracturas en piritas (Py1) asociadas a (E1). 10X. NP.LR. C) Oro (Au) y galena (Gn) asociado a calcopirita (Cpy) pertenecientes a (E2). 10X. NP.LR. D) Asociación paragenética entre pirita (Py), calcopirita (Cpy), galena (Gn), esfalerita (Sp). 10X. NP.LR. E) Imagen SEM con presencia de galena (Gn) y telururos de (Au-Ag). BSED. 3500x. 15.0 kV. F) Espectros de análisis EDS (cuadros rojos en FIGURA E) sobre galena (Gn) y telururos Au-Ag. Abreviaciones de acuerdo a Whitney y Evans, 2010..... 28
- Figura 5.** Secuencia paragenética para la veta Santa Elena. El primer evento está caracterizado por presentar contenidos importantes de cuarzo (Qz), pirita (Py1). El segundo y principal evento de mineralización está caracterizado por la asociación

sulfuros-oro-telururos. El tercer evento se caracteriza por el reemplazamiento de esfalerita (Sp) por pirita (Py1) y galena (Gn)..... 29

**Figura 6.** Características generales de la mineralización presente en la veta Santa María. A) Oro (Au), galena (Gn) y telururos de Au-Ag asociados al segundo evento de mineralización (E2) se presenta de manera libre como parches. 10X. NP.LR. B) Oro (Au), asociado a (E2) llenando cavidades en piritas (Py1) asociada al primer evento (E1). 10X. NP.LR. C) Oro (Au) y galena (Gn) y telururos de Au-Ag de manera libre asociados a (E2). 10X. NP.LR. D) Esfalerita asociada al tercer evento de mineralización (E3) reemplazando parcialmente los bordes de pirita (Py1) y galena (Gn). 20X. NP.LR. E) Imagen SEM con presencia de Oro (Au) y telururos de (Au-Ag). BSED. 3496x. 20.0 kV. F) Espectros de análisis EDS (cuadros rojos en FIGURA E) sobre galena telururos Au-Ag. Abreviaciones de acuerdo a Whitney and Evans, 2010 ..... 32

**Figura 7.** Secuencia paragenética establecida para la veta Santa María. El primer evento caracterizado por presentar contenidos importantes de cuarzo (Qz), pirita (Py1). El segundo y principal evento mineralizante está caracterizada por la asociación sulfuros-oro-telururos. El tercer evento se caracteriza por el reemplazamiento de esfalerita (Sp) por pirita (Py1). ..... 33

**Figura 8.** Características generales de la alteración hidrotermal en el área de estudio. A) Roca caja sector Santa María. Cuarzo (Qz), carbonato (Cb), Clorita (Chl), Biotita (Bt) alterada a Clorita (Chl) 5X. NP.LT. B) Roca caja sector Santa Elena. Cuarzo (Qz), Clorita (Chl), Epidota (Ep) 5X. NX.LT. C) Roca caja Sector Santa Elena. Cuarzo (Qz), Clorita (Chl), Actinolita (Act). 20X. NX.LT. D) Veta Santa María. Cuarzo (Qz), Plagioclasa (Pl), Sericita (Ser). 5X. NX.LT. E) Veta Santa Elena. Cuarzo (Qz), Clorita (Chl), Plagioclasa (Pl), Sericita (Ser), Pirita (Py), Carbonatos (Cb). 5X. NX.LT. F) Veta Santa Elena. Cuarzo (Qz), Pirita (Py), Calcopirita (Cpy). 20X. NP.LR..... 36

**Figura 9.** Texturas generales del cuarzo y texturas de mena para la veta Santa Elena y Santa María. A) Veta Santa Elena. Cuarzo (Qz) con textura masiva. 5X. NX.LT. B) Veta Santa Elena. Textura bulging en cuarzo (Qz) 20X. NX.LT. C) Veta

Santa Elena. Textura mosaica en cuarzo (Qz). 5X. NX.LT. D) Veta Santa María. Textura globular de galena (Gn) en pirita (Py). 5X. NP.LR. E) Veta Santa María. Textura de exsolución. Telururos de Au-Ag sobre galena (Gn). 10X. NP.LR. F) Veta Santa María. Textura de reemplazamiento de esfalerita (Sp) sobre Pirita (Py) asociado al tercer evento de mineralización (E3). 5X. NP.LR. Abreviaciones de acuerdo a Whitney y Evans, 2010..... 38

**Figura 10.** Gráficos bimodales de los resultados multielementales de la veta Santa Elena, confirmando las asociaciones mineralógicas observadas y analizadas para el segundo y principal evento de mineralización (E2). A. Au vs Te. B. Au vs Ag. C. Au vs Pb. D. Au vs Se. Los coeficientes de correlación fueron calculados con el valor logarítmico de la concentración de cada elemento ..... 40

**Figura 11.** Gráficos bimodales de los resultados multielementales de la veta Santa María, confirmando las asociaciones mineralógicas observadas y analizadas para el segundo y principal evento de mineralización (E2). A. Au vs Te. B. Au vs Ag. C. Au vs Se. D. Au vs Pb. Los coeficientes de correlación fueron calculados con el valor logarítmico de la concentración de cada elemento ..... 43

## RESUMEN

Los depósitos vetiformes en los sectores de Santa Elena y Santa María, se encuentran hospedados en ortoneises del Neis de Nechí, afectados por deformación frágil-dúctil, que generó texturas de recristalización en cuarzo tipo *Bulging* y un alto fracturamiento. Al menos tres eventos mineralizantes fueron definidos para ambos depósitos vetiformes: (E1) afectado por deformación, se caracteriza por la presencia de Qz + Py1 altamente fracturada; (E2) que selló los espacios abiertos es definido por la asociación de Qz + Py2 + Gn + Cpy + Au + telururos de Au-Ag, + telururos de Pb + telururos de Se-Bi y (E3) caracterizado por Sp que reemplazó los bordes de Gn, Cpy, Py1 y Py2. Los análisis de geoquímica multielemental muestran una relación directa entre las concentraciones de Au-Ag, Au-Pb, Au-Te, Au-Se. Las alteraciones hidrotermales y la paragénesis mineral sugieren un ambiente neutral levemente reducido, donde especies ligantes como H<sub>2</sub>S y HS<sup>-</sup> son dominantes en los fluidos mineralizantes y por lo tanto el ion complejo Au(HS)<sup>2-</sup> pudo ser el medio más factible para transportar el oro. Las características geológicas del depósito, incluyendo el control estructural, mineralogía, roca encajonante, alteración hidrotermal y estilo de mineralización, indican que los depósitos para ambos sectores son compatibles con el modelo de depósitos de oro orogénico (*Orogenic Gold Deposits*) del subtipo: Depósitos de Filones Auríferos Hospedados en Granitoides (*Granitoid-Hosted Lode-gold Deposits*).

## ABSTRACT

The lode gold deposits in the Santa Elena and Santa María sectors, are hosted in orthogneisses of Nechí Gneiss, affected by brittle-ductile deformation, which generated *Bulging* type recrystallization textures in quartz and high fracturing. At least three mineralization events were defined for both lode gold deposits: (E1) affected by deformation, is characterized by the presence of highly fracturing Qz + Py1; (E2) that sealed the open spaces is defined by of Qz + Py2 + Gn + Cpy + Au + tellurides Au-Ag, + tellurides Pb + tellurides Se-Bi associations and (E3) characterized by Sp that replaced the edges of Gn, Cpy, Py1 and Py2. Multi-elemental geochemistry analysis shows a direct relationship between the concentrations of Au-Ag, Au-Pb and Au-Te. Hydrothermal alterations and mineral assemblage (paragenesis) suggests a slightly reduced neutral environment, where ligand species such as H<sub>2</sub>S and HS<sup>-</sup> are dominant in the mineralizing fluid and therefore the complex ion Au(HS)<sup>2-</sup> could be the most feasible medium to transport the gold. The geological characteristics of the deposit, including the structural control, mineralogy, hosted rock, hydrothermal alteration, and mineralization style, indicate that the lode gold deposits for both sectors, are compatible with the *Orogenic Gold Deposits* model of the subtype: *Granitoid-Hosted Lode-gold Deposit*.

## 1. INTRODUCCIÓN

El distrito minero de Nechí, está localizado al suroccidente del departamento de Bolívar, en la cordillera Central de Colombia a 358 km al noreste de la ciudad de Medellín (Figura 1). Este distrito es reconocido ampliamente como un importante distrito de explotación de oro aluvial asociado a terrazas del río Nechí formadas durante el neógeno (Londoño *et al.*, 2009; Shaw, 2000). Las mineralizaciones vetiformes de Au-Ag se encuentran emplazadas al interior de zonas de cizalla de rocas metamórficas agrupadas regionalmente como Complejo Cajamarca (Gonzales, 2001; Gómez-Tapias *et al.*, 2015) y denominadas posteriormente como Neis de Nechí (Restrepo *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2014). Pocos estudios geológicos detallados de estas manifestaciones vetiformes han sido reportados.

El análisis petrográfico y metalográfico se realizó en los depósitos vetiformes de Santa Elena y Santa María. Este estudio reporta por primera vez, una caracterización metalográfica detallada de la mineralización presente en las vetas; enfocándose en las etapas mineralizantes, secuencia paragenética y alteraciones hidrotermales. Adicionalmente, se propone una evolución composicional del sistema hidrotermal y sus implicaciones en la mineralización con énfasis en el transporte y depositación del oro. Por último, se plantea un modelo genético para estas manifestaciones vetiformes.

## 2. ANTECEDENTES

No existen estudios detallados de las manifestaciones vetiformes presentes en el distrito minero de Nechí. A nivel de geología regional se han realizado distintos trabajos para la caracterización de las diferentes unidades que afloran en la zona de estudio (Figura 1), entre ellos los publicados por Feininger *et al.*, (1972), Restrepo y Toussaint (1988), Maya y González (1995), Álvarez. (1983), Royero (1997), González (2001), Londoño *et al.*, 2009, Leal-Mejía, 2011, Zapata *et al.*, 2013 y Rodríguez *et al.*, 2019.

Gonzales (2001), agrupa las rocas aflorantes en la zona de estudio como parte del Complejo Cajamarca, denominándolas “Neises Cuarzo Feldespáticos y Alumínicos”.

Londoño *et al.*, (2009) establece que las estructuras vetiformes en las inmediaciones del municipio Nechí, se encuentran encajadas en gneises cuarzo feldespáticos y migmatitas, correspondientes al Neis de San Lucas, controladas por zonas de cizalla paralelas al posible esfuerzo principal responsable de una antigua dinámica dextral a lo largo de la falla Otú, apoyando la idea de que las mineralizaciones son de tipo orogénico.

Restrepo *et al.*, (2010) denominaron a la roca caja de estas mineralizaciones vetiformes como Neis de Nechí, que corresponde a un cuerpo ígneo afectado por metamorfismo dinámico-dúctil en facies anfibolita con esquistosidad no penetrativa y obteniendo en circones una edad pérmica de  $277,3 \pm 3,0$  Ma, interpretada como la edad de intrusión del granitoide y una edad triásica de  $236,4 \pm 6,6$  Ma., correspondiente a la edad del metamorfismo.

Rodríguez *et al.*, (2014) realizaron la petrografía y geoquímica detallada del Neis de Nechí, e interpretan junto con los datos de edad obtenidos por Restrepo *et al.*, (2010), la existencia de un arco plutónico, posiblemente de margen continental relacionado a subducción, que intruyó un basamento más antiguo, el cual posteriormente fue sometido a metamorfismo regional durante el Triásico.

Rodríguez *et al.*, (2019) plantearon que la deformación dúctil que caracteriza esta unidad (Neis de Nechí) podría ser el resultado de la colisión entre los basamentos Neoproterozoico y Triásico durante el Jurásico.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente se presentan algunos obstáculos en el desarrollo de las actividades mineras ligadas al oro, ya que el poco apoyo económico imposibilita el desarrollo de estudios detallados de las condiciones geológicas intrínsecas en los depósitos minerales. La posibilidad de realizar estos estudios permite conocer de primera mano, dimensiones de las partículas de oro y sus asociaciones mineralógicas. Al tener conocimiento suficiente de estos factores se puede establecer que técnicas mineras son más efectivas en el procesamiento y beneficio del oro.

Estudiar la petrografía, metalografía y alteraciones hidrotermales nos permite establecer las condiciones, transporte y mecanismos de depositación de las partículas de oro.

Estos estudios son fundamentales para poder definir el potencial minero y exploratorio de Colombia. El distrito minero Nechí a pesar de ser un distrito ampliamente reconocido por sus explotaciones de oro aluvial, es una zona poco conocida para las explotaciones de oro subterráneo, no hay ningún trabajo relacionado en el área, por lo que este estudio sería pionero en la zona, buscando contribuir al aporte científico del país, especialmente en el área de geología económica.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 GENERAL**

Realizar una caracterización metalográfica y petrográfica de las mineralizaciones vetiformes presentes en los prospectos Santa Elena y Santa María en el Distrito Minero Nechí en Antioquia.

### **4.2 ESPECÍFICOS**

-Realizar una caracterización mineralógica, textural, paragenética y de alteraciones hidrotermales de las manifestaciones vetiformes presentes en los prospectos Santa Elena y Santa María en el distrito minero de Nechí.

-Plantear el posible medio de transporte y depositación del Au.

-Proponer un modelo geológico para estas manifestaciones vetiformes.

## 5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación la empresa Operadora Minera brindó el apoyo económico y el soporte logístico necesario para llevar a cabo el estudio petrográfico y metalogenético para los depósitos vetiformes de Au-Ag Santa Elena y Santa María, en el distrito minero de Nechí.

Se realizó la elaboración de 17 secciones delgadas pulidas en MinerLab S.A de la ciudad de Bogotá, a partir de muestras de núcleos de perforación y muestras de canaletas al interior de mina. Las muestras seleccionadas fueron cortadas utilizando una cortadora de disco diamantado y sometidas posteriormente a un proceso de pulido con carburo de silicio, comenzando con un tamaño de grano pasante malla 120, luego 240, 400, 600 y finalmente malla 1000. Al final del proceso de elaboración, las secciones fueron pulidas con pasta de diamante de 6µm y 1µm.

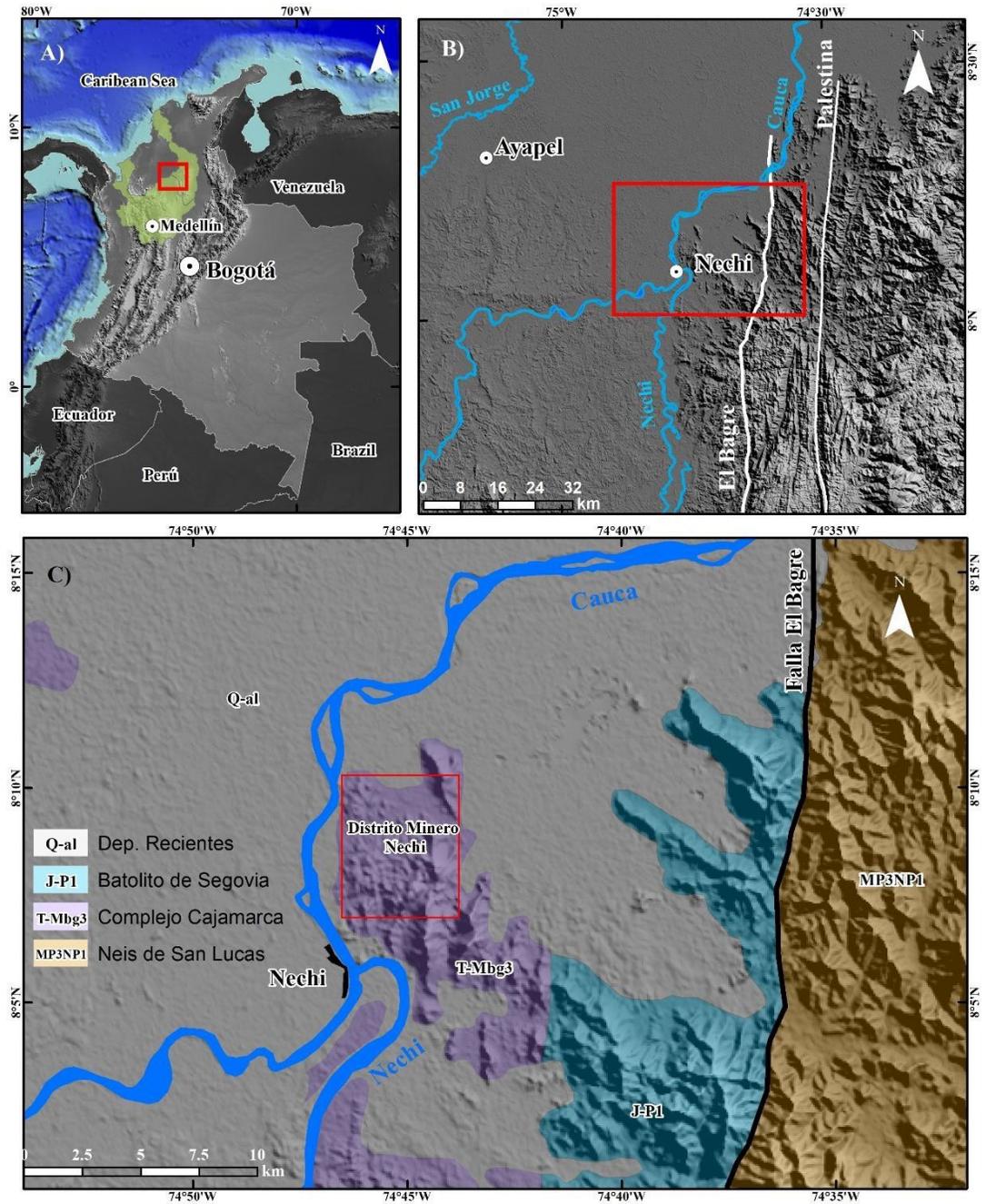
El análisis petrográfico y metalográfico de las secciones delgadas pulidas se realizó para identificar los minerales de mena y ganga, asociaciones mineralógicas, la ocurrencia, asociación y tamaño de granos de oro. Estos análisis se llevaron a cabo en un microscopio marca Nikon 50i POL, acompañados de fotografías digitales utilizando una cámara Nikon de alta resolución adaptada al microscopio, pertenecientes al laboratorio de Yacimientos Minerales del programa de Geología de la Universidad de Caldas. El análisis metalográfico fue complementado con microscopía electrónica de barrido, utilizando un equipo FEI QUANTA 250 con detectores SEI, BEI y EDS, magnificaciones de hasta 1.000.000X y resoluciones desde los 3 nanómetros, perteneciente al Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES) de la Universidad de Caldas y con análisis multielementales de 32 elementos, llevados a cabo en el laboratorio ALS con tratamiento de agua regia y posterior análisis ICP-MS, utilizando un equipo Perkin Elmer Sciex ELAN 9000. Las abreviaturas utilizadas en el presente trabajo fueron tomadas de Whitney and Evans; (2010).

Por último, se realizó el trabajo interpretativo de los resultados adquiridos al aplicar diferentes técnicas analíticas. adicional a esto, los resultados consolidados y depurados se discutieron amplia y abiertamente con el director del trabajo de grado, con el objetivo de corregir, mejorar y complementar las conclusiones del estudio.

## 6. MARCO GEOLÓGICO

Regionalmente el distrito minero Nechí se encuentra dominado estructuralmente por el trazo NS a NNW de la falla Otú-Pericos (Feininger, 1972). La cinemática de esta zona de falla no está definida, se han observado movimientos, destrales y sinestrales a lo largo del trazo de la falla (Horner, 2018). Esta zona de falla separa los terrenos Tahamí al occidente y el Chibcha al oriente (Restrepo y Toussaint, 1988; Cediél *et al.*, 2003). Al este de la zona de estudio, la falla Otú pone en contacto rocas plutónicas jurásicas del batolito de Segovia (Spikings *et al.*, 2014) con Neises cuarzo feldespático y alumínicos permo-triásicos agrupados regionalmente como Complejo Cajamarca (Maya y González, 1995; Gonzales, 2001; Gómez-Tapias *et al.*, 2015). Restrepo *et al.*, (2010) denominan a estas rocas metamórficas presentes en la zona de estudio como Neis de Nechí, describiéndolas como un cuerpo ígneo afectado por metamorfismo dinámico-dúctil en facies anfibolita con esquistosidad no penetrativa (Rodríguez *et al.*, 2014). Restrepo *et al.*, (2010) obtuvieron en circones una edad U-Pb del Pérmico de  $277,3 \pm 3,0$  Ma, interpretada como la edad de intrusión del granitoide y una edad Triásica de  $236,4 \pm 6,6$  Ma., correspondiente a la edad del metamorfismo. Rodríguez *et al.*, (2019) propone que la deformación dúctil que caracteriza esta unidad podría ser el resultado de la colisión entre los basamentos Neoproterozoico y Triásico durante el jurásico.

Al oriente de la falla Otú-Pericos afloran rocas metamórficas precámbricas agrupadas regionalmente como el Neis de San Lucas (Gómez-Tapias *et al.*, 2015). Estas rocas metamórficas están limitadas al occidente por la zona de falla El Bagre y al este por la zona de falla Palestina. Al sur de la zona de estudio se encuentra los depósitos cretácicos volcano-sedimentarios de Segovia y depósitos cuaternarios aluviales del río Nechí y sus afluentes, cubriendo discordantemente a las unidades que se presentan en el área (Zapata *et al.*, 2013), (Figura 1).



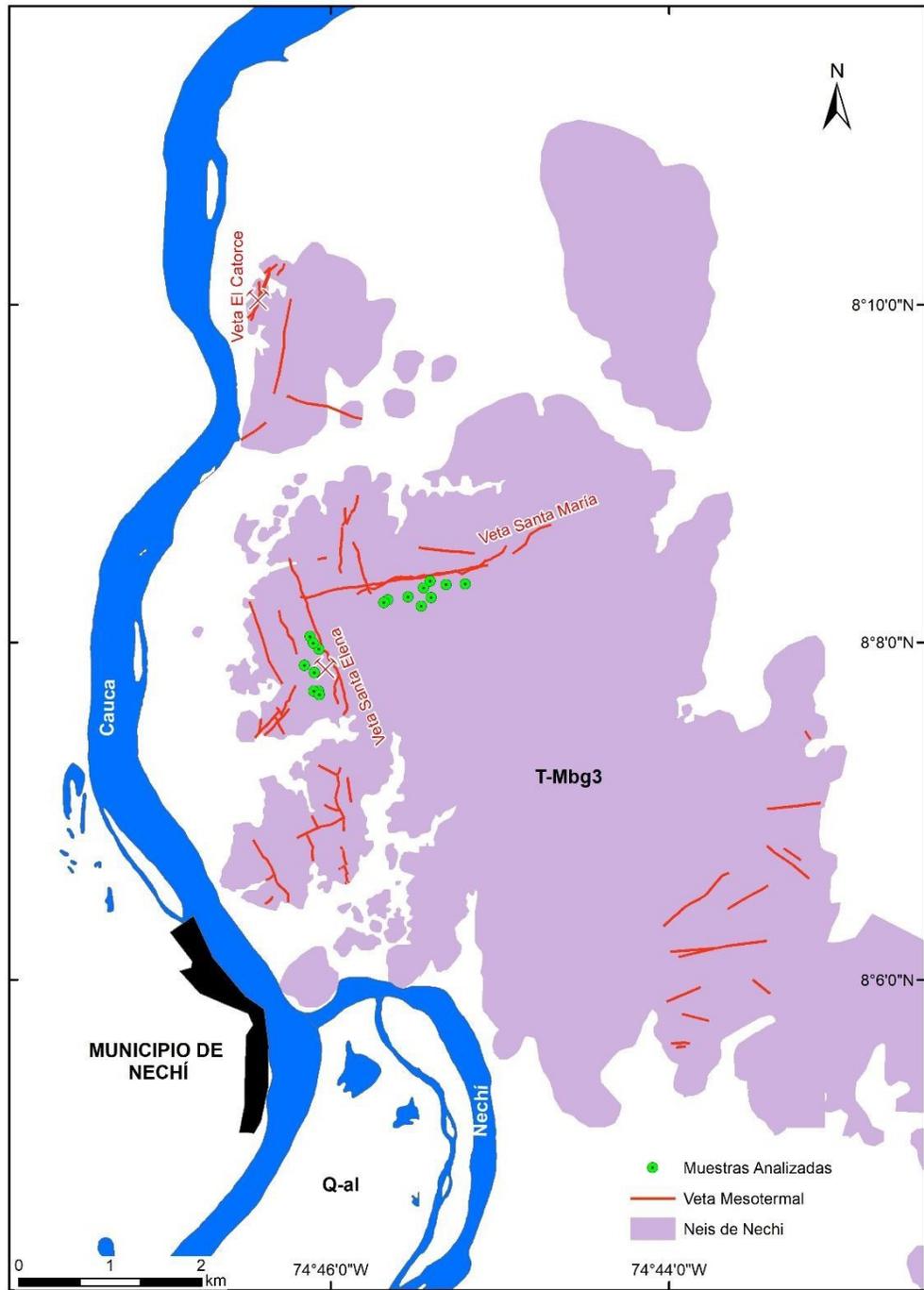
**Figura 1.** Mapa geológico regional de la zona de estudio. Base cartográfica tomada de Gómez-Tapias *et al.*, (2015).

## 7. GEOLOGÍA LOCAL

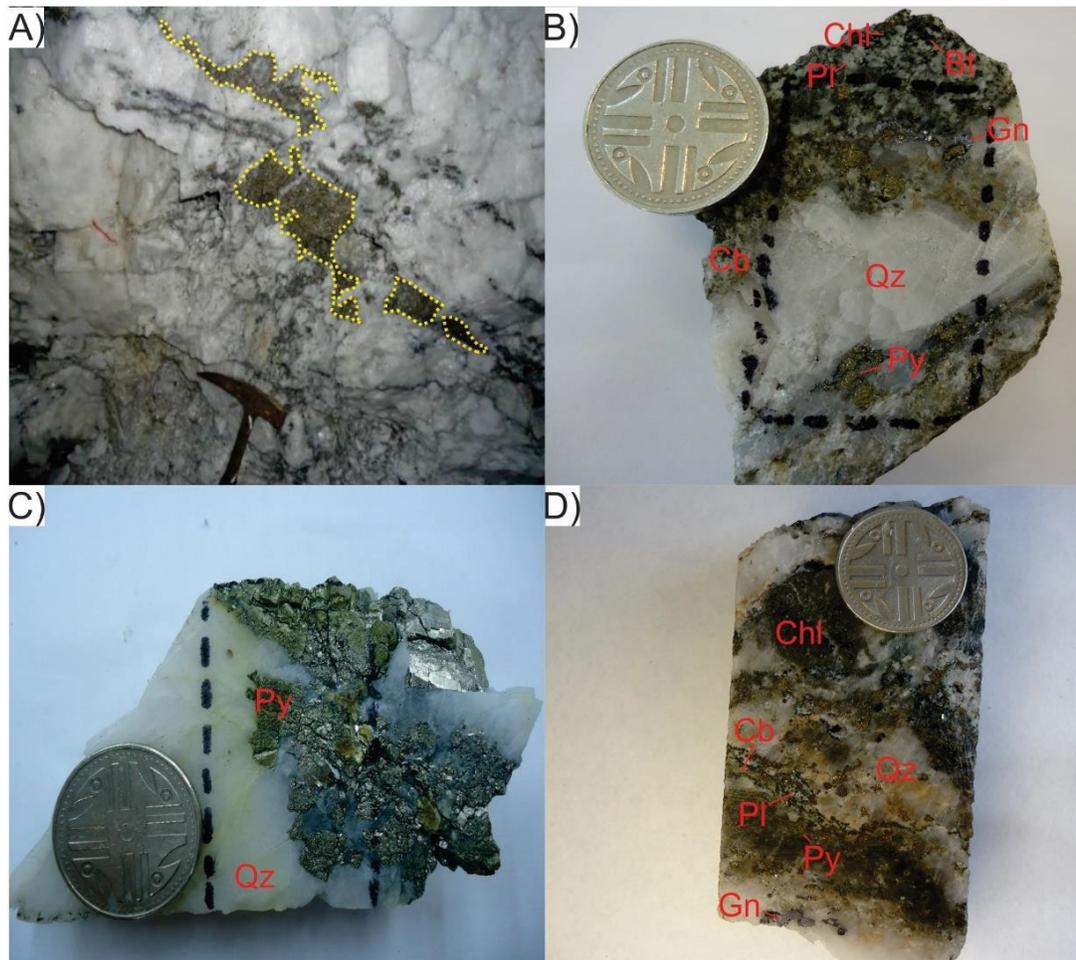
Los depósitos vetiformes de Au-Ag se encuentran hospedados al interior de zonas de cizalla (Figura 2) en rocas metamórficas del Neis de Nechí agrupadas regionalmente como Complejo Cajamarca (Gonzales, 2001; Restrepo *et al.*, 2010 y Gómez-Tapias *et al.*, 2015).

La estructura vetiforme en el sector Santa Elena se presenta de manera discontinua, con formas sigmoidales y una tendencia en el sector norte de N20°W/35°SW con un espesor de 1.80 m, hacia el sur la tendencia cambia entre N20°W y N50°E; con buzamientos entre 25° a 65° al sur y un espesor promedio de 0.50 m. Los minerales metálicos presentes son pirita (Py), galena (Gn), calcopirita (Cpy) y escasa esfalerita (Sp). La mineralización se presenta en parches (Figura 3C), venillas y diseminada. La alteración dominante al interior de la veta es fílica o sericítica. El cuerpo hospedante exhibe un halo de alteración propilítica (Figura 3A)

En el sector de Santa María la estructura vetiforme es de forma discontinua y de espesor promedio de 1.01 m, con tendencia entre N50°E a N70°E y buzamiento que varía entre 30° a 50° hacia el sur este. La veta está conformada por cuarzo blanco a semi-traslúcido, con contenidos de pirita (Py), galena (Gn), ±calcopirita (Cpy), ±esfalerita (Sp). La mineralización se presenta en parches, venillas y diseminada (Figura 3B, 3D). La alteración dominante al interior de la veta es fílica o sericítica. El cuerpo hospedante exhibe un halo de alteración propilítica (Figura 3B, 3D).



**Figura 2.** Geología local de la zona de estudio y localización de las muestras analizadas. Base cartográfica tomada y modifica de Gómez-Tapias, *et al.*, (2015).



**Figura 3.** Características generales de las vetas. A) Estructura vetiforme fuertemente cizallada con fragmentos de roca caja (ortoneis) con alteraciones a clorita (Chl) al interior de la mina Santa Elena. B) Segmento de veta del sector de Santa María con fragmentos de roca caja (ortoneis) alterados a clorita (Chl) y mineralización de pirita (Py) y galena (Gn) diseminada. C) Segmento de veta de cuarzo (Qz) lechoso con mineralización de pirita (Py) en parches en el sector de Santa Elena. D) Segmento de veta de cuarzo (Qz) lechoso a semitraslúcido con mineralización de pirita (Py) y galena (Gn) diseminada y en vetillas, con carbonatos (Cb) rellenando oquedades y fragmentos de roca caja (ortoneis) alterados a clorita (Chl).

## **8. MINERALIZACIÓN**

Para la veta Santa Elena se identificó la presencia de pirita, galena, calcopirita, esfalerita, oro, telururos de Pb (altaita), telururos de Bi (telurobismutina) y telururos de Au-Ag. Para la veta Santa María se identificó la presencia de pirita, galena, esfalerita, escasa calcopirita, oro, telururos de Au-Ag y telururos de Pb (altaita).

### **8.1 VETA SANTA ELENA**

La pirita es el sulfuro dominante en la mineralización de esta veta, se observó principalmente de dos formas: pirita (Py1) de cristales euhedrales, con tamaños entre 15 $\mu$ m y mayores a 1mm, altamente fracturadas; pirita (Py2) con formas anhedrales no fracturadas, de tamaños menores a 120 $\mu$ m generalmente asociada a minerales de sulfuros base (galena y calcopirita), oro, telururos de Pb, telururos de Se-Bi y telururos de Au-Ag (Figura 4A, 4B).

La galena presenta exsoluciones de telururos de plomo (altaita), pits triangulares (algunos de ellos deformados) y está fuertemente asociada a la presencia de oro en las secciones (Figura 4B). Los tamaños varían de 15 $\mu$ m-3mm, con formas subhedrales como cristales aislados y anhedrales principalmente como rellenos de fracturas en pirita (Py1).

La calcopirita tiene formas anhedrales y tamaños promedios entre 10 $\mu$ m-1mm, comúnmente se observó entre las fracturas de pirita (Py1) y asociada a minerales como galena, oro y esfalerita (Figura 4C).

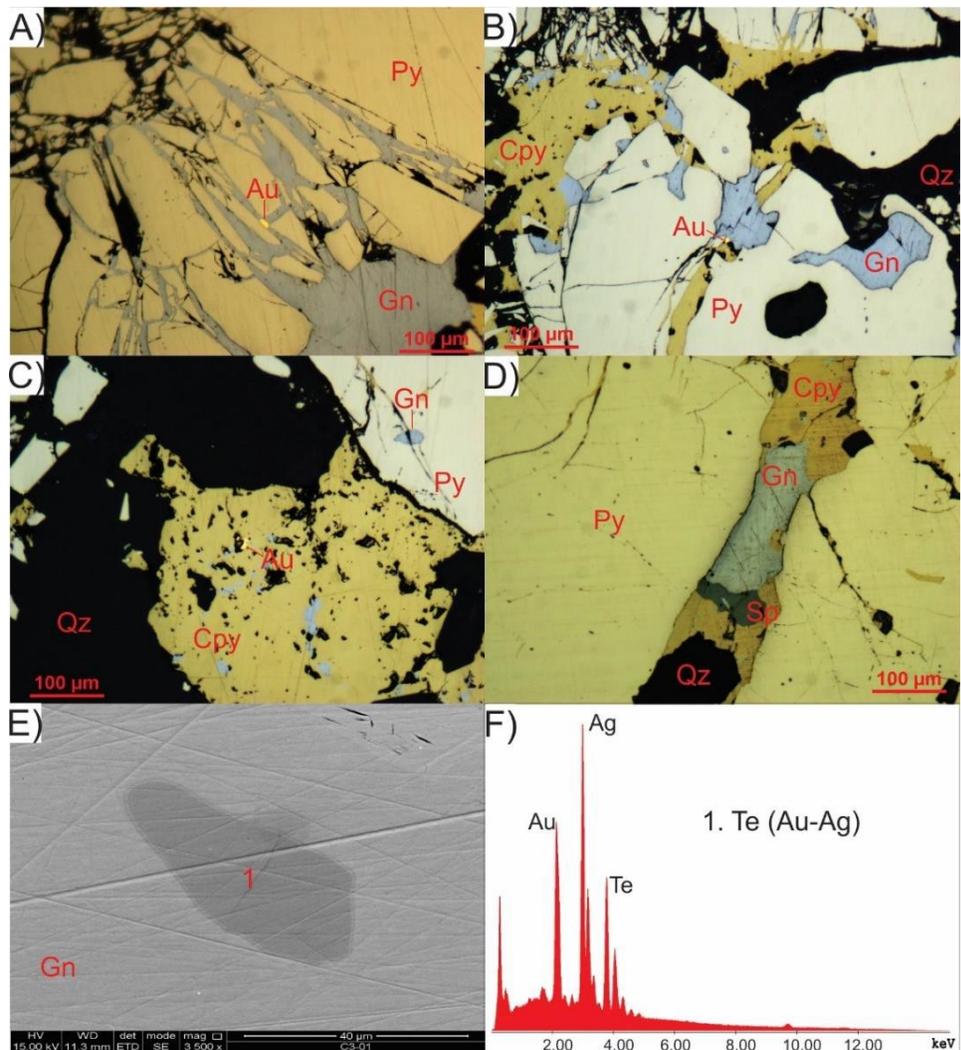
La esfalerita presenta reflexiones internas rojas y amarillas características, con formas anhedrales, tamaños promedios de 50 $\mu$ m y generalmente se observó como mineral de reemplazamiento en bordes de galena, calcopirita y pirita (Figura 4D).

La presencia de telururo Pb (altaita), telururo de Bi (telurobismutina) y telururos de Au-Ag fue corroborada por medio de los análisis SEM-EDS (Figura 4F).

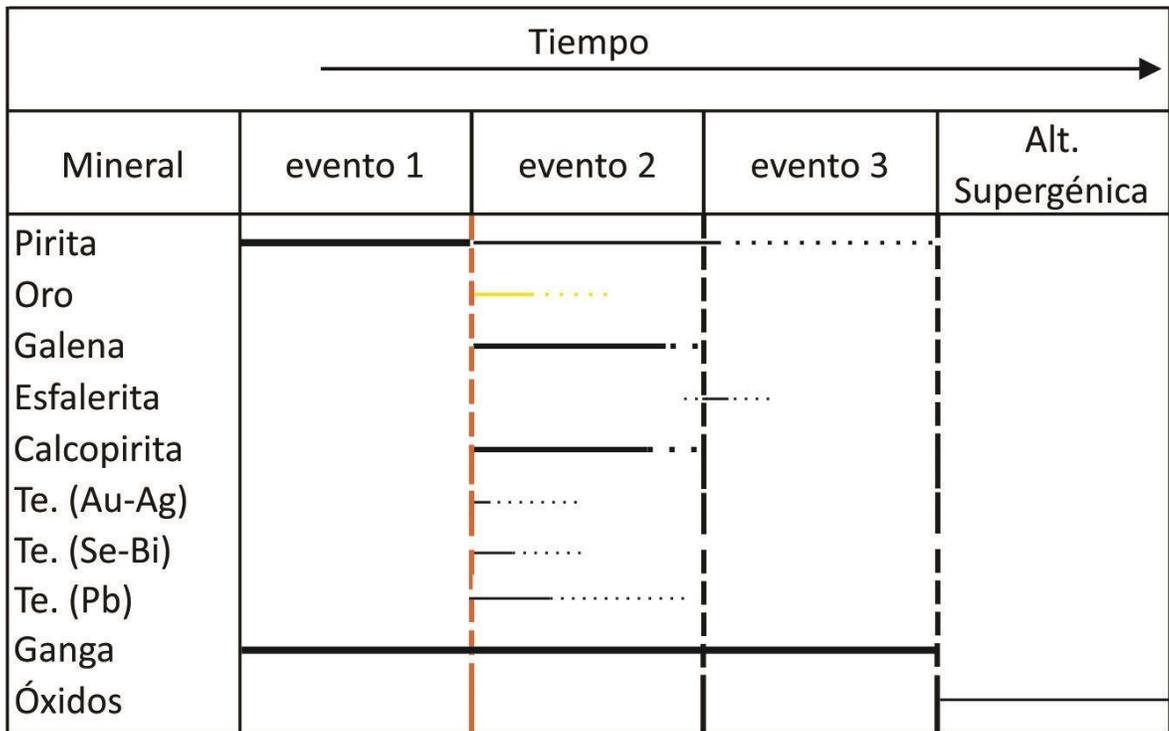
Los telururos Pb (altaita), telururos de bismuto (telurobismutina) y telururos de Au-Ag son comunes encontrarlos como exsoluciones sobre la galena, con formas anhedrales y tamaños inferiores a 50  $\mu\text{m}$  (Figura 4E).

El oro se presenta asociado a sulfuros de metales base (galena y calcopirita), principalmente rellenando fracturas de pirita (Py1), con formas redondeadas y alargadas subhedrales de tamaños menores a 21 $\mu\text{m}$  (Figura 4A, 4B y 4C).

Se definió tres eventos mineralizantes para esta veta. El primer evento (E1) está definido por la presencia de pirita (Py1) afectada por deformación que generó fracturamiento. El segundo y principal evento mineralizante (E2) selló las fracturas de la pirita (Py1) depositando sulfuros de metales base como galena y calcopirita, acompañados por pirita (Py2), oro, telururos de Au-Ag, telururos de Pb y telururos de Bi. La presencia de telururos (Pb y Bi) es una característica de esta etapa. Un tercer evento mineralizante (E3) fue definido por la presencia de esfalerita como reemplazamiento en los bordes de galena, calcopirita y pirita (Figura 5).



**Figura 4.** Características generales de la mineralización presente en la veta Santa Elena. A) Oro (Au), pirita (Py) y galena (Gn) asociados al segundo evento de mineralización (E2) llenando fracturas en piritas (Py1) asociada al primer evento mineralizante (E1). 10X. NP.LR. B) Oro (Au), pirita (Py), galena (Gn) y calcopirita (Cpy) asociadas a (E2) llenando fracturas en piritas (Py1) asociadas a (E1). 10X. NP.LR. C) Oro (Au) y galena (Gn) asociado a calcopirita (Cpy) pertenecientes a (E2). 10X. NP.LR. D) Asociación paragenética entre pirita (Py), calcopirita (Cpy), galena (Gn), esfalerita (Sp). 10X. NP.LR. E) Imagen SEM con presencia de galena (Gn) y telururos de (Au-Ag). BSED. 3500x. 15.0 kV. F) Espectros de análisis EDS (cuadros rojos en Figura E) sobre galena (Gn) y telururos Au-Ag. Abreviaciones de acuerdo a Whitney y Evans, 2010.



### Fracturamiento

**Figura 5.** Secuencia paragenética para la veta Santa Elena. El primer evento está caracterizado por presentar contenidos importantes de cuarzo (Qz), pirita (Py1). El segundo y principal evento de mineralización está caracterizado por la asociación sulfuros-oro-telururos. El tercer evento se caracteriza por el reemplazamiento de esfalerita (Sp) por pirita (Py1) y galena (Gn).

## 8.2 VETA SANTA MARÍA

La pirita es el sulfuro dominante en la veta, se observó de dos formas: pirita (Py1) correspondiente al evento temprano de mineralización, se caracteriza por ser de forma euhedral a subhedral, con tamaños promedio entre 500 $\mu$ m-2mm, moderada a altamente fracturada; pirita (Py2) con formas subhedrales con tamaños inferiores a 200 $\mu$ m, sin fracturas, acompañando al oro, telururos de Pb, telururos de Au-Ag y sulfuros de metales base como galena, esfalerita y  $\pm$  calcopirita (Figura 6B, 6C, 6D).

Microscópicamente la galena se observó libre o rellenando fracturas dentro de las piritas (Py1), de formas ligeramente alargadas y subhedrales, con tamaños que varían de 50 $\mu$ m a 2mm, algunos pits triangulares se encuentran deformados (Figura 6A, 6C).

La esfalerita se caracteriza por presentar formas anhedrales, con sus reflexiones internas rojas y amarillas típicas, con tamaños promedio entre 30 $\mu$ m-50 $\mu$ m, es poca su presencia en todas las secciones estudiadas, pero se encuentra principalmente reemplazando los bordes de la pirita (Figura 6D).

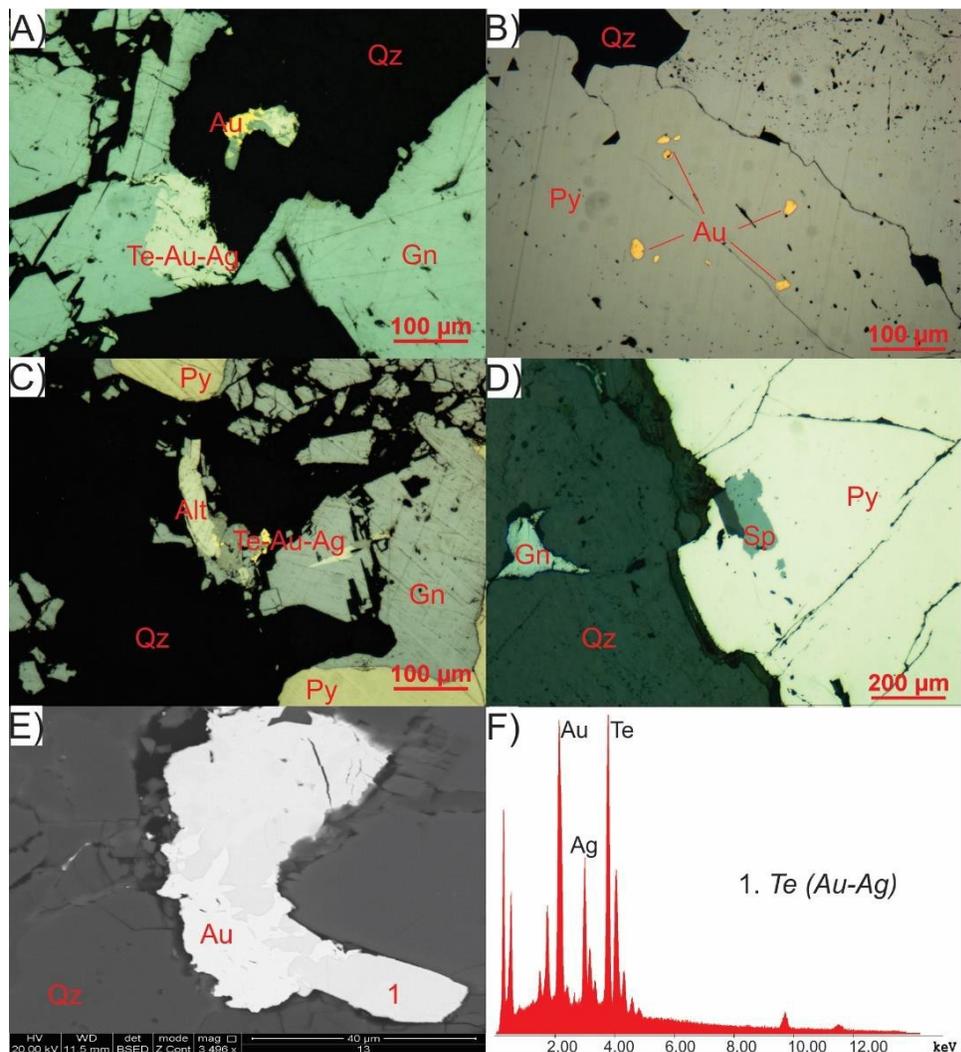
La calcopirita es escasa en las secciones analizadas, se encuentra de manera libre o formando contactos cóncavos con la galena, de forma anhedral, de color amarillo y tamaños promedio de 100 $\mu$ m.

A partir del uso del microscopio electrónico de barrido SEM-EDX, se identificó la presencia de telururos de Pb (altaita) como exsoluciones sobre la galena y telururos de Au-Ag que están fuertemente asociados a la presencia de oro en las secciones (Figura 6E).

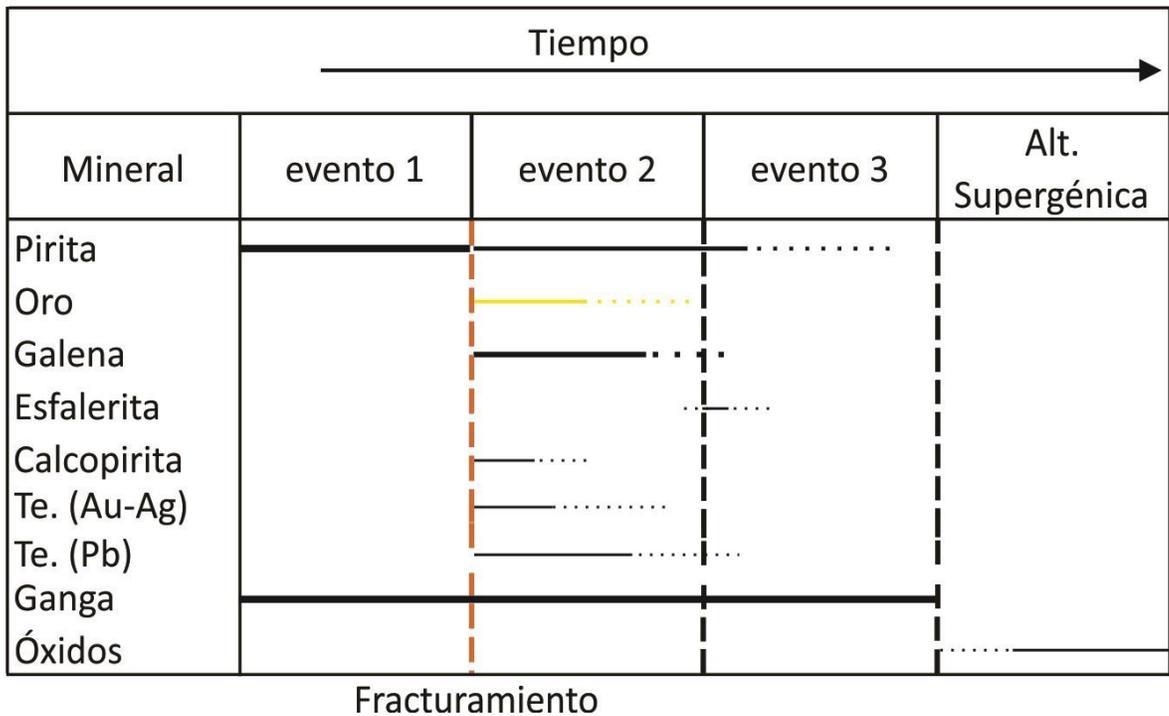
El oro presenta gran afinidad con la galena y está asociado al segundo y principal evento de mineralización, se encuentra sellando fracturas y rellenando cavidades

dentro de la pirita (Py1), con formas anhedrales y en ocasiones redondeadas, los tamaños oscilan entre 5-30 $\mu$ m (Figura 6A, 6B, 6C).

Para la veta Santa María se estableció tres eventos de mineralización. El primer evento mineralizante (E1), se caracteriza por presentar cantidades significativas de pirita (Py1) altamente fracturadas debido a esfuerzos dinámicos. El segundo y principal evento de mineralización (E2), selló las fracturas de la pirita (Py1) con pirita (Py2), galena, esfalerita, calcopirita, oro, telururos de Pb y telururos Au-Ag. La presencia de telururos es típica de esta etapa. El tercer y último evento de mineralización (E3) está definido por esfalerita reemplazando los bordes de la pirita (Py1) (Figura 7).



**Figura 6.** Características generales de la mineralización presente en la veta Santa María. A) Oro (Au), galena (Gn) y telururos de Au-Ag asociados al segundo evento de mineralización (E2) se presenta de manera libre como parches. 10X. NP.LR. B) Oro (Au), asociado a (E2) llenando cavidades en piritas (Py1) asociada al primer evento (E1). 10X. NP.LR. C) Oro (Au) y galena (Gn) y telururos de Au-Ag de manera libre asociados a (E2). 10X. NP.LR. D) Esfalerita asociada al tercer evento de mineralización (E3) reemplazando parcialmente los bordes de pirita (Py1) y galena (Gn). 20X. NP.LR. E) Imagen SEM con presencia de Oro (Au) y telururos de (Au-Ag). BSED. 3496x. 20.0 kV. F) Espectros de análisis EDS (cuadros rojos en Figura E) sobre galena telururos Au-Ag. Abreviaciones de acuerdo a Whitney y Evans, 2010.



**Figura 7.** Secuencia paragenética establecida para la veta Santa María. El primer evento caracterizado por presentar contenidos importantes de cuarzo (Qz), pirita (Py1). El segundo y principal evento mineralizante está caracterizado por la asociación sulfuros-oro-teluros. El tercer evento se caracteriza por el reemplazamiento de esfalerita (Sp) por pirita (Py1).

## 9. ALTERACIONES HIDROTERMALES

### 9.1 ROCA CAJA

Durante el ascenso del fluido mineralizante se generó un halo de alteración propilítica en la roca caja (ortoneis) de los dos sectores de estudio, ocasionando cambios físicos y químicos de los minerales preexistentes.

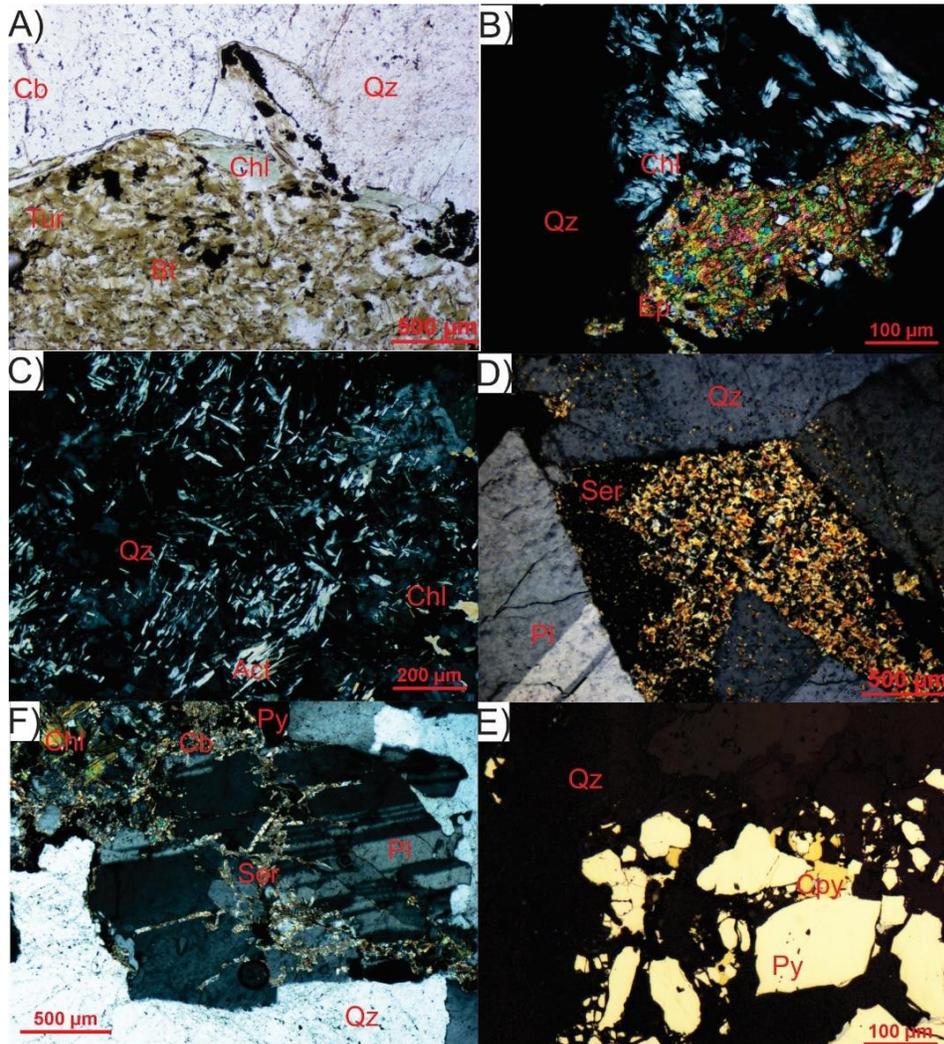
Microscópicamente se observó la presencia de biotitas con formas tabulares y alargadas con tamaños menores a  $400\mu\text{m}$  alteradas parcial o totalmente a clorita otorgando una apariencia verdosa a la roca caja. La epidota se presenta como agregados granulares con tamaños que no superan las  $60\mu\text{m}$ , este mineral se encuentra asociada a la presencia de rutilo y anatasa. Los cristales de actinolita presentan colores de interferencia de primer orden, con formas aciculares y tamaños inferiores a  $50\mu\text{m}$ . Los carbonatos se encuentran principalmente rellenando fracturas con espesores menores a  $110\mu\text{m}$  presentes en cuarzos masivos y piritas o como cristales aislados sin una distribución preferencial (Figura 8C, 8E, 8F)

La presencia de minerales carbonatados indica que el fluido fue rico en  $\text{CO}_2$ . La remoción del  $\text{CO}_2$  de la solución por disociación, de acuerdo con la reacción  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ , aumenta el pH y la actividad del carbonato en la solución, causando la precipitación de minerales carbonatados (Rimstidt, 1997).

## 9.2 VETA SANTA ELENA Y VETA SANTA MARÍA

La alteración fílica o sericítica es común al interior de las vetas estudiadas, esto queda evidenciado por la formación cuarzo masivo con tamaños menores a 1.5 mm, sericita como producto de alteración total o parcial de la plagioclasa, cloritas subhedrales con tamaños menores a 100  $\mu\text{m}$ , piritas euhedrales a subhedrales con tamaños inferiores a 1.5 cm, algunas de ellas moderadamente fracturadas y  $\pm$  calcopirita con formas anhedrales generalmente relleno de fracturas (Figura 8).

Esta asociación es dada por medio de hidrólisis que altera minerales anhidros, lo que ocasiona una alteración de los feldespatos por presencia de iones  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{S}^{2-}$ , para formar cuarzo, sericita, pirita, calcopirita y clorita generando minerales arcillosos para atenuar el pH ligeramente ácido del fluido (Pirajano, 2009). La sericitización ocurre en un rango de pH entre 5 y 6 a temperaturas superiores a 250°C (Corbett and Leach, 1997).



**Figura 8.** Características generales de la alteración hidrotermal en el área de estudio. A) Roca caja sector Santa María. Cuarzo (Qz), carbonato (Cb), Clorita (Chl), Biotita (Bt) alterada a Clorita (Chl) 5X. NP.LT. B) Roca caja sector Santa Elena. Cuarzo (Qz), Clorita (Chl), Epidota (Ep) 5X. NX.LT. C) Roca caja Sector Santa Elena. Cuarzo (Qz), Clorita (Chl), Actinolita (Act). 20X. NX.LT. D) Veta Santa María. Cuarzo (Qz), Plagioclasa (Pl), Sericita (Ser). 5X. NX.LT. E) Veta Santa Elena. Cuarzo (Qz), Clorita (Chl), Plagioclasa (Pl), Sericita (Ser), Pirita (Py), Carbonatos (Cb). 5X. NX.LT. F) Veta Santa Elena. Cuarzo (Qz), Pirita (Py), Calcopirita (Cpy). 20X. NP.LR.

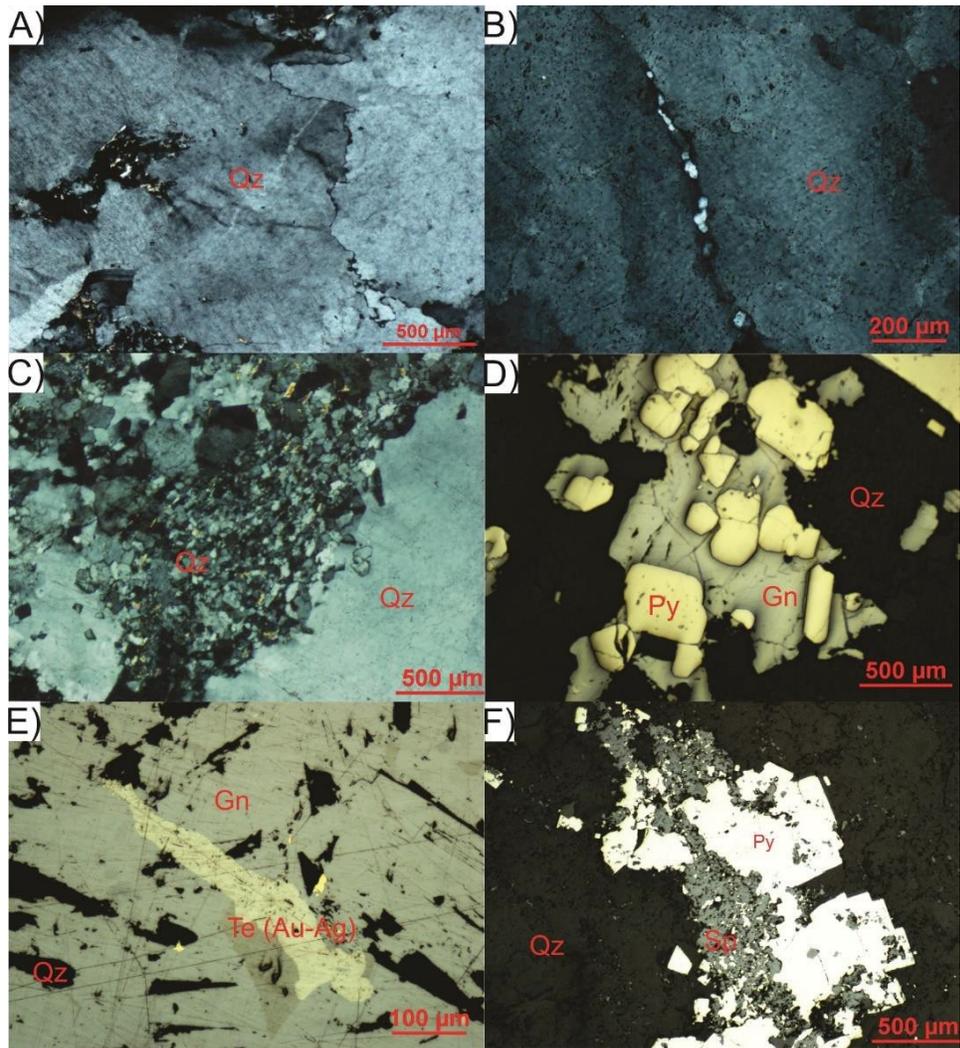
## 10. TEXTURAS DE CUARZO Y TEXTURAS DE MENA

Tanto para la veta Santa Elena como para la veta Santa María el cuarzo es el mineral dominante, presenta texturas primarias de carácter masivo, producto de la cristalización del fluido hidrotermal en espacios abiertos, otorgando una apariencia más o menos homogénea sobre amplias áreas de las secciones estudiadas. Se evidenció además texturas de recristalización como: 1) en forma de mosaico (Dong *et al.*, 1995) donde agregados cristalinos exhiben bordes irregulares y bahías que reflejan las condiciones cambiantes a las que fueron sometidas los granos; 2) dinámica tipo *Bulging* (BLG) que se desarrolló a lo largo de los contactos entre granos de cuarzo (Figura 9B).

La descripción de las texturas de minerales de mena se estableció a partir de las clasificaciones propuestas por Edwards (1960) y Ramdohr (1980). Tanto para la veta Santa Elena como para la veta Santa María se identificaron texturas de reemplazamiento, globular y de exsolución.

Las texturas de reemplazamiento (Figura 9F) son comunes observarlas en los bordes de la pirita (Py1) la cual está siendo reemplazada parcialmente por esfalerita (Sp) ocasionando bordes irregulares. La textura globular se encuentra asociada principalmente a la presencia de pirita (Py) y galena (Gn) en la cual se forman glóbulos o agregados de pirita (Py) los cuales estén embebidos dentro de la galena (Figura 9D). Las texturas de exsolución se presentan en forma de parches y con una coloración más clara sobre la galena (Gn) (Figura 9E).

La depositación de sulfuros de metales base en los diferentes eventos de mineralización de las vetas, corresponden al sellado de fracturas y cavidades en minerales preexistente y en menor proporción reemplazamiento mineral.



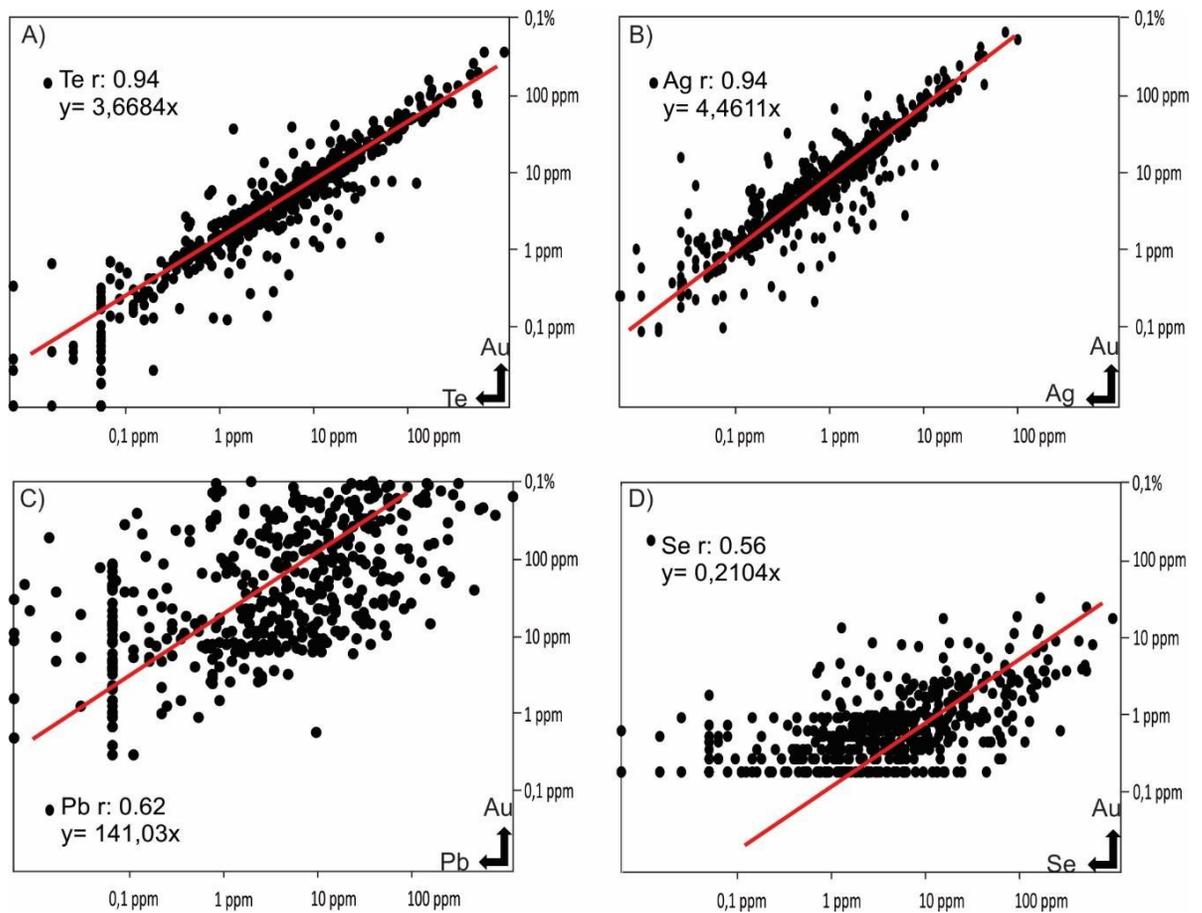
**Figura 9.** Texturas generales del cuarzo y texturas de mena para la veta Santa Elena y Santa María. A) Veta Santa Elena. Cuarzo (Qz) con textura masiva. 5X. NX.LT. B) Veta Santa Elena. Textura bulging en cuarzo (Qz) 20X. NX.LT. C) Veta Santa Elena. Textura mosaica en cuarzo (Qz). 5X. NX.LT. D) Veta Santa María. Textura globular de pirita (Py) en galena (Gn). 5X. NP.LR. E) Veta Santa María. Textura de exsolución. Telururos de Au-Ag sobre galena (Gn). 10X. NP.LR. F) Veta Santa María. Textura de reemplazamiento de esfalerita (Sp) sobre Pirita (Py) asociado al tercer evento de mineralización (E3). 5X. NP.LR. Abreviaciones de acuerdo a Whitney y Evans, 2010.

## **11. GEOQUÍMICA MULTIELEMENTAL**

Se procesaron (713) muestras que corresponden a las vetas Santa Elena (553) y Santa María (160) para realizar análisis multielementales de 32 elementos. Las mineralizaciones de estas vetas están caracterizadas por las asociaciones Au-Ag, Au-Te, Au-Pb, Au-Cu, Te-(Se-Bi), Te-(Au-Ag), Te-(Pb).

### **11.1 VETA SANTA ELENA**

Las mineralizaciones presentes en la veta Santa Elena se caracterizan por presentar las asociaciones Au-Ag, Au-Pb, Au-Te, Au-Ag-Te Au-Pb-Te (Figura 10). Estas asociaciones minerales corresponden principalmente al segundo y principal evento mineralizante. Las concentraciones de As, Hg, Sb, (promedio de 1.13 ppm, 0.04 ppm y 0.55 ppm respectivamente) son bajas, descartando la presencia de arsenopirita, rejalgar, cinabrio y estibina en la mineralización (Tabla 1). Las concentraciones de Zn y Cd son moderadas (promedio de 60.52 ppm y 0.94 ppm respectivamente) concordando con la presencia de esfalerita. Las altas concentraciones (>100ppm) de Te, Cu, Pb reflejan la presencia de telururos de Au-Ag, telururos de Bi, calcopirita y galena en la mineralización. Aunque no se observaron seleniuros, las concentraciones de Se (1.38ppm) y la asociación con Te, permiten inferir su presencia. Las concentraciones de W están en 2.31 ppm y la relación Au/Ag es 0.94.



**Figura 10.** Gráficos bimodales de los resultados multielementales de la veta Santa Elena, confirmando las asociaciones mineralógicas observadas y analizadas para el segundo y principal evento de mineralización (E2). A. Au vs Te. B. Au vs Ag. C. Au vs Pb. D. Au vs Se. Los coeficientes de correlación fueron calculados con el valor logarítmico de la concentración de cada elemento.

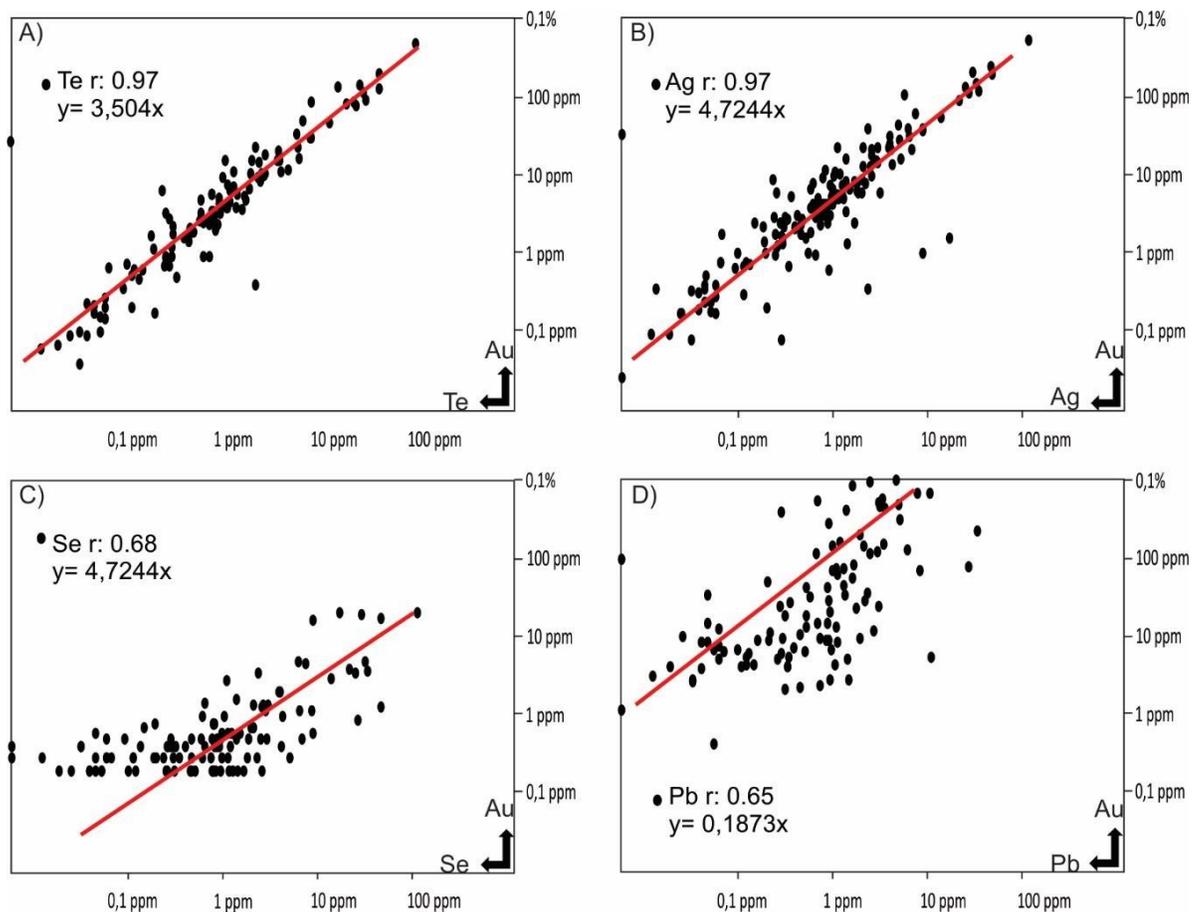
**Tabla 3.** Matriz de correlación para las asociaciones de Au-Ag, Au-Te, Te-Pb, Te-Se, Te-Bi.

|    | <i>Au</i> | <i>As</i> | <i>Te</i> | <i>Bi</i> | <i>Se</i> | <i>Hg</i> | <i>Ag</i> | <i>Cu</i> | <i>Pb</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> | <i>Sb</i> |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Au | 1         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| As | 0,10      | 1         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Te | 0,94      | 0,09      | 1         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Bi | 0,40      | 0,14      | 0,48      | 1         |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Se | 0,56      | 0,08      | 0,64      | 0,90      | 1         |           |           |           |           |           |           |           |
| Hg | 0,47      | 0,08      | 0,53      | 0,32      | 0,49      | 1         |           |           |           |           |           |           |
| Ag | 0,87      | 0,10      | 0,87      | 0,48      | 0,63      | 0,60      | 1         |           |           |           |           |           |
| Cu | 0,34      | 0,05      | 0,31      | 0,31      | 0,29      | 0,15      | 0,30      | 1         |           |           |           |           |
| Pb | 0,63      | 0,09      | 0,66      | 0,76      | 0,86      | 0,49      | 0,66      | 0,40      | 1         |           |           |           |
| Cd | 0,55      | 0,17      | 0,62      | 0,86      | 0,92      | 0,51      | 0,65      | 0,39      | 0,89      | 1         |           |           |
| Zn | -0,18     | 0,09      | -0,18     | -0,12     | -0,08     | -0,13     | -0,17     | 0,00      | -0,20     | -0,12     | 1         |           |
| Sb | -0,08     | 0,62      | -0,09     | 0,05      | -0,13     | -0,10     | -0,07     | 0,04      | -0,05     | 0,05      | -0,08     | 1         |

## 11.2 VETA SANTA MARÍA

Para la veta Santa María se presenta una asociación Au-Ag, Au-Pb, Au-(Se-Bi), Au-Te, Au-Ag-Te, Au-Pb-Te (Figura 11). Estas asociaciones son características del segundo y principal evento de mineralización. Al igual que la veta Santa Elena las concentraciones en As, Hg y Sb son bajas (promedio de 0.82 ppm, 0.27 ppm y 0.36 ppm respectivamente) descartando la presencia de arsenopirita, rejalgar, cinabrio y estibina en la mineralización (Tabla 2). Las concentraciones de Zn y Cd son moderadas (promedio de 42.88 ppm y 0.82 ppm respectivamente) congruente con la presencia de esfalerita. Concentraciones (>100 ppm) de Pb reflejan la presencia de galena en la mineralización.

La concentración de Cu (59.97 ppm) se ve evidenciada en la presencia de calcopirita en la mineralización. La concentración del Te (19.42 ppm) y la relación con el Au, Ag y el Pb es congruente con la presencia de telururos de Au-Ag y telururos de Pb. Aunque no se observaron seleniuros, las concentraciones de Se (1.54 ppm) y la asociación con Te, permiten inferir su presencia. Las concentraciones de W están en 0.52 ppm y la relación Au/Ag es 0.97.



**Figura 11.** Gráficos bimodales de los resultados multielementales de la veta Santa María, confirmando las asociaciones mineralógicas observadas y analizadas para el segundo y principal evento de mineralización (E2). A. Au vs Te. B. Au vs Ag. C. Au vs Se. D. Au vs Pb. Los coeficientes de correlación fueron calculados con el valor logarítmico de la concentración de cada elemento.

**Tabla 4.** Matriz de correlación para las asociaciones de Au-Ag, Au-Te, Te-Pb, Te-Se, Te-Bi.

|    | <i>Au</i> | <i>As</i> | <i>Te</i> | <i>Bi</i> | <i>Se</i> | <i>Hg</i> | <i>Ag</i> | <i>Cu</i> | <i>Pb</i> | <i>Cd</i> | <i>Zn</i> | <i>Sb</i> |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Au | 1         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| As | 0,00      | 1         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Te | 0,97      | -0,02     | 1         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Bi | 0,53      | 0,03      | 0,61      | 1         |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Se | 0,69      | -0,04     | 0,80      | 0,85      | 1         |           |           |           |           |           |           |           |
| Hg | 0,66      | -0,02     | 0,68      | 0,22      | 0,42      | 1         |           |           |           |           |           |           |
| Ag | 0,97      | 0,01      | 0,96      | 0,51      | 0,67      | 0,66      | 1         |           |           |           |           |           |
| Cu | 0,43      | 0,04      | 0,46      | 0,09      | 0,26      | 0,39      | 0,42      | 1         |           |           |           |           |
| Pb | 0,68      | 0,01      | 0,78      | 0,89      | 0,99      | 0,39      | 0,65      | 0,22      | 1         |           |           |           |
| Cd | 0,48      | 0,02      | 0,61      | 0,71      | 0,90      | 0,27      | 0,41      | 0,19      | 0,90      | 1         |           |           |
| Zn | -0,18     | -0,01     | -0,17     | -0,20     | -0,12     | -0,20     | -0,20     | 0,13      | -0,17     | -0,05     | 1         |           |
| Sb | 0,21      | 0,91      | 0,21      | 0,09      | 0,10      | 0,21      | 0,22      | 0,27      | 0,14      | 0,10      | -0,10     | 1         |

## **12. DISCUSIÓN**

La información adquirida por los estudios petrográficos en relación con la secuencia paragenética y minerales de alteración hidrotermal, permitió sugerir las condiciones de formación y la evolución del fluido mineralizante para ambas vetas.

### **12.1 EVOLUCIÓN DEL FLUIDO HIDROTERMAL**

A pesar de no tener datos microtermométricos de inclusiones fluidas, las texturas de cuarzo masivo acompañado de pirita (Py1) con nulo contenido de oro, permite sugerir un primer momento (E1) de ascenso de fluidos rico en sílice, donde no se alcanzaron las condiciones (presión, temperatura, pH) necesarias para la precipitación del oro. Posteriormente, este cuarzo masivo fue sometido a deformación evidenciada por cuarzo recristalizado y pirita (Py1) altamente fracturada, cuyas cavidades fueron selladas por un segundo y principal evento (E2) de ascenso de fluido hidrotermal el cual trajo consigo considerables cantidades de sulfuros de metales base como galena, calcopirita,  $\pm$  esfalerita, acompañados por pirita (Py2), oro y telururos de Pb, Se-Bi, Au-Ag, además de minerales de ganga como cuarzo y carbonatos. Por último, se logró establecer un tercer ascenso de fluidos (E3) caracterizado por texturas de reemplazamiento de esfaleritas en bordes de pirita (Py1, Py2), calcopirita y galenas.

### **12.2 TRANSPORTE Y DEPOSITACIÓN DEL ORO**

La información mineralógica disponible es una evidencia directa del pH y las condiciones redox del fluido (Klein *et al.*, 2005). La ausencia de hematita y sulfatos en el ambiente de depositación, la alteración hidrotermal propilítica y la coexistencia de pirita y clorita producto de ésta, indican una condición relativamente reducida, además, la alteración Fílica sugiere un ambiente neutral a ligeramente alcalino para

la mineralización en ambas vetas (Klein *et al.*, 2005). La presencia de telururos en el ensamble mineral durante (E2) indican condiciones ligeramente reductoras para el fluido mineralizante (Ciobanu *et al.*, 2006; Cooke *et al.*, 2009). Bajo estas condiciones físico-químicas especies como H<sub>2</sub>S y HS<sup>-</sup> son dominantes, por lo tanto, se sugiere que el ion complejo Au(HS)<sup>2-</sup> pudo ser el medio más factible para transportar el oro (Klein *et al.*, 2005; Shenberger y Barnes, 1989; Benning y Seward, 1996). La presencia de carbonatos en la ganga como en minerales de alteración hidrotermal sugieren que el fluido fue rico en CO<sub>2</sub>. La remoción de CO<sub>2</sub> de la solución por disociación de acuerdo a la reacción  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ , aumenta el pH y la actividad del carbonato en la solución causando la precipitación de minerales carbonatados y promueve la desestabilización del ion complejo de oro (Rimstidt, 1997; Klein *et al.*, 2005). Al mismo tiempo, el S total fue decreciendo debido a la volatilización del H<sub>2</sub>S y la precipitación de los sulfuros. El proceso de reducción del S total tiene un efecto esencial para alcanzar la super saturación del oro y por consiguiente su precipitación debido a la desestabilización del ion complejo Au(HS)<sup>2-</sup> (Ridley y Diamond, 2000; Phillips y Powell, 2010 y Saunders *et al.*, 2014).

### 12.3 MODELO GENÉTICO PARA LAS VETAS

Las características geológicas y estructurales de ambos depósitos vetiformes como: emplazamiento en zonas de cizalla con deformación frágil-dúctil, la presencia de telururos de Pb, Au-Ag, Se-Bi, sugieren un posible origen magmático del fluido hidrotermal (Cook *et al.*, 2009) siendo compatible con el modelo de depósitos de tipo Oro Orogénico (*Orogenic Gold Deposits*), definido por Groves *et al.* (1998), del subtipo depósitos de Filones Auríferos Hospedados en Granitoides (*Granitoid-Hosted Lode-gold Deposits*).

Aunque la posible afinidad magmática del fluido mineralizante podría ser relacionada genéticamente a la roca caja, en el sentido de los depósitos Relacionados a Intrusivos (*Intrusion-Related*) definidos por Sillitoe y Thompson

(1998), las características estructurales y los eventos deformativos observados en las muestras permiten descartar por el momento esta clasificación. Este tipo de depósitos se caracterizan por presentar edades similares entre la mineralización y su roca caja. Hasta el momento las relaciones discordantes de las vetas respecto a su roca caja (Neis de Nechí) permiten sugerir que el momento de formación de estas vetas es post-Triásico y que la roca encajante ya estaba cristalizada. Según Rodríguez *et al.*, (2019) la deformación frágil-dúctil que caracteriza esta unidad (Neis de Nechí) podría ser el resultado de la colisión entre los basamentos Neoproterozoico y Triásico durante el Jurásico, momento durante el cual pudo ocurrir la liberación y ascenso de los fluidos mineralizantes.

#### **12.4 IMPLICACIONES REGIONALES**

Históricamente las manifestaciones y los depósitos vetiformes presentes a lo largo del sistema de falla Otú-Pericos, (distrito minero Segovia-Remedios, Zaragoza, Bagre y Nechí) se habían asociado genéticamente. Los estudios realizados por Leal-Mejía (2011) permitieron descartar este vínculo genético para los depósitos vetiformes de Segovia-Remedio (Cretácico) y los depósitos vetiformes del distrito Bagre (Permo-triásico). Sin embargo, las relaciones genéticas entre los distritos Bagre, Zaragoza y Nechí permanecen inciertas. Pocos depósitos vetiformes en el distrito minero de Zaragoza han sido datados. Hasta la fecha, sólo los estudios realizados por Serna-Peña (2020) permitieron establecer un vínculo genético entre la mineralización presente en la mina La Aurora (Zaragoza) y los depósitos de Segovia-Remedios. El distrito Nechí, se encuentra en el extremo norte de esta secuencia de depósitos y al este de la zona de falla Otú-Pericos. El patrón geoquímico (Au-Ag-Te-Pb) y la posible afinidad magmática para el fluido mineralizante observado en las vetas analizadas en este trabajo permiten establecer un vínculo químico con las vetas presentes en el distrito Bagre. Sin embargo, las relaciones genéticas entre ambos distritos permanecen inciertas debido a la ausencia de datos geocronológicos que permitan establecer con claridad

este vínculo. Las relaciones de corte y las interpretaciones realizadas sugieren una edad post-triásica para los depósitos vetiformes analizados y la afinidad magmática del fluido podría estar relacionada a los eventos magmáticos del Jurásico colombiano. Descartando por el momento una relación genética-temporal entre las vetas del distrito Nechí y las vetas permo-triásicas del distrito Bagre (Leal-Mejía, 2011; Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra y Alvaran-Echeverri, 2018 y Naranjo-Sierra, 2019). Así mismo, se podría descartar también una relación genética-temporal entre las vetas del distrito Nechí y las vetas cretácicas de los distritos Segovia-Remedios y Zaragoza (Leal-Mejía, 2011; Leal-Mejía *et al.*, 2018; Shaw *et al.*, 2018 y Serna-Peña, 2020).

### 13. CONCLUSIONES

Se definieron tres eventos mineralizantes para la veta Santa Elena definidos como E1, E2 y E3 siendo el segundo evento el principal, que trajo consigo considerables cantidades de galena, calcopirita, telururos y oro. Para la veta Santa María se definieron también tres eventos denominados como E1, E2 y E3 siendo el segundo evento el principal, depositando galena, telururos, oro y poco contenido de calcopirita.

La asociación de minerales de alteración en la roca caja del sector Santa Elena permitió establecer un predominio de la alteración hidrotermal Propilítica subfacies epidota con variaciones locales a subfacies clorita y actinolita. Para el sector de Santa María la asociación mineralógica permitió establecer un predominio de la alteración hidrotermal Propilítica subfacies epidota con variaciones locales a subfacies clorita.

Los análisis de geoquímica multielemental permitieron establecer las asociaciones de Au-Ag, Au-Te, Au-Pb, Au-Cu, Te-(Se-Bi), Te-(Au-Ag), Te-(Pb) para ambas vetas. Además de mostrar una relación directa entre las concentraciones de Au-Pb, Au-Ag, Au-Te, Au-Se.

Las asociaciones mineralógicas de las alteraciones y minerales de mena indican un ambiente relativamente reducido para el fluido hidrotermal. Bajo estas condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino, las especies ligantes  $H_2S$  o  $HS^-$  son las especies dominantes, por lo tanto, se sugiere que el ion complejo  $Au(HS)_2^-$  pudo ser el medio más factible para transportar el oro. El proceso de reducción del S total por volatilización de  $H_2S$  y precipitación de sulfuros tiene un efecto esencial para alcanzar la super saturación del oro y por consiguiente su precipitación, además la

remoción de CO<sub>2</sub> de la solución por disociación genera cambios físico-químicos que promueven la desestabilización del ion complejo Au(HS)<sup>2-</sup>.

Las características geológicas definidas para ambos depósitos vetiformes, el emplazamiento de las vetas en un ambiente de deformación frágil-dúctil que se relaciona a la colisión de los basamentos Neoproterozoico y Triásico durante el Jurásico; la presencia de telururos y ambientes relativamente reducidos para el fluido hidrotermal que sugieren una afinidad magmática y mecanismos de transporte como complejos Au(HS)<sup>2-</sup>, permiten sugerir la clasificación de ambos depósitos según el modelo de tipo Oro Orogénico (*Orogenic Gold Deposits*), del subtipo Depósitos de Filones Auríferos Hospedados en Granitoides (*Granitoid-Hosted Lode-gold Deposits*).

## REFERENCIAS

- Álvarez, 1983. Geología de la Cordillera Central y Occidente Colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Mezoceno-zóicos. Tesis doctoral, Universidad de Chile, Boletín Geológico INGEOMINAS – Bogotá.
- Bakker, Ronald J., 2003. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, v.194, p. 3-23.
- Benning, L.G., y Seward, T.M., 1996. Hydrosulphide complexing of Au(I) in hydrothermal solutions from 150 to 400 °C and 500 to 1500 bars. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 1849 – 1871.
- Cediél, F., Shaw, R. P., y Ceres, C., 2003. Tectonic assembly of the northern Andean block.: *American Association of Petroleum Geologist (AAPG) Memoir* 79, p. 815-848.
- Ciobanu, C.L., Cook, N.J., Damian, F., y Damian, G., 2006. Gold scavenged by bismuth melts: An example from Alpine shear-mobilisates in the Highis Massif, Romania. *Mineralogy and Petrology*, v. 87, pp. 351-384.
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Spry., y Voudouris, P., 2009. Understanding gold-(silver) telluride-(selenide) mineral deposits. *Episodes*, V32, p249-263.
- Echeverry, B., 2006. Genesis and thermal history of gold mineralization in the Remedios-Segovia Zaragoza Mining District of Northern Colombia. Tesis de Maestría. Universidad de Shimane. Japón.
- Feininger, T., Barrero, D. y Castro, N., 1972. Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub-zona II-B). *Boletín geológico*, Volumen XX, No. 2.
- Goldstein, R. H., y Samson, I., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*, v. 32, p. 9-53.
- Gómez-Tapias, J., Montes -Ramírez, NE., Nivia-Guevara, A., y Diederix, H., 2015. Mapa Geológico de Colombia, escala 1:1.000.000. Servicio Geológico Colombiano.

- González, H., 2001. Mapa geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. Ingeominas, Bogotá. 240p.
- Haeberlin, Y., 2002. Geological and structural setting, age, and geochemistry of the orogenic gold deposits at the Pataz Province, eastern Andean Cordillera, Peru: Suiza, Université de Genève, Tesis Doctoral #3283, 196 pp.
- Haeberlin, Y., Moritz, R., Fontbote, L., Cosca, M., 2004. Carboniferous orogenic gold deposits at Pataz, eastern Andean Cordillera, Peru: geological and structural framework, paragenesis, alteration, and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology: *Economic Geology*, 99, 73-112.
- Horner, J., 2018. Second opinion on exploration activities, El Bagre Mining district, dept. of Antioquia, Colombia, Internal Report prepared to Mineros S.A. 27p.
- Klein, E.L., Harris, C., Giret, A., Moura C., Angelica R.S., 2005. Geology and isotope (O, H, C, S) constraints on the genesis of the Cachoeira gold deposit, Gurupi Belt, northern Brazil: *Elsevier-Chemical Geology*, 221, 188-206.
- Kreuzer, O.P., 2006. Textures, paragenesis and wall-rock alteration of lode-gold deposits in the Charters Towers district, north Queensland: implications for conditions of ore formation: *Mineralium Deposita*, 40(6-7), 639-663, doi:10.1007/s00126-005-0010-1
- Leal-Mejía, H., 2011. Phanerozoic Gold Metallogeny in the Colombian Andes: A Tectono-Magmatic Approach. Tesis Doctoral, Barcelona University, 1000p.
- Leal-Mejía, H., Shaw, R., y Melgarejo, J.C., 2018. Spatial-Temporal Migration of Granitoid Magmatism and the Phanerozoic Tectono-Magmatic Evolution of the Colombian Andes. Chapter 5. *Geology and Tectonics of Northwestern South America*, *Frontiers in Earth Sciences*.
- Londoño, C., Montoya, J.C., Ordoñez, O., y Restrepo, J.J., 2009. Características de las mineralizaciones vetiformes en el Distrito Minero Bagre-Nechí, Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 26, 29-38.

- Maya, M. y González, H., 1995. Unidades Litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Boletín geológico, Ingeominas. Bogotá. Volumen 35, No. 23: pp. 4353.
- Naranjo-Sierra, E., Alvaran-Echeverri, M., Zapata-Cardona, E., 2016. Análisis metalogenético preliminar del depósito vetiforme en mina La Ye, Antioquia-Colombia: características geológicas, isotópicas y estructurales: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.33, núm. 3, p316-328.
- Naranjo-Sierra, E., y Alvarán-Echeverri, M., 2018. Características geológicas, isotópicas y estructurales del depósito vetiforme Los Mangos, Antioquia-Colombia. Boletín de Geología, v40, p93-108.
- 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.
- Qiu, Y., Groves, D.I., McNaughton, N.J., Wang, L., Zhou, T., 2002. Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits in the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China: Mineralium Deposita, 37, 283-305.
- Randive, K.K., Hari, K.R., Dora, M.L., Malpe, D.B., y Bhondwe, A.A., 2014. Study of fluid inclusions: methods, techniques and applications. Gond. Mag., v29, p.19-28.
- Restrepo, J.J., Ordoñez, O., y Armstrog, R., 2010. Triassic metamorphism in the northern part of the Central Cordillera of Colombia, VII SSAGI, Brasilia, 405-408p.
- Restrepo, J. J., Toussaint, J. F., 1988. Terranes and continental accretion in the Colombian. Andes. Episodes 11(3), 189-193.
- Rimstidt, J.D., 1997. Gangue mineral transport and deposition, en Barnes, H.B. (ed.), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits: John Wiley & Sons, 487-515.
- Rodríguez, G., Arango, M.I., Zapata, G., y Bermúdez J.G., 2014. Petrografía y geoquímica del Neis de Nechí. Boletín de Geología, 36(1): 71-84.

- Roedder, E., 1984, Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy, v.2, p. 12-26.
- Roedder, E., y Bodnar, R. J., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. Annual Review of Earth and Planetary Sci. p. 263-301.
- Royero, J.M., 1997. Mapa geológico de Colombia. Plancha 65 – Tamalameque. Memoria Explicativa. Ingeominas. 53 p. Bucaramanga.
- Serna-Peña, C.A., Hernández-González, J.S., Leal-Mejía, H., Castaño-Dávila, D.L., 2020. Edad y caracterización isotópica de la mineralización aurífera vetiforme de la Mina La Aurora, distrito minero Zaragoza-Segovia-Remedios (DMZSR), Antioquia-Colombia. XVII Congreso Colombiano de Geología. IV Simposio de Exploradores. Santa Marta.
- Shaw, R. P., 2000. Gold mineralization in the Northern Andes – magmatic setting vs. metallogeny [technical summary]: International Mining Congress XI, Bogotá, Colombia.
- Shaw, R., Leal-Mejía, H., y Melgarejo, J.C., 2018. Phanerozoic Metallogeny in the Colombian Andes: A Tectono-Magmatic Analysis in Space and Time. Chapter 5. Geology and Tectonics of Northwestern South America, Frontiers in Earth Sciences.
- Shenberger, D.M., Barnes, H.L., 1989. Solubility of gold in sulfide solutions from 150 to 350 8C. Geochim. Cosmochim. Acta 53, 269 – 278.
- Sillitoe, R.H., Thompson, J.F.H., 1998. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits: Resource Geology, 48, 237-250.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., and Beate, B., 2015. The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). Gondwana Research, 27(1), 95-139.
- Zapata, G., Gilberto-Bermúdez, J., Rodríguez, G., Arango, M.I., 2013. Cartografía geológica de la plancha 83 Nechí (departamento de Antioquia). Servicio Geológico Colombiano. Medellín