

Características petrográficas y de alteración hidrotermal en litotipos asociados a sistemas epitermales de baja sulfuración: Estudio del caso mina la Reliquia (Antioquia - Colombia).

Autor

Mateo Herrera Ospina

201510077015

Trabajo de grado presentado para optar título de geólogo

Asesor

PhD. Diego Felipe Gómez Gutiérrez



Departamento de Ciencias de la Tierra

Medellín

2022

## **Agradecimientos**

Primero que todo quiero agradecer a Dios por permitir elaborar este proyecto, gracias a todas las personas que aportaron su conocimiento y experiencia, al asesor guía dedicando horas de su trabajo para los avances realizados que sin su ayuda y conocimientos no hubiera sido posible desarrollar este proyecto y por ultimo a mi familia que hicieron todo lo posible para apoyarme durante este proceso.

## Tala de Contenido

### Contenido

<b>1. Resumen</b> .....	6
<b>2. Introducción</b> .....	8
<b>3. Generalidades</b> .....	10
<b>3.1 Pregunta Problema</b> .....	10
<b>3.2 Hipótesis</b> .....	10
<b>3.3 Objetivos</b> .....	10
<b>3.3.1 Objetivo general</b> .....	10
<b>3.3.2 Objetivos específicos</b> .....	10
<b>4. Localización</b> .....	11
<b>5. Contexto geológico</b> .....	12
<b>5.1 Sistemas Epitermales</b> .....	13
<b>5.1.1 Depósitos epitermales de baja sulfuración</b> .....	13
<b>5.1.2 Depósitos epitermales de intermedia sulfuración</b> .....	14
<b>5.1.3 Depósitos epitermales de alta sulfuración</b> .....	14
<b>5.2 Tipos de alteración hidrotermales</b> .....	15
<b>5.2.1 Alteración argílica</b> .....	16
<b>5.2.2 Alteración argílica intermedia</b> .....	17
<b>5.2.3 Alteración argílica avanzada</b> .....	17
<b>5.2.4 Alteración fílica o sericitica</b> .....	17
<b>5.2.5 Alteración potásica</b> .....	18
<b>5.2.6 Alteración propilítica</b> .....	18
<b>6. Contexto local y tectónico</b> .....	19
<b>6.1 Batolito de Segovia</b> .....	19
<b>6.1.2 Origen y edad</b> .....	20
<b>6.2 Control Estructural</b> .....	20
<b>7. Metodología</b> .....	21
<b>7.1 Trabajo de campo</b> .....	22
<b>7.2 Análisis de muestras</b> .....	24
<b>7.2.1 Descripción macroscópica</b> .....	24
<b>7.2.2 Descripción microscópica:</b> .....	25
<b>8. Resultados</b> .....	27

<b>8.1 Roca caja</b> .....	27
<b>8.1.1 Descripción y análisis macroscópico</b> .....	27
<b>8.1.2 Descripción y análisis microscópico</b> .....	27
<b>8.2 Veta 1</b> .....	30
<b>8.2.1 Descripción y análisis macroscópico</b> .....	30
<b>8.2.2 Descripción y análisis microscópico</b> .....	30
<b>8.3 Veta 2</b> .....	32
<b>8.3.1 Descripción y análisis macroscópico</b> .....	32
<b>8.3.2 Descripción y análisis microscópico</b> .....	32
<b>8.4 Zona de alteración</b> .....	34
<b>8.4.1 Descripción y análisis macroscópico</b> .....	34
<b>8.4.2 Descripción y análisis microscópico</b> .....	34
<b>9. Conclusiones</b> .....	35
<b>10. Referencias</b> .....	36

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Localización de la zona de estudio. ....	11
<b>Figura 2.</b> Distrito minero Segovia – Remedios (DMSR). ....	13
<b>Figura 3.</b> Formación de los depósitos epitermales. ....	15
<b>Figura 4.</b> Esquema generalizado de alteraciones hidrotermales (Sillitoe, 2010). ....	16
<b>Figura 5.</b> Mapa de las principales unidades cronoestratigráficas y fallas de la Cordillera Central sector Norte. ....	19
<b>Figura 6.</b> Mapa estructural del Proyecto Segovia con propuesta de división en bloques estructurales (Malo, 2020). ....	21
<b>Figura 7.</b> Muestra macroscópica de la roca caja. ....	27
<b>Figura 8.</b> A y B - Plagioclasas (Pl) siendo remplazadas por Feldespato Potásico (Kfs). C y D – Cristales de Pirita (Py), cuarzo (Qz) y sericita (Ser) (alteración sericitica). E y F – Plagioclasas (Pl) con alteración sericitica. G y H - Zona de exsolución de feldespato potásico (Kfs) en plagioclasas (Pl). I – Oro (Au) libre. J – Pirita (Py) con textura oquerosa. ....	29
<b>Figura 9.</b> Muestras macroscópicas de la Veta 1. ....	30
<b>Figura 10.</b> A y B - Vetilla de carbonatos cortando un mineral opaco (Opq) y vetillas de cuarzo (Qz). C y D - Veta de Cuarzo (Qz) cortando la roca caja y vetillas con cuarzo (Qz) y pirita (Py). E – Pirita (Py) gruesa. ....	31
<b>Figura 11.</b> Muestra macroscópica de Veta 2. ....	32
<b>Figura 12.</b> A y B – Cuarzo (Qz) de veta cristalizado con exsolución. C, D, E y F – Intercrecimiento de cuarzo (Qz) en fracturas en hábito de drusa G – Esfalerita (Sp) dentro de la pirita (Py). H – Pirita (Py) con inclusiones de esfalerita (Sp), calcopirita (Ccp) y oro (Au). ....	33
<b>Figura 12.</b> Muestra macroscópica de zona de alteración. ....	34
<b>Figura 13.</b> A y B - Presencia de minerales de óxido y clorita de alteración. C – Presencia de esfalerita (Sp) y calcopirita (Ccp), notese la mayor proporción de esfalerita (Sp) que calcopirita (Ccp). D – Ocurrencia de Pirita (Py), esfalerita (Sp) y Calcopirita (Ccp). ....	35

## 1. Resumen

Los sistemas porfiriticos se encuentran relacionados a los arcos continentales y se emplazan entre los 2 y 5 km de profundidad. Los depósitos epitermales de baja, intermedia y alta sulfuración se encuentran asociados a los ambientes magmático hidrotermales. Al estar en contacto con el agua meteórica cerca de superficie se forman estos tipos de depósitos.

Las alteraciones hidrotermales en la zona de estudio están relacionadas con la alteración potásica y argílica donde se relaciona directamente la alteración potásica con los sistemas porfiriticos perteneciendo a lo que es el Batolito de Segovia y la alteración argílica pertenece a lo que es las vetas de cuarzo-oro de la mina La Reliquia.

La mina ‘La Reliquia’ se encuentra enmarcada en lo que se conoce como el Distrito Minero Segovia – Remedios (DMSR), donde se han identificado mineralizaciones de oro relacionado con cuerpos intrusivos (Batolito de Segovia) en este caso asociado a la Cordillera Central y mineralizaciones no identificado dentro de las mismas. Muchas de estas mineralizaciones presentes en el Batolito de Segovia se encuentran emplazadas en lo que pertenece al sistema de fallas inversas del Distrito Minero Segovia – Remedios (DMSR).

Palabras Claves: Magmático-hidrotermal, Batolito de Segovia, alteraciones hidrotermales, depósitos epitermales.

## **Abstract**

The porphyrite systems are in relation to what are the continental arcs and are located at what they are between 2 and 5 km deep. Low, intermediate, and high sulphidation epithermal deposits are associated with hydrothermal magmatic environments. Being in contact with meteoric water near the surface forms what these types of deposits are.

The hydrothermal alterations in the study area are related to the potassium and argillic alteration where the potassium alteration is directly related to the porphyritic systems belonging to what is the Segovia Batholith and the argillic alteration belongs to what is the quartz-gold veins of the La Reliquia mine.

The mine 'La Reliquia' is framed in what is known as the Segovia – Remedios Mining District (DMSR), where gold mineralizations related to intrusive bodies (Segovia Batholith) have been identified in this case associated with the Central Mountain Range and unidentified mineralizations within them. Many of these mineralizations present in the Segovia Batholith are located in what belongs to the reverse fault system of the DMSR.

Keywords: Magmatic-hydrothermal, Segovia batholith, hydrothermal alterations, epithermal deposits.

## 2. Introducción

El modelamiento y ubicación de lo que es hoy Colombia, estuvo atado a la definición de modelos, de acuerdo a la subducción y evolución de ‘Godwana’ para esto se han sugerido tres modelos tectónicos, el primero es un ‘Roll Back’ (Kammer & Sánchez, 2006; Sarmiento-Rojas et al., 2006), el segundo erosión por subducción (Cochrane et al., 2014; Spikings et al., 2015) y el tercero es subducción normal con transpresión (Blanco-Quintero et al., 2014; Bustamante et al., 2017; Rodríguez et al., 2018; Zuluaga et al., 2017). La interacción de la subducción occidental y la separación norte - sur de los bloques continentales dio lugar a la localización que actualmente tiene la zona estudio.

Segovia es un municipio de Colombia, situado en la subregión nordeste del departamento de Antioquia. Históricamente la región del Noreste y Bajo Cauca Antioqueño ha albergado el distrito auro-argentífero más fértil de Colombia, en las que se conoce la existencia de operaciones mineras desde la época colonial (Ordoñez et al., 2005). Allí se han realizado explotaciones cerca de lugares tradicionalmente de ocurrencia aurífera que en parte reflejan la poca actividad de exploración moderna (Ordoñez et al., 2005).

El batolito de Segovia lo cartografió (Feininger et al., 1972), el cual lo definió como una roca ígnea al este de la falla Otú - Pericos. Este cuerpo principalmente predomina en dioritas, pero presentan variaciones composicionales entre diorita cuarzosa y rocas más básicas (Gonzales, 1992).

El Distrito Minero Segovia-Remedios está ubicado en el flanco oriental de la Cordillera Central colombiana y contiene los yacimientos de Au-Ag más fértiles del país (Ordoñez y Zuluaga, 2005; Rodríguez, 2007 y Sánchez et al., 2007), donde el principal operador del distrito, multinacional Gran Colombia Gold, reporta reservas minerales de 19 Mt con una ley promedio de 11,02 g/t de Au en el Proyecto Segovia, contenidas en vetas de oro-cuarzo alojadas en el batolito jurásico de Segovia (SRK Consulting, 2018).

Las mineralizaciones vetiformes – auríferas del nordeste antioqueño se encuentran estructuralmente controladas por una zona de cizalla hacia el sector oriental del sistema de fallas de Otú pericos, encajadas en el denominado batolito de Segovia. (Ordoñez et al., 2005). Los sistemas vetiformes del distrito minero Segovia remedios han sido caracterizados y organizados por tres sistemas predominantes que son El silencio, vertical y cogote.



Para el desarrollo de este trabajo se utilizó petrografía y metalografía pretendiendo aportar información a partir de la composición de la roca y los tipos de alteración hidrotermal en sistemas epitermales de baja sulfuración en el municipio de Segovia, Antioquia.

### **3. Generalidades**

#### **3.1 Pregunta Problema**

Cuál es el tipo de depósito mineral vetiforme presente en la mina la Reliquia (Antioquia – Colombia), basados en sus características petrográficas y de alteración hidrotermal asociadas.

#### **3.2 Hipótesis**

Los sistemas vetiformes presentes en la mina la Reliquia en Antioquia – Colombia, se asocian a un depósito hidrotermal de tipo con características del tipo epitermal (baja sulfuración), basados en las características mineralógicas primarias, y de paragenesis de alteración hidrotermal así como metalográfica.

#### **3.3 Objetivos**

##### **3.3.1 Objetivo general**

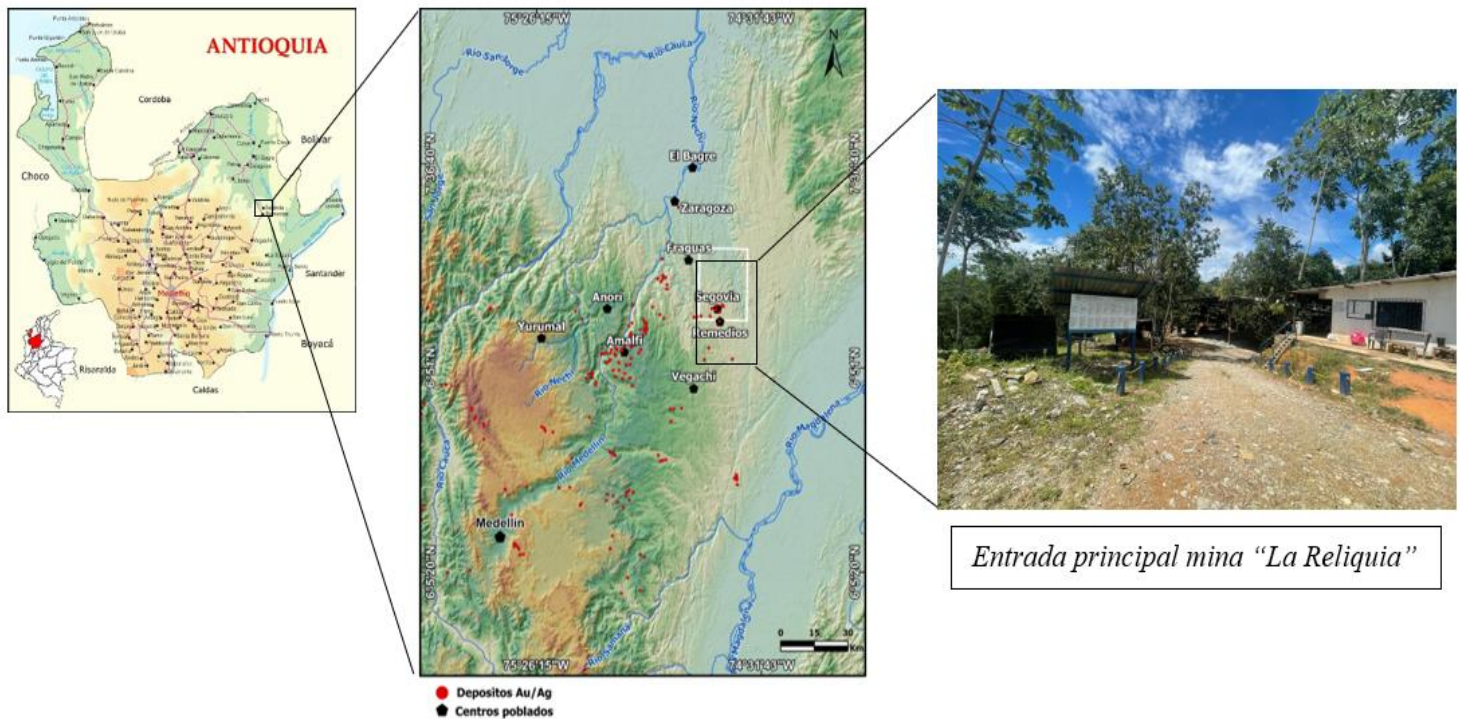
A partir de las relaciones de campo y caracterización petrográfica y de alteración hidrotermal, determinar el posible tipo de depósito mineral presente en la mina La Reliquia.

##### **3.3.2 Objetivos específicos**

- Revisar los antecedentes bibliográficos en relación con la evolución geológica y metalogénicas asociadas a los sistemas magmático-hidrotermales a caracterizar.
- Caracterizar la mineralogía primaria y de alteración hidrotermal a nivel macroscópico las muestras objeto de estudio.
- Caracterizar la mineralogía primaria y de alteración hidrotermal, a escala microscópica en secciones delgadas.
- A partir de las características petrográficas y de alteración hidrotermal proponer una posible clasificación a nivel de tipo de depósito.

#### 4. Localización

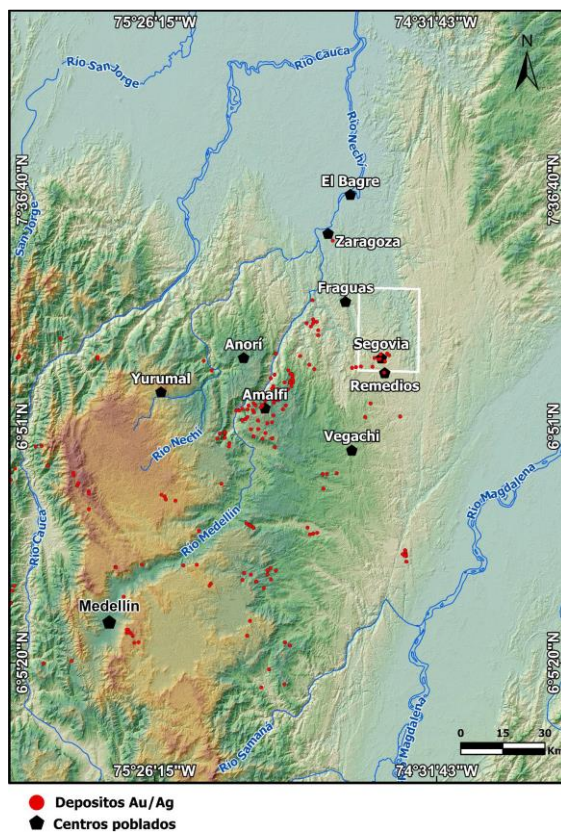
La zona de estudio está localizada en el municipio de Segovia dentro del DMSR el cual se encuentra ubicado en el nordeste de Antioquia en el Flanco Oriental de la cordillera Central, aproximadamente a unos 200 Km de la capital de Antioquia (Medellín) (Rodríguez y Pernet, 1983), el cual limita al norte con los municipios de Zaragoza y el Bagre, al Oriente con el Departamento de Bolívar, al Occidente con los municipios de Amalfi y Anorí y al Sur con el municipio de Remedios. La mina “La Reliquia” se ubica en la vereda El manzanillo del mismo municipio con coordenadas  $7^{\circ}05'04.57''$  N –  $74^{\circ}42'43.59''$  W (GPs), la cual cuenta con 190m de profundidad contenida en 4 niveles de operación siendo el nivel 1 el más cercano a la superficie (Datos proporcionados por la organización), la litología de la zona esta especificada en la plancha 117 – Amalfi del SGC (Servicio geológico colombiano).



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio.

## 5. Contexto geológico

Algunos estudios y autores tiempo atrás han investigado sobre el distrito de Segovia-Remedios mediante el análisis de diferentes características geológicas, (Russell, 1959) consideró que las fracturas de dique como un evento inicial por compresión en profundidad y luego una reapertura de éstas con la consecuente mineralización. Hall (1970) por su parte define que la roca caja de las mineralizaciones de Segovia y Remedios, es una cuarzodiorita de grano medio, que se encuentra cortada por diques de pórfido de composición intermedia. La mineralización está constituida por un relleno de fracturas que siguen un sistema primario de fracturación producido por presión a profundidad. Después Feininger (1972), clasifican la roca caja como una diorita que pasa gradacionalmente a anfibolita de origen magmático, de acuerdo a su textura, composición, y por estar cortando las rocas adyacentes con una edad aproximada de 160 M.a correspondiente al Jurásico. Por último, Sierra (1992) describe un cuerpo intrusivo entre las cabeceras de Remedios y Segovia de edad Jura-Triásico, que presenta una riqueza auro-argentífera reconocida y explotada en forma industrial, cuyo principal control en la depositación de minerales en los filones es de tipo estructural.



**Figura 2.** Tomado de (Santander, 2022) Distrito minero Segovia – Remedios (DMSR).

A medida que se tienen nuevas investigaciones acerca de la evolución al norte de la cordillera central, se puede inferir que los modelos metalogénicos anteriores del Distrito minero Segovia – Remedios (DMSR) (figura 2). se utilizan para recopilar información y, de este modo, hacer énfasis en estudios sobre geocronología, geoquímica y petrografías, con el fin de hacer una reconstrucción de su historia de enfriamiento. *Echeverri (2006)* construyó una historia térmica del Batolito de Segovia utilizando datos de fisión, donde concluyó que éste se enfrió a ritmos bajos y constantes en un entorno tectónico inactivo, por medio de la pérdida de calor post-magmático a lo largo de su evolución jurásica hasta la actualidad. Sin embargo, los estudios actuales reconocen varias fases de elevación en la Cordillera Central que reflejan la Orogenia Andina del Norte desde el Cretácico Superior basada en la procedencia de las rocas asociadas (Horton et al., 2010)

## **5.1 Sistemas Epitermales**

Los sistemas epitermales se definen como una clase de yacimientos hidrotermales que se forman a temperaturas bajas que están hasta los 300°C y a profundidades someras entre 1 y 2km (Figura 3). Los depósitos epitermales se dividen en baja y alta sulfuración (Malagón y Saa, 2021). Se cree que el desarrollo de los sistemas epitermales está asociado principalmente al magmatismo calco-alcalino de los arcos volcánicos en los límites de placas convergentes. Muchos grandes depósitos de este tipo son de edad terciaria y más jóvenes, aunque se conocen algunos otros de edad más antigua. (Luna, 2018). Los depósitos o distritos, que comprenden uno o más cuerpos mineralizados, pueden llegar a cubrir áreas menores a 200 km<sup>2</sup>, con cuerpos que varían en forma, tamaño y ley (Simmons, 2005).

### **5.1.1 Depósitos epitermales de baja sulfuración**

Los depósitos epitermales de baja sulfuración se forman a temperaturas de entre 200°-300°C, donde la presión está controlada por las condiciones hidrostáticas y se asocian a fluidos con pH neutros, fluidos reductores dominados por sulfuros y están distantes de las fuentes de calor magmática (Hedenquist & Lowenstern, 1994).

Se reconocen dos estilos principales de mineralización en los depósitos epitermales de baja sulfuración con base a su asociación mineral (Figura 3). Un estilo es rico en Au, con Ag/Au con relaciones de 1/10 a 10/1 y solo trazas de metales base, mientras que el otro estilo es rico en Ag, con Ag/Au de 100/1, con presencia de cantidades económicas de Zn y Pb (Luna, 2018).

### **5.1.2 Depósitos epitermales de intermedia sulfuración**

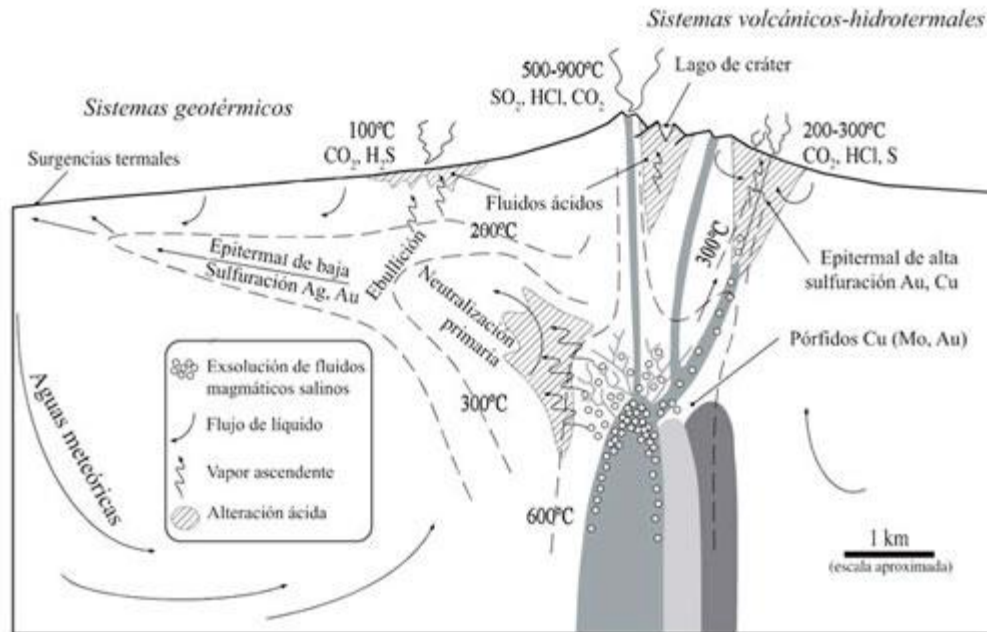
Los depósitos epitermales de sulfuración intermedia ocurren en un amplio espectro de arcos andesíticos a dacíticos, pero comúnmente no reflejan una estrecha conexión con los depósitos de pórfido de cobre, como lo hacen muchos de los depósitos de alta sulfuración. Algunos depósitos de intermedia sulfuración, particularmente los más pequeños, se presentan asociados a “lithocaps” y están asociadas a la alteración argílica avanzada (Sillitoe, 1999) y se forman a partir de fluidos con salinidades similares a aquellos que son responsables de la formación de los tipos de alta sulfuración, aunque su estructura es más parecida a los epitermales de baja sulfuración. (Luna, 2018).

Los sistemas de sulfuración intermedia se caracterizan por la presencia de vetas de cuarzo cristalino, usualmente se relacionado con carbonatos de Manganeso (rodocrosita), al igual que galena con bajo contenido de FeS, tetraedrita-tentanita, y calcopirita principalmente (Sillitoe & Hedenquist, 2003; Simmons, 2005).

### **5.1.3 Depósitos epitermales de alta sulfuración**

Los depósitos epitermales de alta sulfuración se caracterizan por estar a profundidades someras y porque los fluidos tienen un pH <2, y alteraciones argílicas de ensambles que reflejan condiciones acidas generalmente asociadas a edificios volcánicos (Malagón y Saa, 2021). La alteración en los depósitos de alta sulfuración se caracteriza por ser zonada, partiendo de un núcleo de cuarzo residual poroso, comúnmente llamado sílice “vuggy” (Luna, 2018), seguida de alteración argílica avanzada constituida de cuarzo-alunita, para terminar en una alteración propilítica (Sillitoe, 1993).



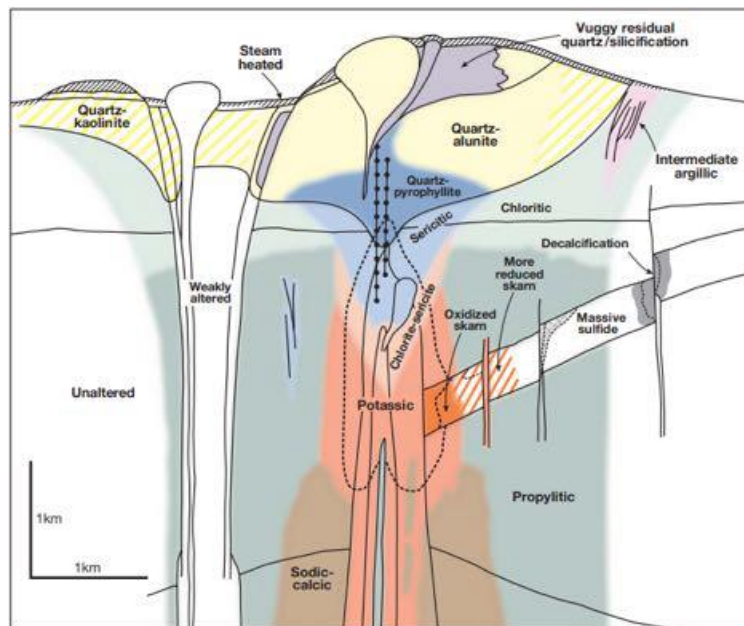


**Figura 3.** Formación de los depósitos epitermales.

## 5.2 Tipos de alteración hidrotermales

Las alteraciones hidrotermales son el resultado de la interacción de fluidos de origen magmático (Figura 4) y de aguas de origen formación meteóricas presentándose en la roca caja (Gómez y Molano, 2009), estos procesos de alteración hidrotermal también están relacionados con los cambios de la mineralogía, cambios físicos y químicos, composición y textura (Malagón y Saa, 2021). Además de su morfología, distribución y mineralización son variables de los controles estructurales, litología, evolución magmática, permeabilidad, disponibilidad y distribución de los fluidos (Camus, 2003). El proceso de alteración hidrotermal se da mediante el intercambio de componentes químicos (metasomatismo), dados por la naturaleza de la roca encajante, la composición de los fluidos, y la concentración de los componentes del fluido (Malagón y Saa, 2021).

Las alteraciones hidrotermales se pueden clasificar de acuerdo con las asociaciones de minerales de alteración presentes en las rocas (García, 2021), dado que una asociación de minerales de alteración refleja las condiciones de temperatura, presión, composición química del fluido hidrotermal, mineralogía de la roca original y el tiempo requerido para lograr un equilibrio termodinámico entre la roca y el fluido (Corbett y Leach, 1998).



**Figura 4.** Esquema generalizado de alteraciones hidrotermales (Sillitoe, 2010).

Terminología genérica	Conjunto de minerales de alteración
Argílica	Caolinita (halloisita o dickita) + montmorillonita ± sericita ± (o moscovita) ± clorita.
Argílica avanzada	Pirofilita + caolinita (o dickita) ± cuarzo ± sericita ± andalucita ± diáspora ± alunita ± topacio ± zunita ± enargita ± turmalina ± pirita ± calcopirita ± hematita.
Argílica intermedia	Clorita + sericita ± caolinita ± montmorillonita ± illita-esmectita ± calcita ± epidota ± biotita ± pirita.
Filitica (o sericitica)	Sericita + cuarzo + pirita ± biotita ± clorita ± rutilo ± leucoxeno ± calcopirita ± illita.
Propilitica	Epidota (zoisita o clinozoisita) + clorita + albita carbonato ± sericita ± montmorillonita ± septaclorita apatito ± anhídrita ± ankerita ± hematita ± pirita calcopirita.
Potásica	K-feldespato (ortoclasa) + biotita + cuarzo, magnetita, sericita (o moscovita) albita, clorita, anhídrita, apatito, epidota, rutilo, calcopirita, pirita de bornita.

**Tabla 1.** Tomada (García, 2021) Terminología de alteración aplicada a sistemas minerales.

### 5.2.1 Alteración argílica

La alteración argílica se caracteriza por presencia de minerales arcillosos como el caolín con cierto porcentaje de cuarzo, esto se da debido mesomatismo  $H^+$  dado a temperaturas muy altas que varían entre 100 °C y 300°C (Figura 4). Los ambientes epitermales se caracteriza por una extrema



lixiviación ácida, y por lo tanto la alteración argílica proporciona una guía muy útil para la mineralización (CFE, 2016). Los minerales arcillosos reemplazan principalmente a las plagioclasas y los silicatos máficos (hornblenda, biotita).

### **5.2.2 Alteración argílica intermedia**

Presenta importantes cantidades minerales arcillosos como de caolinita, montmorillonita, smectita o arcillas amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; se puede encontrar sericita acompañando a las arcillas; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o también argilizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas (Meyer y Hemley, 1967). Debido a la circulación de fluidos ácidos ( $\text{pH} < 2$ ), a temperaturas que oscilan entre  $100\text{--}360^\circ\text{C}$ , se produce disolución de las rocas caja y la posterior precipitación de sulfuros ricos en metales base y preciosos (Malagón y Saa, 2021).

### **5.2.3 Alteración argílica avanzada**

En este tipo de alteración, gran parte de los minerales de las rocas son transformados a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. Esta alteración representa un taque hidrolítico extremo de las rocas en el que incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato de Al (alunita) y óxidos de Al. En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual “vuggy silica” (Meyer y Hemley, 1967). Los grandes volúmenes de rocas alteradas a asociaciones minerales de argílica avanzada se denominan lithocaps, y estos indican las partes superiores de sistemas magmático-hidrotermales (Malagón y Saa, 2021).

### **5.2.4 Alteración fílica o sericitica**

La alteración sericitica también conocida como fílica representa la asociación de los minerales cuarzo, sericita y pirita. Esta alteración es uno de los tipos más comunes y está presente en casi todos los depósitos hidrotermales desde los sulfuros masivos del Arqueano hasta las vetas de cuarzo – auríferas de depósitos hidrotermales más recientes. (CFE. 2016)

La sericita es una mica blanca de grano fino que está asociada a moscovitas y paragonito. Sus fases minerales principales son, feldespato potásico, caolinita, calcita, biotita, rutilo, anhidrita y apatito. Cuando se tiene temperaturas más bajas de  $200$  a  $250\text{ C}^\circ$  se da la illita y en variaciones pequeñas a

esta, se da la illita-smectita. A temperaturas sobre los 450°C el corindón aparece en asociación con sericita y andalucita (Barnes y Czamanske, 1967).

La sericita no son marcadamente diferentes de las moscovitas, se reportan que tiene alto contenido de SiO<sub>2</sub>, MgO y H<sub>2</sub>O y un bajo contenido de K<sub>2</sub>O. Esta alteración puede presentar una variación hacia la alteración potásica por medio del incremento en las cantidades de feldespato potásico y hacia la argílica por el aumento de minerales arcillosos. (Barton y Skinner, 1979).

### **5.2.5 Alteración potásica**

La alteración potásica es un evento que sucede en temperaturas entre 400C° y 600C°, generalmente se encuentran remplazando las plagioclasas, este tipo de alteración está asociada a los yacimientos minerales tipo pórfido y epitermales (Figura 4), los minerales característicos de esta alteración son Feldespato Potásico/Biotita secundaria en sistemas tipo pórfidos. (CFE, 2016)

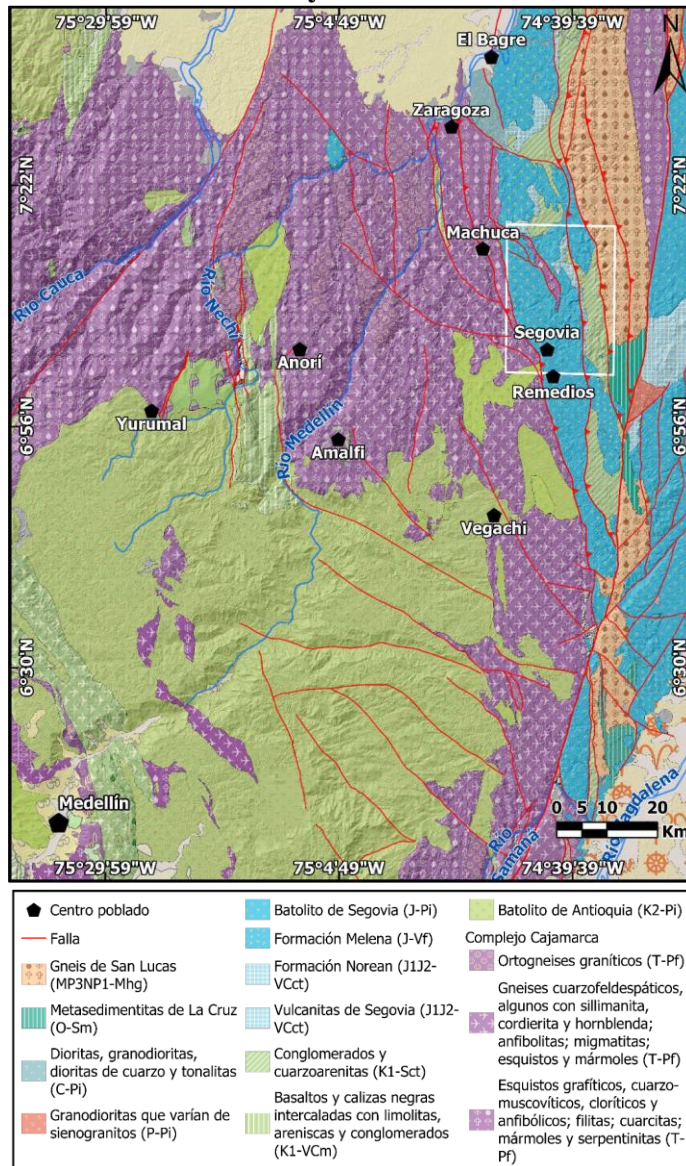
Los fluidos hidrotermales de esta alteración son normalmente de pH neutro a alcalino (Malvicini y Sauliner, 1979). Las asociaciones comunes son feldespato K- biotita – cuarzo, feldespato K-Clorita, feldespato K-biotita-magnetita, acompañada por cantidades variables de otros minerales como lo son, albita, sericita, anhidrita y apatito (CFE, 2016)

### **5.2.6 Alteración propilítica**

La alteración propilítica se usaba para describir la alteración de las rocas volcánicas y se caracterizaban por la adición de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> (CFE, 2016) en esta alteración domina la asociación clorita – epidota, los minerales presentes son, albita, calcita, pirita, cuarzo, magnetita y illita. La alteración propilítica se presenta como halo gradacional y distal cercana a una alteración potásica (Figura 4), con minerales graduados desde actinolita y biotita en la zona de contacto a actinolita, y epidota en la zona propilítica (Barton y Skinner, 1979).

La estabilidad de los campos de presión y temperatura puede ser bien definida por el grupo de minerales de las zeolitas que son importantes indicadores de la temperatura y profundidad. Esta característica es particularmente útil en depósitos epitermales (CFE, 2016)

## 6. Contexto local y tectónico



*Figura 5. Tomado (Santander, 2022) Mapa de las principales unidades cronoestratigráficas y fallas de la Cordillera Central sector Norte.*

### 6.1 Batolito de Segovia

Se le reconoce con este nombre a la unidad litológica a un cuerpo ígneo localizado en el departamento de Antioquia especialmente al este de la falla Otú – Pericos, teniendo en cuenta su localización geográfica, extensión, características composicionales y estructurales (Álvarez, 1983). El Batolito de Segovia es magmático intrusivo (Feininger et al., 1972) y hace parte de un conjunto de intrusivos jurásicos que aparecen a lo largo de la Cordillera Central en su flanco oriental.

El batolito se encuentra al flanco este de la cordillera central compuesto principalmente por Dioritas, con amplias variaciones texturales y composiciones gradacionales en especial a diorita cuarzosa los minerales esenciales son: Plagioclasas, Cuarzo, Ortoclasa, Hornblenda, biotita y algunos accesorios allanita, magnetita – ilmenita, apatito y pirita (González, 1992).

### 6.1.2 Origen y edad

La edad del batolito es de 160 +/- 7 M.a por K / Ar en Hornblenda, perteneciente al Jurásico (Feininger et al., 1972). Se han encontrado diferentes edades de enfriamiento en el Batolito de Segovia por debajo de los 200°C durante el Cretácico Tardío entre 68.4± 5.5 y 84.1± 5.5 M. Mientras que los eventos mineralizantes que encajan el Batolito de Segovia tienen una edad máxima de 47.7 +2.9 M.a (Echeverry, 2006). En la zona predomina un tipo de roca de grano medio y textura hipidiomórfica granular, que varía gradacionalmente entre cuarzdiorita, cuarzomonzonita diorita (Feininger et al., 1972).

### 6.2 Control Estructural

Se tienen un fuerte control estructural que se asemeja a las características de los depósitos de tipo orogénico (*Ordóñez et al., 2005; Rodríguez, 2007; Sánchez et al., 2007*). Las mineralizaciones vetiformes - auríferas del noreste antioqueño y la parte sur de la Serranía de San Lucas, se localizan preferencialmente hacia la parte oriental del sistema de Fallas Otú-Pericos, encajadas en el denominado Batolito de Segovia (*Ordóñez et al., 2005*).

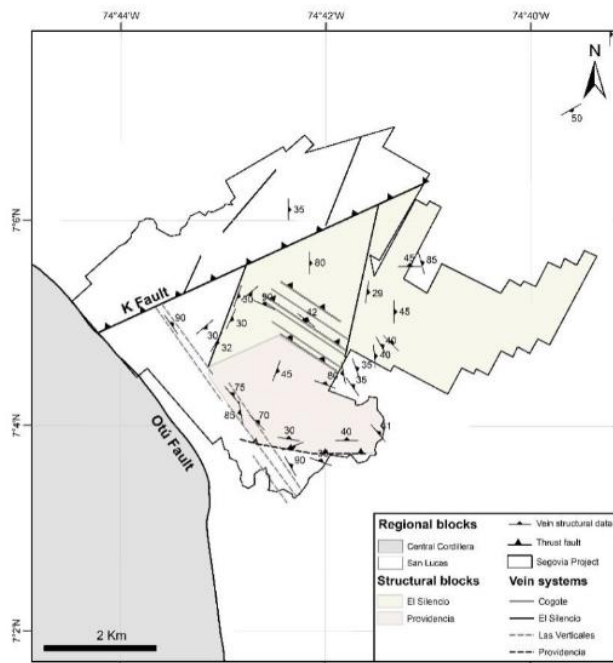
El DMSR se divide en dos sectores oriental y occidental que se encuentran separados por la falla Otú-Pericos (*Ordóñez et al., 2005*); estas subdivisiones están desarrolladas con base en la posible existencia de dos litoferoclastos, con historias geológicas distintas hasta finales del Cretáceo que corresponden a los terrenos Chibcha y Tahamí (*Restrepo y Toussaint, 1988*).

- Sector Oriental

El sector oriental correspondiente al terreno Chibcha, está conformado por gneises cuarzosos, mármoles y anfibolitas, de edad precámbrica (*Ordóñez et al., 1999*), rocas intruidas por el Batolito de Segovia de edad Jurásica (*Feininger et al., 1972*).

- Sector Occidental

El sector occidental correspondiente al terreno Tahamí, está representada por una secuencia de gneises feldespáticos, aluminicos y cuarzosos, mármoles y anfibolitas, de edad desconocida, intruídos por los stocks de Santa Isabel y La Culebra (*Ordóñez et al., 2005*)

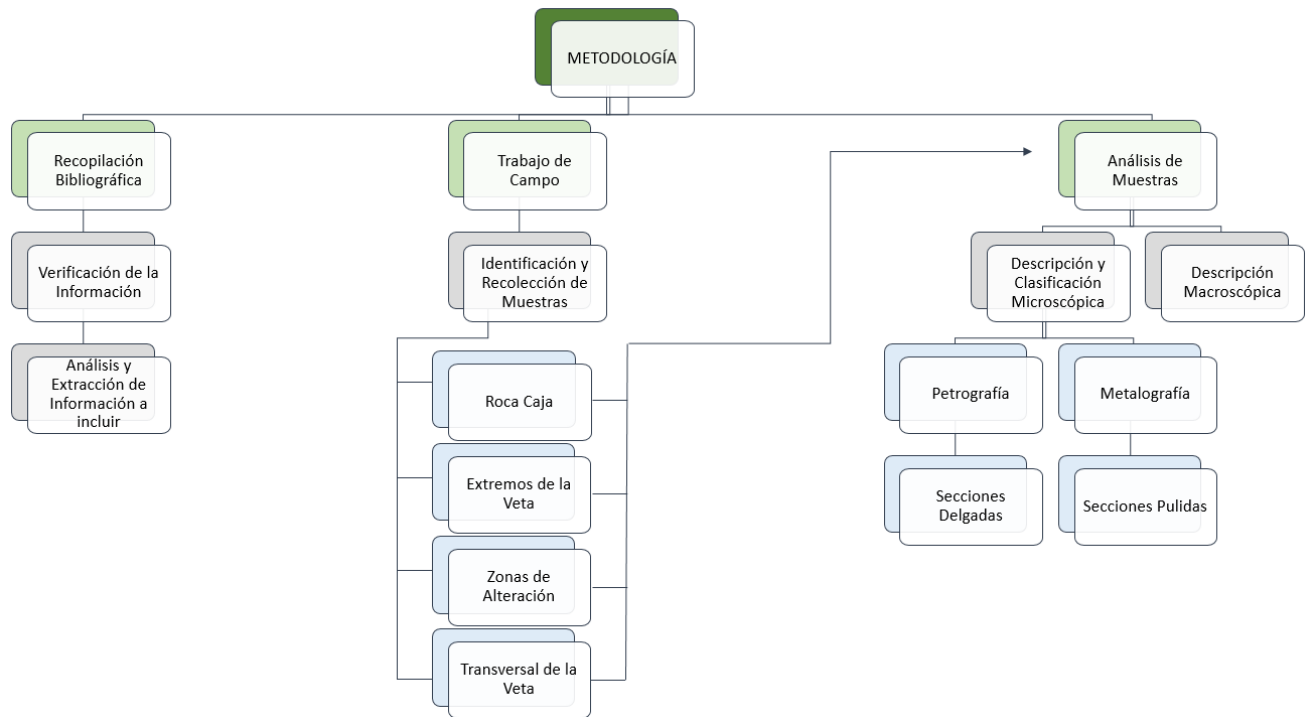


**Figura 6.** Mapa estructural del Proyecto Segovia con propuesta de división en bloques estructurales (Malo, 2020).

El dominio estructural está definido por la zona de falla Otú-Pericos (ZFOP) (Figura 6). Se ha establecido una componente sinestrolateral (Figura 6) dominante para esta estructura (Feininger et al., 1972), conformada por patrones de fracturamiento con tendencia regional N-S a N10W, en la región de influencia del DMSR, e inflexiones locales N30W asociadas a los sectores económicamente más atractivos del distrito. Zonas discretas de deformación dúctil, constituidas por rocas graníticas altamente cizalladas (e. g. batolito de Ibagué), anfibolitas y mármoles, son observadas a lo largo de la ZFOP, con un componente de transporte tectónico similar. (Malo, 2020).

## 7. Metodología

Para la realización de este proyecto de grado se realizó a partir de la caracterización sistemática de fuentes de información primaria y secundaria, trabajo de campo y análisis en laboratorio de muestras colectadas en la zona de estudio.



**Esquema 1. Modelo Conceptual de la metodología**

### 7.1 Trabajo de campo

Para la elaboración de esta metodología inicialmente se preparó el desplazamiento al municipio de Segovia, Antioquia específicamente a la mina la Reliquia. Donde se recolectó toda la información necesaria para la elaboración del trabajo.

Fase 1. (Pre-campo) – Se recopiló información de la zona de estudio acerca de los depósitos cercanos, sistema de vetas, geomorfología y tipo de rocas presente.

Fase 2 (Trabajo de campo). Se realizó el reconocimiento geológico de la zona de estudio, se recogieron 4 muestras en lugares estratégicos como lo fue en la roca caja, extremos de la veta y dentro de ella, zonas de alteración y transversales a la veta.

Fase 3. (Trabajo de laboratorio). A partir de las muestras recolectadas se procesaron en el laboratorio con la finalidad de realizar una sección doblemente pulida para un análisis petrográfico y metalográfico a través de un microscopio.

Fase 4. (Informe final). En esta fase se hizo la interpretación de los datos recogidos, tipo de roca presente, alteraciones hidrotermales y depósito mineral presente.

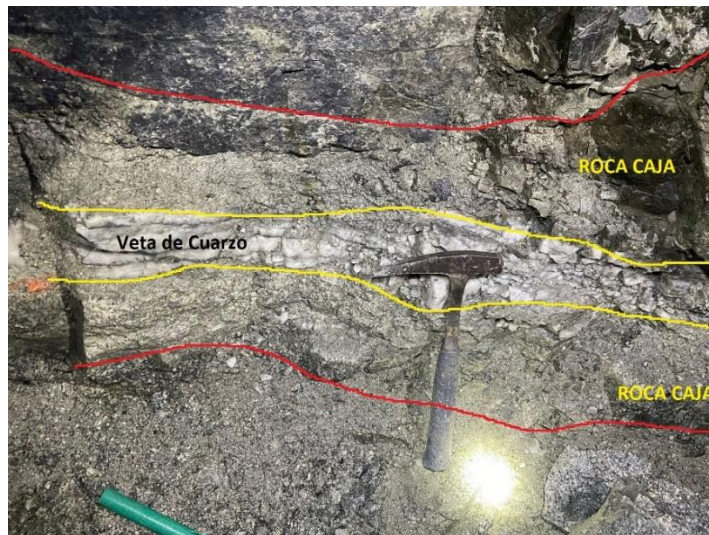


## ROCA CAJA



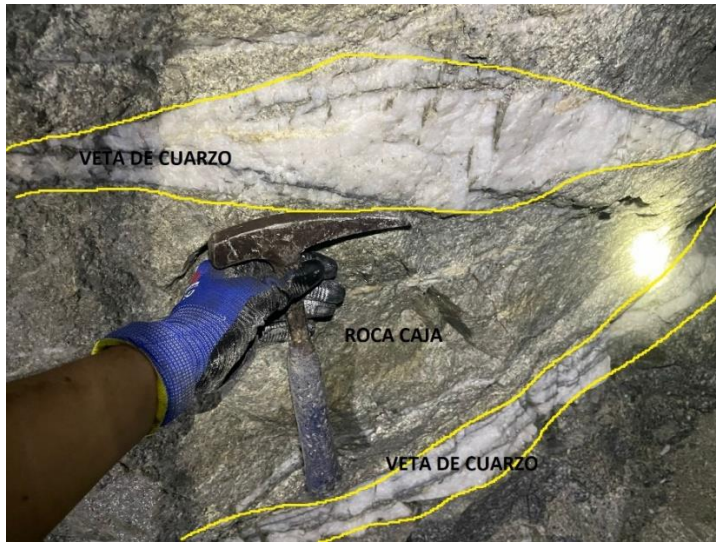
*Fotografía 1. Roca Caja*

## Veta 1



*Fotografía 2. Veta 1.*

## Veta 2



*Fotografía 3. Veta 2.*

## Zona de alteración



*Fotografía 4. Zona alterada*

## 7.2 Análisis de muestras

Este análisis se le realizó a todas las muestras macroscópicas y se analizaron 5 muestras microscópicas.

### 7.2.1 Descripción macroscópica




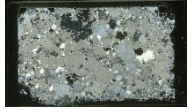
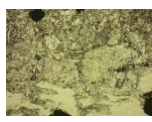
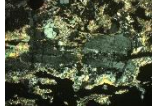



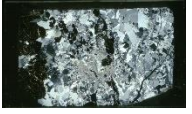
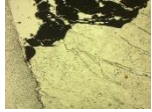
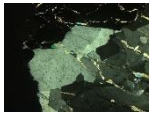


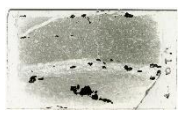

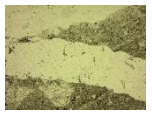
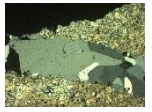



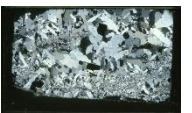

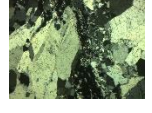

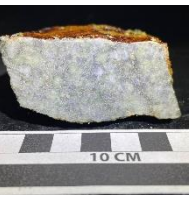

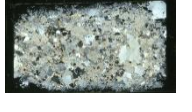
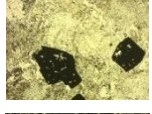
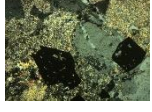
Para el reconocimiento y clasificación de las rocas se hace necesario en primer lugar un análisis macroscópico preliminar de las muestras del terreno que se está investigando, dentro de esto se puede observar propiedades como el aspecto, color, textura, dureza, minerales, tamaño de los



mismos, forma, disposición entre sí, entre otras. Sin embargo, hay minerales y texturas que no son visibles con la ayuda de la lupa (Orozco-Centeno et al., 2014).

### **7.2.2 Descripción microscópica:**

Dentro de esta se encuentra métodos más específicos como petrografía y metalografía donde la petrografía se hace para dar un concepto de asociación mineral y descripción de la sección delgadas, teniendo en cuenta las características que posee la roca y los minerales en ella, A través de un microscópico petrográfico o de polarización. Bajo la luz polarizada plana o nicoles paralelos (PPL) e iluminación ortoscópica, se pueden observar propiedades como el relieve, color, pleocroísmo, hábito y foliación. (Kerr, 1965). Si se trabaja con la luz polarizada cruzada o nicoles cruzados (XPL) e iluminación ortoscópica, se puede observar la birrefringencia, ángulo de extinción, elongación, maclado y alteración de los minerales, mientras que con la iluminación conosópica se observan la figura de interferencia y el signo óptico de los minerales (Kerr, 1965). Para la metodología se priorizan la descripción de minerales opacos y la relación que tienen con otras propiedades mecánicas y el análisis e identificación de los metales. La obtención de superficies pulidas representa una parte importante de la técnica de microscopia de minerales opacos, y, en especial de medidas cuantitativas (Marcos y Moreira, 1984).

Código de la muestra	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
<b>Roca Caja Rca1</b>			 PPL  PPX	 PPL  PPX
<b>Veta 1 – V1</b>			 PPL  PPX	 PPL  PPX
<b>Veta 1 – V1a</b>			 PPL  PPX	 PPL  PPX
<b>Veta 2 – V2</b>			 PPL  PPX	 PPL  PPX
<b>Zona de alteración – Za1</b>			 PPL  PPX	 PPL  PPX

*Tabla 2. Fases de preparación de las muestras recolectadas*

## 8. Resultados

### 8.1 Roca caja

#### 8.1.1 Descripción y análisis macroscópico

Roca ígnea, holocristalina, fanerítica, hipidiomórfica, inequigranular, con un tamaño de cristales de grano medio (1 – 5 mm) de forma subhedrales, es leucocrática y tiene un índice de color bajo que varía entre (>90% claro) y (<10% oscuro). La roca presenta tonalidades de colores que varían entre gris y blanco. La composición de la roca está compuesta de, plagioclasas (15%), cuarzo (10%), sulfuros (5%) y arcillas (mineral secundario) (70%).

Se puede clasificar dentro del grupo de los granitoides y según el diagrama de (Strekeisen, 1974) como una cuarzodiorita (Figura 7).



*Figura 7. Muestra macroscópica de la roca caja.*

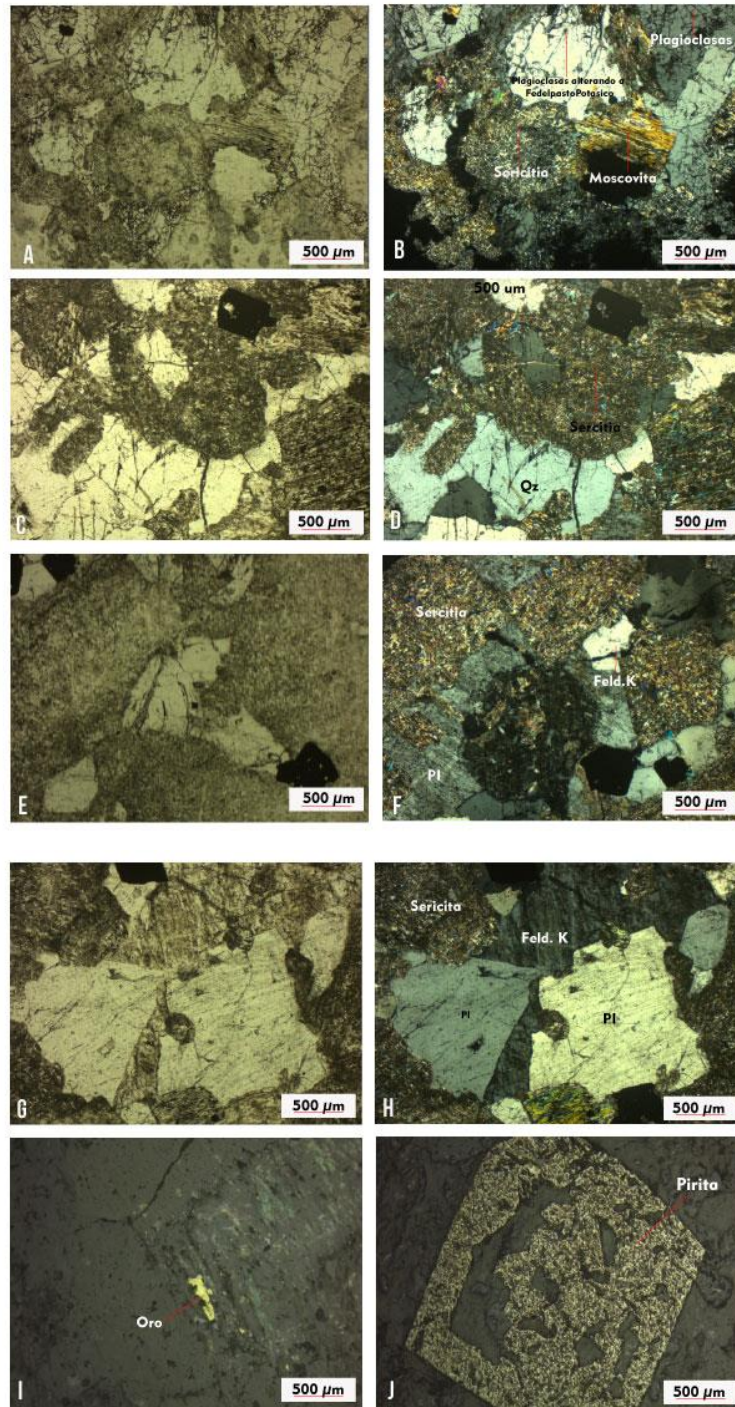
#### 8.1.2 Descripción y análisis microscópico

La roca caja corresponde a un intrusivo ígneo diferenciado con cristales euhedrales de plagioclasa, cuarzos (subhedrales y reabsorbidos) y moscovita (Figura 8. A-B) como minerales primarios, destaca la ausencia de minerales máficos ferromagnesianos. Como minerales de alteración o secundarios se encuentra la sericita (Figura. 8 C-D), feldespato potásico (Figura. 8 E-F), sulfuros (pirita y calcopirita) (Figura. 8 J) y carbonatos.

La muestra evidencia una superposición de alteraciones, dominada principalmente por la alteración potásica y filica. La alteración potásica (Figura. 8 G-H) se encuentra reflejada por la presencia de feldespatos potásicos reemplazando pervasivamente cristales de plagioclasa de forma parcial y total. La alteración filica (Figura. 8 C-D) se evidencia por la presencia de sericita,

acompañada de sílice amorfo y piritita; esta alteración se presenta en forma de fluido y se da de forma pervasiva a la roca circundante y fisural dentro de las fracturas, los cristales de plagioclasa se encuentran totalmente alterados como consecuencia de la paragénesis generada por el paso del fluido hidrotermal. La presencia de oro libre (Figura. 8 I) se relaciona posiblemente con ambas alteraciones y podría interpretarse que la roca inicialmente tuvo mineralización asociada a la alteración potásica o por el contrario el fluido de la alteración fílica pudo haber dado lugar a la reconcentración de la mineralización. Estas alteraciones se describen según las alteraciones hidrotermales descritas por Sillitoe (2010) y Seedorf (2005).



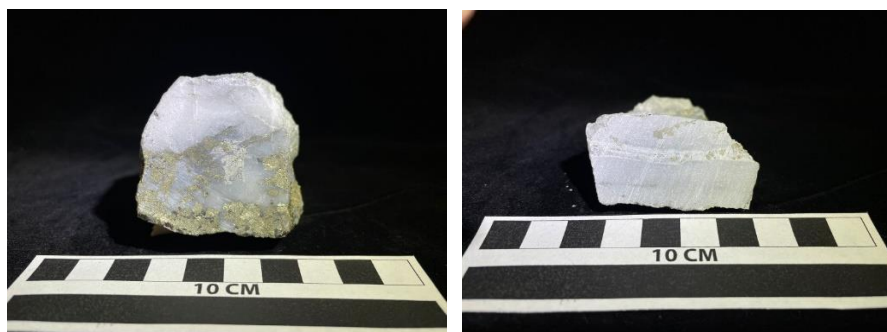


**Figura 8.** A y B - Plagioclasas (Pl) siendo remplazadas por Feldespato Potásico (Kfs). C y D – Cristales de Pirita (Py), cuarzo (Qz) y sericita (Ser) (alteración sericitica). E y F – Plagioclasas (Pl) con alteración sericitica. G y H - Zona de exsolución de feldespato potásico (Kfs) en plagioclasas (Pl). I – Oro (Au) libre. J – Pirita (Py) con textura oquerosa.

## 8.2 Veta 1

### 8.2.1 Descripción y análisis macroscópico

Veta holocristalina, fanerítica, inequigranular, con un tamaño de cristales de grano medio (1 – 5 mm) de forma subhedrales, con un índice de color medio que varía entre (10 – 90%) entre claros y oscuros. La roca presenta tonalidades de colores entre gris y blanco, en algunas partes presenta un amarillo latón. La mineralogía de la roca está compuesta de, cuarzo (60%), plagioclasas (10%) y sulfuros y venas de carbonatos (Figura 9).



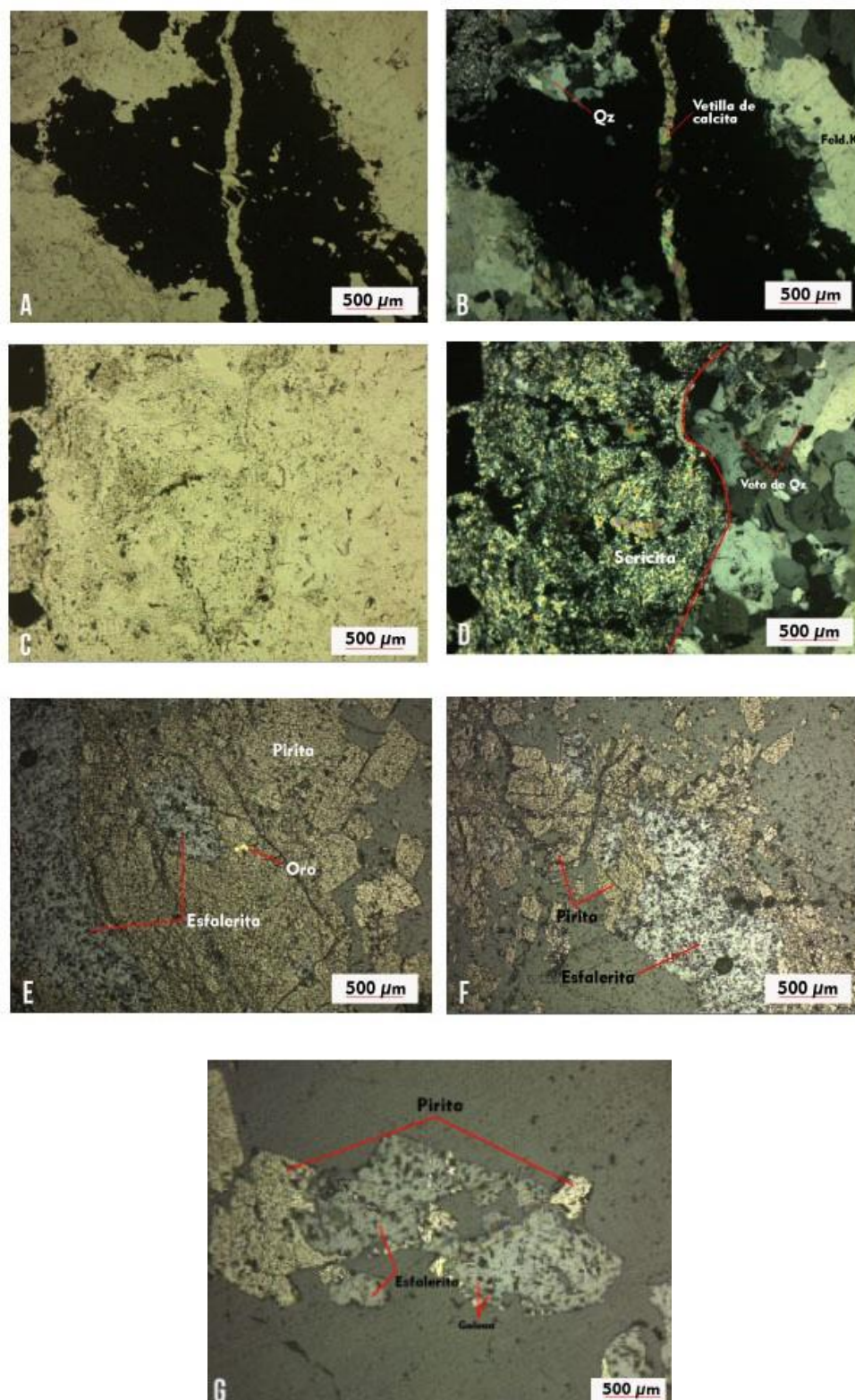
*Figura 9. Muestras macroscópicas de la Veta 1.*

### 8.2.2 Descripción y análisis microscópico

Vetilla está conformada esencialmente por cristales de cuarzo euhedrales, de igual forma, se evidencia un stockwork posterior según la relación de corte conformado por vetillas de cuarzo hialino (Figura. 10 C-D) y carbonatos (Figura. 10 A-B). Matalográficamente se identificó la presencia de pirita gruesa, calcopirita, galena con maclas triangulares, esfalerita (Figura. 10 G) y oro diseminado en pirita y esfalerita (Figura 10 E).

Según la composición mineral encontrada se puede inferir que la veta está asociada a un sistema epitermal de baja sulfuración, evidenciado en la presencia de esfalerita Intercrecida con pirita (Figura 10 E) y el stockwork de cuarzo hialino (Figura. 10 I), posteriormente, debido a la interacción del sistema epitermal con aguas meteóricas genera vetillas de carbonatos (Figura. 10 B). (Hedenquist y Lowenstern, 1994)





**Figura 10.** A y B - Vetilla de carbonatos cortando un mineral opaco (Opq) y vetillas de cuarzo (Qz). C y D - Veta de Cuarzo (Qz) cortando la roca caja y vetillas con cuarzo (Qz) y pirita (Py). E – Pirita (Py) gruesa con inclusiones de oro (Au) y esfalerita (Sp). F - Esfalerita (Sp) intercrecida con pirita (Py) gruesa. G – Pirita (Py) oquerosa con esfalerita (Sp) y galena (Gn).

## 8.3 Veta 2

### 8.3.1 Descripción y análisis macroscópico

Veta holocristalina, fanerítica, inequigranular, con un tamaño de cristales de grano medio (1 – 5 mm) de forma subhedrales, esta es leucocrática con índice de color que varía entre >90% claro y <10% oscuro. La roca presenta tonalidades de colores entre gris y blanco. La composición mineralógica corresponde a cuarzo, plagioclasa y sulfuros (Figura 11).



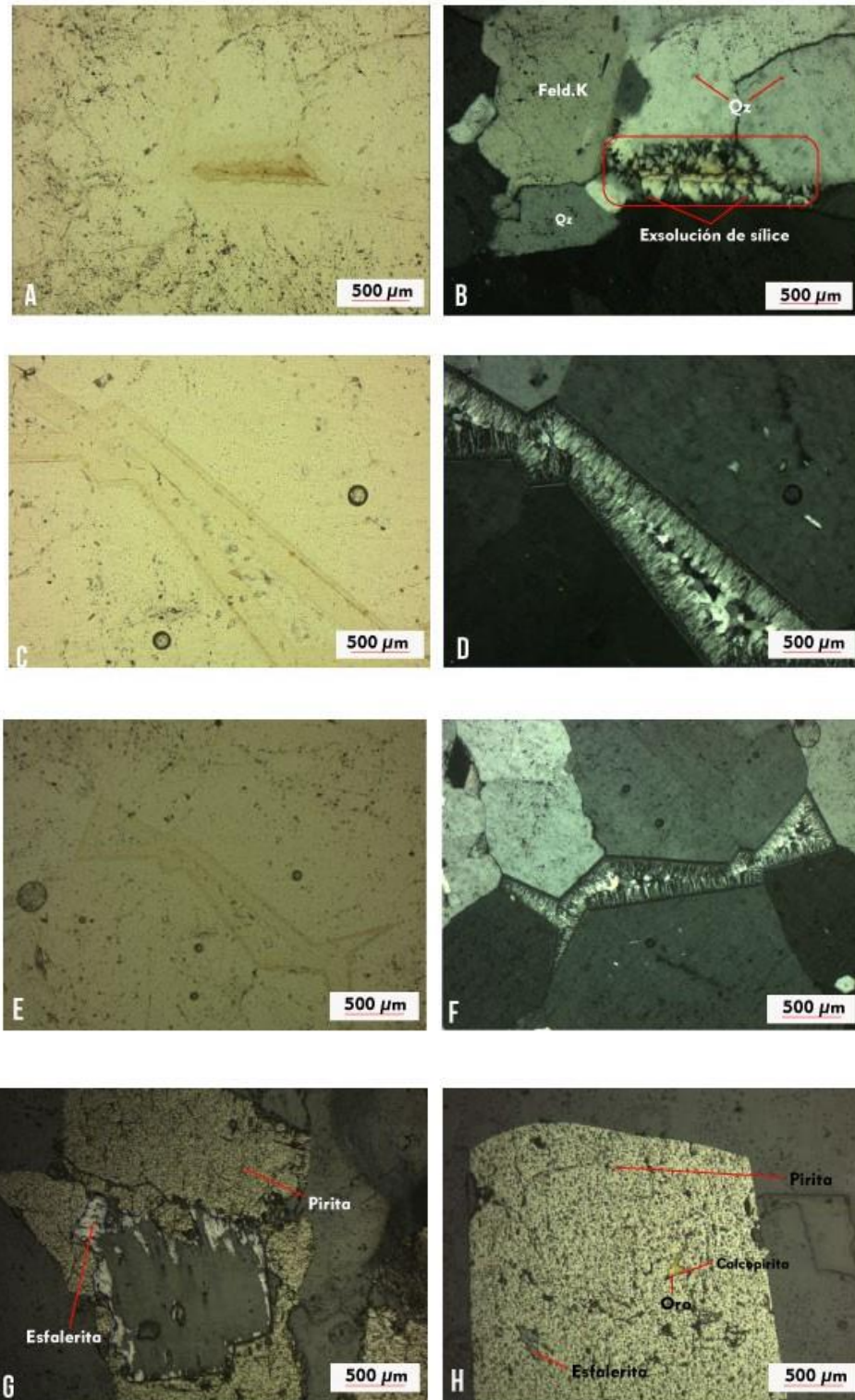
*Figura 11. Muestra macroscópica de Veta 2.*

### 8.3.2 Descripción y análisis microscópico

La veta está conformada principalmente por cuarzos euhedrales y sílice amorfo, se evidencian texturas de exsolución y reabsorción, se aprecian fracturas que fueron rellenadas por sílice, el cual se cristalizó desde la parte más exterior hacia el interior generando “Comb texture” o “en-peine” (Figura. 12 C-D-E-F). Matalográficamente se identificó esfalerita embebida en pirita (Figura. 12 G), al igual que pirita con inclusiones de esfalerita, calcopirita y oro (Figura. 12 H).

La presencia de las drusas de sílice rellenando fracturas (Figura. 12 D), esfalerita embebida en pirita (Figura. 12 H) y carbonatos, son indicadores de sistemas epitermales, siendo este asociado con un sistema de baja sulfuración, el cual ha tenido interacción con fluidos meteóricos (Hedenquist, 1997)



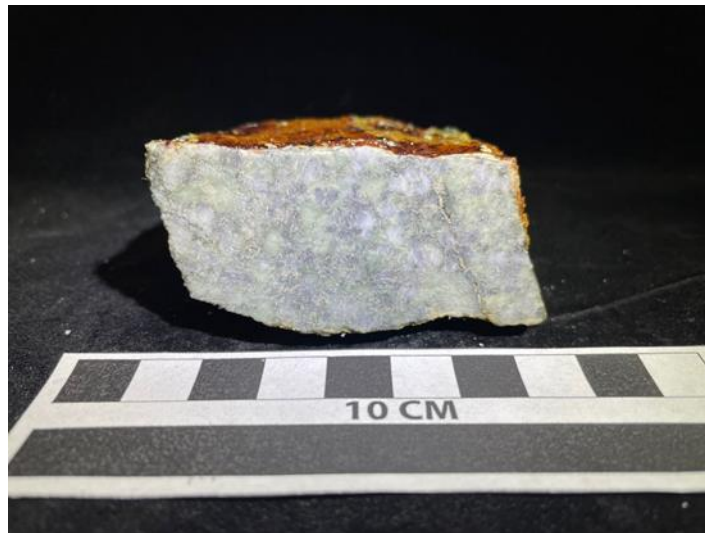


**Figura 12.** A y B – Cuarzo (Qz) de veta cristalizado con exsolucion. C, D, E y F – Intercrecimiento de cuarzo (Qz) en fracturas en habito de drusa G – Esfalerita (Sp) dentro de la pirita (Py). H – Pirita (Py) con inclusiones de esfalerita (Sp), calcopirita (Ccp) y oro (Au).

## 8.4 Zona de alteración

### 8.4.1 Descripción y análisis macroscópico

Roca ígnea, holocristalina, fanerítica, hipidiomórfica, inequiangular, con un tamaño de cristales de grano medio (1 – 5 mm) de forma subhedrales, es una roca mesocrática entre el 35% y 65% de máficos, con un índice de color medio que varía entre (10 – 90%) en oscuros y claros. La roca presenta tonalidades de colores entre blanco y gris, y en algunas partes presenta minerales verdes oscuros. La composición mineralógica es plagioclasa (35%), cuarzo (20%), sulfuros (20%) y clorita (producto de alteración) (25%). De acuerdo al diagrama de (Strekeisen, 1974) correspondería a una Cuarzodiorita.

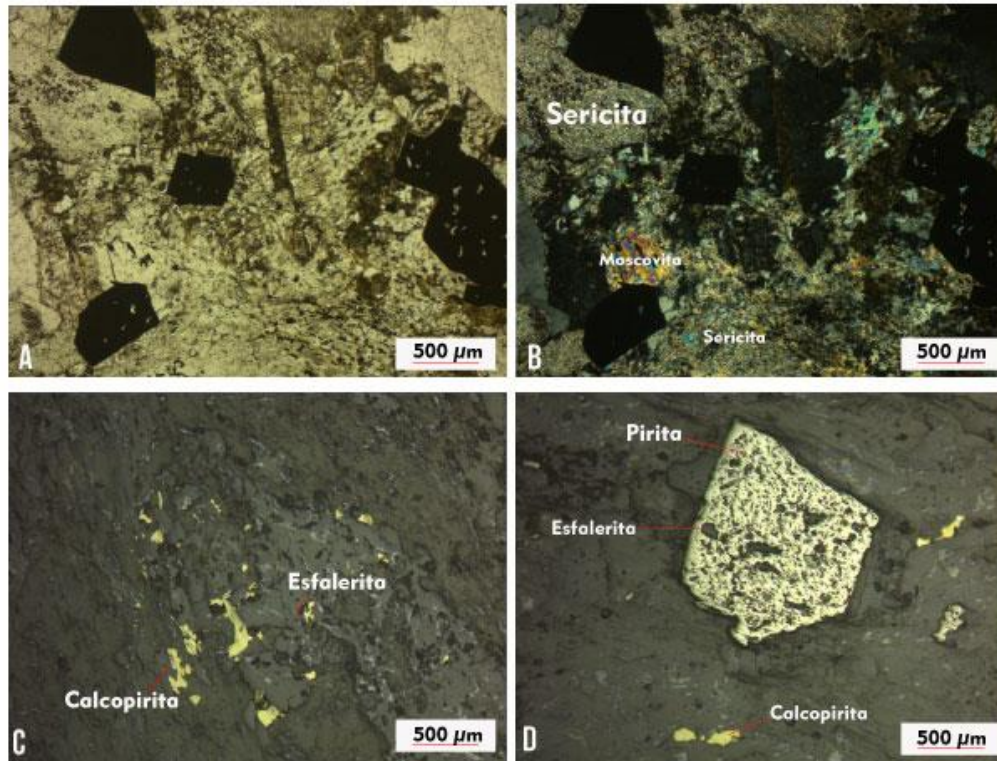


*Figura 12. Muestra macroscópica de zona de alteración.*

### 8.4.2 Descripción y análisis microscópico

Roca ígnea con plagioclasas (alteradas a sericita), moscovita, cuarzo, se evidencia gran contenido óxidos, carbonatos y clorita (Figura. 13 A-B). Metalográficamente se evidencio pirita, calcopirita y galena con textura de exsolución con la esfalerita (Figura. 13 D).

La presencia de clorita al igual que la sericita permite inferir que existe una superposición de alteraciones, siendo estas evidenciadas en la presencia de biotita secundaria (alteración potásica), clorita alterando estas biotitas y plagioclasa alterada completamente a sericita, pirita y calcopirita (alteración clorítica-sericitica) (Figura. 13 C-D). De igual forma, la existencia de carbonatos y esfalerita muestran interacción con sistemas epitermales y agua meteórica. Estas alteraciones se definen según las alteraciones hidrotermales descritas por Sillitoe (2010) y Seedorf (2005).



**Figura 13.** A y B - Presencia de minerales de oxido y clorita de alteración. C – Presencia de esfalerita (Sp) y calcopirita (Ccp), notese la mayor proporción de esfalerita (Sp) que calcopirita (Ccp). D – Ocurrencia de Pirita (Py), esfalerita (Sp) y Calcopirita (Ccp).

## 9. Conclusiones

- Por medio de la petrografía y metalografía se definieron y describieron alteraciones predominantes en la mineralización dando así un indicio al tipo de depósito epitermal presente
- De acuerdo a la clasificación e interpretación de las muestras macroscópicas se determinó la mineralogía primaria y de alteración hidrotermal donde se encontraron características epitermales asociados a los depósitos de baja sulfuración.
- La mina la Reliquia se encuentra en un depósito epitermal de baja sulfuración asociado a sistemas magmático hidrotermales.



## 10. Referencias

- Álvarez, A. J. (1983). Geología de la Cordillera Central y el Occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Mesocenozóicos. *Boletín Geológico*, 26(2), 1-175.
- Barnes, H.L. y Czamanske, G.K. (1967). Solubilities and Transport of Ore Minerals. En: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Primera Edición, Hubert L. Barnes (ed.), Holt, Rinehart, and Winston Inc. Publication, 334-381.
- Barton, P.B. y Skinner, B.J. (1979). Sulfide Mineral Stabilities. En: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Segunda Edición, Hubert L. Barnes (ed.), Wiley Interscience Publication, 278-403.
- Blanco-Quintero, I. F., García-Casco, A., Toro, L. M., Moreno, M., Ruiz, E. C., Vinasco, C. J., ... & Morata, D. (2014). Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*, 56(15), 1852-1872.
- Bustamante, C., Archanjo, C.J., Cardona, A., Bustamante, A., Valencia, V., 2017. U–Pb ages and Hf isotopes in zircons from parautochthonous Mesozoic terranes in the western margin of Pangea: implications for the terrane configurations in the Northern Andes. *J. Geol.* 125, 487-500. <https://doi.org/10.1086/693014>.
- Camus, F. (2003). Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería*.
- CFE (Federal Commission of Electricity), 2016. Descripción de las alteraciones hidrotermales CFE 10100, 50.
- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Winkler, W., Ulianov, A., Mora, A. & Chiaradia, M. 2014a. Distinguishing between in-situ and accretionary growth of continents along active margins. *Lithos*, 202–203: 382–394. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.03>
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). *Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization* (Vol. 6, p. 240). Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists.
- Echeverri, B. (2006). Genesis and thermal history of gold mineralization in the Segovia-Remedios Mining District of Northern Colombia. Master thesis, Shimane University, Japan.
- FEININGER, T. BARRERO, D. CASTRO, N. Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub-zona II-B). *Boletín geológico*, Volumen XX, No. 2, 1972
- García Lara, A. V. Caracterización mineralógica de las alteraciones hidrotermales en el área geotérmica de Paipa Boyacá, Colombia.
- GONZÁLEZ, H. (1992). Mapa geológico de la Plancha 106 Liberia.
- Hedenquist, J.W., Lowenstern, J.B., 1994, The Role of Magmas in the Formation of Hydrothermal Ore Deposits, *Nature*, v. 370, p. 519-527.
- Horton, B. K., Saylor, J. E., Nie, J., Mora, A., Parra, M., Reyes-Harker, A., & Stockli, D. F. (2010).

- Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia. *Bulletin*, 122(9-10), 1423-1442.
- Kammer, A., & Sánchez, J. (2006). Early Jurassic rift structures associated with the Soapaga and Boyacá faults of the Eastern Cordillera, Colombia: Sedimentological inferences and regional implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 412-422.
- Kerr, P. F. (1965). *Optical Mineralogy*.
- LUNA, P., & DEL CARMEN, C. R. I. S. T. A. L. (2018). *El yacimiento La Colorada, Sonora México: evidencias de un sistema epitermal oligoceno-mioceno superpuesto a un sistema pórfido de Cu-Mo laramídico* (Master's thesis, PALAFOX LUNA, CRISTAL DEL CARMEN).
- Malagón Quiroga, D. E., & Saa Calderón, A. F. (2021). *Características petrográficas y de alteración hidrotermal en litotipos asociados a sistemas magmático-hidrotermales tipo pórfido en los Andes y el Cratón amazónico: estudio del caso Chuscal (Colombia), Pegasus (Ecuador), Antamina (Perú), Las Tórtolas (Chile) y Provincia Mineral de Tapajós (Brasil)* (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).
- Malo González, C. A. (2020). *A review on the Segovia Batholith and its thermal history, implications for metallogenesis in the Segovia-Remedios Mining District* (Bachelor's thesis, Universidad Eafit).
- Malvicini, L. y M. E. Saulnier (1979). Textura de depósitos minerales. *Asoc. Arg. de min. Petr. y sedim., Serie Didáct. N°3*.
- Marcos, C., & Moreiras, D. (1984). Obtención de secciones pulidas en muestras granuladas utilizadas en la toma de medidas de reflectancia. *Trabajos de Geología*, (14), 217-220.
- Meyer, C., Hemley, J., 1967, Wall Rock Alteration, en Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, Holt, Rinehart and Winston, Inc., p. 166-235.
- Molano Mendoza, J. C., & Gómez Gutiérrez, D. F. (2009). Evaluación de zonas de alteración hidrotermal y fases intrusivas, para el prospecto “stock porfirítico de piedra sentada” (vereda santa lucía) cauca, Colombia. *Geología Colombiana*.
- Ordóñez-Carmona, O., Valencia, M., Álvarez, M., Sánchez, L., Castaño, L., Echeverri, B. (2005). Metalogenia y evolución tectonomagmatica del distrito minero Segovia-Remedios. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.13140/2.1.4782.8486>
- Ordóñez-Carmona, O., Valencia, M., Álvarez, M., Sánchez, L., Castaño, L., Echeverri, B. (2005). Metalogenia y evolución tectonomagmatica del distrito minero Segovia-Remedios. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.13140/2.1.4782.8486>
- Orozco-Centeno, W. P., Branch Bedoya, J. W., & Jiménez-Builes, J. A. (2014). Classification of fine-grained igneous, sedimentary and metamorphic rocks through structured programming. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 36, 5–9. <https://doi.org/10.15446/rbct.n36.44037>

- Restrepo, J. J., Toussaint, J. F. (1988). Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. In: Episodes, 11, 189–193.
- Rodríguez, C.J., y Pernet, A. (1983). Recursos minerales de Antioquía. Boletín Geológico, 26(3), 1 – 116.
- Rusell. (1959). Secuence of Fissures Frontino Area. Internal Report Frontino Gold mines, Segovia, 2.
- Sánchez, L. H., Ordóñez, O., Castaño, L. C., & Romero, A. (2007). Revisión de modelos de fracturamiento y controles estructurales como guías de exploración de filones auríferos en el distrito minero segovia remedios. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (21), 49-58.
- 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. *Bolentín Ciencias de la Tierra*, 21, 49-58.
- Santander, A. U. A. (2022). Análisis microtexturales de los diferentes pulsos magmáticos asociados a las mineralizaciones de Au–Ag en el Distrito Minero Segovia–Remedios (DMSR), Antioquia, Colombia.
- Sarmiento-Rojas, L. F., Van Wess, J. D., & Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383-411.
- Seedorf, E. (2005). Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Econ. Geol.*, 100, 251–298.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), 3-41.
- Sillitoe, R. H. (2010a). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sillitoe, R.H., 1993, Epithermal models: Genetic Types, Geometrical Controls and Shallow Features. Geological Association of Canada Special Paper 40, p. 403-417.
- Sillitoe, R.H., 1999, Styles of High Sulfidation Gold, Silver and Copper Mineralization in Porphyry and Epithermal Environments, en PACRIM’99, Proc. 7th IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM’99), Victoria, B.C., Canada.
- Sillitoe, R.H., Hedenquist, J.W., 2003, Linkages Between Volcanotectonic Settings, Ore- fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits, Society of Economic Geologists, Special Publication Series, v. 10, p. 314-343.

- Simmons, S.F., Graham, I.J., eds., 2005, Volcanic, Geothermal and Ore-forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes Within the Earth, Society of Economic Geologists Special Publication 10 (Giggenbach Volume), p. 285-313.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). *Gondwana Research*, 27(1), 95-139.
- SRK Consulting. (2018). Amended NI 43-101 technical report prefeasibility study update Segovia Project Colombia. Report prepared for Gran Colombia Gold, Canada. 328 pp.
- Streckeisen, A. (1974). Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geologische Rundschau*, 63(2), 773–786.
- Zuluaga, C.A., Amaya, S., Urueña, C. & Bernet, M. 2017. Migmatization and low–pressure overprinting metamorphism as record of two pre–Cretaceous tectonic episodes in the Santander Massif of the Andean basement in northern Colombia (NW South America). *Lithos*, 274-275: 123-146. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.12.036>