

# Caracterización espectral de la alteración hidrotermal asociada a filones de oro en el Sistema

Sandra K, Segovia, Antioquia

César J. Bustos S., Ariel O. Cadena S. (Director)

 10 FEB 2022

Grupo de Caracterización Tecnológica de Minerales, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá., Colombia. 10 de febrero del 2022.

[cbustoss@unal.edu.co](mailto:cbustoss@unal.edu.co)

## Resumen

Se evalúa un método de vectorización basado en la cristalinidad y composición de mica blanca, y la composición de la clorita, utilizando espectroscopía de reflectancia infrarroja en la roca caja de las mineralizaciones auríferas del Sistema Sandra K, Distrito Minero de Segovia-Remedios. Se reporta un aumento de la cristalinidad de la mica blanca hacia el suroeste del sistema, donde fases Muscovita e Illita son las predominantes. Por otro lado, no se observa que esta tendencia esté relacionada con las zonas de alto y bajo tenor aurífero. La composición de la roca caja parece tener un mayor control sobre la composición de la mica que la temperatura de la alteración hidrotermal. La composición de la clorita determinada por este método de reflectancia no tiene relación con la presencia de oro ni parece obedecer a la composición de la roca caja. Descripciones macro y microscópicas permitieron identificar 2 eventos de alteración hidrotermal: Un *evento 1* de alteración fílica (Cuarzo + Sericita + Pirita ± Calcopirita ± Esfalerita ± Galena), con un rango de temperatura de 220°C – 320°C y un pH ácido – moderado; y un *evento 2* de alteración propilítica (Carbonato + Clorita + Epidota ± Zoisita ± Clinozoisita) con una temperatura entre 230°C - 340°C y un pH alcalino.

**Palabras clave:** Vectorización - Espectroscopía de reflectancia infrarroja – Cristalinidad – Exploración de oro – Alteración Hidrotermal

## Abstract

A vectorization method based on white-mica's composition and crystallinity, and chlorite composition, characterized by infrared reflectance spectroscopy, is evaluated in the host rock of Sandra K System gold-deposit, Segovia-Remedios Mining District. A southwestern trend of higher mica crystallinity is proposed, where Muscovite – Illite phases are dominant, nevertheless, there is no visible relation with gold ore shoot location. Host rock composition appears to control more the white-mica composition than the hydrothermal alteration temperature. Chlorite composition determined by the infrared reflectance spectroscopy has no relation with the ore shoot location nor

obeys the host rock composition. Two hydrothermal alteration stages were petrographically identified.: A first phyllic alteration stage (Quartz + Sericite + Pyrite  $\pm$  Chalcopyrite  $\pm$  Sphalerite  $\pm$  Galena), with a temperature range of 220°C – 320°C and an acidic – moderate pH, and a second propylitic alteration stage (Carbonate + Chlorite + Epidote  $\pm$  Zoisite  $\pm$  Clinozoisite) with a temperature range between 230°C – 340°C and alkaline pH.

**Key Words:** Vectorization – Reflectance infrared spectroscopy – Crystallinity – Gold exploration – Hydrothermal Alteration

## 1. Introducción

Este trabajo se realiza en el marco del proyecto “Modelamiento metalogénico y caracterización geo-metalúrgica como instrumentos predictivos para la exploración y los procesos de beneficio en las áreas de influencia de Gran Colombia Gold - Distrito minero Segovia-Remedios, Antioquia.” celebrado entre Gran Colombia Gold y el Grupo de Caracterización Tecnológica de Minerales de la Universidad Nacional de Colombia.

El Distrito Minero de Segovia-Remedios es el distrito minero de oro de filón más importante del país. Para el año 2011, el Distrito había producido cerca de 8 millones de onzas de oro. (Leal-Mejia 2011; Echeverry et. al., 2019). Teniendo en cuenta estos datos de producción y su importancia para la economía colombiana, es vital investigar métodos de exploración que afecten positivamente en la producción de este metal en el Distrito Minero de Segovia-Remedios (DMSG) y en otros depósitos a nivel regional y mundial.

El DMSR está ubicado en los municipios de Segovia y Remedios, Noroeste del departamento de Antioquia. Este distrito minero se encuentra comprendido por cuatro sistemas: El Silencio, Providencia, Vertical y Cogote (Rusell, 1959; Echeverri, 2006; Echeverry et al., 2009). Es de interés para la compañía Gran Colombia Gold abordar el estudio enmarcado dentro del proyecto de investigación definiendo de antemano tres sistemas geográficos denotados como: Sistema El Silencio, Sistema Providencia y Sistema Sandra K. El sistema Sandra K está comprendido por las minas Sandra K, Vera, Guía Antigua y Cristales tal como observa en la figura 1.

Este trabajo corresponde a la primera investigación de vectorización empleando el método de espectroscopía de reflectancia infrarroja en la zona. El método ha sido utilizado en otros depósitos de oro, cobre-molibdeno, PGE's a nivel mundial, y en varios tipos de depósitos como lo son los pórfidos, skarns, sulfuros masivos y depósitos de tipo epitermal (Xu, 2017; Yang, 2012; Xu, 2017;

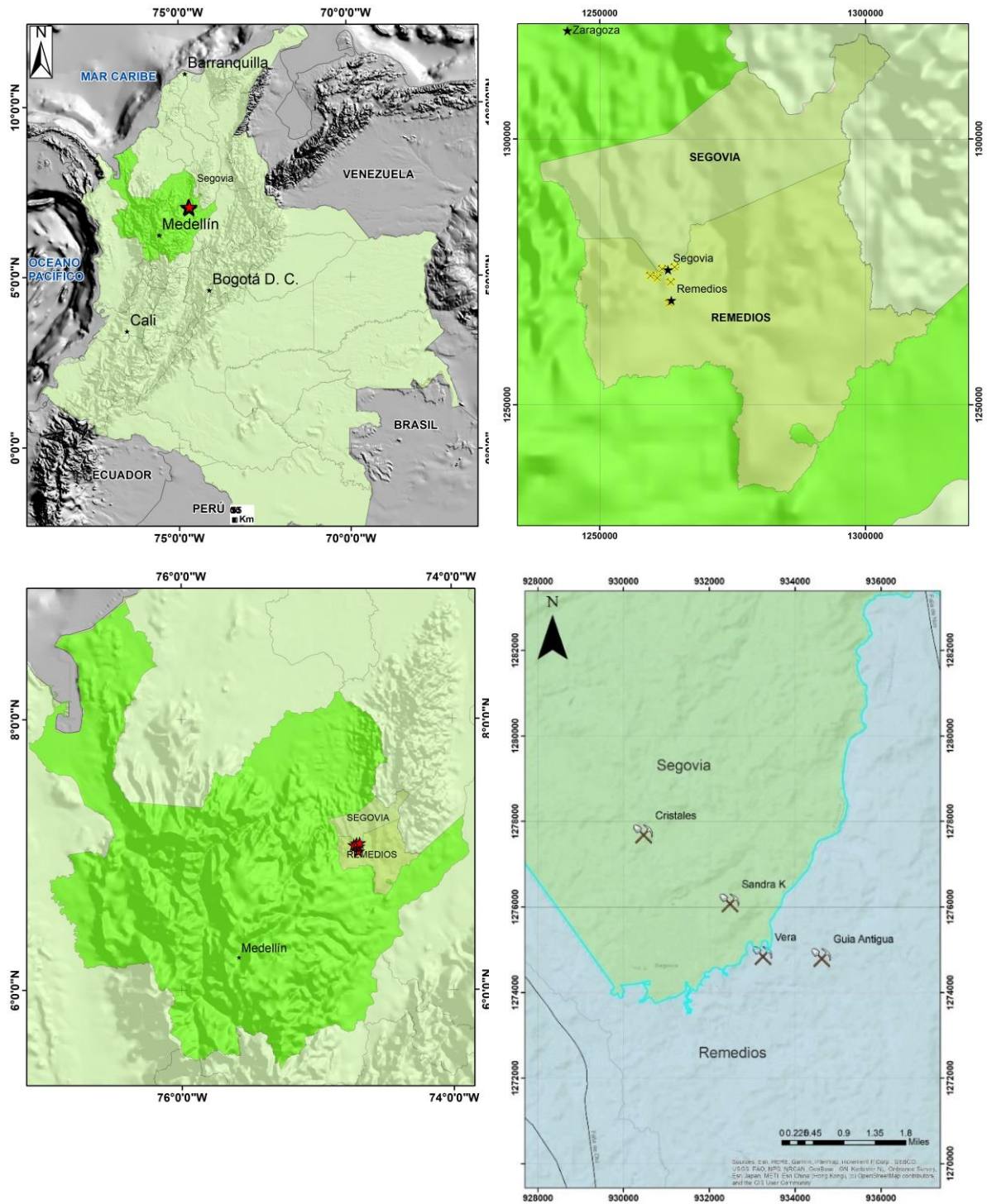


Figura 1: Ubicación geográfica. A) Ubicación respecto a Colombia. B) Ubicación respecto al Departamento de Antioquia. C) Ubicación respecto a los municipios de Segovia y Remedios. D) Ubicación de las minas pertenecientes al Sistema Sandra K

Dalm, 2014; Dalm 2017; Harraden, 2013; Herrmann, 2001; Han, 2018).

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Zona de estudio**

El DMSR se puede dividir por el sector oriental y el sector occidental, ambos separados por la falla de Otú, la cual limita entre el terreno Tahamí y el terreno Chibcha (Restrepo y Toussaint, 1988). El sector oriental lo conforman anfíbolitas, neises cuarzosos y mármoles, de edad presuntamente precámbrica. Estas unidades son posteriormente intruidas por el Batolito de Segovia (Feininger et al. 1972). El sector occidental, está conformado por una secuencia de neises feldespáticos, aluminicos y cuarzosos, mármoles y anfíbolitas, intruidos por los Stocks de Santa Isabel y La Culebra, de edad Cretácica, asociados al segundo pulso magmático del Batolito Antioqueño y denominados intrusivos satélite (Leal Mejía, 2011).

La ubicación del DMSR en el área de deformación del sistema de fallas Otú-Pericos, hace que la mineralización auro-argentífera esté estructuralmente controlada con una tendencia N-S.

El Sistema Sandra K, el cual es la zona de estudio de este trabajo, se encuentra comprendido en el Batolito de Segovia, de edad Jurásica, datada en  $160 \pm 7$  mediante K-Ar en Hornblenda (Feininger T., et al., 1972). El Batolito de Segovia presenta una litología

correspondiente a granodiorita de hornblenda y biotita, reconocido en la fase de campo de este trabajo.

El intrusivo granodiorítico hospeda un conjunto de diques con dos litologías predominantes. 1) Diques con textura porfirítica y fenocristales de plagioclasa y 2) Diques porfíricos, con fenocristales de hornblenda y matriz de plagioclasa. Estos diques fueron datados con una edad absoluta de 89 – 85 Ma ( Leal Mejía 2011), la cual es contemporánea al segundo pulso magmático del Batolito Antioqueño.

La mineralización aurífera se presenta en venas de cuarzo con una asociación mineral de cuarzo, pirita, galena y esfalerita. Se reporta presencia de arsenopirita, rutilo, tetraedrita, argentinita y electrum.

Echeverry (2006) identifica cinco tipos de alteración hidrotermal: filica, propilítica, sulfidación, calcificación y silicificación. El mismo autor indica que las rocas más cercanas a la mineralización presentan una fuerte sericitización, caracterizada por la presencia de un filosilicato de color verde (Fuschita), correspondiente a una Muscovita rica en cromo. La alteración más distal a la vena que se reporta es la alteración propilítica, con una asociación de Clorita-Epidota-Calcita.

La secuencia paragenética propuesta consiste en 3 eventos de alteración hidrotermal, en donde el evento 1 precipita el electrum asociado a la presencia de pirita, esfalerita, galena y pirrotina.

## 2.2 Espectroscopía de reflectancia infrarroja

La espectroscopía de reflectancia infrarroja es una técnica que mide el porcentaje de reflectancia de las longitudes de onda reflejadas por la superficie de un mineral o conjunto de minerales, que posteriormente son registradas en un espectro.

La técnica utiliza las longitudes de onda de las regiones del espectro electromagnético visible (VIS, 400 – 700 nm), infrarrojo cercano (NIR, de 700 – 1300 nm) e infrarrojo de onda corta (SWIR, 1300 – 2500 nm). La absorción de energía de los materiales está controlada por su estructura atómica, esto quiere decir que el espectro de reflectancia de un material, en este caso un mineral, es el resultado de propiedades físicas y químicas del mismo. Distintos fenómenos atómicos/moleculares tienen respuesta en regiones específicas del espectro estudiado tal como se observa en la Tabla 1.

Las respuestas que se utilizaran en este trabajo son 1) banda del cromo que se ubica en el VIS (619 nm), 2) el pico del OH<sup>-</sup> (1350-1560 nm), 3) la banda del agua (1900-2000 nm), 3) banda de AlOH (2130 – 2228 nm), 4) la banda del FeOH (2240 – 2298 nm) y bandas del MgOH y carbonatos (2300 – 2400 nm).

Los distintos picos correspondientes al rango SWIR son útiles para la identificación de ciertos minerales específicos tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 1: Regiones de reflectancia espectral

Región	Mecanismo
VIS	Transferencia de carga / Metales de transición Identidad del compuesto molecular
VIS/NIR	Efectos del campo cristalino / Metales de transición/ Identidad del compuesto molecular
SWIR	Identidad + Geometría de cationes enlazados con OH <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>

Tabla 2: Bandas de la región del SWIR

Posición (nm)	Franja	Grupos Minerales
~ 1350-1560	Hidroxilo (OH)	Arcillas, zeolitas, sulfatos, cloritas, biotitas, anfíboles, talco.
~ 1900-2000	Agua (H <sub>2</sub> O)	Esmectita, illita, yeso, zeolitas.
~ 2130-2228	AlOH	Caolinita, dickita, pirofilita, illita, montmorillonita, alunita, zunyita.
~ 2240-2298	FeOH	Clorita, biotita, Nontronita, jarosita, epidota.
~ 2300-2400	MgOH-cb	Talco, anfíboles, serpentina, biotita, clorita, saponita. Calcita, ankerita, dolomita, etc.

La caracterización de la cristalinidad de la mica blanca se realiza con el Índice de Cristalinidad (IC) el cual es:

$$IC = \frac{\text{Profundidad rasgo AlOH}}{\text{Profundidad rasgo H}_2\text{O}}$$

A mayor profundidad del rasgo AlOH comparado con el rasgo del H<sub>2</sub>O hay una mayor cristalinidad de mica blanca.

Respecto a la composición de la mica, se caracteriza con la posición del rasgo del AlOH de acuerdo con lo indicado en la Tabla 3.

Tabla 3: Composición de la mica blanca respecto al rasgo de AlOH

Longitud de Onda (nm)		Composición
2180	2190	Paragonita (Na)
2191	2200	Tendiente a Paragonita
2201	2210	“Normal Potásica” K
2211	2220	Tendiente a fengita
2221	2225	Fengita (Fe, Mg)

Para caracterizar la composición de la clorita se utilizan las bandas del FeOH y el MgOH:

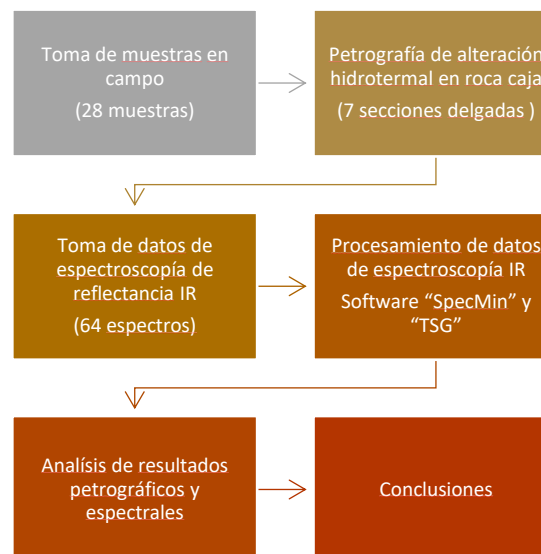
Tabla 4: Composición de la clorita respecto al rasgo de FeOH y MgOH

Longitud de Onda (nm)		Composición
2240	2249	Clorita Mg
2316	2325	
2250	2256	Clorita Fe - Mg
2326	2347	
2257	2265	Clorita Fe
2355	2365	

Es importante resaltar que la mezcla de distintos minerales que tienen respuesta en estos picos de AlOH, MgOH y FeOH afectan la medida de cristalinidad y composición de la clorita y las micas blancas, por lo que se debe utilizar solo en muestras donde sea el único mineral identificado. (AusspecInternational. 2008; SPECTRAL INTERNATIONAL INC, 2005; Ducart, 2016)

### 3. Metodología

La metodología de este trabajo se observa en el siguiente diagrama de flujo:



Primero, en la fase de campo se recolectaron un total de 28 muestras en 21 estaciones. Las estaciones se encuentran distribuidas en las minas Sandra K (13 estaciones), Cristales (3 estaciones), Guía Antigua (3 estaciones) y Vera (2 estaciones), tal y como se muestra en los mapas de muestreo (Figuras 2 y 3). La fase de muestreo se realizó con la metodología de canal, en la que se recolectaron muestras de veta y roca caja proximal a la mineralización. Se recolectaron muestras de roca caja tanto del intrusivo granodiorítico correspondiente al Batolito de Segovia como de los diques lamprófidos y andesíticos que acompañan la mineralización en la zona de estudio. Las muestras de vena se utilizaron en otros trabajos enmarcados en el mismo proyecto.



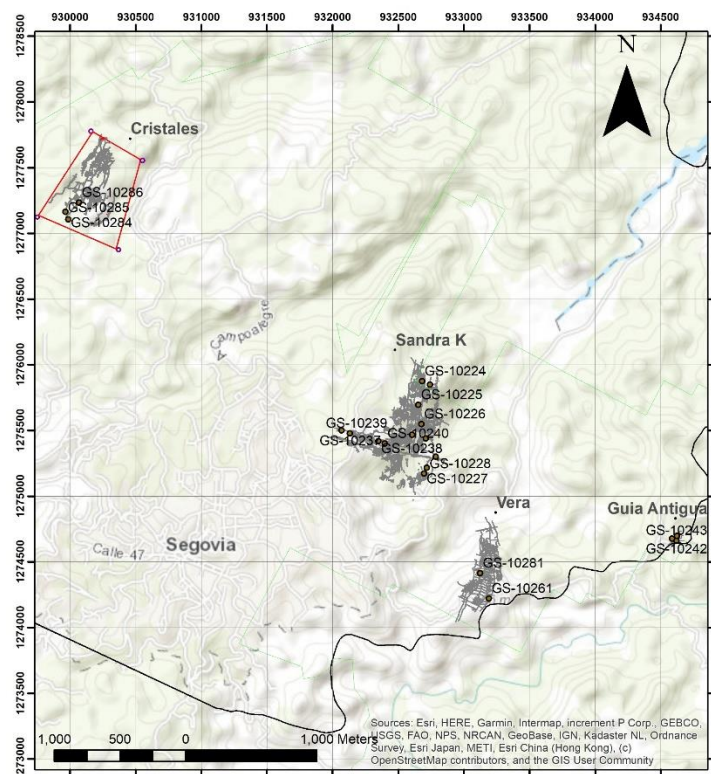


Figura 2. Ubicación de estaciones en las distintas minas pertenecientes al Sistema Sandra K

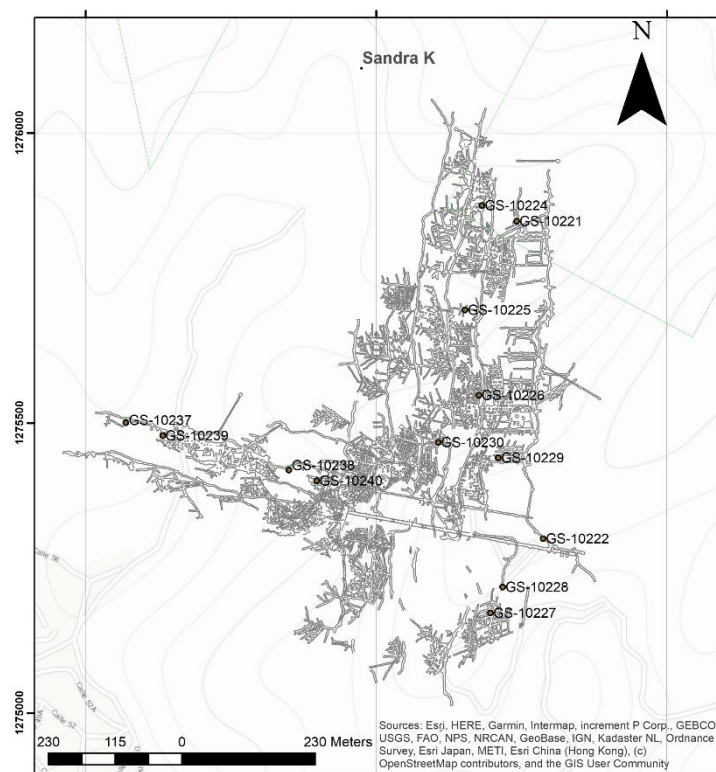


Figura 3. Ubicación de estaciones en la mina Sandra K

Segundo, la petrografía se realizó en 7 muestras de roca caja distribuidas de acuerdo con la Tabla 5.

*Tabla 5: Distribución de las muestras analizadas mediante petrografía*

Petrografía		
Estación	Muestra	Litología
GS-10221	R-10019	Dique Lamprófidio
GS-10222	R-10023	Dique Lamprófidio
GS-10223	R-10025	Dique Lamprófidio
GS-10226	R-10036	Granodiorita
GS-10228	R-10037	Dique Andesítico
GS-10228	R-10040	Dique Lamprófidio
GS-10227	R-10045	Dique Andesítico

La caracterización petrográfica se realizó utilizando los microscopios petrográficos pertenecientes al laboratorio de Petrografía de Menas y del Carbón de la Universidad Nacional de Colombia (Laboratorio 220), en los cuales se puede observar minerales mediante las técnicas de luz reflejada y luz transmitida.

La petrografía se realizó con el objetivo de identificar los minerales de alteración hidrotermal, establecer relaciones paragenéticas y temporales. En la petrografía las micas blancas fueron caracterizadas como Sericita, para posteriormente, poder discriminar entre las fases minerales de la misma, basándose en la cristalinidad determinada por espectrofotometría de reflectancia.

Se realizó la toma de datos de caracterización espectral infrarroja de la siguiente manera:

1. Se seleccionaron las muestras de roca caja que fueron procesadas para caracterizar minerales de alteración hidrotermal basándose en variedad litológica, presencia de alteración hidrotermal y zonación de la alteración hidrotermal.
2. Las muestras de mano fueron secadas en un horno de marca Froilabo, Modelo Dinamica Air Expert AP60 – Puerta de vidrio a una temperatura de 40°C por un periodo de 48 horas. Este proceso se realizó con el fin de eliminar la humedad superficial de la muestra con la intención de evitar ruido e interferencia en el pico del agua (1900 – 2000 nm).
3. Se seleccionaron los puntos de toma de espectros de reflectancia infrarroja en las muestras de mano. La selección de estos puntos se basó en las diferencias macroscópicas de la alteración hidrotermal, cambios de color, textura y porcentaje aparente de minerales. El registro de los espectros de reflectancia infrarroja se realizó con el espectrofotómetro perteneciente al laboratorio de Caracterización Litológica de la Universidad Nacional de Colombia, TerraSpec® EXPLORER marca ASD Inc, que maneja un rango espectral de 350-2500 nm, resolución 3 nm @700 nm, 6 nm @1400 nm y 7 nm @2150 nm y una tasa



de recolección de 10 espectros por segundos.

4. Los espectros crudos fueron corregidos utilizando el software “View Spec Pro <sup>TM</sup>” de marca ASD Inc, el cual es usado para el post-procesamiento de archivos espectrales registrados por un equipo de marca ASD Inc.
5. Los espectros corregidos fueron procesados usando los softwares “TSG The Spectral Geologist <sup>TM</sup>” de marca CSIRO y “SpecMin<sup>TM</sup>” producto de la empresa Spectral International INC. Finalmente, la información obtenida por cada programa fue interpretada por el autor, apoyado en el contexto geológico, mineralógico y petrográfico.
6. Se determinó el grado de cristalinidad y composición de la mica blanca en muestras donde éste fuese el único mineral registrado. La sobreposición de espectros de varios minerales hace que el pico del AlOH (2130-2226 nm) responda a procesos que no son únicos de la mica, si no de cualquier otro material que tenga Al(OH) en su estructura cristalina, tales como la Clorita o la Epidota. Igualmente, la composición de la clorita se determinó en puntos de infrarrojo donde éste haya sido el único mineral caracterizado.

Finalmente, la información petrográfica y espectral fue analizada conjuntamente. Se realizaron las secuencias paragenéticas de

alteración hidrotermal con los minerales identificados a partir de ambos métodos de caracterización. Los datos obtenidos de cristalinidad y composición de la mica blanca, y composición de la clorita, fueron graficados en el mapa. La información de cristalinidad de la mica fue interpolada utilizando la función “Diffusion Interpolation With Barriers” del programa ArcMap v10.8 de marca ESRI, el cual interpola una superficie usando un núcleo basado en la ecuación de calor y permite usar raster y barreras de características para redefinir las distancias entre los puntos de entrada.

#### **4. Resultados obtenidos**

##### **4.1 Caracterización de la alteración hidrotermal y minerales de alteración**

Se identificaron dos eventos de alteración hidrotermal y un evento de introducción de carbonato a partir de la caracterización petrográfica de las muestras de roca caja del Sistema Sandra K. Los minerales fueron confirmados por medio de espectroscopía de reflectancia infrarroja especificando los tipos de filosilicatos.

En el intrusivo granodiorítico se identifican dos eventos de alteración hidrotermal. Un *Evento 1* de alteración fílica, presentando una paragénesis mineral Cuarzo + Sericita + Pirita ± Calcopirita ± Esfalerita ± Galena. Esta alteración fílica es de carácter pervasiva y varía de intensidad moderada a intensa. Por medio de la espectroscopía de reflectancia infrarroja se caracterizaron cristalinidades de

la Sericita desde Esmectita/Illita a Muscovita para esta litología. El *Evento 2* corresponde a una alteración propilítica con una paragénesis mineral de Carbonato + Clorita + Epidota. La intensidad de esta alteración es moderada y de carácter selectivo, reemplazando los cristales de Hornblenda de la granodiorita. Adicionalmente, se observa que el carbonato del *Evento 2* corroee los bordes de los cristales de Cuarzo del evento 1, tal como se observa en la figura 4B. Esta asociación mineral fue confirmada por la espectroscopía de

reflectancia infrarroja. Posterior a los *Eventos 1 y 2*, ocurre un *Evento 3* de introducción de carbonato en venillas.

En los diques lamprófidos y andesíticos se caracterizaron los mismos eventos de alteración 1 y 2. . Una alteración fílica pervasiva intensa en la matriz de los diques andesíticos y moderada en la matriz de los diques lamprófidos con una paragénesis mineral de Cuarzo + Sericita + Piritita ± Calcopirita. Respecto a la cristalinidad de la mica blanca identificada en esta litología varía

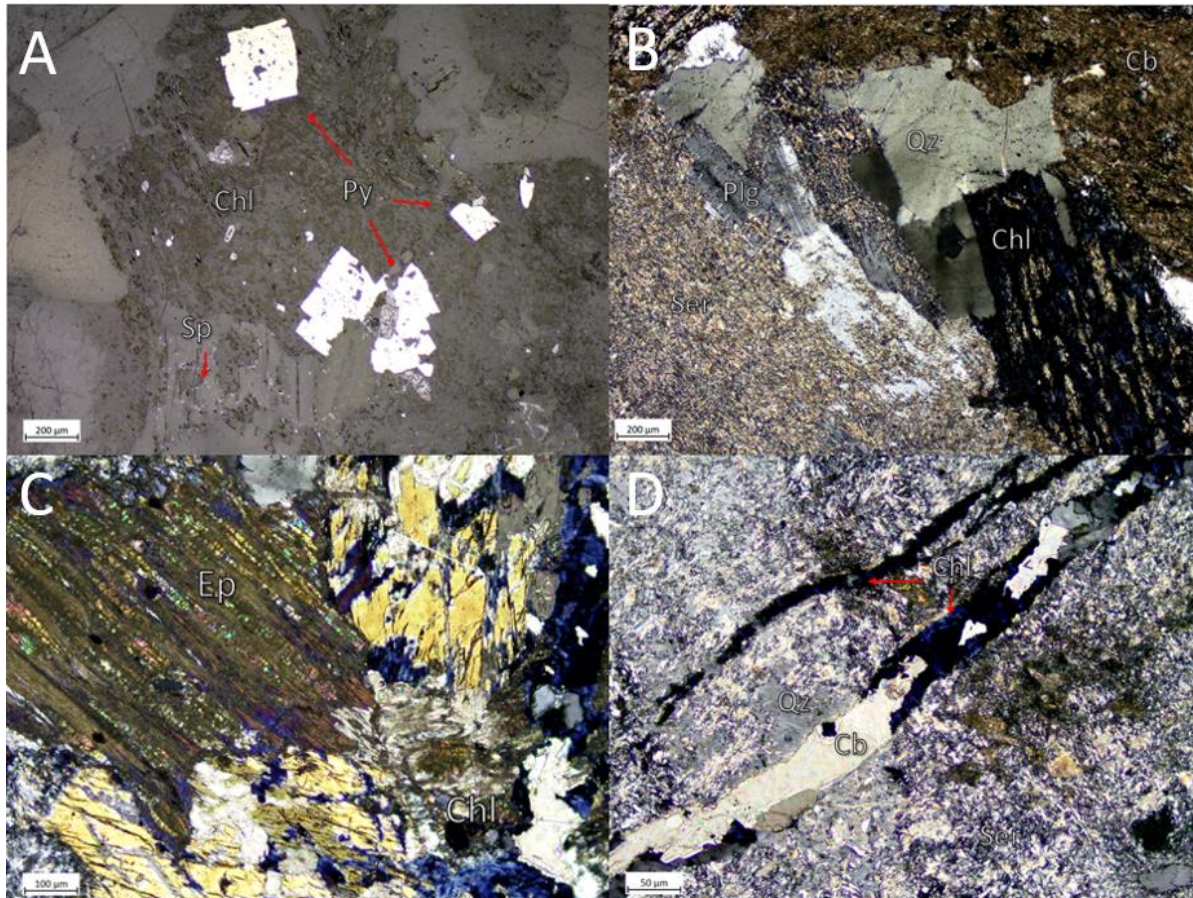


Figura 4: Imágenes de petrografía de la muestra R-10036 correspondiente a una granodiorita. A) Cristales euhedrales de piritita embebidos dentro de clorita. B) Plagioclasa siendo reemplazada por Sericita, clorita reemplazando un cristal de hornblenda y carbonato corroyendo los bordes de un cristal de Cuarzo, C) Clorita, Epidota y Carbonato reemplazando cristales hornblenda. D) Sericitización pervasiva intensa, siendo cortado por una venilla de carbonato y clorita.



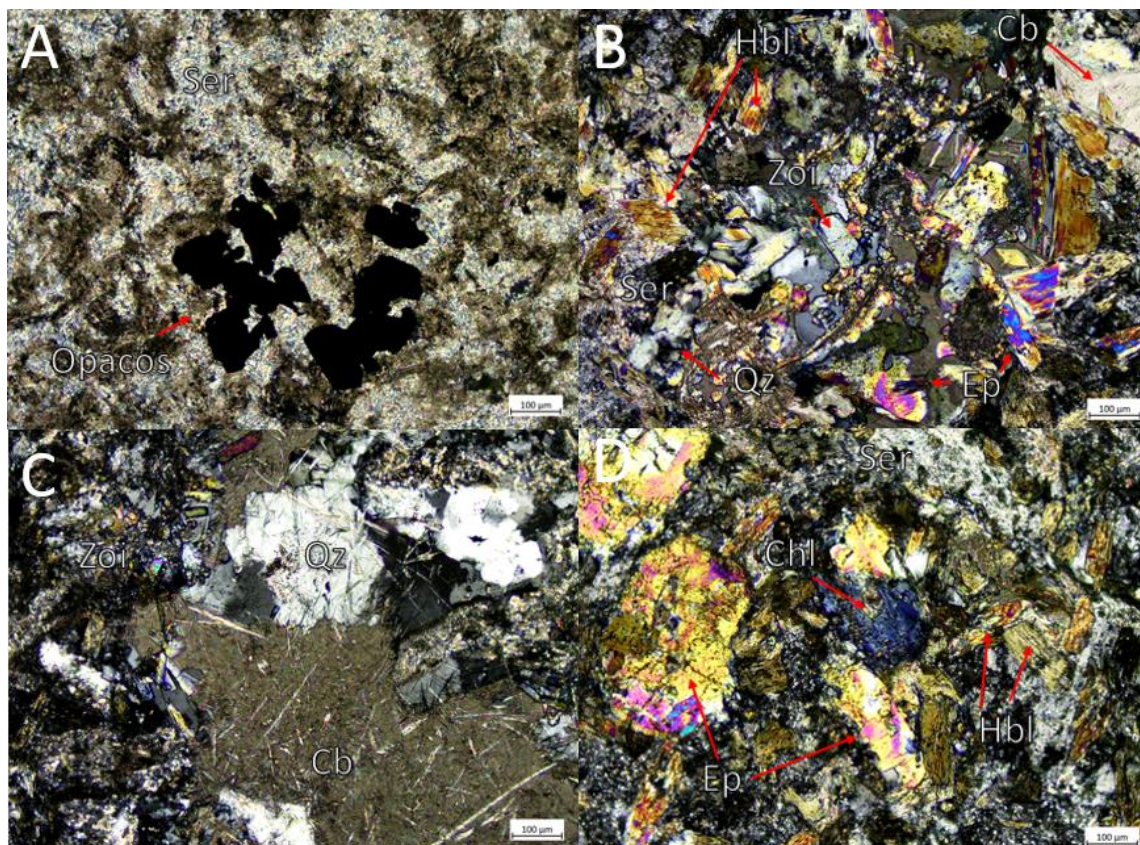


Figura 5: Imágenes de petrografía de la muestra R-10023 correspondiente a un Dique Lamprófid. A) Sericitización pervasiva intensa y minerales de mena (Py). B) Sericitización pervasiva moderada y Zoisita y Epidota reemplazando fenocristales de plagioclase. C) Carbonato corroyendo los límites de un cristal de Cuarzo. Presencia de Clinozoisita. D) Clorita y Epidota reemplazando cristales de Hornblenda. Sericitización pervasiva moderado reemplazando la matriz.

de Muscovita a Illita. El *Evento 2* de alteración propilítica presenta paragénesis mineral de Carbonato + Clorita + Epidota  $\pm$  Zoisita  $\pm$  Clinozoisita, minerales caracterizados por la espectroscopía de reflectancia infrarroja y petrografía. El *Evento 3* de introducción de carbonato también está presente en esta litología.

#### 4.2 Cristalinidad y composición de la mica blanca

Fueron 34 los puntos de infrarrojo donde la mica blanca fue el único mineral caracterizado. Se identificaron cristalinidades desde Muscovita a Esmectita/Illita de la siguiente manera: Muscovita (50%), Illita

(26%), Illita/Esmectita (21%) y Esmectita/Illita (3%). Las zonas de alto y bajo tenor de oro reportadas por Gran Colombia Gold no tienen relación con la cristalinidad. La mica con composición tendiente a Fengita fue identificada en el 91% de los espectros analizados, y la mica de composición Normal Potásica se registró en el 9% restante. La litología de la roca caja y la composición de la mica se encuentran en la tabla 6.

#### 4.3 Composición de la Clorita

Se analizaron 23 espectros de reflectancia infrarroja que fueron interpretados como clorita únicamente.

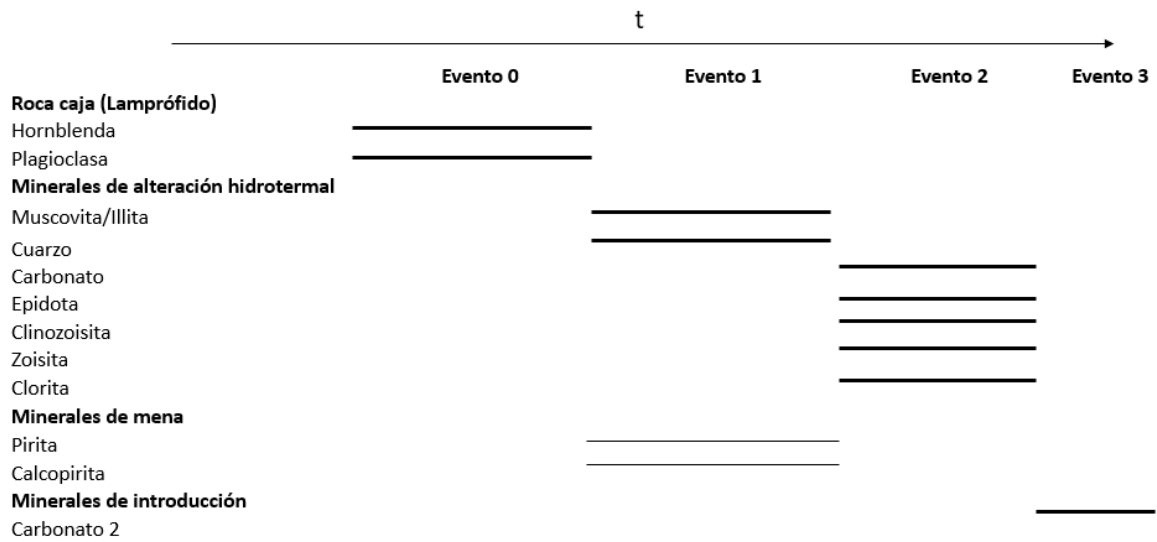


Figura 6. Secuencia paragenética de alteración hidrotermal en el dique lamprófidico.

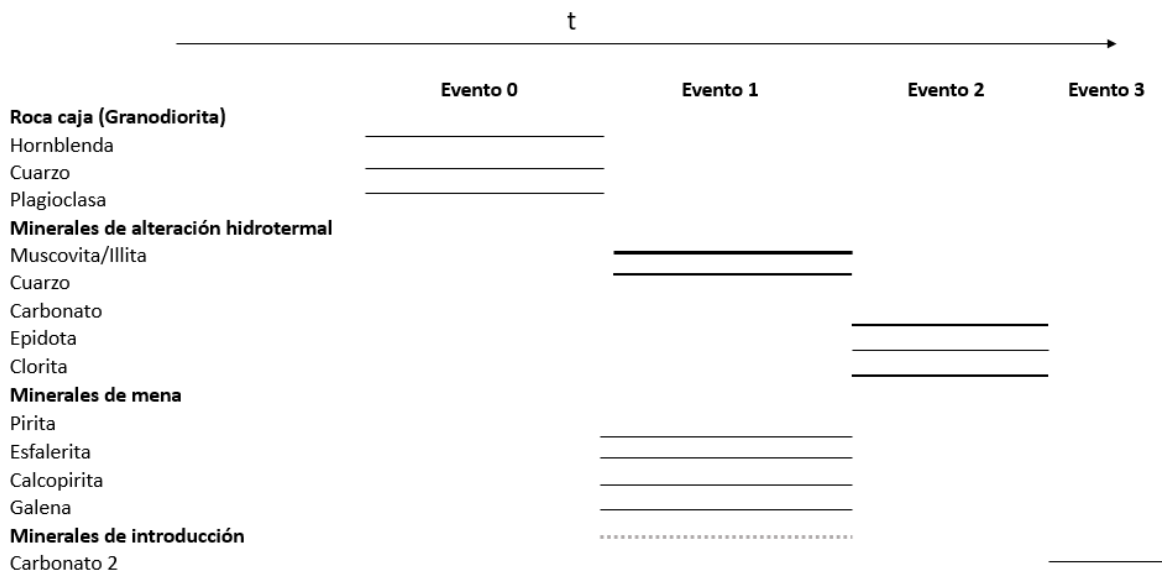


Figura 7. Secuencia paragenética de alteración hidrotermal en el intrusivo.

Tabla 6: Composición de la mica blanca según la litología

Mineral	Contenido
<b>Diorita</b>	<b>5.88%</b>
TENDIENTE A FENGITA	5.88%
<b>Granodiorita</b>	<b>52.94%</b>
NORMAL POTÁSICA	5.88%
TENDIENTE A FENGITA	47.06%
<b>Lamprófidio (Ocellus)</b>	<b>2.94%</b>
TENDIENTE A FENGITA	2.94%
<b>Lamprófidio Espesartita</b>	<b>2.94%</b>
TENDIENTE A FENGITA	2.94%
<b>Andesita Porfírica</b>	<b>17.65%</b>
TENDIENTE A FENGITA	17.65%
<b>Quartz-Sericite Schist</b>	<b>8.82%</b>
TENDIENTE A FENGITA	8.82%
<b>Tonalita</b>	<b>5.88%</b>
TENDIENTE A FENGITA	5.88%
<b>Vena</b>	<b>2.94%</b>
NORMAL POTÁSICA	2.94%
<b>Total</b>	<b>100.00%</b>

El 95% de los puntos de clorita analizados dieron como resultado una composición ferromagnesiana (Fe – Mg), y el 5% restante fue caracterizada como rica en hierro (Fe).

## 5. Discusión de resultados

### 5.1 Temperatura y pH de los eventos de alteración hidrotermal

Con base en los minerales caracterizados petrográfica y espectralmente, utilizando las temperaturas de equilibrio de las fases de micas blancas reportadas por Steiner (1968) y Reyes (1990), para el Evento 1 de alteración fílica se estima una temperatura de entre 220°C y 320°C. Adicionalmente, se propone un pH ácido-moderado a este fluido alterante

basándose en el trabajo de Corbett y Leach (1998).

Respecto al evento 2 de alteración propilítica se determina que tuvo una temperatura de 230°C y 340°C de acuerdo con la temperatura de estabilidad entre la Clorita, Epidota y carbonato reportadas por Reyes (1990) y Hedenquist, Isawa y Arribas (1993). Se estima un pH ácido a este fluido alterante con base en lo reportado por Corbett y Leach (1998), soportado por evidencia petrográfica, donde se observa que el carbonato de este segundo evento corroee los bordes de los cristales de cuarzo asociados al evento 1, consecuencia de la diferencia de pH en ambos eventos.

### 5.2 Cristalinidad y composición de la mica blanca

Se aprecia que la cristalinidad de la mica blanca es mayor hacia el suroeste del área de estudio, tal como se observa en los mapas de las figuras 8 y 9. Cabe resaltar que en el noreste y suroeste del área de estudio no se obtuvieron datos para confirmar esta propuesta de zonificación de cristalinidad.

En el suroeste del mapa de la figura 6 se encuentra la Mina el Silencio, perteneciente al Sistema el Silencio del DMSR. La mina el silencio es de gran importancia histórica en la minería aurífera colombiana, siendo una de las más grandes del país, y explotada desde tiempos de la colonia.



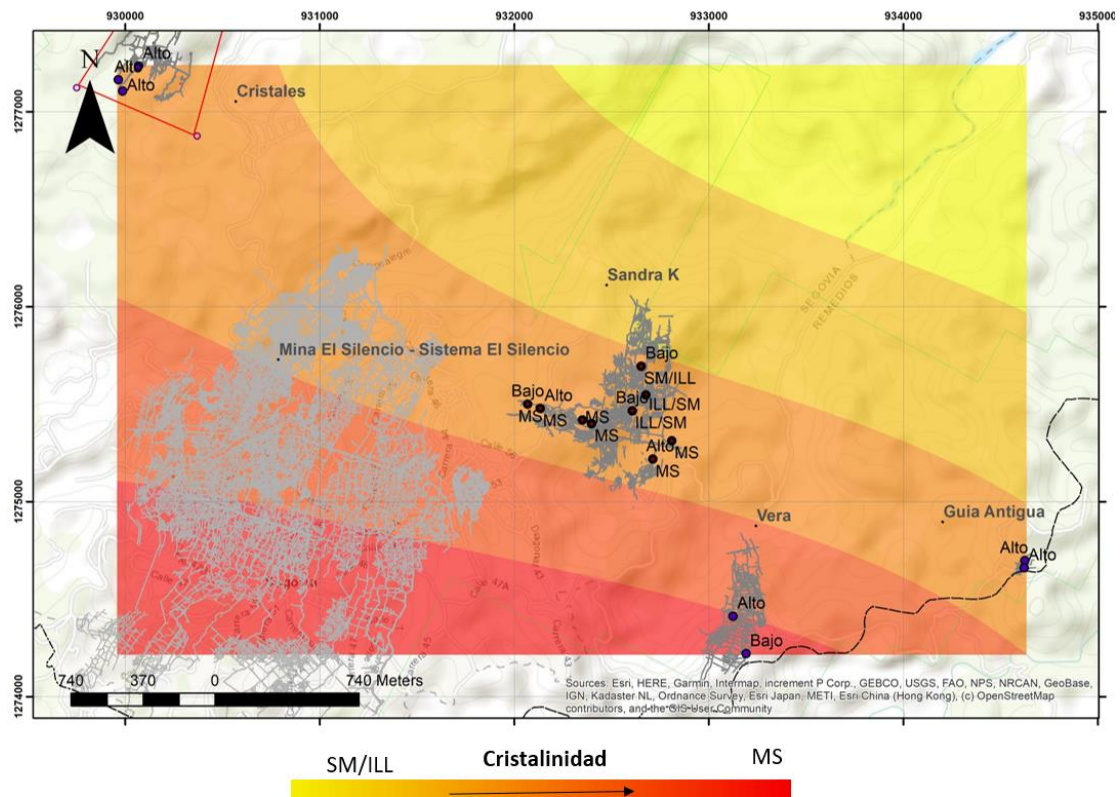


Figura 8. Propuesta de zonificación de cristalinidad de la mica blanca en el sistema Sandra K.

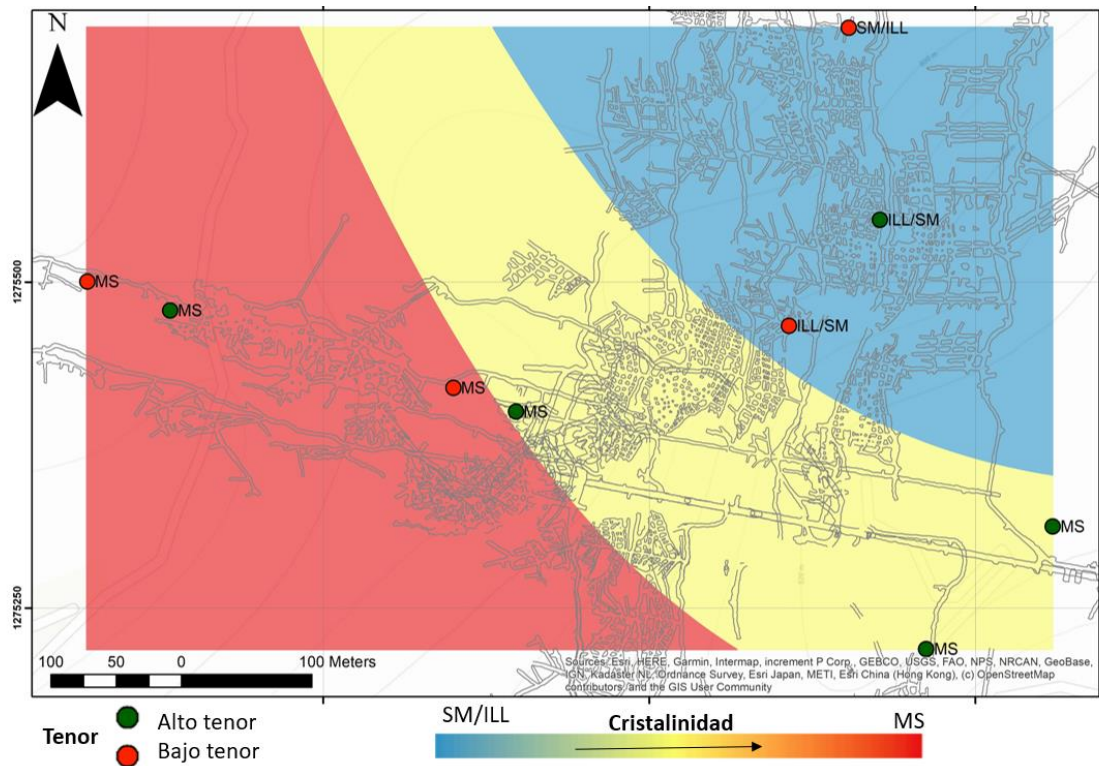


Figura 9. Propuesta de zonificación de cristalinidad de la mica blanca en la mina Sandra K, se observa que no hay relación de la cristalinidad y el tenor reportado por Gran Colombia Gold.



Por lo cual, se recomienda realizar caracterizaciones de cristalinidad de mica blanca usando este mismo método, con el fin de confirmar una posible relación entre la cristalinidad de la mica y la presencia de oro en la zona.

En la figura 9 se observa la zonificación de cristalinidad de mica en la mina Sandra K. No se observa relación respecto a la mayor cristalinidad hacia el suroeste y el tenor reportado por Gran Colombia Gold, por lo tanto, hay zonas de alto y bajo tenor en zonas de mayor y menor cristalinidad de la mica blanca.

En este trabajo no se tuvo en cuenta la fineza del oro presente en las diferentes estaciones, información que puede ser importante para una mayor precisión en el modelo propuesto.

La composición de la mica blanca caracterizada fue principalmente *Tendiente a Fengita*. Las muestras que arrojaron composiciones potásicas corresponden a rocas de composición ácida posteriormente alteradas, por lo que la presencia de estas micas ricas en potasio está controlada por la composición de la roca caja (Figura 10).

No se logró establecer la presencia de Fuchsitita a través de los espectros de reflectancia

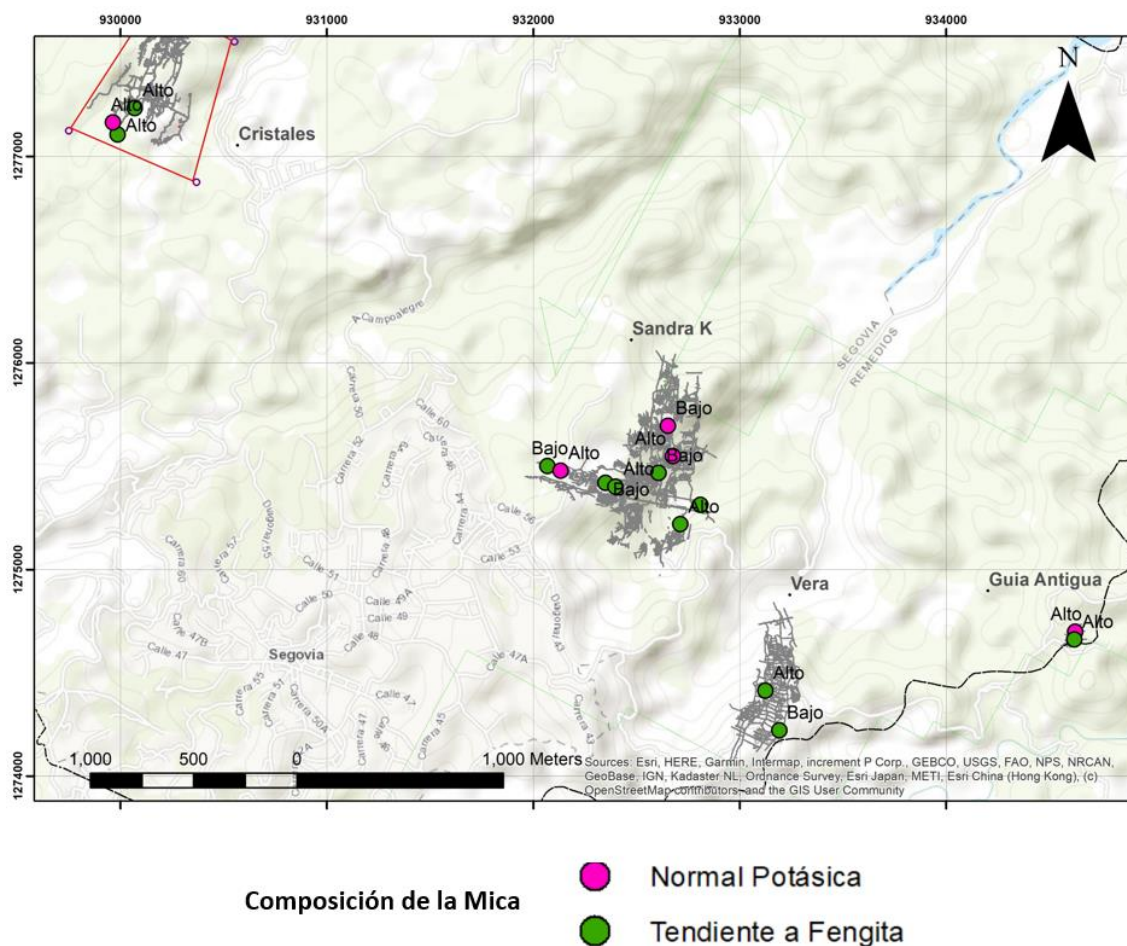


Figura 10: Composición de la mica blanca en el Sistema Sandra K. Nótese que se indica el tenor reportado en la estación.

infrarroja analizados en este trabajo, ya que ninguno de los espectros presentó respuesta en el pico del cromo (619 nm). Por lo cual, se recomienda utilizar el método de espectroscopía de reflectancia infrarroja en muestras similares a las estudiadas en este trabajo para establecer si la técnica logra identificar este mineral.

### 5.3 Composición de la clorita

En la figura 11 se observa la distribución de la composición de la clorita. No hay ningún patrón espacial reconocible en la zona, esto ya que la única muestra que registró una composición rica en hierro corresponde a una

sola muestra. La composición de la clorita tampoco presenta ninguna relación con las zonas de alto y bajo tenor reportadas por Gran Colombia Gold.

Debido a que la reflectancia infrarroja clasifica la clorita únicamente en tres tipos (Rica en hierro, rica en hierro y magnesio, y rica en magnesio), la precisión de estos datos no es buena para determinar temperaturas de cristalización. Se recomiendan estudios de química puntual usando EPMA para poder caracterizar temperaturas del evento 2 utilizando este mineral.

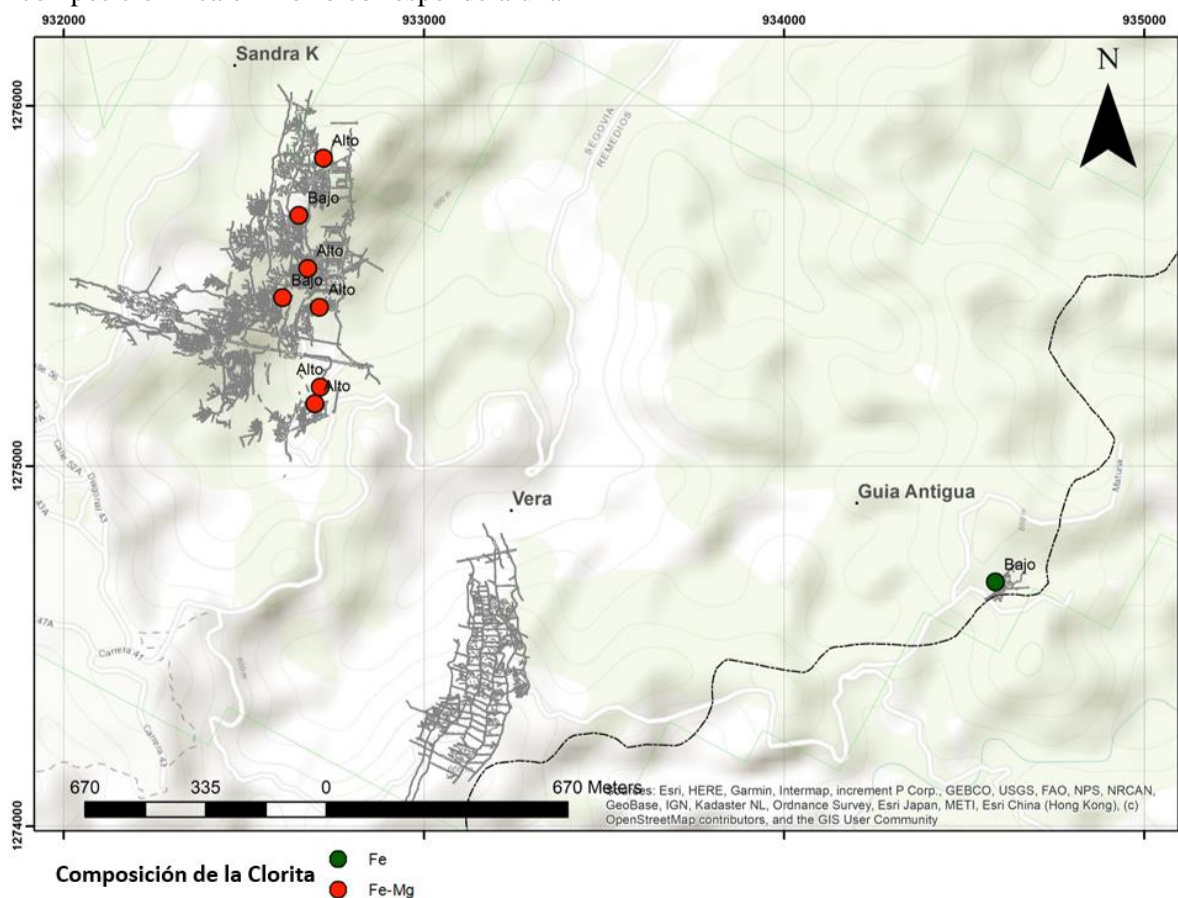


Figura 11: Composición de la Clorita en el Sistema Sandra K. En la mina Cristales no se registró clorita como mineral único de alteración en ningún espectro de reflectancia infrarrojo

## 6. Conclusiones

Se estima un rango de temperatura de 220°C a 320°C para el **evento 1** de alteración fílica, el cual es el asociado a la precipitación del oro en el Sistema. Posteriormente, ocurre un **evento 2** asociado a una alteración propilítica con temperaturas de entre 230°C a 340°C. El fluido del **evento 1** que precipita los minerales de mena tiene un pH ácido – moderado, posteriormente ocurre un **evento 2** de alteración propilítica con un pH alcalino.

La interpolación de datos de cristalinidad de la mica blanca arroja mayores cristalinidades y por lo tanto mayores temperaturas hacia el Suroeste de la zona de estudio. Sin embargo, la cristalinidad no está relacionada con la presencia de zonas de alto o bajo tenor. La composición de la mica blanca reportada es principalmente Tendiente a Fengita; esto puede deberse a la relación genética del fluido mineralizante y el emplazamiento de diques de composición máfica que ha sido propuesta anteriormente. La variación de la composición de la mica a potásica está controlada por la química de la roca caja y solo se presenta en composiciones ácidas e intermedias.

La composición de la clorita caracterizada por medio de la espectroscopía de reflectancia IR no presenta ningún patrón que permita vectorizar hacia zonas de alto tenor o mayor temperatura.

## Agradecimientos

Quiero agradecerle a Gran Colombia Gold y al grupo de Caracterización Tecnológica de Minerales por la oportunidad de hacer parte de este proyecto. A los profesores Juan Carlos Molano y Ariel Cadena por siempre contar conmigo durante estos años. Muchas gracias a Andrés Zárate por el apoyo incondicional en este y otros proyectos. A Ricardo M. y Nataly P. por la ayuda y asesoramiento. Finalmente, a mi familia; gracias a mis padres por siempre apoyarme en todo lo que me propongo, a mis hermanos por siempre creer en mí, a mis amigos por alegrarme la vida y a María Alejandra por ser mi apoyo y compañía incondicional.

## Bibliografía

- Alvarez, A. (1983). Geología de la Cordillera Central y el occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides mesocenozoicos, Boletín Geológico Vol 26 (2), 1–175
- AusspecInternational. (2008). SpectralAnalysisGuideforMineral Exploration.
- Dalm, M., Buxton, M.W., van Ruitenbeek, Frank J.A., Voncken, J.H., 2014. Application of near-infrared spectroscopy to sensor-based sorting of a porphyry copper ore. Miner. Eng. 58, 7–16.

- Dalm, M., Buxton, M., van Ruitenbeek, F., 2017. Discriminating ore and waste in a porphyry copper deposit using short-wavelength infrared (SWIR) hyperspectral imagery. *Miner. Eng.* 105, 10–18.
- Ducart, Diego 2016, Procesamiento e Interpretación de Datos de Espectroscopia de Reflectancia en la Región del Visible e Infrarrojo de Ondas Cortas (VNIR-SWIR), Curso de Postgrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias.
- Echeverri, B., 2006, Genesis and thermal history of gold mineralization in the Remedios-Segovia-Zaragoza Mining District of Northern Colombia: M.Sc. thesis, Shimane, Japan, Shimane University, 88 p.
- Echeverry, B., 2008, Dataciones por huellas de fisión e historia térmica de las rocas encajantes de la mineralización de oro en el Distrito Minero de Segovia-Remedios en el norte de Colombia: Boletín de Ciencias de la Tierra (Universidad Nacional de Colombia – Medellín), v. 22, p. 135-136.
- Echeverry, S., Cardenas, A.F., Ordoñez, O., and Muñoz, O., 2009, Aspectos estructurales y relaciones de algunos sistemas vetiformes del Distrito Minero Segovia Remedios: Boletín de Ciencias de la Tierra, n. 26, p. 19-28
- Feininger, T., Barrero D., Castro, N., 1972.- Geología de Antioquia y Caldas (subzona JIB). *Ingeominas, Bol. Geol.* 20 (2): 17 3
- Han Jinsheng , Gaobin Chu, Huayong Chen, Pete Hollings, Siquan Sun, Mi Chen, Hydrothermal alteration and short wavelength infrared (SWIR) characteristics of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, Yangtze craton, Eastern China, *Ore Geology Reviews*, Volume 101, 2018, Pages 143-164, ISSN 0169-1368 <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.018>.
- Harraden, C.L., McNulty, B.A., Gregory, M.J., Lang, J.R., 2013. Shortwave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Iliamna, Alaska. *Econ. Geol.* 108, 483–494.
- Hecker et al. (2013) Thermal Infrared Spectroscopy in the Laboratory and Field in Support of Land Surface Remote Sensing.
- Hedenquist, J.W., Izawa, E., Arribas, A., Jr., and White, N.C., 1996, Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration: Poster and booklet, *Resource Geology Special Publication* 1, 17 p.
- Herrmann, W., Blake, M., Doyle, M., Huston, D., Kamprad, J., Merry, N., Pontual, S., 2001. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated

- with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Econ. Geol.* 96, 939–955.
- INFORME EJECUTIVO 2020, Modelamiento metalogénico y caracterización geo-metalúrgica como instrumentos predictivos para la exploración y los procesos de beneficio en las áreas de influencia de Gran Colombia Gold - Distrito minero Segovia-Remedios, Antioquia, Grupo de Caracterización Tecnológica de Minerales, Dept. de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., marzo de 2021
  - Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes; A tectono- magmatic approach, Universidad de Barcelona.
  - Ordóñez, O., Valencia, M., Álvarez, M. J., Sánchez, L. H., Castaño, L., & Echeverri, B. (2005). Metalogenia y evolución tectonomagmatica del distrito minero Segovia-Remedios. X Congreso Colombiano de Geología, October 2014.
  - Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F., 1988. "Terranes and continental accretion in the Colombian Andes". *Episodes*, 11, No. 3, p. 189-193.
  - Reyes, A. 1990. "Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment!", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43 (1990) 279-309.
  - Rusell, 1959, Sequence of Fissures Frontino Area: Internal report for Frontino Gold Mines, Segovia, 2 p.
  - SPECTRAL INTERNATIONAL INC (2005), Espectroscopia de reflectancia aplicada, Versión 4.1.
  - Steiner A. 1968. "CLAY MINERALS IN HYDROTHERMALLY ALTERED ROCKS AT WAIRAKEI, NEW ZEALAND\*", *Clays and Clay Minerals*, 1968, Vol. 16, pp. 193-213.
  - Xu, C., Chen, H.Y., Noel, W., Qi, J.P., Zhang, L.J., Zhang, S., Duan, G., 2017. Alteration and mineralization of Xinan Cu-Mo ore deposit in Zijinshan orefield, Fujian Province, and application of short wavelength infra-red technology (SWIR) to exploration. *Miner. Deposits* 36, 1013–1038 in Chinese with English abstract.
  - Xu, C., Chen, H.Y., Noel, W., Qi, J.P., Zhang, L.J., Zhang, S., Duan, G., 2017. Alteration and mineralization of Xinan Cu-Mo ore deposit in Zijinshan orefield, Fujian Province, and application of short wavelength infra-red techno
  - Yang, Z.M., Hou, Z.Q., Yang, Z.S., Qu, H.C., Li, Z.Q., Liu, Y.F., 2012. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: a case study of Niancun ore district, Tibet. *Miner. Deposit* 31, 699–717 in Chinese with English abstract.