

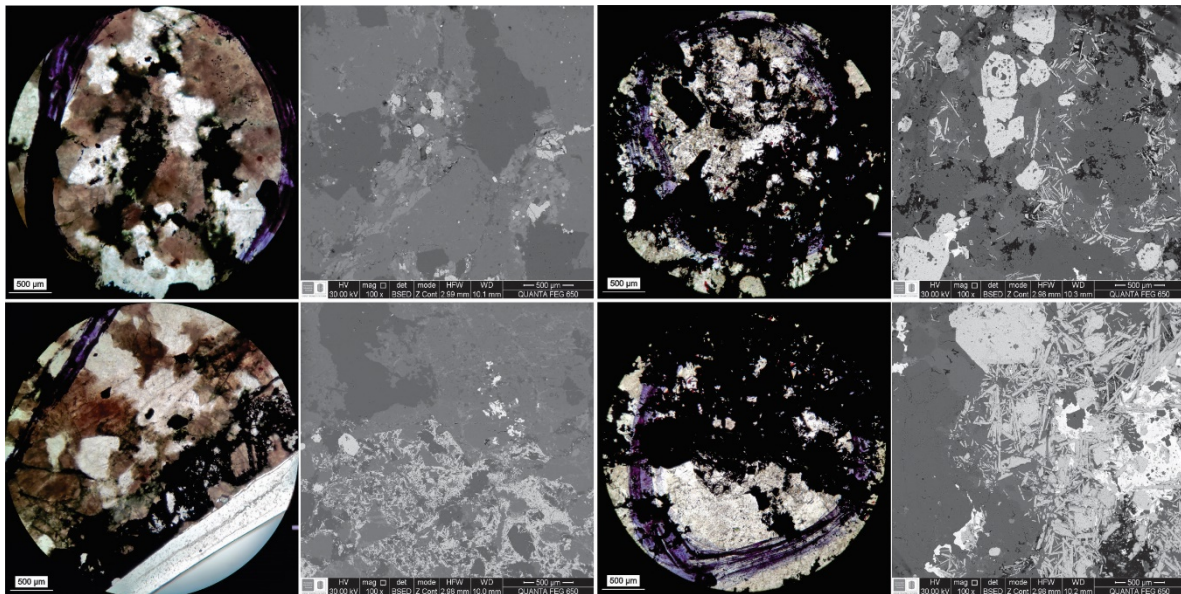
## Microscopia electrónica de barrido (SEM)

En adición a los análisis de microscopia óptica de luz transmitida y reflejada, se sometieron las secciones delgadas pulidas a microscopia electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). Los espectrogramas arrojan un pico de carbono debido a que previamente las secciones se cubrieron con dicho material para favorecer la conductividad de la superficie.

A continuación, se muestran las microfotografías de electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés) y microscopia óptica, para las cuatro zonas analizadas.

**Figura 1.**

*Microfotografías de luz transmitida y BSE de las zonas analizadas mediante SEM*



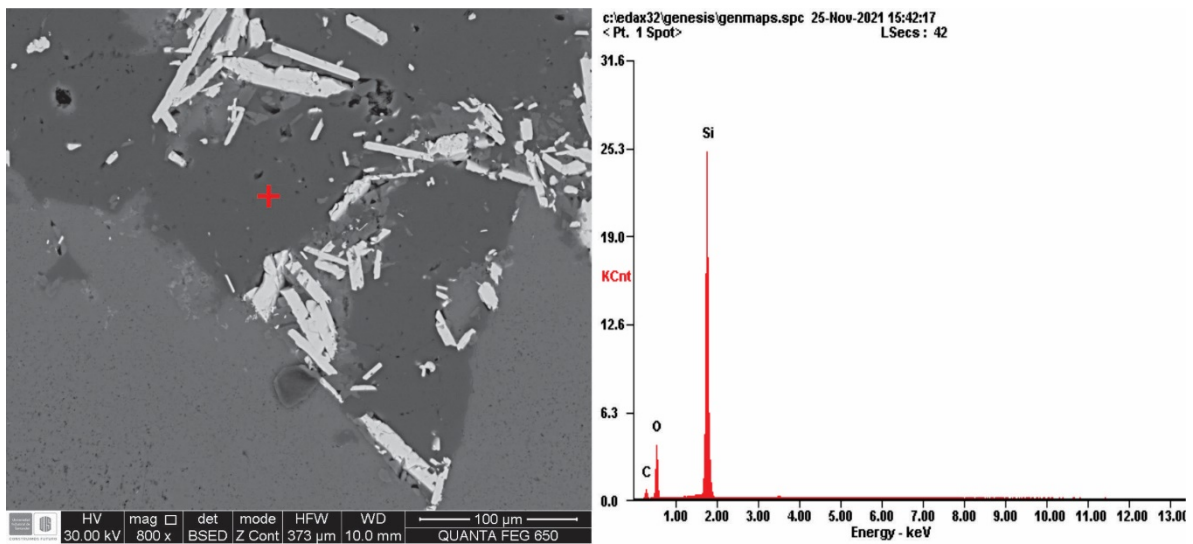
Los minerales identificados fueron cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, pirita, calcopirita, calcosina, hematita, hematita especular, magnetita, clorita, sericita, titanita y epidota. Las cruces rojas en las imágenes BSE corresponden a los puntos analizados.

- *Cuarzo*

Los cristales tienen formas anhedrales, comúnmente relleno de espacios con terminaciones angulares. Esto es producto de procesos de recristalización de cuarzo magmático y formación de cuarzo hidrotermal, como el que se observa acompañado de especularita. En la microfotografía BSE tiene color gris oscuro y en su respectivo espectro el pico distintivo de sílice.

**Figura 1.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS del cuarzo*



**Tabla 1.**

*Composición elemental semicuantitativa del cuarzo*

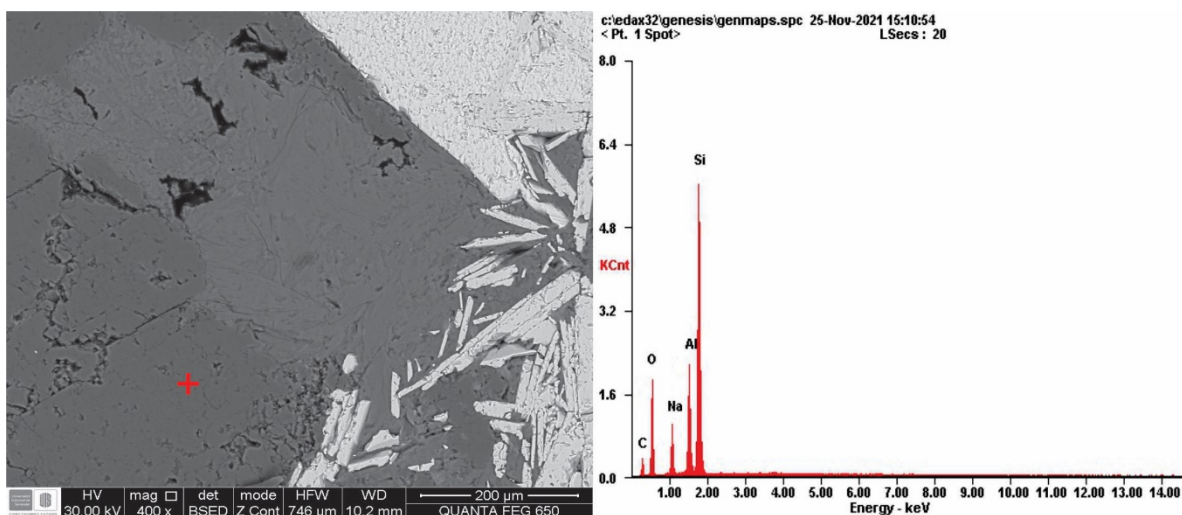
Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	17.97
<i>O</i>	34.64
<i>Si</i>	47.39

- *Plagioclasa*

Los cristales son euhedrales a subhedrales prismáticos de color gris oscuro. En el espectro EDS se obtuvo un pico elevado de Si y dos relativamente altos de Al y Na. Estos picos evidencian composición química de la variedad albita, correspondiente al extremo final de la serie continua de cristalización de la plagioclasa. En contraste con lo anterior, por medio del método de Michel-Levy y espaciamiento de maclas, en microscopia de luz transmitida se observaron plagioclasas con componente cálcico. Esto indica la existencia de al menos dos tipos de plagioclasas, formadas por procesos magmáticos e hidrotermales.

**Figura 2.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la plagioclasa*



**Tabla 2.**

*Composición elemental semicuantitativa de la plagioclasa*

Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	17.56
<i>O</i>	33.12
<i>Na</i>	07.14

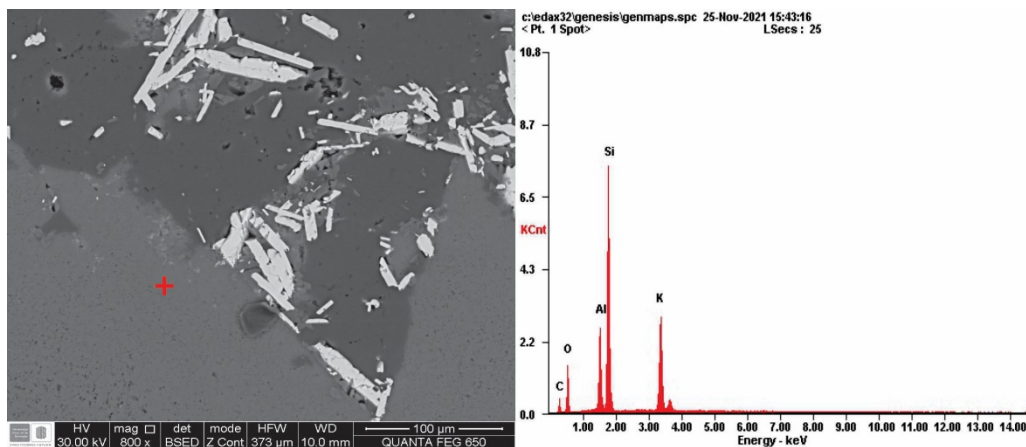
<i>Al</i>	10.30
<i>Si</i>	31.87

- *Feldespato potásico*

Los cristales son anhedrales de color gris claro y normalmente tienen intercrecimientos con cuarzo y plagioclasa. En algunos casos pueden englobar en su totalidad estos minerales e incorporarlos como inclusiones. En la zona inferior de la microfotografía BSE se observa microporosidad (ver Anexo C). El espectro EDS tiene los picos característicos de Si, Al y K. Pese a que la roca está afectada por alteración hidrotermal potásica, el cristal analizado no arrojó anomalías de bario.

**Figura 3.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS del feldespato potásico*



**Tabla 3.**

*Composición elemental semicuantitativa del feldespato potásico*

Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	16.47
<i>O</i>	28.24

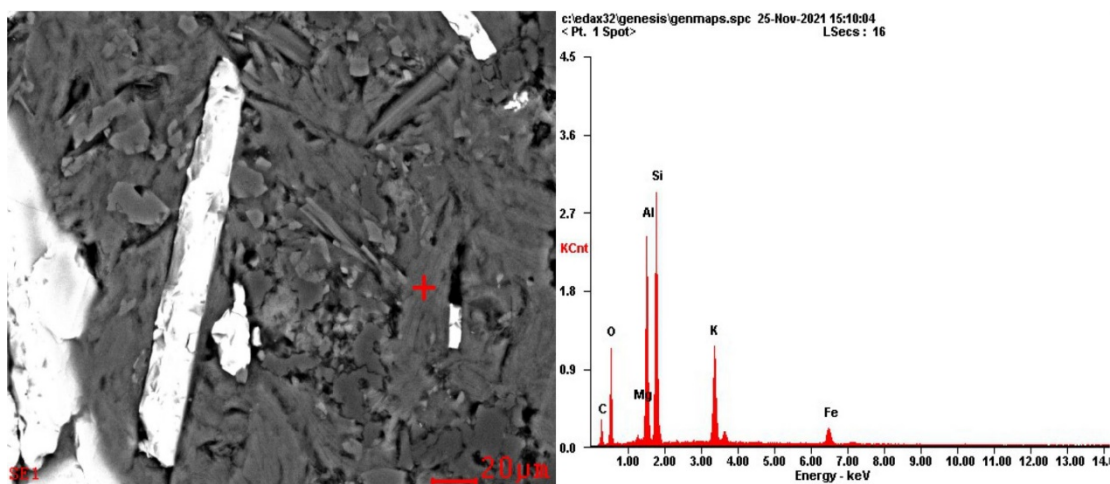
<i>Al</i>	09.94
<i>Si</i>	31.58
<i>K</i>	13.78

- *Sericita*

En forma de agregados microcristalinos, como alteración de feldespatos y rellenando espacios acompañada de especularita y clorita. Según lo observado en los espectros EDS, tiene un componente considerable de Fe y Mg, y cantidades menores de K.

**Figura 4.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la sericita*



**Tabla 4.**

*Composición elemental semicuantitativa de la sericita*

Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	18.87
<i>O</i>	30.35
<i>Mg</i>	00.82
<i>Al</i>	15.48

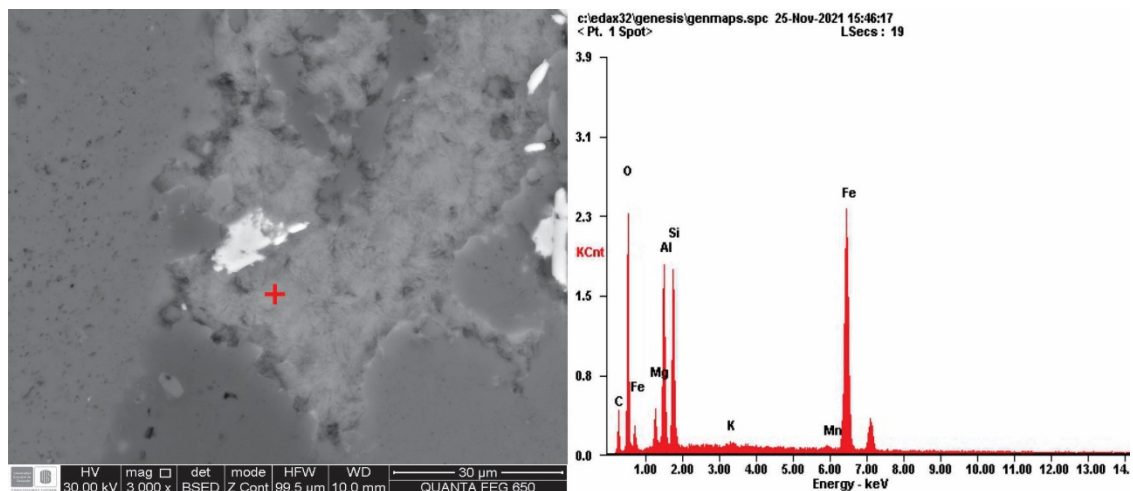
<i>Si</i>	23.11
<i>K</i>	08.20
<i>Fe</i>	03.18

- *Clorita*

Producto de alteración hidrotermal en minerales máficos, como agregados muy finos, los cuales pueden tener hábito radial y presentar interestratificación con sericita. El espectro EDS indica picos altos de Fe, Si, Al y Mg, correspondientes a clorita variedad chamosita, enriquecida en Fe con porcentaje en peso cercano al 25%. Además, se evidencian picos puntuales de Mn y K, que indican impurezas de dichos elementos, esto se debe a los espacios existentes entre las interestratificaciones que conforman su estructura cristalina. La depositación de dichas impurezas es generada por procesos de reemplazamiento mineral o intercambio catiónico, como es el caso del  $Mn^{2+}$  y  $K^{+}$  (Bourdelle, 2021).

**Figura 5.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la clorita*



**Tabla 5.**

*Composición elemental semicuantitativa de la clorita*

<b>Elemento</b>	<b>Porcentaje en peso (%wt)</b>
<i>C</i>	15.46
<i>O</i>	32.09
<i>Mg</i>	03.12
<i>Al</i>	11.79
<i>Si</i>	11.98
<i>K</i>	00.27
<i>Mn</i>	00.46
<i>Fe</i>	24.83

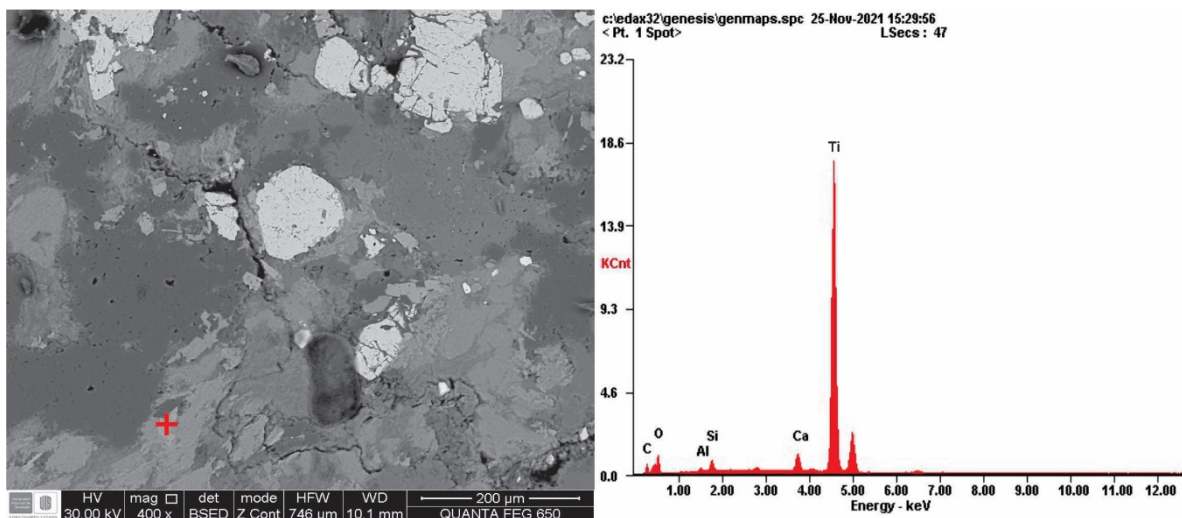
- *Titanita*

Incluida en biotitas y anfíboles, comúnmente a lo largo de planos de clivaje, como subproducto de alteración clorítica en dichos minerales. Los porcentajes semicuantitativos de los elementos químicos que la componen no se pudieron obtener, debido a fallas en el detector del microscopio a la hora de cuantificar el titanio. Sin embargo, los picos obtenidos en el EDS indican abundancia de Ti con cantidades subordinadas de Ca, Si y Al. Debido a procesos metasomáticos por hidrotermalismo, las concentraciones de los elementos químicos que componen la titanita pueden variar con respecto a sus concentraciones modales ideales, como en este caso sucede con el Ca (Pandit, 2018).

**Figura 6.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la titanita*



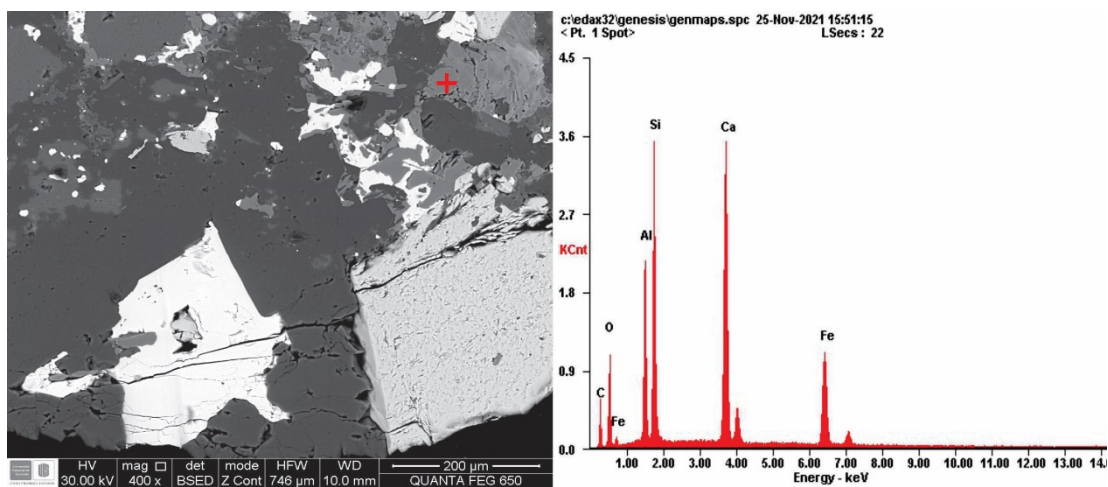


### - Epidota

Asociada a la alteración sericita-clorita en plagioclasas con componente cálcico y minerales máficos. Tiene forma anhedral y puede presentar intercrecimientos acompañados de bordes sinuoso con calcopirita. El espectro EDS arroja los picos característicos de Si, Ca, Al y Fe. Dependiendo de la disponibilidad de hierro en los minerales alterados, cristaliza la variedad clinozoisita.

**Figura 7.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la epidota*



**Tabla 7.**

*Composición elemental semicuantitativa de la epidota*



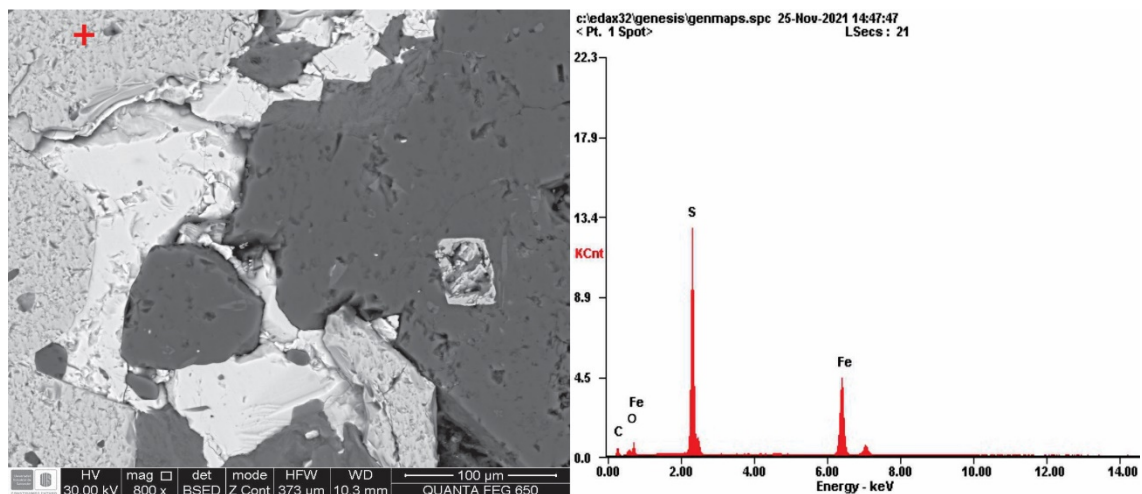
Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	18.26
<i>O</i>	24.30
<i>Al</i>	11.18
<i>Si</i>	18.35
<i>Ca</i>	16.65
<i>Fe</i>	11.26

- *Pirita*

Se observan imperfecciones en la superficie de los cristales, que denotan una porosidad secundaria aparente. Estas se generan en el proceso de preparación de la sección delgada, en lo cual influye la dureza elevada del mineral. Por lo general, se encuentra en hábito cubico con tamaños variables. Está asociada con calcopirita por medio de contactos irregulares sinuosos. El espectro EDS obtenido es el característico.

**Figura 8.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la pirita*



**Tabla 8.**

*Composición elemental semicuantitativa de la pirita*

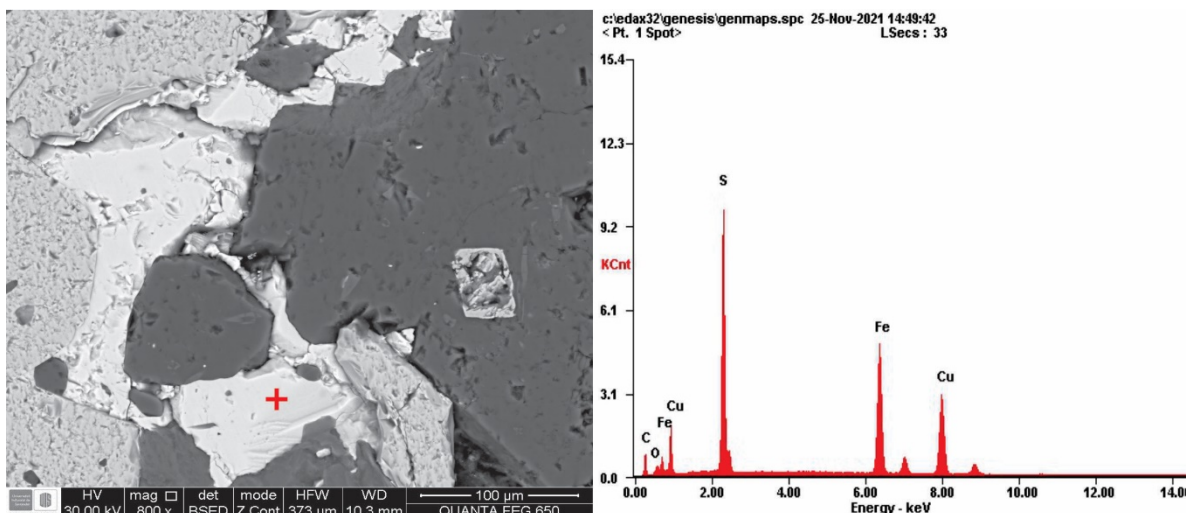
Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	14.88
<i>O</i>	25.49
<i>S</i>	30.51
<i>Fe</i>	29.12

#### - *Calcopirita*

Es anhedral y tiene habito intersticial con desarrollo de terminaciones en ángulo agudo. El espectro EDS es muy similar al de la pirita, pero en este caso además del Fe y S, presenta un pico adicional correspondiente a 27.28 porcentaje en peso de Cu.

**Figura 9.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la calcopirita*



**Tabla 9.**

*Composición elemental semicuantitativa de la calcopirita*

Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	23.20
<i>O</i>	01.40
<i>S</i>	23.97
<i>Fe</i>	24.14
<i>Cu</i>	27.28

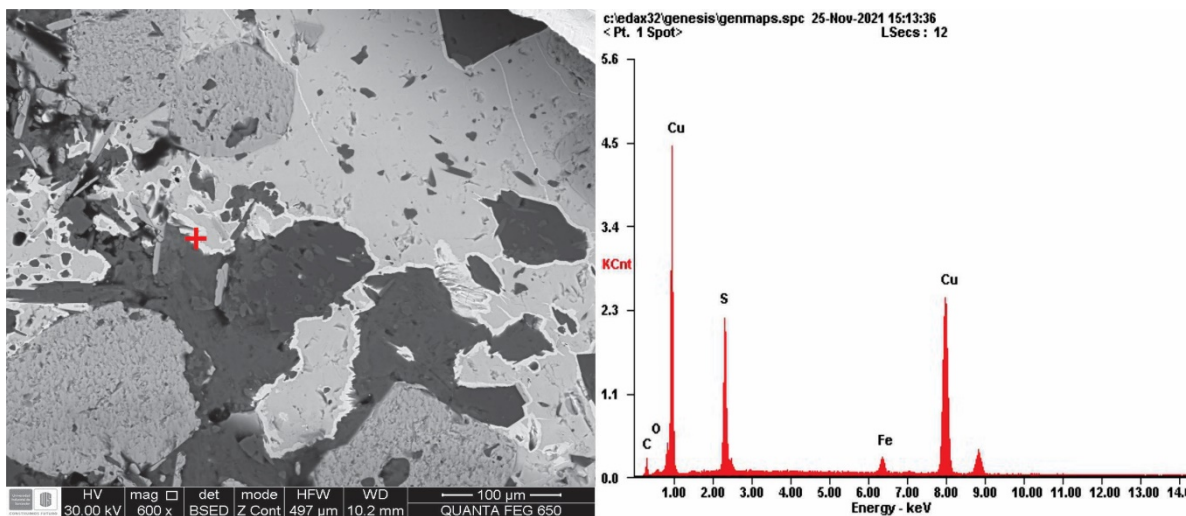
- *Calcosina*

Fue identificada durante los barridos realizados en el microscopio electrónico, ya que su tamaño no permitió observarla a escala mesoscópica. En las imágenes BSE tiene color gris claro y está asociada a calcopirita, en los bordes de cristales y a través de microfracturas. El espectro EDS es el característico con sus respectivos picos de Cu, S y Fe. Por lo general su origen es secundario, producto de la oxidación y lixiviación de la calcopirita. Se forma a temperaturas inferiores de 105 °C en zonas de cementación, por lo que cristaliza en agregados

de cristales muy finos pobremente interestratificados, los cuales reciben el nombre de calcosina acerada (MinMicro, 2023).

**Figura 10.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la calcosina*



**Tabla 10.**

*Composición elemental semicuantitativa de la calcosina*

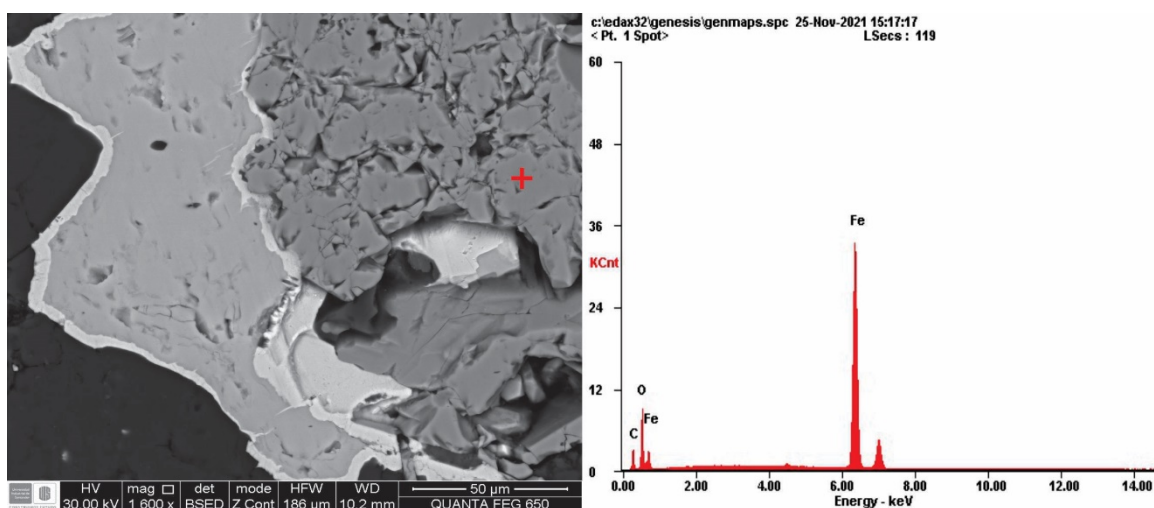
Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	16.50
<i>O</i>	01.54
<i>S</i>	17.31
<i>Fe</i>	02.52
<i>Cu</i>	62.13

- *Magnetita*

Se encuentra en venillas y vetas hidrotermales. El espectro EDS es el característico, similar al de la hematita, pero en este caso los picos de oxígeno y hierro son ligeramente menores y mayores, respectivamente. Los puntos clave para diferenciarla de la hematita son el hábito, la concentración de oxígeno y hierro, el color de las microfotografías BSE (gris oscuro para la magnetita) y las propiedades magnéticas.

**Figura 11.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de la magnetita*



**Tabla 11.**

*Composición elemental semicuantitativa de la magnetita*

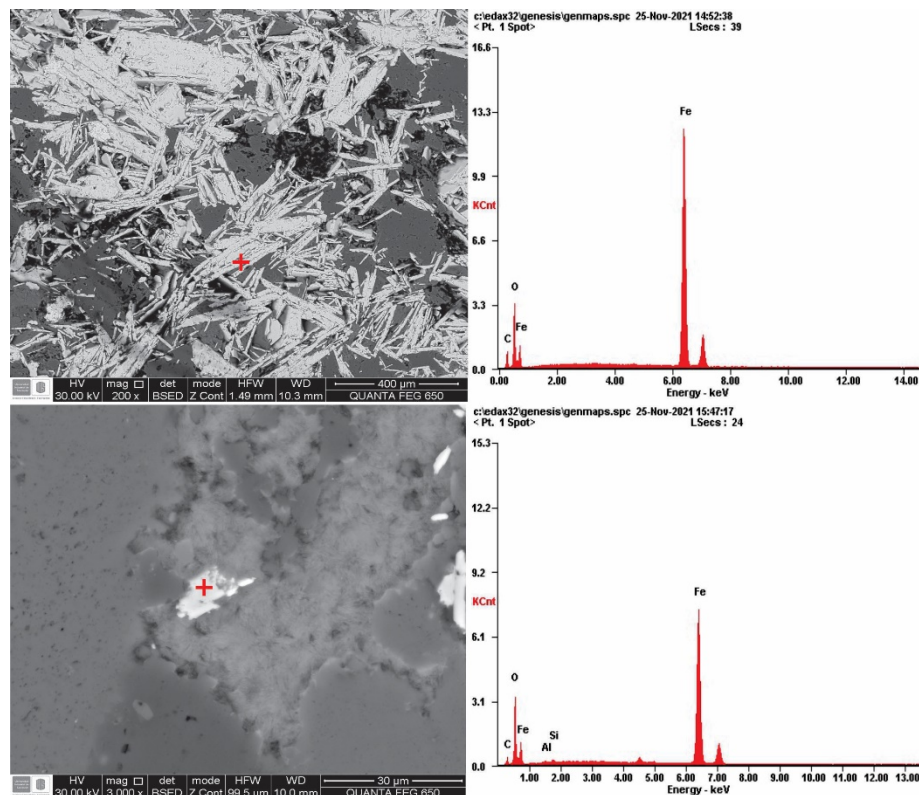
Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	16.33
<i>O</i>	19.39
<i>Fe</i>	64.28

- *Hematita*

Se encontraron dos variedades de hematita diferenciadas entre sí por sus hábitos primario alargado y masivo. La hematita prismática alargada es la más abundante y corresponde a la variedad especularita. Tiene patrones de flujo y es producto de relleno hidrotermal en zonas de fractura. El espectro EDS es el característico, con sus respectivos picos de Fe y O. La hematita masiva es resultado de alteración hidrotermal clorítica en minerales máficos, de modo que se encuentra rodeada por agregados muy finos de clorita. La forma puede ser alargada siguiendo los planos de clivaje del mineral alterado, como es el caso de la biotita. Para este tipo de hematita el espectro EDS evidencia impurezas de Al y Si, debido al intercambio catiónico y disponibilidad de elementos químicos durante los procesos metasomáticos.

**Figura 12.**

*Microfotografía BSE y espectro EDS de hematita masiva (inferior) y variedad especularita (superior)*



**Tabla 12.**



Composición elemental semicuantitativa de hematita masiva (izquierda) y variedad especularita (derecha)

Elemento	Porcentaje en peso (%wt)	Elemento	Porcentaje en peso (%wt)
<i>C</i>	08.19	<i>C</i>	13.14
<i>O</i>	26.92	<i>O</i>	19.45
<i>Al</i>	00.97	<i>Fe</i>	67.40
<i>Si</i>	01.12		
<i>Fe</i>	62.80		