

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**Contribución a la Caracterización Petrominerográfica-Textural-
Geoquímica de las Unidades Litológicas Mineralizadas del
Pórfido de Cobre Cuajone (Sur del Perú) y su posible influencia
en el Work Index y la Recuperación Metalúrgica**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Geólogo**, que presenta el bachiller:

Carlos Alonso Salcedo Núñez

Asesor: Dr. Jean François Victor Vallance

Lima, abril de 2021

A mi madre Norma Rocío y a mi padre Carlos
Martín. Sin su aliento y constante motivación,
esta tesis se habría completado muchos años
después. Gracias por su infinito amor y esfuerzo
en educarme.



Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer al Dr. Jean Vallance, por haberle dedicado parte de su valioso tiempo a corregir esta tesis y orientarme en ella desde los inicios. Sus acertados comentarios y guía me motivaron a seguir trabajando para conseguir un resultado de calidad.

A la División de Geología de Campo de la Mina Cuajone. A don Oscar Concha por hacer las gestiones para permitirme realizar esta tesis, permitir la toma de muestras y publicación de la información. A los ingenieros Berthing Herrera, José Salas y Manuel Vega por sus enseñanzas día y a día. Y en especial, al ingeniero Eder Pauca por su gran amistad, y por haberme ayudado en la obtención de muestras e información necesaria para la tesis; y a la ingeniera Nancy Salcedo por su apoyo con las imágenes del modelo de la mina, consejos y constante apoyo con la tesis.

Un reconocimiento especial, al laboratorio BizaLab, por haberme ofrecido el realizar los análisis para esta tesis en sus instalaciones con tanta generosidad y cariño. A Erika Gabriel por sus lecciones de gestión. A Yezeña Huáypar por su apoyo en el procesamiento de los datos de la Difracción de Rayos X, a Karina Ligarda por su apoyo con la preparación de las muestras, análisis de Fluorescencia de Rayos X y buenos consejos. A Diego Benites y Daniel Plascencia por sus lecciones de microscopía óptica y por siempre sorprenderme con algún nuevo mineral, así como sus comentarios y apoyo con las secciones de la tesis. A Alejandro Vargas por sus lecciones de Metalurgia.

Mi gratitud, a la Dra. Silvia Rosas por haberme motivado a estudiar ingeniería geológica y sus consejos a lo largo de la carrera; al profesor Manuel Shishido por sus consejos y monitoreo durante la conminución de las muestras; al Dr. Edmundo Alfaro por las lecciones que me dio sobre concentración de minerales y metalurgia, así como contestar mis mensajes de WhatsApp y llamadas para resolver mis preguntas sobre diversos conceptos y procesos; al Sr. Farley Munares del Laboratorio de Mecánica de Rocas de la PUCP, por su apoyo en la preparación de las secciones pulidas y corte diamantino de las muestras; al Sr. José Quiroz, por su apoyo en el proceso de poder quedarme en el laboratorio de microscopía hasta el cierre de la universidad por la noche.

A First Quantum Minerals, por haberme apoyado desde un inicio en la realización de esta tesis, brindándome el tiempo necesario y la motivación para poder culminarla, así como por su constante motivación en realizar el trabajo con excelencia. Gracias Markku Lappalainen, Sebastian Benavides, Rafael Roberto, Misael Robles, Chris Manners, Jackline Lumamba, James Mwale y Rob Kaemba.

Finalmente, a mis padres por su constante motivación en acabar este proyecto y por haberme dado el regalo de su amor y la educación. ¡Gracias muchachos!

Abstract

The Cuajone porphyry copper-molybdenum deposit is located in the South-West of Peru, in the province of Moquegua (Torata district). It is operated by the company Southern Peru Copper Corporation and began its operations in 1976. The deposit belongs to the Metallogenetic Belt number XIII of Peru (Acosta et al., 2011). The mine has reserves of 1,883,081 Mt @ 0.503% Cu and 0.018% Mo (Cuajone Mine Geology, 2018). The operation has a plant capacity of approximately 100 kt/day of mineralized rock. The average metallurgical recovery of copper varies by lithological unit from 81.59% in the IA FIL PTK (IA porphyry with potassic-phyllic alteration) to 85.7% in the LP QS (LP porphyry with phyllic-argillic alteration). The recovery parameter is very important economically because if it was greater in 1% just in the BA PTK unit with a tonnage of 40 kt processed per day in the plant (usual for this subunit), at a copper price of 5,904.00 USD / t (average price for the last 5 years), 4.28 million dollars (USD) of extra profit will be obtained per year (calculations in section 9.1 of Annexes). This thesis aims to evaluate if the texture and mineralogy of gangue and chalcopyrite are affecting the metallurgical recovery and the Work index.

The thesis makes a bibliographic review not only of the regional and local geological framework but also of the mining and metallurgy divisions. The methodology consists of: sampling; optical microscopy; X-Ray Diffraction - SWIR (Terraspec) and geochemistry (XRF, ICP-AES-MS). The discussion section deals with the following topics: Total Petromineragraphic Characterization and correlation of macroscopic-microscopic characteristics; mineralogy of fine-grained clays and phyllosilicates; maximum and average chalcopyrite grain sizes; types of chalcopyrite-opaque mineral and chalcopyrite-gangue mineral intergrowth textures; Rock Texture-Work index relationship; and latter a geometallurgical approach analysis.

Finally, the present work generates a conclusion regarding the petrological classification based on geochemistry; a hypothesis of 3 factors that control the difference in recovery between the lithological units; and a recommendation is given on how to optimize these 3 factors to improve recovery and therefore economical revenue.

Resumen

El yacimiento de pórfido de cobre-molibdeno Cuajone está localizado al suroeste del Perú (provincia de Moquegua), es explotado por la empresa Southern Peru Copper Corporation e inició sus operaciones el año 1976. La mina tiene reservas de 1,883.081 Mt @ 0.503 % de Cu y 0.018 % de Mo (Geología de Mina Cuajone, 2019). La operación tiene una capacidad de procesamiento de aproximadamente 100 kt/día de roca mineralizada y cuenta con 3 unidades mineralizadas principales (códigos de mina - pórfidos BA, LP y BLP). La recuperación metalúrgica promedio de cobre varía en sus extremos de 81.59% en la unidad IA FIL PTK (pórfido BA con alteración filica potásica) a 85.7% en la unidad LP QS (pórfido LP con alteración filica-argílica).

El parámetro de recuperación es económicamente muy importante ya que, si se tuviera una recuperación mayor en 1% en la unidad BA PTK (pórfido BA con alteración potásica), con un tonelaje de 40 kt procesadas al día en planta (usual para esta unidad), a un precio del cobre de 5,904.00 USD/t (promedio del precio para los últimos 5 años), se obtendría una ganancia extra de 4.28 millones de dólares (USD) al año (cálculos en la sección 10.1 de Anexos), efecto que se podría escalar si pudiera darse en todas las unidades, por lo que es importante la investigación de este tema. Este trabajo tiene como primer objetivo ser un piloto de estudio geometalúrgico y evaluar si la textura y mineralogía de ganga y calcopirita podrían estar influyendo en la recuperación metalúrgica y el Work Index de los pórfidos de Cuajone; y como segundo objetivo dar una clasificación petrológica no basada en microscopía debido a la intensa alteración de los pórfidos de Cuajone. Para cumplir estos objetivos se tomaron 9 muestras estratégicamente seleccionadas de los pórfidos mineralizados y se los caracterizó usando microscopía óptica; difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja de reflectancia y análisis químicos (XRF, ICP-AES-MS). Luego se buscó una correlación entre textura y mineralogía de las muestras, con los datos de work index y recuperación proporcionados por Cuajone (datos promedio de cada unidad). Este trabajo profundiza en: caracterización petromineralógica; mineralogía de arcillas y micas; tamaños de granos de calcopirita; tipos de intercrecimientos de calcopirita-minerales opacos y calcopirita-minerales transparentes; relación textura de roca-Work Index y análisis con enfoque geometalúrgico.

La primera conclusión es la identificación de 3 factores que podrían controlar la diferencia de recuperación y Work-Index entre las unidades, estos 3 factores deben ser verificados por un estudio a gran escala. La segunda conclusión, es la clasificación petrológica en base a composición química y textura de las muestras analizadas. Finalmente, en base a este piloto, se dan recomendaciones para un posible estudio a gran escala que podría llevar a aumentar el cobre total obtenido en la mina. Se sugiere enfocarse primero en mejorar la recuperación de las unidades ricas en arcillas y luego en tratar de optimizar los grados de liberación de cobre de cada unidad de acuerdo a su Work index.

Índice

Agradecimientos	iii
Abstract	iv
Resumen	v
Índice	vi
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas	xiii
1. Introducción	1
2. Metodología	3
3. Marco Geológico	8
3.1. Geología Regional.....	8
3.1.1. Estratigrafía y rocas intrusivas	8
3.1.2. Tectónica	10
3.2. Geología Local	11
3.2.1. Litologías	11
3.2.2. Contexto estructural.....	17
3.2.3. Sistema hidrotermal.....	17
4. Proceso productivo.....	18
4.1. Minería	18
4.2. Concentradora Cuajone-Metalurgia	18
5. Resultados	20
5.1. Microscopía óptica y difracción de rayos X- espectroscopía infrarroja de reflectancia.....	20
5.1.1. Unidad Andesita Basáltica-BA. Muestra CS1 (Tomada de la Subunidad BA FILPTK)	20
5.1.2. Unidad Andesita Basáltica-BA. Muestra CS2 (Tomada de la Subunidad BA PTK)	27
5.1.3. Unidad Andesita Basáltica-BA. Muestra CS3 (Tomada de la Subunidad IA-FILPTK)	33
5.1.4. Unidad Latita Porfirítica-LP. Muestra CS4 (Tomada de la Subunidad LP PTK) ..	39
5.1.5. Unidad Latita Porfirítica-LP. Muestra CS5 (Tomada de la Subunidad LPQS).....	45
5.1.6. Unidad Latita Porfirítica-LP. Muestra CS6 (Tomada de la Subunidad BXLP)	51
5.1.7. Unidad Latita Porfirítica2-BLP. Muestra CS8 (Tomada de la Subunidad BLPFRES)	57
5.1.8. Unidad Latita Porfirítica2-BLP. Muestra CS9 (Tomada de la Subunidad BLPFRES)	62
5.1.9. Pórfido Blanco. Muestra CS7	68
5.2. Análisis Geoquímico	74
6. Discusión.....	79
6.1. Discusión de resultados	79
6.1.1. Caracterización Petromineralógica usando microscopía, DRX- espectroscopía infrarroja de reflectancia y geoquímica	79
6.1.2. Mineralogía de arcillas y micas	83
6.1.3. Tamaños máximo y promedio de granos de calcopirita	85

6.1.4. Tipos de intercrecimientos de calcopirita con los demás minerales.....	85
6.1.5. Relación textura de roca-work index.....	88
6.1.6. Análisis con enfoque geometalúrgico.....	91
6.2. Recomendaciones para mejorar la eficiencia de la metodología	96
7. Conclusiones	97
8. Recomendaciones	98
9. Bibliografía	99
10. Anexos	102
10.1. Definiciones e información complementaria	102
10.2. Resultados geoquímica.....	104
10.3. Clasificación de intercrecimientos minerales de Canchaya y Cardozo (1977), basado en Amstutz (1961).....	106

Índice de figuras

<i>Figura 1: Ubicación de las muestras con la imagen satelital de fondo. Coordenadas en WGS84, 19S</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2: A: Maquinaria en frente de minado durante receso, momentos en los cuales se tomaron las muestras. B: Afloramiento ubicado en talud del tajo abierto, en la zona mapeada como unidad BA. Cerca +del punto de muestreo CS2. C: Muestra de mano de la unidad BA se realiza el color negro de la biotita secundaria. D: Espectro obtenido con Terraspec, procesado en el TSG. En la esquina superior, equipo Terraspec y operador. E: Escaneos de sección pulida y delgada. F: Izquierda, separación granulométrica y filtrado al vacío (preparación para énfasis en arcillas). Esquina superior derecha, depositación de muestra para Difracción de Rayos X. Esquina inferior derecha, cascos de pastillas prensadas para Fluorescencia de Rayos X.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3: Ubicación de la Mina Cuajone, Toquepala y Quellaveco (Franja XIII de pórfidos de cobre del Paleoceno) en un mapa geológico regional a escala 1:100,000 del INGEMMET, modificado del mapa geológico del cuadrángulo de Moquegua-35u, por Bellido (1979b).</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4: Ubicación de la Mina Cuajone y sus fallas. Modificado del mapa geológico a escala 1:50,000 del cuadrángulo de Moquegua, 35u-I, por Martínez y Zuloaga (2000b).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5: Edades (Ma) de las unidades litológicas de Cuajone</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6: Arriba, mapa de las unidades litológicas de la mina Cuajone. Abajo, sección geológica de unidades litológicas. Modificados de Geología de Mina Cuajone (2019).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7: Arriba, block tridimensional mostrando los tipos de alteraciones en la Mina Cuajone en vista isométrica, Abajo, sección geológica con los tipos de alteraciones. Modificados de Geología de Mina Cuajone (2019).</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8: A: Vista panorámica de la mina, mirando al Nor-Oeste. Se observan las oficinas de la mina al oeste y volquetes mineros, perforadoras y palas eléctricas, trabajando en los distintos frentes de producción. B: Vista de fondo de mina, con un volquete minero en primer plano y a la distancia un tractor sobre orugas y una perforadora eléctrica de producción. C: Vista panorámica de la concentradora de Cuajone, resaltando los hangares y los espesadores de relaves. D: Molinos de bolas de marca Svedala de 20' x 33.5' de 9,000 HP c/u..</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9: Muestra de mano CS1 (Subunidad BA-FILPTK).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10: A: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados, de agregados de granos de clorita (clo) que han reemplazado fenocristales de plagioclasas. Se quiere enfatizar la importante abundancia relativa de este mineral. B: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de granos de feldespato potásico secundario (kfsII), en contacto con granos de clorita (clo) y cuarzo secundario (qzII) de una vetilla. C: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de grano de feldespato potásico secundario (kfs II), en contacto con opaco (OPs, probable pirita) y granos de clorita (clo). D: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de un relicto de fenocristal de plagioclasa (plag) totalmente alterado por clorita (clo) y cuarzo secundario (qzII). E: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un fenocristal de feldespato potásico (kfs I), en contacto con clorita pseudomorfa en granos de biotita secundaria. F: Vista al objetivo 10, en luz transmitida de granos de calcopirita y pirita (cpy&py), en contacto simple con granos de clorita (clo) y biotita (biot).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 11: A: Vista al objetivo 2.5, de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) ,<1,000 μm, relleno una vetilla. A la derecha de la foto se observan 2 granos anhedrales de calcopirita de 200 μm, diseminados en la gangas y acompañados de un grano subhedral de pirita (py). B: Vista al objetivo 10, a la izquierda se observa</i>	

un cristal anhedral de calcopirita (cpy) en contacto simple con magnetita. Arriba, cristal subhedral de pirita en contacto con magnetita y con una inclusión de este último mineral. Abajo, grano anhedral de magnetita con contacto simple a un grano subhedral de pirita. C: Vista al objetivo 20, de agregados anhedrales de calcopirita. Al centro de la foto se ubica una inclusión de un grano anhedral de rutilo. D: Vista al objetivo 20, de un grano subhedral de pirita con inclusiones de calcopirita y magnetita, en contacto simple con un grano subhedral de calcopirita y granos anhedrales de magnetita. Los granos anhedrales de magnetita presentan inclusiones de calcopirita. 25

Figura 12: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica y de etilenglicol..... 26

Figura 13: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Clorita Fe-Mg (Chl izquierda), paragonita (Pg), biotita (Bt), clorita Mg (Chl derecha), muscovita (Ms), sin espectro (Asp). 26

Figura 14: Muestra de mano CS2 (Subunidad BA-PTK)..... 28

Figura 15: A: Vista al objetivo 2.5, en modo polarizadores cruzados, de fenocristales euhedrales de plagioclasa (plag) alterados por biotita secundaria (biot II). La matriz se observa fuertemente alterada también por la biotización (biot II). En la esquina inferior izquierda se tiene silicificación (alteración fílica) como reemplazo de molde de un fenocristal (qzII) y en la parte superior se observa una vetilla de cuarzo con potencia <25 µm. Los ensambles demuestran la fuerte alteración potásica y sobreimposición propílica que ha tenido la muestra. B: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de grano de feldespato potásico secundario (kfs II), en contacto con opaco (OPs, probable pirita) y granos de clorita (clo). C: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de una vetilla de cuarzo con halo de sericita que corta una vetilla cuarzo sin halo de mayor potencia. D: Vista al objetivo 10, en luz polarizada de agregado de granos subhedrales de biotita secundaria totalmente cloritizados (clo), en contacto con minerales opacos (OPs). E: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados del molde de un fenocristal de plagioclasa (plag) totalmente alterado por clorita (clo) y montmorillonita (mnt). F: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de fenocristal de plagioclasa reemplazado por biotita secundaria (biot II) que está cloritizada notándose esto en los tonos amarillos que se sobreponen al color café de la biotita; cuarzo secundario reemplazando molde de plagioclasa (qzII) y montmorillonita (mnt, también alterando molde)..... 30

Figura 16: A: Vista al objetivo 2.5 de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) en contacto con agregados anhedrales de magnetita (mt). Abajo, se tienen dos granos subhedrales de pirita (py) y un grano anhedral de calcopirita, todos ellos diseminados en las gangas. B: Vista al objetivo 10, de agregados anhedrales de magnetita (mt) con reemplazamientos en bordes por granos anhedrales de calcopirita (cpy). A la izquierda se observan 3 granos anhedrales de calcopirita y un grano subhedral de pirita (py). C: Vista al objetivo 20, de un grano anhedral de pirita (py) con una inclusión de 100 µm de calcopirita (cpy) y otra inclusión de 25 µm, de pirrotita (po) y calcopirita asociadas. Grano de pirita en contacto con magnetita (mt). D: Vista al objetivo 10, calcopirita (cpy) sin asociación con otro mineral reflectante en vetillas. E: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de una vetilla, con granos de calcopirita y pirita (OPs) intercrecidos con clorita (clo) y feldespato potásico secundario (kfsII). En contacto con la matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y biotita secundaria. F: Vista al objetivo 10, en luz transmitida de una vetilla de cuarzo (qzII) y feldespato potásico secundario (kfsII). 31

Figura 17: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica y de etilenglicol..... 32

Figura 18: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Clorita Fe-Mg (Chl derecha), fengita (Ph), muscovita (Ms), clorita Fe (Chl izquierda), biotita (Bt), siderita (Sd). 32

Figura 19: Muestra de mano CS3 (Subunidad IA-FILPTK) 34

Figura 20: A: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de una vetilla de cuarzo secundario (qzII), en contacto con granos de calcita (cal) y de illita (illi). A los costados de la vetilla, se observa la matriz fina alterada por muscovita de grano fino (mus) y por cuarzo secundario. B: Vista al objetivo 20, en modo polarizadores cruzados de la matriz de la matriz fina. Se observa que esta ha sido intensamente silicificada, presentando abundantes granos de cuarzo secundario <25 µm (qzII), que están asociados a granos de illita (illi). A la derecha, relictos de biotita (biot), que ha sido alterada por montmorillonita (mnt). C: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de grano de relictos de un fenocristal de plagioclasa (plag), que ha sido reemplazado por muscovita (mus) y montmorillonita (mnt), así como por cuarzo secundario (qzII). También se observa un opaco (probable pirita o calcopirita), que está rodeado por muscovita y montmorillonita (mnt). D: Vista al objetivo 20, en luz polarizada de relictos de granos de biotita (biot) que han sido completamente alterados por montmorillonita (mnt). Asociados a granos de clorita (clo) e illita (illi). E: Vista al objetivo 10, en luz polarizada (luz transmitida) de granos de pirita y calcopirita (cpy&py) diseminados en una matriz de biotita secundaria fuertemente alterada por montmorillonita (mnt&biot). F: Vista al objetivo 10, en modo

<i>polarizadores cruzados (luz transmitida) de una vetilla con granos de calcopirita y pirita (cpy&py), intercrecidos con clorita (clo), calcita (cac) y sericita (mus).</i>	36
<i>Figura 21: A: Vista al objetivo 2.5, se observan granos anhedrales de calcopirita (cpy) con tamaño promedio de 300 μm, diseminados en las gangas y granos subhedrales de pirita (py) en la esquina inferior derecha; mayor abundancia de calcopirita sobre pirita. B: Vista al objetivo 2.5, de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) relleno vetillas. C: Vista al objetivo 20, de un agregado anhedral de calcopirita (cpy) con inclusiones de granos subhedrales de rutilo (rut). D: Vista al objetivo 10, de izquierda a derecha, cristales euhedrales prismáticos de molibdenita (mo); granos subhedrales de pirita (py) con inclusiones y reemplazamientos de calcopirita (cpy); y granos de calcopirita no asociados a otro mineral reflectivo, diseminados en las gangas. E: Vista al objetivo 10, grano anhedral de pirita (py) con inclusiones de calcopirita (cpy) y pirrotita (po). F: Vista al objetivo 20, de un grano anhedral de calcopirita (cpy) en contacto simple a su izquierda con un grano anhedral de rutilo (rut).</i>	37
<i>Figura 22: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica y de etilenglicol.</i>	38
<i>Figura 23: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Montmorillonita (Mnt), clorita Fe-Mg (Chl izquierda), mezcla illita-muscovítica (Msl), muscovita (Ms), fengita (Ph).</i>	38
<i>Figura 24: Muestra de mano CS4 (Subunidad LP-PTK)</i>	40
<i>Figura 25: A: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de fenocristal euhedral de biotita totalmente cloritizado (clo). B: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de fenocristal de plagioclasa totalmente alterado por muscovita de grano fino (plagymus). Al centro de la foto, vetilla de cuarzo secundario (qzII) y calcita (cal). A la derecha, fenocristal de biotita (biot) alterado por muscovita de grano fino (mus). C: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de fenocristal de plagioclasa (plag), que presenta alteración de muscovita de grano fino (sericita) en fracturas. Al centro de la foto, matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y muscovita (mus). A la derecha, fenocristal de biotita (biot) alterado por muscovita de grano fino (mus). D: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de fenocristal redondeado de cuarzo (qzI). A la izquierda, fenocristal de biotita (biot) alterado por montmorillonita. A la derecha de la foto, plagioclasa (plag) alterada por cuarzo secundario (qzII) y muscovita. E: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados fenocristales redondeados de cuarzo (qzI), que se encuentran aislados en la matriz fina. Por otro lado, se tienen los granos de cuarzo secundario (qzII), que se presentan asociados y en contacto a lo largo de sus bordes. F: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de vetilla de cuarzo secundaria (qzII), asociada con granos de minerales opacos (OPS), pirita. Se observan fenocristales de plagioclasa (plag), alterados por sericita, y a la derecha un relicto de un fenocristal de biotita (biot).</i>	42
<i>Figura 26: A: Vista al objetivo 2.5 de un cristal euhedral de pirita (py) y de agregados anhedrales de calcopirita (cpy), todos ellos relacionados a fracturas de la muestra. Esta fotomicrografía con el menor acercamiento permite visualizar la poca abundancia de calcopirita que hay en comparación con las demás secciones. B: Vista al objetivo 20, de un grano anhedral de pirita (py) con reemplazamientos en bordes por granos anhedrales de calcopirita (cpy). También se observan finas inclusiones de calcopirita en el grano anhedral de pirita. C: Vista al objetivo 20, de un grano anhedral de calcopirita (cpy) en contacto con un grano anhedral de rutilo (rut). D: Vista al objetivo 20, de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) con reemplazamientos en bordes por esfalerita (ef) que se observan cerca de la esquina inferior izquierda y de la esquina superior derecha. E: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un grano euhedral de biotita que ha sido cloritizado (clo), presenta cavidades en las zonas de clivaje que han sido rellenas por pirita y calcopirita (cpy&py) y calcita (cac). En la foto también se observa la matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y sericita y arcillas (mus&mnt). F: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos de pirita y calcopirita (cpy&py) diseminados en matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y sericita y arcillas (mus&mnt).</i>	43
<i>Figura 27: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica.</i> ...	44
<i>Figura 28: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): mezcla illita-muscovítica (Msl), muscovita (Ms), clorita Fe-Mg (Chl derecha), mezcla fengita-illita (PhI), clorita Fe (Chl izquierda).</i>	44
<i>Figura 29: Muestra de mano CS5 (Subunidad LP-QS)</i>	46
<i>Figura 30: A: Vista al objetivo 5, en luz polarizada, de molde de fenocristal de plagioclasa que ha sido completamente alterado por muscovita de grano fino (mus) y arcillas (montmorillonita, mnt complementando con la DRX). A la izquierda, relicto de fenocristal de biotita alterado por montmorillonita (mnt). B: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de minerales opacos (calcopirita y pirita), rodeados por una matriz alterada por muscovita (mus) y montmorillonita (mnt). Se observa la intensa alteración cuarzo-sericita que ha pasado la muestra. C: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de vetilla de cuarzo secundario (qz II) y vista de la matriz intensamente alterada por muscovita (mus). D: Vista al objetivo 5, en</i>	

modo polarizadores cruzados de fenocristal redondeado de cuarzo (qz I) de diámetro $\approx 2,000 \mu\text{m}$, rodeado por una matriz alterada por muscovita (mus) y cuarzo secundario (qz II). E: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos pirita y calcopirita (py & cpy) intercrecidos en morfología de vetilla con calcita (cac) y feldespato potásico secundario (kfsII). En la foto también se observa la matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y sericita y arcillas (mus&mnt). F: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos de pirita y calcopirita (py & cpy) diseminados en matriz alterada por cuarzo secundario sericita y arcillas (mus&mnt). También se observa una vetilla de cuarzo secundario (qzII). Se destaca la relación entre los opacos (calcopirita) y las arcillas (mnt). 48

Figura 31: A: Vista al objetivo 10, de granos anhedral de pirita (py) con inclusiones de calcopirita (cpy) $<100 \mu\text{m}$. Al centro de la foto también se observa un grano anhedral de calcopirita con reemplazamientos por digenita y calcosita (dgycc). B: Vista al objetivo 10, se observan granos anhedral de pirita (py). También se observa un grano anhedral de calcopirita con reemplazamientos de digenita y calcosita (dgycc). En la esquina inferior izquierda se tiene agregados anhedral de magnetita (mt). C: Vista al objetivo 20, de dos granos euhedral de molibdenita (mo) incrustados en granos anhedral de calcopirita (cpy). D: Vista al objetivo 20, de dos granos anhedral de calcopirita (cpy) diseminados en las gangas, con texturas de coronas (potencia de coronas $<50 \mu\text{m}$). Las coronas están formadas por digenita (dg) al contacto con la calcopirita y más distal calcosita (cc). E: Vista al objetivo 50, de agregados anhedral de rutilo (rut). Se muestra a la izquierda un contacto simple con un grano subhedral de calcopirita y a la derecha se observan finas inclusiones globulares. F: Vista al objetivo 50, de vetilla de calcopirita (cpy) con enriquecimiento supergénico. La calcopirita está totalmente reemplazada por bornita (bn), digenita (dg) y calcosita (cc). 49

Figura 32: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica... 50

Figura 33: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Montmorillonita (Mnt), mezclas illita-muscovita (Msl), mezcla fengita-illítica (Phl), clorita Fe-Mg (Chl izquierda), ankerita (Ank)..... 50

Figura 34: Muestra de mano CS6 (BX LP) Calcita (cac), calcopirita (cpy) 52

Figura 35: A: Vista al objetivo 5, en luz polarizada de clasto de la brecha, intensamente alterado por cuarzo secundario (qzII), sericita (mus) y feldespato potásico secundario (kfsII). B: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de clasto de la brecha, se observa biotita primaria que ha sido cloritizada (clo) y luego alterada por montmorillonita (mnt), también se observa que los minerales de la matriz han sido silicificados (qzII). C: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de cemento de brecha, con cristales calcita intercrecidos con granos de feldespato potásico secundario (kfsII) y cuarzo secundario (qzII). D: Vista al objetivo 5, en luz polarizada de fenocristal de cuarzo (qzI) rodeado por una matriz alterada a cuarzo (qzII) y feldespato potásico secundario (kfsII). 54

Figura 36: A: Vista al objetivo 2.5, de agregados anhedral de calcopirita (cpy) como relleno de cavidades que constituyen la fase dominante de esta sección. B: Vista al objetivo 10, de agregados anhedral de calcopirita (cpy) con inclusiones de granos euhedral y subhedral de rutilo (rut); granos anhedral de rutilo diseminados en las gangas; y grano anhedral de esfalerita (ef). C: Vista al objetivo 2.5 de agregados anhedral de calcopirita (cpy), con inclusiones de granos subhedral de esfalerita (ef). D: Vista al objetivo 50 de 4 cristales euhedral de molibdenita (mo), $<50 \mu\text{m}$. E: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de vetilla de calcopirita (cpy), clorita (clo) y feldespato potásico secundario (kfsII). A la derecha de la vetilla se tiene una zona donde predomina la clorita sobre el feldespato potásico. La vetilla está rodeada por cuarzo secundario (qzII). F: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos de calcopirita (cpy) intercrecidos con granos de calcita (cac) y sericita (mus). Estos granos de calcopirita están en contacto con cuarzo secundario (qzII) y zonas alteradas por sericita y arcillas (mus&mnt). 55

Figura 37: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica... 56

Figura 38: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Caolinita WX (Kln), montmorillonita (Mnt), caolinita PX (Kln), calcita (Cal), muscovita (Ms), siderita (Sd), fengita (Ph). 56

Figura 39: Muestra de mano CS8 (Subunidad BLP-FRES) 58

Figura 40: A: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un fenocristal de biotita que ha sido completamente sericitizado (mus), este fenocristal presenta también una zona reemplazada por cloritas (clo). Se encuentra rodeada por granos euhedral y anhedral de cuarzo primario (qz I), la matriz esta alterada por cuarzo secundario (qz II) y sericita. B: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un fenocristal de cuarzo primario (qzI) rodeado por la matriz alterada por cuarzo secundario y sericita (musyqzII), con cuarzo fino ígneo también en la matriz, pero indistinguible del cuarzo hidrotermal. C: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de una vetilla de granos de calcopirita y pirita (py & cpy), intercrecidos con granos de cuarzo secundario (qzII), y granos de clorita (clo). Rodeados por la matriz alterada por cuarzo y sericita (musyqzII). D: Vista al objetivo 5 en luz reflejada de una vetilla con granos

de pirita (py) y granos de magnetita (mt). Se observa también un grano de calcopirita (cpy), relleno de una porosidad en la pirita.....	59
Figura 41: A: Vista al objetivo 20 en luz reflejada, de una vetilla de pirita (py), presenta algunos de sus bordes reemplazados por calcopirita (cpy). Presencia de rutilo (rut). B: Vista al objetivo 10, en luz reflejada de una vetilla de pirita (py). Agregados anhedrales de calcopirita (cpy), están en contacto simple en los bordes de pirita y relleno de fracturas. C: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida). Se observan granos subhedrales de calcopirita y pirita (cpy&py), en contacto con granos de clorita (clo) y de sericita (mus). La matriz está fuertemente alterada solo por sericita (mus) en ciertas zonas y en otras por sericita y arcillas (mus&mnt). D: Vista al objetivo 5, en luz transmitida de la misma región de la fotomicrografía C. Se observan los mismos elementos que en la descripción C. Se pretende destacar la relación de los minerales opacos con la clorita (clo) y las diferentes zonas alteradas de la matriz, una solo alterada por sericita (mus) y la otra por arcillas y sericita (mus&mnt). E: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos subhedrales de calcopirita (cpy&py). La matriz ha sido alterada por sericita (mus), arcillas y sericita (mus&mnt) y cuarzo secundario (qz II). F: Vista al objetivo 5, en luz transmitida de la misma región de la fotomicrografía E. Se destacan la clorita (clo), en contacto con los minerales opacos. Y las arcillas y sericita (mus&mnt) que no están en contacto con los opacos y más bien se encuentran reemplazando posibles fenocristales y a la matriz.	60
Figura 42: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica ...	61
Figura 43: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): mezcla muscovita-illita (Msl), clorita (Chl), montmorillonita (Mnt)	61
Figura 44: Muestra de mano CS9 (Subunidad BLP-FRES)	63
Figura 45: A: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de fenocristales de cuarzo euhedrales y subhedrales (qz I). En una matriz de cuarzo secundario y sericita, muscovita de grano fino (mu). B: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de una vetilla de opacos, OPs (calcopirita, pirita, hematita), calcita (cac), con halo de cuarzo secundario (qz II) y sericita (mus). C: Vista al objetivo 5, en luz reflejada de una vetilla con granos anhedrales de calcopirita (cpy). D: Vista al objetivo 5, modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de la misma región de la fotomicrografía C y E. Se observa una vetilla de opacos, OPs (calcopirita). En las partes superiores se observan los productos de la intensa alteración filica, cuarzo secundario (qz II) y sericita (mus). E: Vista al objetivo 5, en luz transmitida de la misma región de la fotomicrografía C y D de una vetilla con granos anhedrales de calcopirita (cpy). Se pretende enfatizar la ausencia de coronas de arcillas en calcopirita. En su lugar las arcillas (mnt y kln), se encuentran junto con la sericita en la parte superior de la foto. F: Vista al objetivo 5, en luz transmitida de opacos (OPs), y relictos de fenocristales de posibles plagioclasas o biotitas que han sido completamente reemplazadas por montmorillonita y caolinita (mnt y kln).	65
Figura 46: A: Vista al objetivo 20 (luz reflejada), en modo polarizadores cruzados de una vetilla de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) intercrecidos con pseudomorfo prismáticos de magnetita (mt) después de hematita (mushketovita, leves reflejos internos rojos). B: Vista al objetivo 10, en luz reflejada de una vetilla de calcopirita (cpy) a la derecha, y a la izquierda granos anhedrales diseminados de pirita (py). C: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de la misma región de la fotomicrografía B. Se observa una vetilla de granos de calcopirita (cpy), intercrecidos con granos de cuarzo secundario (qz II). Los granos de pirita (py), presenta contacto simple con granos subhedrales de muscovita. La matriz está fuertemente alterada por sericita y cuarzo secundario (mus y qz II) D: Vista al objetivo 10, en luz transmitida de la misma región de la fotomicrografía B. Se observa la vetilla de granos de calcopirita (cpy), intercrecidos con granos de cuarzo secundario (qz II). Nótese que las arcillas (mnt y kln) no presentan relación con la calcopirita y pirita, sino que se presentan reemplazando fenocristales de feldspatos y de posibles biotitas. E: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un grano subhedral de calcopirita (cpy), fenocristales subhedrales y anhedrales de cuarzo (qz I) y la matriz alterada por sericita y cuarzo (qz II y mus). F: Vista al objetivo 10, en luz reflejada de una vetilla de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) intercrecidos con granos subhedrales de magnetita (mt), y granos subhedrales de pirita (py).	66
Figura 47: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica. ..	67
Figura 48: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): mezcla muscovita-illita (Msl), montmorillonita (Mnt)	67
Figura 49: Muestra de mano CS7 (Subunidad Pórfido Blanco)	69
Figura 50: A: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de un fenocristal de cuarzo (qz I), rodeado por granos finos de cuarzo secundario (qz II) y zonas que han sido reemplazadas por muscovita de grano fino (mus), montmorillonita (mnt) y caolinita (kln). B: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de un fenocristal de cuarzo (qz I), y de un fenocristal de plagioclasa (plag), que ha sido reemplazado en sus bordes por	

cuarzo secundario, sericita (muscovita de grano fino) y arcillas (caolinita y montmorillonita). C: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de un fenocristal de feldespato potásico (kfs I), en contacto con granos de feldespato potásico secundario (kfs II), cuarzo secundario (qz II) rodeado de sericita y arcillas. D: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de granos euhedrales de muscovita secundaria (mus) en contacto con cuarzo secundario (qz II). E: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de un fenocristal de cuarzo (qz I), rodeado por granos finos de cuarzo secundario (qz II) y zonas que han sido reemplazadas por muscovita de grano fino (mus), montmorillonita (mnt) y caolinita (kln). F: Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de granos de minerales opacos (OPs), calcopirita y pirita, que están en contacto con zonas que han sido reemplazadas por muscovita de grano fino y por feldespato potásico secundario (kfs II). .. 71

Figura 51: A: Vista al objetivo 10, en luz reflejada de agregados anhedral de pirita (py), que presentan contacto simple con bornita (bn), especialmente a los bordes, y con calcopirita (cpy). Además, el agregado anhedral de pirita, a la izquierda de la foto, presenta fracturas rectilíneas que han sido rellenadas por calcopirita, a manera de un intercrecimiento del tipo veteado. B: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de la misma región de la fotomicrografía A. Se observa el agregado anhedral de pirita a la izquierda (py), rodeado por un agregado de sericita y arcillas (mus&mntykln), a manera de una sub-corona, y por cuarzo secundario (qz II). A la derecha los granos de bornita y calcopirita (bn&cpy) presentan los mismos contactos con sericita, arcillas y cuarzo secundario. C: Vista al objetivo 10, en luz reflejada de un agregado anhedral de pirita (py), en contacto simple a los bordes con granos anhedral de calcopirita (cpy). Al centro, agregado anhedral de rutilo (rut) en contacto simple con calcopirita y pirita. A la derecha, agregado anhedral de calcopirita en contacto simple con un grano de bornita (bn). D: Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de la misma región de la fotomicrografía C. Se observa el agregado anhedral de pirita a la izquierda, rodeado por un agregado de sericita y arcillas (mus&mntykln), a manera de una sub-corona, y por cuarzo secundario (qz II). A la derecha los granos de bornita y calcopirita (bn&cpy) presentan los mismos contactos con sericita, arcillas y cuarzo secundario. Es importante destacar que en el caso de los granos de minerales opacos de la derecha se llegan a formar coronas casi completas de sericita y arcillas. E: Vista al objetivo 5, en luz transmitida de agregados de sericita y arcillas (mus&mntykln), que están relacionados espacialmente a los minerales opacos (OPs), calcopirita y pirita. F: Vista al objetivo 20, en luz reflejada de un grano subhedral de calcopirita en contacto simple con rutilo (OPs). Este grano de minerales opacos está rodeado por un agregado sericita y arcillas (mus&mntykln) que forma una sub corona y por cuarzo secundario. Se observan también algunos granos euhedrales de muscovita junto con los granos más finos y las arcillas..... 72

Figura 52: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica y de etilenglicol..... 73

Figura 53: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): fengita (Ph), muscovita (Ms), caolinita PX (Kln)..... 74

Figura 54: Gráfico Zr/Ti vs Nb/Y de Pearce (1996) muestra que tres, de los cuatro pórfidos, tienen composición andesita basáltica-andesítica y uno presenta composición riolita-dacítica. 75

Figura 55: En este gráfico (Warren et al., 2007) Se observa que todas las muestras están alteradas y es evidente la transferencia de los elementos mayores para formar la sericita (K-mica), seguida de la biotita secundaria. . 76

Figura 56: Gráfico de Ti vs Zr de Hallberg (1984), mostrando como los 4 pórfidos de Cuajone tienen una firma distinta..... 76

Figura 57: Notar patrones agrupados de acuerdo a la unidad y empobrecimiento en Co, Sc y Ti y enriquecimiento en Ce, Hf, La, Nb, Ta, Th, U y Zr del pórfido blanco..... 77

Figura 58: Pórfido Blanco proviene de un magma más diferenciado. En este diagrama se evidencia su enriquecimiento en Th (elemento incompatible) y empobrecimiento en Co (elemento compatible)..... 78

Figura 59: Resumen de las micas (clorita y muscovita) y arcillas (montmorillonita y caolinita) identificados en las unidades mineralizadas de Mina Cuajone..... 84

Figura 60: Porcentajes de montmorillonita y caolinita en las unidades mineralizadas. Notar que la muestra CS7-Porfido Blanco presenta altas cantidades de montmorillonita y caolinita, pero comparativamente no tiene mucha abundancia de muscovita y clorita. Por otro lado, las muestras CS3-IAFILPTK y CS9-BLP FRES FIL ARG presentan abundancia tanto en muscovita y clorita como en montmorillonita y caolinita. 84

Figura 61: A: Tipos de intercrecimientos, modificado de Canchaya y Cardozo (1977), después de Amstutz (1961). B: contactos simples e inclusiones entre calcopirita, magnetita y pirita de la muestra de BA con ligera alteración filica sobre alteración potásica. C: Inclusiones de calcopirita y pirrotita en contacto simple dentro de pirita. D: Sub-corona de montmorillonita, sericita y caolinita en partícula intercrecida de calcopirita-pirita. E: Compenetración entre calcopirita y molibdenita. F: Corona entre calcopirita y calcosita-digenita (E y F, pertenecen a la muestra de LP con fuerte alteración filica). 87

Figura 62: A la izquierda fotomicrografías de rocas pertenecientes a la mina El Teniente Oyarzun y Arévalo (2011): A: Dacita Porfírica; B: Fase porfírica de Diorita Sewell; C: Basalto Porfírico. A la derecha fotomicrografías de rocas de la Mina Cuajone: D: LP PTK; E: BLP FRES FIL ARG; F: BA PTK. Se muestra como varía el Work index de acuerdo a la textura. Si la roca tiene cristales bien desarrollados y estos tienen intercrecimientos poligonales entre sí el Work index será bajo, conforme la roca presenta mayor abundancia de matriz fina y los contactos entre minerales son más sinuosos, el Work index será mayor. 90

Figura 63: Resumen de las recuperaciones de las 3 unidades litológicas oficiales y el Porfido Blanco 95

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS1 (Subunidad BA FIL PTK).....	21
Tabla 2: Resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	26
Tabla 3: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS2 (Subunidad BAPTK).....	27
Tabla 4: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	32
Tabla 5: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS3 (Subunidad IAFILPTK).....	33
Tabla 6: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	38
Tabla 7: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS4 (Subunidad LP PTK).....	39
Tabla 8: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	44
Tabla 9: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS5 (Subunidad LPQS).....	45
Tabla 10: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	50
Tabla 11: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS6 (Subunidad BXLP).....	51
Tabla 12: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	56
Tabla 13: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS8 (Subunidad BLPFRES).....	57
Tabla 14: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	61
Tabla 15: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS9 (Subunidad BLPFRES).....	62
Tabla 16: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	67
Tabla 17: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS7 (Subunidad Pórfido Blanco).....	68
Tabla 18: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X.....	73
Tabla 19: Resumen de las características observadas en la caracterización petromineralográfica-textural de las muestras del presente trabajo. Además se presentan Leyes de Cu, Work index y Recuperación recolectados de las bases de datos de la empresa y brindados por Geología de Mina Cuajone (2019).....	82
Tabla 20: Resumen de los tamaños de grano de calcopirita para cada unidad y subunidad.	85

1. Introducción

1.1. Antecedentes: El yacimiento de Cuajone está localizado al sur-oeste del Perú, en la provincia de Moquegua (distrito de Torata), es explotado por la empresa Southern Peru Copper Corporation, que inició sus operaciones el año 1976. El yacimiento es del tipo pórfido de cobre-molibdeno y pertenece a la Franja Metalogenética XIII del Perú (Acosta et al., 2011). La mina cuenta con reservas de 1,883.081 Mt @ 0.503 % de Cu y 0.018 % de Mo (Geología de Mina Cuajone, 2018). La operación tiene una capacidad de procesamiento de aproximadamente 100 kt/día de roca mineralizada.

Cuajone comprende 3 unidades litológicas mineralizadas que reciben los siguientes códigos de mina (en orden cronológico): BA=Andesita Basáltica; LP= Latita Porfírica y BLP= Latita Porfírica 2 y una unidad en evaluación económica, el Pórfido Blanco (Concha y Valle, 1999). Estas 3 unidades han sido afectadas por diferentes alteraciones hidrotermales lo que ha generado subunidades para su explotación en mina, basadas en la combinación de litología y alteración (LP con alteración filica-argílica, LPQS; BA con alteración potásica, BAPTK). La recuperación metalúrgica promedio de cobre varía en sus extremos de 81.59% en la unidad IA FIL PTK (pórfido BA con alteración filica potásica) a 85.7% en la unidad LP QS (pórfido LP con alteración filica-argílica). El Work index promedio varía de 14.4 kWh/t en la LP QS a 21 kWh/t en la BA PTK según Concha y Valle (2019).

La recuperación metalúrgica es la razón entre la masa del elemento valioso obtenido en el concentrado (en este caso, cobre), y la masa del mismo elemento en la roca mineralizada que recibió el proceso de conminución y concentración, denominado “mineral de cabeza” (Alfaro, 2017). El work index es la energía requerida (en kWh/t) para reducir un material desde un tamaño de grano muy grande hasta un grano promedio de 100 μm (Stamboliadis et al., 2005) y está controlado por la textura de minerales formadores de roca (Oyarzun y Arevalo, 2011).

1.2. Problema: En Cuajone, no se ha establecido claramente cuáles son las causas de las diferencias de recuperación y work index entre las diferentes unidades litológicas.

1.3. Justificación: El parámetro de recuperación es económicamente muy importante ya que, si se tuviera una recuperación mayor en 1% en la unidad BA PTK con un tonelaje de 40 kt procesadas al día en planta (usual para esta subunidad), a un precio del cobre de 5,904.00 USD/t (promedio del precio para los últimos 5 años), se obtendría una ganancia extra de 4.28 millones de dólares (USD) al año (cálculos en la sección 10.1 de Anexos), efecto que se

podría escalar si pudiera darse en todas las unidades, por lo que es importante la investigación de este tema

La Sección de Geología de mina lleva un control geológico de leyes (diario) y de Work index (mensual). La mineralogía del yacimiento es relativamente simple (minerales formadores de roca: cuarzo, feldespato y biotita; minerales de alteración hidrotermal: magnetita, cuarzo, muscovita, biotita, clorita, montmorillonita, caolinita, illita; mineralización metálica: -pirita, calcopirita y molibdenita) y ha sido descrita en informes internos hasta la década del 90 por el Ing. Rubén Matos (Concha y Valle, 2019) y dos informes recientes de consultores externos (Cánepa, 2012; Ocharán, 2016). La respuesta a la incógnita de la causa de las diferentes recuperaciones y work index, recae en un enfoque geometalúrgico que consiste en analizar problemas integrando la información geológica, minera, metalúrgica y económica con el objetivo de maximizar el valor actual neto-VAN de un cuerpo mineral (SGS, 2019).

En el trabajo de Cropp *et al.* (2013) se puso en evidencia como la mineralogía de la ganga y las variaciones de textura son un factor clave para la recuperación de cobre por flotación en las menas de tipo pórfido. Como ejemplo de un estudio sistemático de este tipo, se tiene el trabajo de caracterización mineralógica de la Mina Cerro Corona (Baumgartner *et al.*, 2016), en el que se analizó 98 muestras de distintos sectores del tajo con los métodos de microscopía óptica, QEMSCAN y difracción de rayos X. Por otro lado, en base a un estudio petrográfico de 731 muestras, Oyarzun y Arévalo (2011), pusieron en evidencia que cada tipo de textura estaba relacionada a una gama particular de work index en la Mina El Teniente, uno de los pórfidos de cobre más grandes de Chile y del mundo.

1.4. Hipótesis: La caracterización mineralógica de la calcopirita y de la ganga, y sus correspondientes texturas podrían entonces ayudar a explicar la diferencia en la recuperación de cobre de las unidades litológicas de Cuajone.

1.5. Objetivos: Este trabajo tiene como **primer objetivo** ser un piloto de estudio geometalúrgico y evaluar si la textura y mineralogía de ganga y calcopirita podrían estar influyendo en la recuperación metalúrgica y el Work Índice de los pórfidos de Cuajone; y **como segundo objetivo** proponer una clasificación petrológica, basada en datos geoquímicos, puesto que no es posible usar la microscopía debido a la intensa alteración de los pórfidos de Cuajone.

2. Metodología

Para cumplir con los dos objetivos planteados, se tomaron 9 muestras estratégicamente seleccionadas de los pórfidos mineralizados y se les caracterizó usando microscopía óptica; difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja de reflectancia y análisis químicos (XRF, ICP-AES-MS). Adicionalmente se recopiló, en la mina, la información relacionada con la recuperación metalúrgica y el work index.

La caracterización de los intrusivos, a partir de las muestras tomadas, esta basada en la identificación de los minerales constituyentes de las rocas, las alteraciones hidrotermales, la mineralogía metálica y las relaciones geométricas (intercrecimientos) de los minerales. Los factores o criterios considerados se describen brevemente a continuación.

- a. **Descripción de Roca:** Las rocas de Cuajone tienen un promedio del 50% de minerales fuertemente alterados (principalmente los pórfidos de matriz muy fina). Por esta razón no se les puede dar un nombre petrográfico con porcentajes modales. Como alternativa se usó una clasificación geoquímica usando elementos trazas inmóviles en el gráfico de Pearce (1996) y además se empleó microscopía y difracción de rayos X para la identificación y cuantificación de los minerales y para describir la textura de roca.
- b. **Descripción de Alteración hidrotermal:** Se determinó a través de la identificación y cuantificación de minerales mediante difracción de rayos X (feldespato potásico, biotita, clorita, muscovita, montmorillonita, caolinita, illita), espectroscopía de reflectancia, usando el equipo Terraspec Hi-Res 4 (montmorillonita, caolinita, illita); y la identificación de texturas secundarias en microscopía de luz transmitida.
- c. **Descripción de Mineralización (centrado en calcopirita):** Se caracterizó a través de microscopía de luz reflejada, se usó también la cuantificación de pirita y magnetita obtenida con difracción de rayos X.
- d. **Descripción de Intercrecimientos:** Para los intercrecimientos de los minerales opacos se usó microscopía de luz reflejada y para los minerales transparentes, microscopía de luz transmitida. Se usó la clasificación de intercrecimientos de Amstutz modificada por Canchaya y Cardozo (1977).

2.1. Recopilación de datos de Cuajone

Fueron proporcionados oficialmente por Cuajone y citados en la tesis como (Geología de Mina Cuajone, 2019). A continuación, se describe el proceso para ambos.

-Los datos de **recuperación metalúrgica** se obtuvieron de una tabla oficial (4,200 muestras) con los valores promedio para cada código de mina

-Los datos de **work index** son el promedio por unidad litológica en base a un gran número de muestras históricas y muestras tomadas por protocolo cada mes de acuerdo al avance de mina.

2.2. Descripción de los métodos utilizados

Se usaron los siguientes métodos, seleccionados por ser los adecuados para la escala y objetivos del trabajo. En el caso del análisis geoquímico se usaron diversos métodos (XRF, ICP-AES, ICP-MS) para darle mayor detalle al trabajo y por ser factible económicamente (9 muestras).

2.2.1. Muestreo: Se realizó una campaña de muestreo en la mina Cuajone con ayuda de los geólogos de mina. Se recolectaron en total 9 muestras representativas de 5 kg de las 4 unidades litológicas: 3 de la unidad BA (CS1 a CS3); 3 de la unidad LP (CS4 a CS6); 2 de la unidad BLP (CS8 y CS9) y 1 del Pórfido Blanco (CS7), la ubicación de las muestras se puede observar en la [Figuras 1, 2A y 2B](#). Los criterios para extraer las muestras fueron: representatividad de las unidades litológicas de la mina con sus correspondientes alteraciones (lo que forma subdominios-códigos de mina); y existencia de resultados de ensayos del Work Index cercanos al punto de muestreo. El mapeo de la mina, zonificada en polígonos de acuerdo a litología, alteración y Work Index, resultó en 21 códigos de uso común para las secciones de geología, mina y metalurgia (códigos de mina), por ejemplo: LP QS y BA PTK. Se marcaron los puntos de muestreo en este mapa geológico usando el software Minesight, estos fueron ubicados usando un GPS diferencial y se tomaron las 9 muestras directamente de los taludes del tajo abierto.

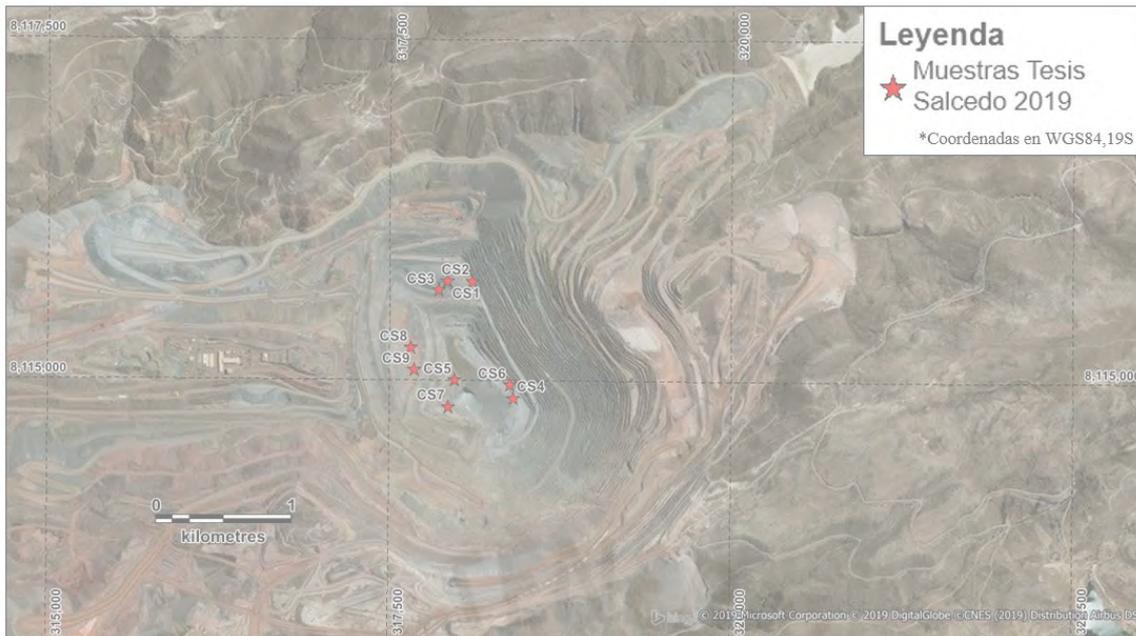


Figura 1: Ubicación de las muestras con la imagen satelital de fondo. Coordenadas WGS84, 19S

2.2.2. Espectroscopía Infrarroja de Reflectancia (Equipo Terraspec Hi-Res 4): Este utiliza los rangos VNIR (“visible and near infrared”; $0.72 - 1.3 \mu\text{m}$) y SWIR (“short-wave infrared”; $1.3-2.5\mu\text{m}$) del espectro electromagnético para la identificación de minerales (micas blancas, cloritas, arcillas, sulfatos, carbonatos), en esta ocasión se utilizó el equipo de campo Terraspec Hi-Res 4, figura 2D. Se realizó el análisis con este equipo para detectar minerales arcillosos hipógenos que son indicadores del tipo de alteración hidrotermal y son relevantes para el proceso metalúrgico (montmorillonita, caolinita, muscovita, illita). Se realizaron 20 lecturas por muestra, exclusivamente en fractura fresca en instalaciones de la mina Cuajone. Los resultados fueron procesados usando el software TSG (“The Spectral Geologist” desarrollado por CSIRO, Australia), el cual realiza la identificación de especies minerales y genera gráficos de barras donde presenta los minerales identificados y cuantifica la mayor o menor abundancia relativa de los minerales.

2.2.3. Microscopía Óptica: Para cada una de las 9 muestras recolectadas, se seleccionaron fragmentos y se realizó un corte perpendicular a la mayor cantidad de vetillas posible y se marcó el área exacta para la realización de las secciones delgadas y pulidas. El análisis de las secciones se realizó con un microscopio Zeiss, modelo Primotech en las instalaciones de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y las imágenes obtenidas fueron procesadas con el software anexo Matscope, figuras 2C y E.

2.2.4. Difracción de Rayos X: Las muestras fueron trituradas usando una chancadora de quijadas y dos de rodillos en el laboratorio de concentración de minerales de la PUCP. Posteriormente fueron molidas usando un pulverizador de anillos de acero en las instalaciones de BizaLab (laboratorio privado que brinda servicios a la industria minera), llegando a una granulometría de 90% pasante a la malla Tyler 400 (37 μm). La muestra en esta granulometría fue usada para difracción rayos X, realizados en el laboratorio de BizaLab.

Para la difracción de rayos X, se realizó la deposición convencional y también se hizo una preparación especial con énfasis en arcillas para realizar un control de laboratorio a los resultados del Terraspec Hi-Res 4. La preparación con énfasis para la identificación de las arcillas consiste en primer lugar, en realizar una separación granulométrica (obtener solo las partículas con un tamaño aproximado de 5 μm) usando una suspensión en agua destilada (en base a la Ley de Stokes), inducir una orientación preferencial a través de un filtrado al vacío y realizar la correspondiente lectura con el equipo, figura 2F. En segundo lugar, se deja a la muestra reaccionando en vapor de etilenglicol por 12 horas, esto produce una expansión de las arcillas y un desplazamiento de los picos del difractograma lo que permite identificar con mejor precisión las arcillas expansivas. Esta preparación realza el difractograma de las arcillas y permite su correcta identificación y cuantificación. La lectura se realizó usando un difractómetro Bruker D4 Endeavor. Las condiciones operativas incluyen: Tubo Cu (40kV, 40mA), KAlfa1: 1.54060 Å, KAlfa2: 1.54439 Å y rango de medida desde $2\theta = 5^\circ$ hasta $2\theta = 70^\circ$. Para la identificación se usó la base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD). Se usaron los softwares: EVA Diffract Plus; identificación de minerales; TOPAS, cuantificación con el método de refinamiento de estructuras Rietveld.

2.2.5. Análisis químicos (fluorescencia de rayos X, ICP-MS, ICP-AES): Se prepararon pastillas prensadas para ser analizadas por Fluorescencia de Rayos X, usando un espectrómetro Bruker S4 Pioner (dispersión por longitud de onda, WDXRF), se obtuvo la pérdida al fuego (Loss On Ignition-LOI) calcinando la muestra por 2 horas a 900 $^\circ\text{C}$. Las condiciones operativas incluyen: longitud de onda dispersiva, ánodo Rh (150 mADC, 4kW), cristales (PET, LIF200, XS-55, LIF220 y Ge) y detectores (Contador de Centelleo y de Flujo). El análisis se hizo usando el software Spectra Plus. Para obtener concentraciones de elementos trazas inmóviles (Zr, Ti, Nb, Y) con el método ICP-MS para 48 elementos con disolución en 4 ácidos (método ME-MS61, ALS LIMA), y para tener mayor precisión en los elementos mayores y complementar el XRF se usó ICP-AES para 13 óxidos de elementos

mayores con fusión en metaborato de litio (ME-ICP06, ALS LIMA) para garantizar que se puedan liberar los elementos de los silicatos más resistentes.

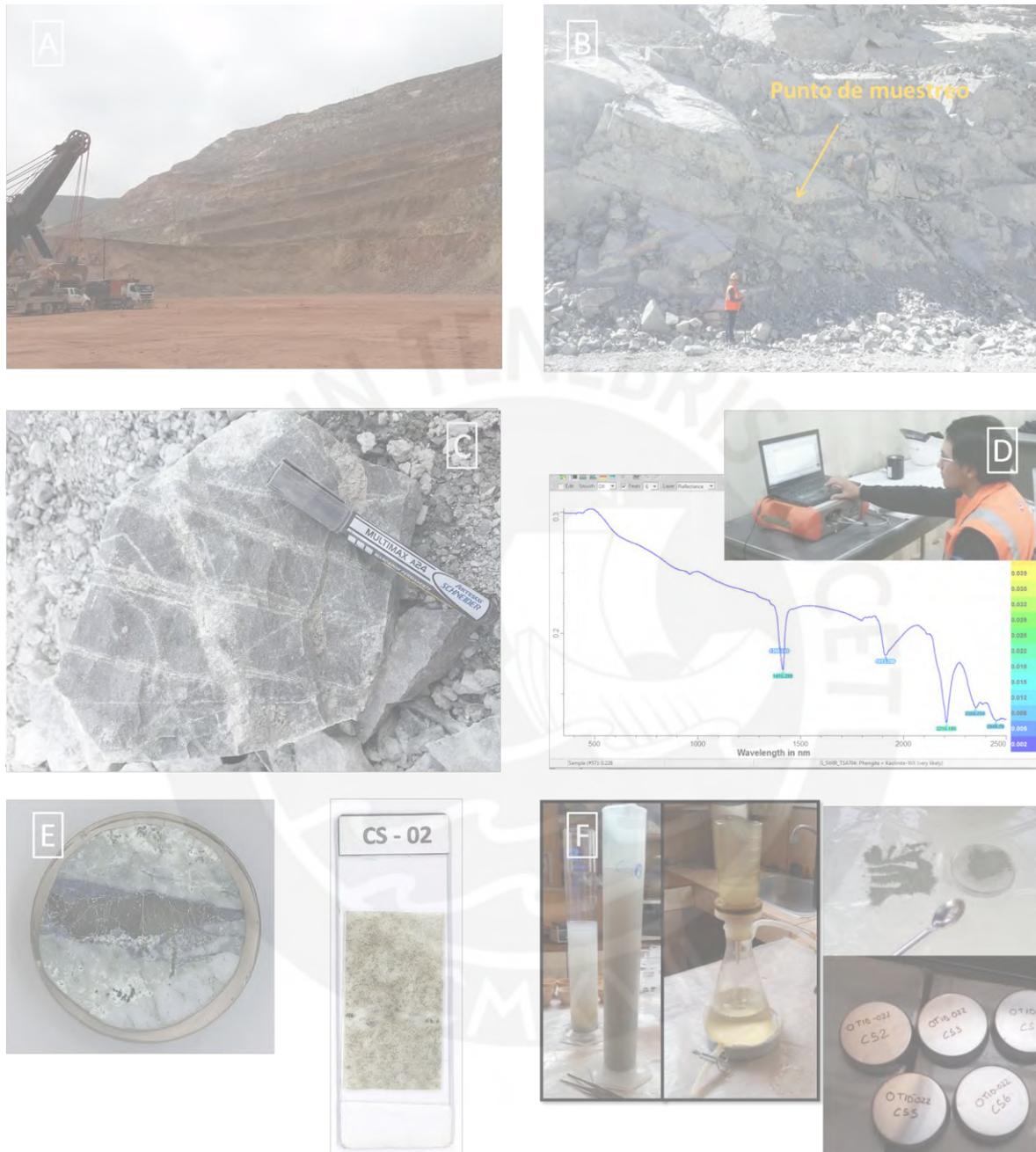


Figura 2: **A:** Maquinaria en frente de minado durante receso, momentos en los cuales se tomaron las muestras. **B:** Afloramiento ubicado en talud del tajo abierto, en la zona mapeada como unidad BA. Cerca del punto de muestreo CS2. **C:** Muestra de mano de la unidad BA se realiza el color negro de la biotita secundaria. **D:** Espectro obtenido con Terraspec, procesado en el TSG. En la esquina superior, equipo Terraspec y operador. **E:** Escaneos de sección pulida y delgada. **F:** Izquierda, separación granulométrica y filtrado al vacío (preparación para énfasis en arcillas). Esquina superior derecha, depositación de muestra para Difracción de Rayos X. Esquina inferior derecha, cascos de pastillas prensadas para Fluorescencia de Rayos X.

3. Marco Geológico

3.1. Geología Regional

3.1.1. Estratigrafía y rocas intrusivas

En la figura 3 se observa un mapa geológico regional con la ubicación de la Mina Cuajone. A continuación, se hace una breve descripción de las unidades relacionadas.

1. **Formación Chocolate (216-185 Ma; Triásico Superior-Jurásico Inferior):** Consiste principalmente de lavas andesíticas con menor presencia de aglomerados volcánicos, brechas, conglomerados y areniscas, depositados en un ambiente subacuático. Conforman la base del Grupo Yura y su potencia varía de 1 a 6 km, recientes dataciones radiométricas, usando el método de U-Pb en zircones, la sitúan en el intervalo entre 216 y 185 millones de años (Boekhout *et al.*, 2013), subyaciendo al Grupo Toquepala.
2. **Grupo Toquepala (91-67 Ma; Cretácico Superior- Paleoceno):** Lavas de composición basáltica a riolítica con subordinación de volcanoclásticos y depósitos clásticos de grano fino, depositados en ambiente subaéreo. Se han realizado pocos estudios en este Grupo, a pesar de su gran importancia al ser el hospedante de los depósitos de Cuajone, Quellaveco y Toquepala, según Simmons (2013), Bellido (1979a) y Martínez y Zuloaga (2000) le asignan una potencia mayor a 1.5 km y lo dividieron en 4 Formaciones, de la más antigua a la más joven: Huaracane-Toquepala, Inogoya, Paralaque y Quellaveco (dividida en 5 miembros: pórfido Quellaveco, Toquepala, Yarito, Alta y Tinajones). Simmons (2013), realizó 14 dataciones (U-Pb en zircón) con especial énfasis en la unidad Quellaveco situando al grupo entre 91 y 67 Ma, la actividad magmática en el arco Toquepala decreció a partir de los 50 Ma y la datación mas joven existente es de 45 Ma (Clark *et al.*, 1990).
3. **Batolito de la costa (86-53 Ma; Cretácico Superior-Eoceno):** Está compuesto de más de 1,000 plutones, que afloran en un área de 1600 km de largo por 60 km de ancho, a 200 km al oeste del arco volcánico actual (definido por los volcanes Pichu Pichu, El Misti y Chachani en el Departamento de Arequipa). Presenta una composición global cuarzodiorítica con facies que van de gabro a granito (Pitcher *et al.*, 1985). Se han realizado abundantes dataciones radiométricas (U-Pb en zircón) en el batolito, que concluyen que la mayoría de las intrusiones pertenecen al periodo de entre 86 y 53 de Ma. El batolito de la costa ha sido dividido en 5 unidades: Gabros y Dioritas, Laderas, Tiabaya, Linga y Yarabamba (Mukasa, 1986; Pitcher *et al.*, 1985; Simmons, 2013). Las

intrusiones al noroeste de Cujone pertenecen a la unidad Yarabamba y fueron datadas en: 65.1 ± 0.8 Ma (granodiorita) y 64.2 ± 0.9 Ma (diorita) por Simmons (2013).

4. **Grupo Moquegua (55- 4.5 Ma; Eoceno Inferior-Plioceno):** Este grupo se depositó en el antearco de los Andes Centrales casi exclusivamente en ambientes continentales. Está dividido en 4 unidades: Moquegua A, capas rojas (areniscas) de grano fino; Moquegua B, conglomerados y areniscas de origen eólico; Moquegua C, volcanoclásticos intercalados con depósitos lacustritos, piroclastos e ignimbritas y Moquegua D, conglomerados, ignimbritas y tobas (Sempere *et al.*, 2014).
5. **Formación Huaylillas (24-10 Ma; Mioceno Inferior):** Corresponde a depósitos de ignimbritas intercalados con la formación Moquegua C, datados entre 24 y 10 Ma por (Wörner *et al.*, 2002; Farías *et al.*, 2005; Charrier *et al.*, 2007). Esta formación constituye los depósitos de ignimbritas de mayor extensión y volumen del sur del Perú (Mamani *et al.*, 2010).
6. **Formación Barroso (10-1 Ma; Mioceno Superior - Pleistoceno):** Lavas andesíticas porfiríticas e ignimbritas (de poco volumen y extensión), intercaladas con la unidad Moquegua D (Mamani *et al.*, 2010). Han sido datadas entre 10 a 1 Ma (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998).
7. **Depósitos Cuaternarios (2.6 Ma? -actualidad; Pleistoceno-Holoceno):** Sedimentos aluviales depositados en lechos de ríos-quebradas; y flujos de escombros depositados en laderas de cerros (Sempere *et al.*, 2014).

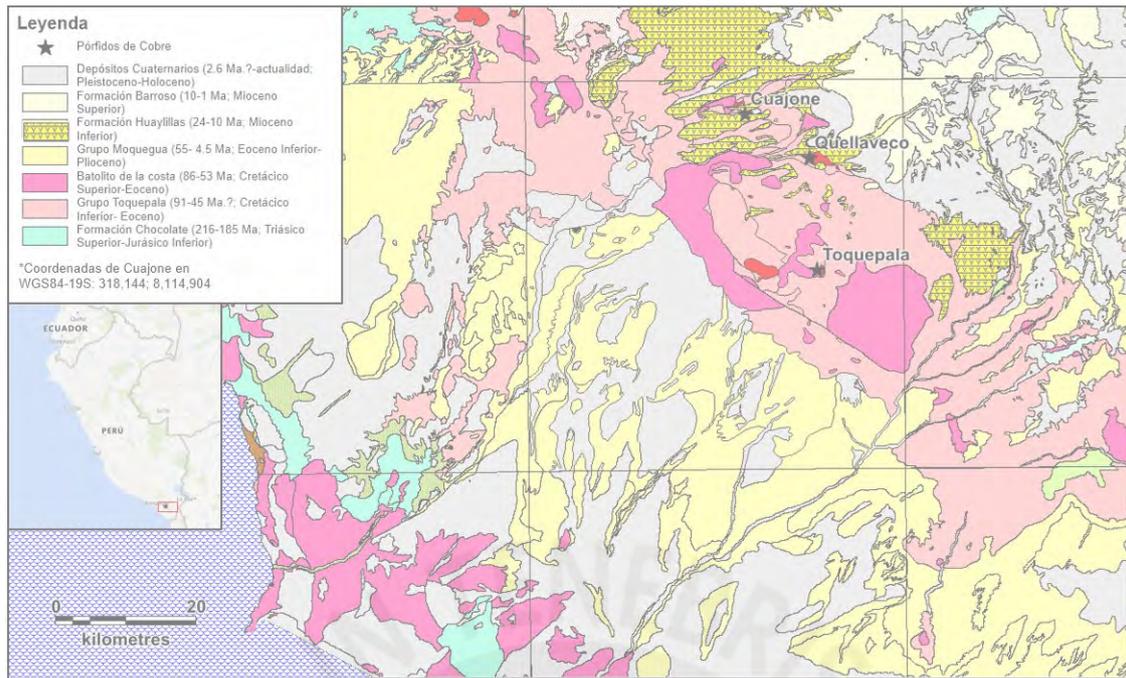


Figura 3: Ubicación de la Mina Cuajone, Toquepala y Quellaveco (Franja XIII de pórfidos de cobre del Paleoceno) en un mapa geológico regional a escala 1:100,000 del INGEMMET, modificado del mapa geológico del cuadrángulo de Moquegua-35u, por Bellido (1979b).

3.1.2. Tectónica

Está controlada por el Sistema de Fallas Incapuquio, que es un sistema de transcurrencia con rumbo Nor-oeste (andino), azimuth 31° - 315° . Este sistema, género lineamientos de rumbo Nor-este, azimuth 50° - 70° . La intersección de estas dos estructuras género zonas de debilidad, que se ubican entre el yacimiento Cerro Verde (Arequipa) y la frontera con Chile (franja de 225 km de longitud y un ancho promedio de 40 km). Algunas de estas zonas, están asociadas a importantes yacimientos de pórfidos como: Cuajone, Cerro verde, Chapi, Quellaveco y Toquepala (Martínez *et al.*, 2017).

3.2. Geología Local

3.2.1. Litologías

Se han subdividido localmente las litologías de la Mina Cuajone en 3 grupos: pre-mineralización, relacionadas a la mineralización y post-mineralización. La [figura 4](#) presenta a Cuajone en un mapa geológico a escala 1:50,000, la [figura 5](#) es un resumen de las edades de las unidades litológicas, y las [figuras 6 y 7](#) muestran las diferentes unidades litológicas y alteraciones hidrotermales de la Mina Cuajone en planta y sección.

3.2.1.1. Litologías Pre-mineralización

1. **Andesitas-doleritas Samanape.** Lava porfirítica de color gris verdoso-marrón, en ciertos horizontes presenta textura conglomerádica o brechada, de composición andesítica (Martinez *et al.*, 2017). No se observa en el tajo, pero se tienen afloramientos a 2.5 km al oeste y al noreste de la operación (Concha y Bernabé, 1999), en mina se le nombra como Dolerita Toquepala. Subyace a la Riolita Porfirítica, pertenece a la formación Quellaveco, grupo Toquepala (Bellido, 1979).
2. **Riolita Porfirítica (Fm. Tinajones, Grupo Toquepala).** Lava porfirítica de color gris-blanquecino, con fenocristales de cuarzo de hasta de 2 mm de diámetro (subangulosos) en una matriz afanítica (Concha y Bernabé, 1999). Pertenece al Miembro Tinajones, Formación Quellaveco, Grupo Toquepala (Bellido, 1979). Una muestra cerca al proyecto Quellaveco ha sido datada en 71.1 ± 0.5 Ma (Simmons, 2013).
3. **Diorita y Granodiorita (Unidad Yarabamba).** Intrusivos de color gris verdoso a gris oscuro de textura equigranular de grano medio a grueso y ocasionalmente porfiríticos. Estos stocks pertenecen se emplazan en el Grupo Toquepala (Riolita Porfirítica y Dolerita), (Concha y Bernabé, 1999). Granodiorita, datada en 65.1 ± 0.8 Ma; y Diorita, en 64.2 ± 0.9 Ma (Simmons *et al.*, 2013), con el método U-Pb en zircones con Microsonda Iónica SHRIMP-RG.

3.2.1.2. Litologías relacionadas a la mineralización

1. **Andesita Basáltica (código de mina=BA).** Roca porfirítica de color gris oscuro verdoso, con fenocristales de plagioclasa tamaño medio (<2 mm) y matriz muy fina dominante, descrita como una lava andesítica porfirítica (Park, 1998; Concha y Valle, 1999; Cánepa, 2012); diorita a monzodiorita porfirítica (Simmons, 2013) y finalmente como un pórfido de composición andesítica de color gris oscuro verdoso con fenocristales medios de plagioclasa y matriz muy fina oscura dominante (alterada a biotita secundaria), con abundante calcopirita diseminada y en vetillas (presente

trabajo). Se presenta una descripción petrominerográfica completa en la [sección 5.1](#). Su ley promedio según el modelo geológico varía de 0.49% a 0.62% de Cu y de 0.014% a 0.016% de Mo, dependiendo del tipo de alteración hidrotermal ([Geología de Mina Cuajone, 2019](#)), y viene siendo explotada desde el inicio de la mina en 1976. Presenta cuatro alteraciones hidrotermales principales: potásica (código de mina=BA PTK), transición filica-potásica (BA FIL PTK), filica (IA FIL), y propilítica (BA PROP). Esta unidad es intruida por la LP y ha sido datada en 56.2 ± 0.5 Ma ([Simmons et al., 2013](#)), con el método U-Pb en zircones con Microsonda Iónica SHRIMP-RG.

2. **Latita Porfírica (código de mina=LP)**. Roca porfírica de color gris claro verdoso; con fenocristales dominantes de plagioclasa, cuarzo, y biotita de tamaño medio (<4 mm) y matriz muy fina (<menor a 100 μ m), descrita como un hipabisal de latita porfírica por [Park \(1998\)](#); [Concha y Valle \(1999\)](#) y [Cánepa \(2012\)](#); como cuarzomonzonita a granodiorita porfírica por [Simmons \(2013\)](#) y finalmente en el presente trabajo como un pórfido de composición andesítica de color gris claro verdoso con fenocristales medios dominantes de plagioclasa, cuarzo, y biotita, y con abundante calcopirita en venillas. Su ley promedio, según el modelo geológico, es de 0.51% de Cu y de 0.025% de Mo ([Geología de Mina Cuajone, 2019](#)), ha sido minada desde inicios de la operación. Presenta dos alteraciones principales: filica-potásica (código de mina=LP PTK), y filica-argílica (LP QS). Intruye en el Grupo Toquepala y es posterior a la Andesita Basáltica-BA. Ha sido datada en 55.6 ± 0.6 Ma, con el método U-Pb en zircones con Microsonda Iónica SHRIMP-RG ([Simmons et al., 2013](#)). Dentro del sistema de mineralización de Pórfido de Cobre, [Simmons \(2013\)](#) la considera un pórfido temprano (“Early mineral Porphyry”), y el pórfido mineralizador en Cuajone.
3. **Latita Porfírica 2 (código de mina=BLP)**. Roca porfírica de color gris claro verdoso, con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, y biotita de tamaño medios (<5 mm) y matriz muy fina dominante, descrita como un hipabisal de latita porfírica ([Park, 1998](#); [Concha y Valle, 1999](#); [Cánepa, 2012](#)); como cuarzomonzonita a monzonita por [Simmons \(2013\)](#) y finalmente en este trabajo como un pórfido de composición andesítica de color gris claro verdoso con matriz muy fina dominante y fenocristales medios de plagioclasa, cuarzo, y biotita, con escasa calcopirita en venillas y diseminada. Se diferencia de la LP, por tener más porcentaje de matriz, fenocristales ligeramente más gruesos y menos mena. Su ley promedio según el modelo geológico es de 0.29% de Cu y de 0.014% de Mo ([Geología de Mina](#)

Cuajone, 2019), y viene siendo procesada. Se le ha asignado solo un código de roca no alterada (BLP FRES). Este pórfido intruye en el Grupo Toquepala, después de la Latita Porfirítica y ha sido datado en 56.2 ± 0.7 Ma, con el método U-Pb en zircones con Microsonda Iónica SHRIMP-RG (Simmons *et al.*, 2013). Dentro del sistema de mineralización de Pórfido de Cobre, Simmons (2013) la considera un pórfido intermedio (“Intramineral Porphyry”).

4. **Pórfido Blanco.** Roca porfirítica de color gris blanquecino, con fenocristales de tamaño medio (<1.5 mm) dominantes y matriz muy fina, la primera caracterización petrominerográfica de esta unidad, se hace en este trabajo y se describe como pórfido de composición riódacítica de color gris blanquecino, con fenocristales finos de feldespatos potásico y cuarzo, con escasa calcopirita diseminada. Unidad que fue distinguida de las otras 3 unidades por sus características macroscópicas, no es considerada como unidad oficial y se evaluará si será explotada. Se diferencia de la LP, por su color blanquecino, fenocristales más finos y porque la mena se presenta preferencialmente como diseminaciones (vetillas muy escasas). A marzo del 2020 no tiene ley promedio, pruebas de flotación, recuperación o Work Index. Se ha identificado solo un tipo de alteración, filica-argílica. Esta unidad no ha sido datada. En el tajo se notó clastos de LP incluidos en el stock del Pórfido Blanco, prueba de que la Latita Porfirítica es más antigua (Geología de Mina Cuajone, 2019). Dentro del sistema de mineralización de Pórfido de Cobre, se le puede considerar un pórfido temprano a intermedio debido a su ley en cobre relativamente alta y a su morfología preferencialmente diseminada.
5. **Latita Porfirítica 3 (código de mina=LP3).** Roca porfirítica de color gris claro, de fenocristales gruesos a muy gruesos (<20 mm) y matriz dominante muy fina, descrita como un hipabisal de latita porfirítica (Park, 1998; Concha y Valle (1999); y como monzogranito a granodiorita porfirítica por Simmons (2013). No se estudió en esta tesis por no estar mineralizada. Se diferencia de la LP, por tener más matriz, fenocristales más gruesos y carecer de mena. Pertenece al sistema de pórfido de cobre, pero es estéril e indica el fin del sistema (Pórfido tardío – “Late Mineral Porphyry”). Esta unidad es la última en intruir al Grupo Toquepala, y ha sido datada en 53.5 ± 0.5 Ma con el método U-Pb en zircones con Microsonda Iónica SHRIMP-RG (Simmons *et al.*, 2013).

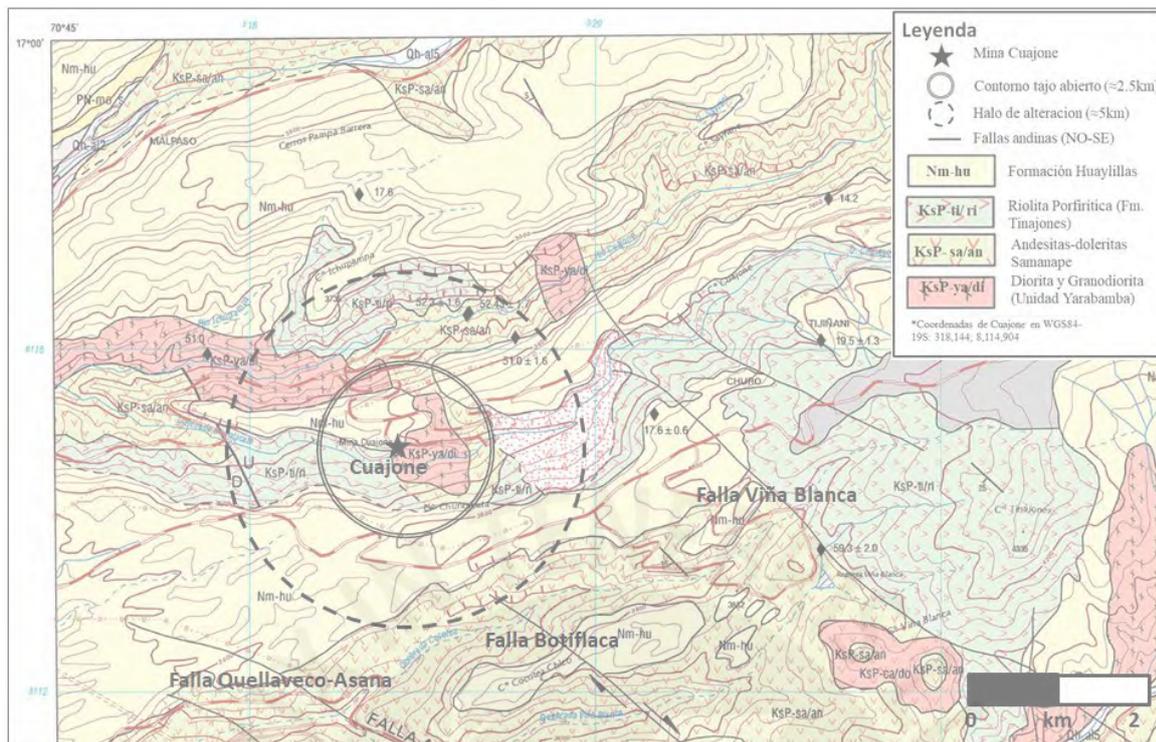


Figura 4: Ubicación de la Mina Cuajone y sus fallas. Modificado del mapa geológico a escala 1:50,000 del cuadrángulo de Moquegua, 35u-I, por Martínez y Zuloaga (2000b)

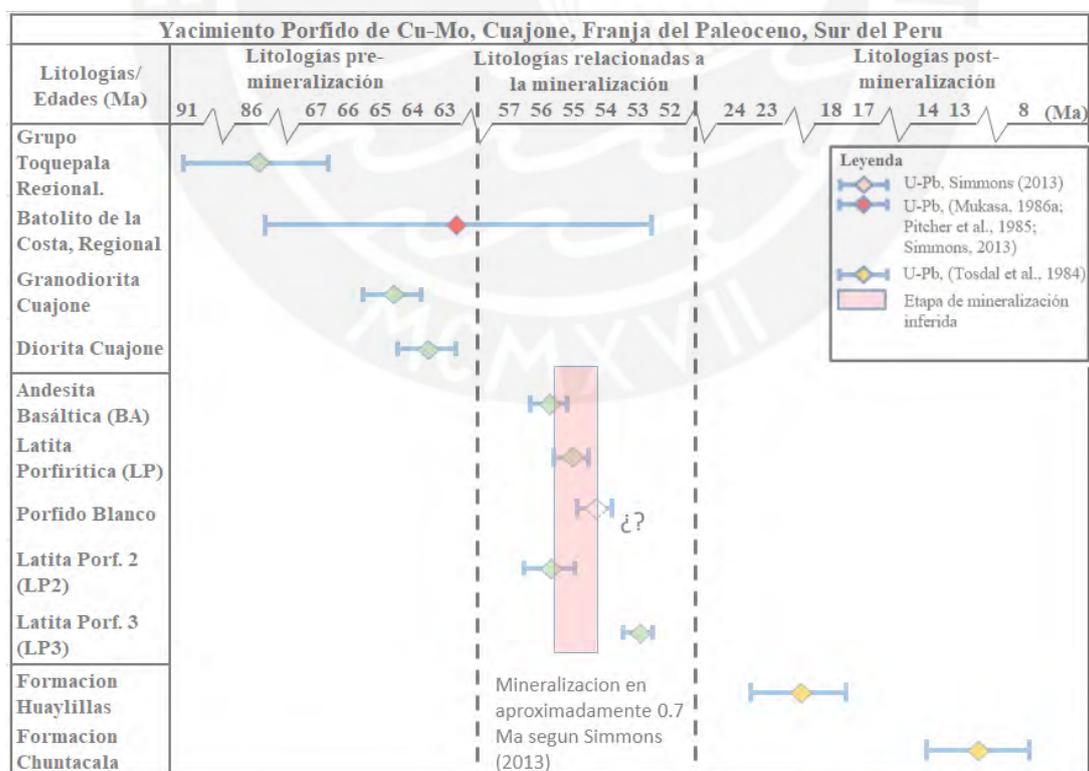


Figura 5: Edades (Ma) de las unidades litologicas de Cuajone

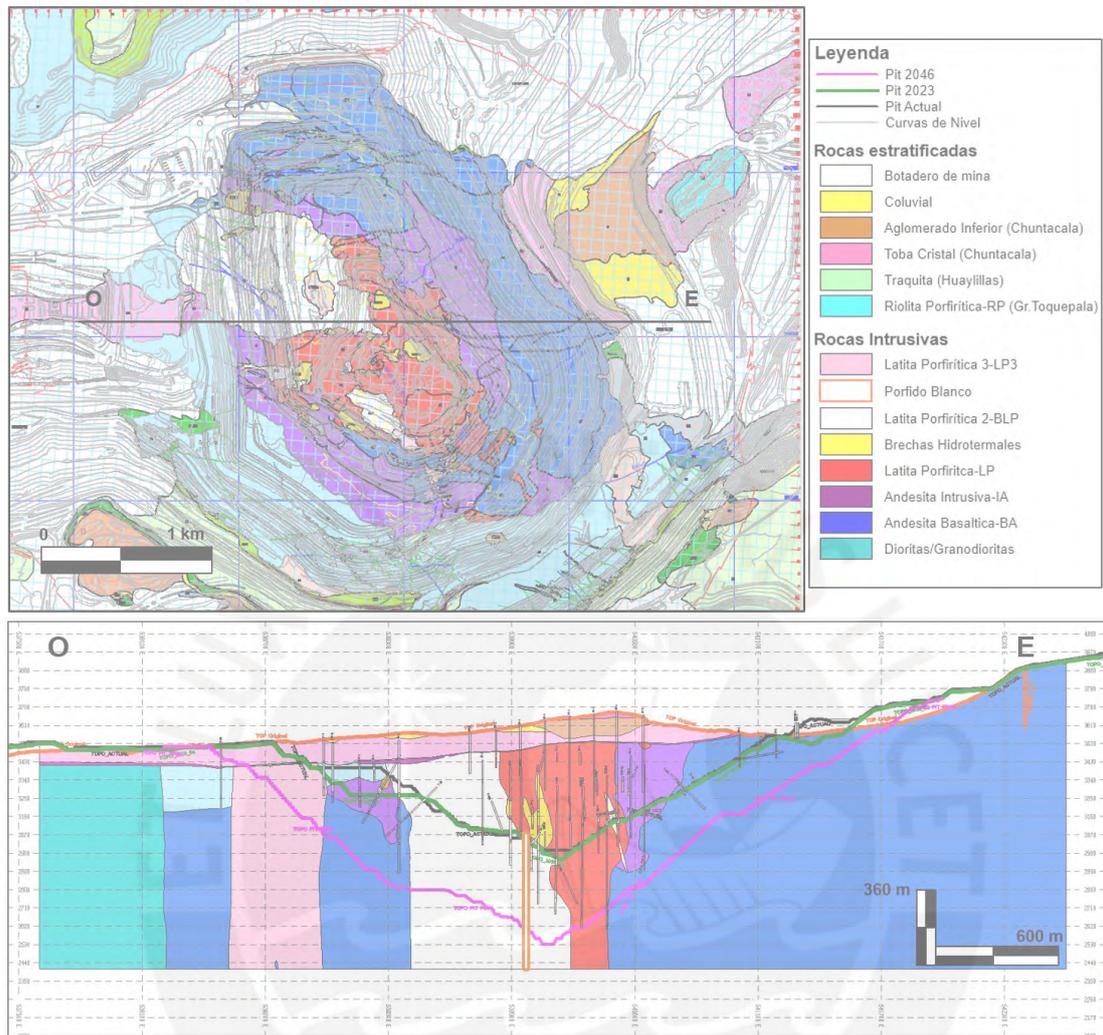


Figura 6: Arriba, mapa de las unidades litológicas de la mina Cuajone. Abajo, sección geológica de unidades litológicas. Modificados de Geología de Mina Cuajone (2019).

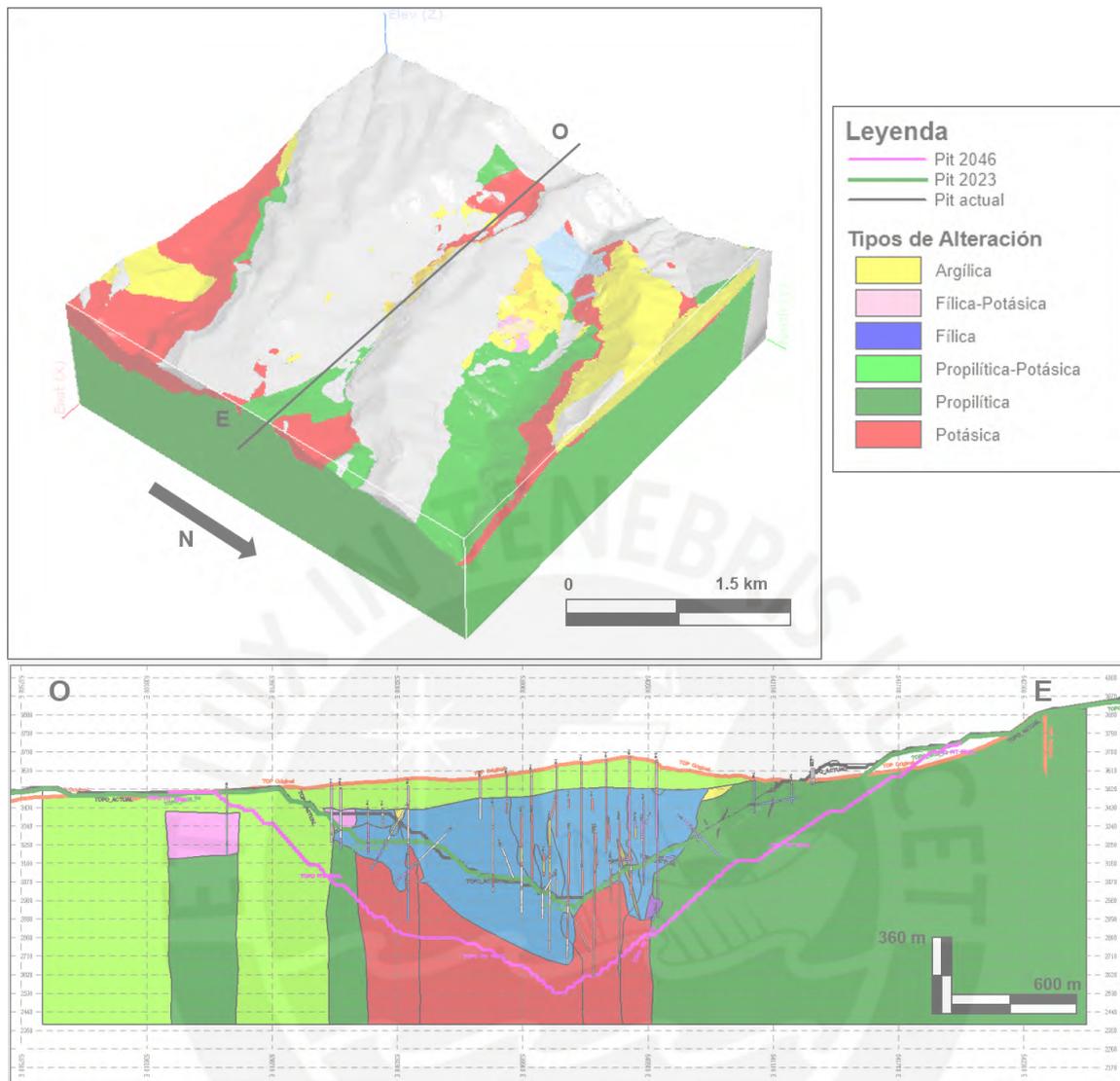


Figura 7: Arriba, block tridimensional mostrando los tipos de alteraciones en la Mina Cuajone en vista isométrica, Abajo, sección geológica con los tipos de alteraciones. Modificados de Geología de Mina Cuajone (2019).

3.2.1.3. Litologías post-mineralización

1. **Formación Huaylillas.** Regionalmente está constituida por grandes depósitos de ignimbritas intercaladas con la formación Moquegua C (Mamani *et al.*, 2010). En la Mina Cuajone, incluye las siguientes litologías: Tobas Huaylillas; Traquita Huaylillas, Vitrófiro Huaylillas y Conglomerado Huaylillas (códigos de mina). Aflora principalmente en la ladera Sur-Sureste de la quebrada Chuntacala y en la orilla norte del río Torata. Tiene una potencia de hasta 230 m y sobreyace discordantemente a las rocas del Grupo Toquepala (Concha y Bernabé, 1999). Localmente ha sido datada con el método de U-Pb en zircones, en la base y tope, entre 24 y 18 Ma (Tosdal *et al.*, 1984).
2. **Formación Chuntacala.** Regionalmente constituye un miembro de la Formación Huaylillas (Mamani *et al.*, 2010). Localmente es tratada como una formación y está constituida por una sucesión de conglomerados, flujos lávicos y tobas, siendo el miembro más importante la Toba Cristal Chuntacala (código de mina). Aflora al Norte de la quebrada Chuntacala, tiene una potencia de hasta 400 m y sobreyace a la Formación Huaylillas (Concha y Bernabé, 1999). Ha sido datada en 14.2 ± 0.4 Ma en la base, y en 8.9 ± 0.6 Ma en el techo (Tosdal *et al.*, 1981).

3.2.2. Contexto estructural

Cuajone está ubicado en un corredor con dirección Nor-oeste, limitado por la falla Quellaveco (Az. 125°) al Sur, la falla Viña Blanca (Az. 130°) al norte, y al centro del corredor se ubica la falla Botiflaca (Az. 130°). Este corredor andino está cortado por una falla local de rumbo Nor-este (Az. 50°), según Martínez *et al.* (2017).

3.2.3. Sistema hidrotermal

El magmatismo en el área de Cuajone tuvo una duración de aproximadamente 13 Ma, desde los intrusivos pre-minerales de la unidad Yarabamba (Granodiorita, 65.1 ± 0.8 Ma) hasta el stock porfirítico tardío LP3 (“late mineral”) datado en 53.5 ± 0.5 Ma. Sin embargo, la mineralización se depositó solo en el intervalo de tiempo comprendido entre el emplazamiento de los pórfidos tempranos LP (“early mineral”) y de los pórfidos intermedios BLP (“intramineral”), que en el caso de Cuajone es de solo 0.7 Ma según Simmons (2013), ver figura 4.

4. Proceso productivo

4.1. Minería

El mineral es extraído a tajo abierto (Figura 8A y B), cuyas dimensiones a diciembre de 2017 eran: longitud, 2.7 km; ancho, 2.5 km; elevación, 2950 – 3850 msnm (900 m de profundidad). El proceso consta de perforación y disparo (7 perforadoras eléctricas de producción con un diámetro de taladro de 12.25 pulgadas); carguío (7 palas eléctricas de entre 42 y 74 yd³ y 2 cargadores frontales de 50 yd³), acarreo (47 volquetes mineros de entre 240 y 400 t) y transporte a concentradora a través de 1 faja transportadora de 7 km que lleva la roca mineralizada hasta la chancadora primaria. Desde los inicios de producción en 1976 hasta diciembre de 2016, se han minado 3,492.0 Mt, de las cuales 921 Mt corresponden a roca mineralizada con una ley promedio de 0.807% de Cu y 0.022 % de Mo. Durante el 2017, se minaron 155.2 Mt de roca, con una proporción aproximada desbroce/roca mineralizada de 4.03 y alimentación a concentradora de aproximadamente 100 kt por día, toda la información de este apartado según Concha (2017).

4.2. Concentradora Cuajone-Metalurgia

La concentradora se ubica a 6 km al sur oeste del tajo abierto (Figura 8C), procesa aproximadamente 100 kt de roca mineralizada por día, que llega hasta la chancadora primaria a través de un circuito de fajas transportadoras. El material llega con un tamaño promedio de 8 pulgadas (luego de la voladura), pasa por la chancadora primaria (que reduce el tamaño máximo aproximadamente a 5 pulgadas) y posteriormente por el chancado secundario y terciario, que entrega un producto con una granulometría de 92% pasante la malla de media pulgada (1.27 cm). Este material es almacenado en la pila de finos para luego ingresar al proceso de molienda (Figura 8D) que reduce el tamaño a un 80% pasante la malla 65 (208 μm). Seguidamente, este producto ingresa al proceso de flotación, espesado, filtrado, almacenamiento en pila de concentrados y transportado por tren al puerto de Ilo (96 km al suroeste de la mina) para su fundición, transformación en ánodos de cobre y finalmente obtención de planchas de cobre refinado (99.9% de pureza), Dávila (2016).



Figura 8: **A:** Vista panorámica de la mina, mirando al Nor-Oeste. Se observan las oficinas de la mina al oeste y volquetes mineros, perforadoras y palas eléctricas, trabajando en los distintos frentes de producción. **B:** Vista de fondo de mina, con un volquete minero en primer plano y a la distancia un tractor sobre orugas y una perforadora eléctrica de producción. **C:** Vista panorámica de la concentradora de Cujone, resaltando los hangares y los espesadores de relaves. **D:** Molinos de bolas de marca Svedala de 20' x 33.5' de 9,000 HP c/u.

5. Resultados

5.1. Microscopía óptica y difracción de rayos X- espectroscopía infrarroja de reflectancia

En esta sección se presenta para cada una de las 9 muestras tomadas, los resultados de los análisis de microscopía óptica y difracción de rayos X – espectroscopía infrarroja de reflectancia.

- Microscopía óptica
 - Resumen de observaciones.
 - Descripción detallada: Muestra de mano, roca y alteración hidrotermal, minerales opacos. Para los **tamaños de grano** se usa la **siguiente escala en milímetros**: de 0.01 a 0.1: muy fino; de 0.1 a 1: fino; de 1 a 4: medio; de 4 a 16: muy grueso.
- Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia
 - Tabla de resultados de la difracción de rayos X y figura mostrando: difractograma sin tratamiento, en negro; difractograma con tratamiento selectivo (análisis con énfasis en arcillas-separación granulométrica), en rosado; y difractograma con tratamiento de etilenglicol, en azul.
 - Histograma que presenta los minerales detectados por el Terraspec.

5.1.1. Unidad Andesita Basáltica-BA. Muestra CS1 (Tomada de la Subunidad BA FIL PTK)

5.1.1.1. Resumen de observaciones

Muestra extraída de la Andesita Basáltica con alteración fílica y potásica (código BA FIL PTK). El presente trabajo la describe como un pórfido de color gris oscuro verdoso con fenocristales de tamaño medio de plagioclasa y matriz muy fina oscura dominante (alterada a biotita secundaria) con intensa alteración potásica y débil alteración fílica, mineralización de calcopirita y pirita con trazas de pirrotita, hematita, magnetita y rutilo. En la [tabla 1](#) se presentan mayores detalles.

Tabla 1: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS1 (Subunidad BA FIL PTK)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados (≈%)
Roca	Pórfido feldespático de color gris oscuro verdoso	Plagioclasa Feldespato potásico primario		25 6
Alteración	Alteración potásica y silicificación, que afectan los bordes de plagioclasas y la matriz muy fina (66% del volumen de la roca). Código de mina: potásica y fílica. BA FIL PTK	Biotita secundaria cloritizada Feldespato potásico secundario Cuarzo secundario	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita - biotita, clorita y cuarzo secundario (contacto simple).	Intensa Muy débil Intensa
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 1200 μm (vetillas) y menor a 800 μm (diseminada)	Calcopirita Pirita Pirrotita, hematita, magnetita, rutilo	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita – pirita, magnetita (contacto simple, inclusiones), rutilo (inclusiones)	2 1 trazas
			Suma	100

5.1.1.2. Descripción detallada

Muestra de mano

Pórfido feldespático con fenocristales de plagioclasa (plag, <1mm), en una matriz muy fina de color gris oscuro verdoso. La roca esta alterada, la matriz y algunos fenocristales de plagioclasa presentan biotización. Trazas de calcopirita y pirita (cpy, py <1mm) diseminadas en las gangas y en vetillas de cuarzo hialino (qzII), rectas, sin halo y de potencia <5 mm. La muestra presenta ligero magnetismo, que sugiere presencia de magnetita (figura 9).

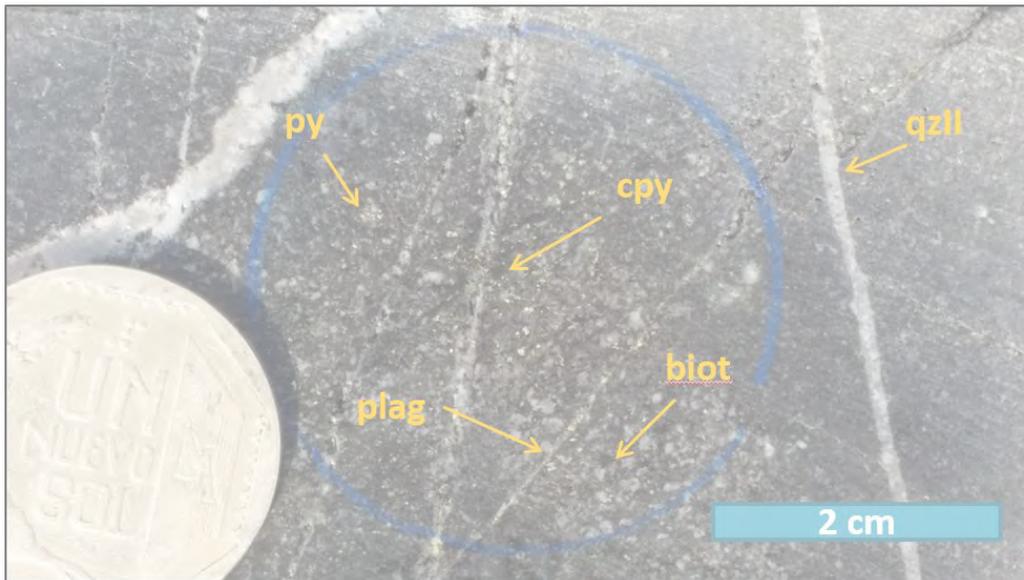


Figura 9: Muestra de mano CS1 (Subunidad BA-FILPTK)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Plagioclasa ($\approx 25\%$) en relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales $< 1,500 \mu\text{m}$, con un tamaño promedio de $700 \mu\text{m}$. Feldespato potásico **primario** ($\approx 6\%$, $< 300 \mu\text{m}$). La matriz es muy fina ($\approx 66\%$, granos anhedrales y subhedrales $< 50 \mu\text{m}$) y se encuentra completamente alterada.

La muestra presenta **débil silicificación** que reemplaza fenocristales de plagioclasa (grano de cuarzo $< 50 \mu\text{m}$), a los minerales primarios de la matriz muy fina (grano de cuarzo $< 25 \mu\text{m}$) y se presenta en vetillas (grano $< 250 \mu\text{m}$). **Intensa alteración potásica**, con biotita secundaria ($< 100 \mu\text{m}$) que reemplaza fenocristales de plagioclasa y a los minerales primarios de la matriz, en granos anhedrales y subhedrales que suelen formar agregados y están en su mayoría cloritizados; y granos de feldespato potásico secundario en vetillas (grano $< 450 \mu\text{m}$), asociado a opacos, cloritas y cuarzo secundario. En la figura 10 se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Minerales opacos

Calcopirita (2% , $< 1,600 \mu\text{m}$), forma de agregados anhedrales y granos subhedrales, que se presenta principalmente diseminada, presenta tamaños máximo y promedio de 800 y $150 \mu\text{m}$ respectivamente, y algunos granos presentan asociaciones preferentes con pirita y magnetita. Por otro lado, la calcopirita en vetillas aparece principalmente sin asociación a otro mineral opaco y en algunas ocasiones asociada a la pirita y a rutilo; alcanzando tamaños

máximo y promedio de 1,200 y 350 μm respectivamente. Tanto en morfología de vetilla o diseminada, la calcopirita ocurre en contacto simple con biotita, clorita y cuarzo secundario (de mayor a menor en frecuencia de la asociación) y presenta inclusiones de rutilo ($<20 \mu\text{m}$), magnetita ($<25 \mu\text{m}$) y galena ($<10 \mu\text{m}$). **Pirita (1%, $<1,200 \mu\text{m}$)**, algunos granos de pirita contienen inclusiones globulares de pirrotita ($<20 \mu\text{m}$), así como inclusiones de cristales de hematita (variedad especularita, $<40 \mu\text{m}$) y granos de magnetita ($<50 \mu\text{m}$) como relictos de una fase más antigua. También suelen presentar bordes y porosidades ($<50 \mu\text{m}$) reemplazadas por granos anhedrales de calcopirita. Presencia como trazas de: **magnetita, rutilo, pirrotita, galena y hematita**. En la figura 11 se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos.



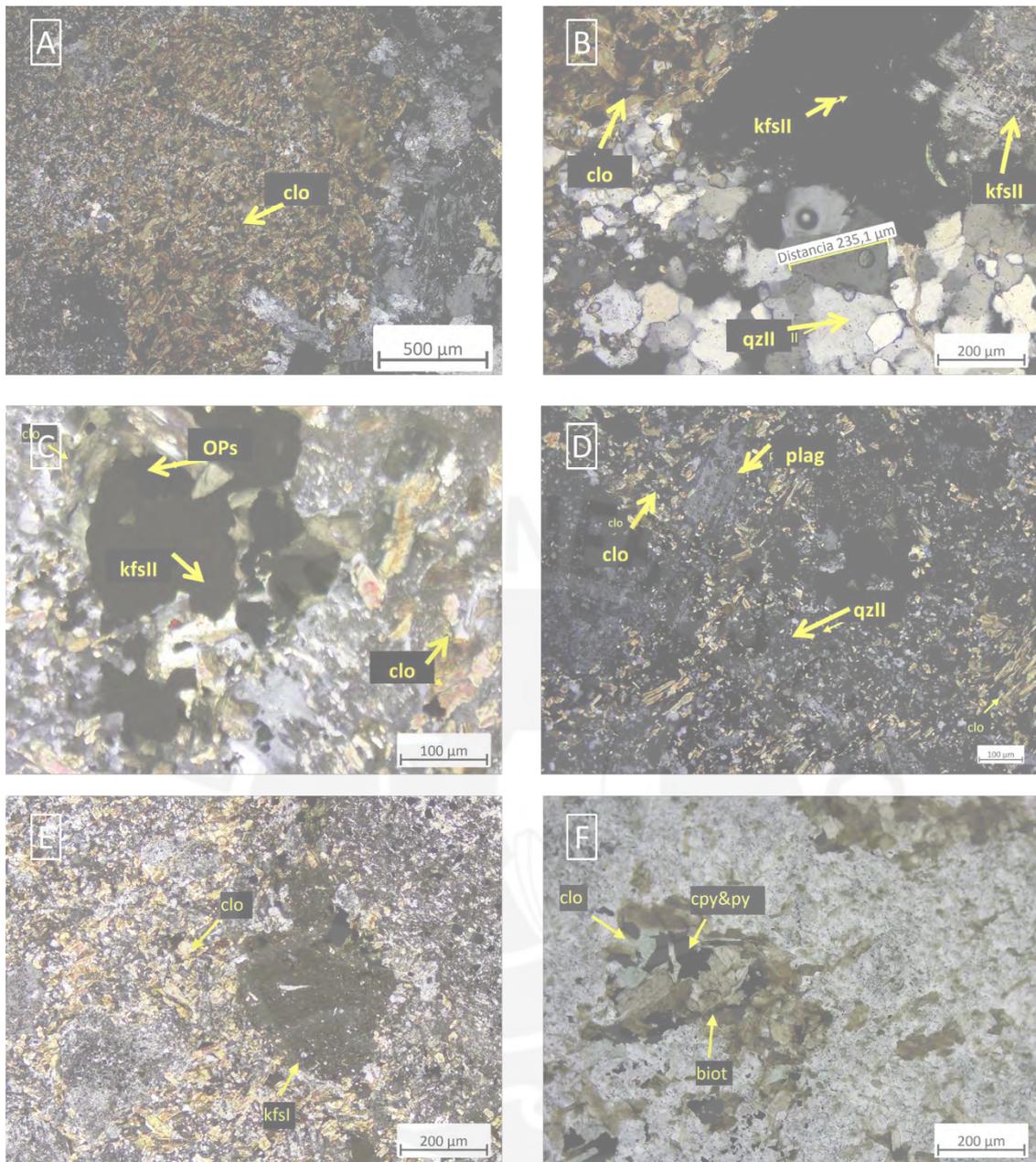


Figura 10: **A:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados, de agregados de granos de clorita (clo) que han reemplazado a la biotita secundaria. Se quiere enfatizar la importante abundancia relativa de este mineral. **B:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de granos de feldespato potásico secundario (kfsII), en contacto con granos de clorita (clo) y cuarzo secundario (qzII) de una vetilla. **C:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de grano de feldespato potásico secundario (kfs II), en contacto con opaco (OPs, probable pirita) y granos de clorita (clo). **D:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de relictos de biotita secundaria totalmente alterados por clorita (clo) y cuarzo secundario (qzII). **E:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un fenocristal de feldespato potásico (kfs I), en contacto con clorita pseudomorfa en granos de biotita secundaria. **F:** Vista al objetivo 10, en luz transmitida de granos de calcopirita y pirita (cpy&py), en contacto simple con granos de clorita (clo) y biotita (biot).

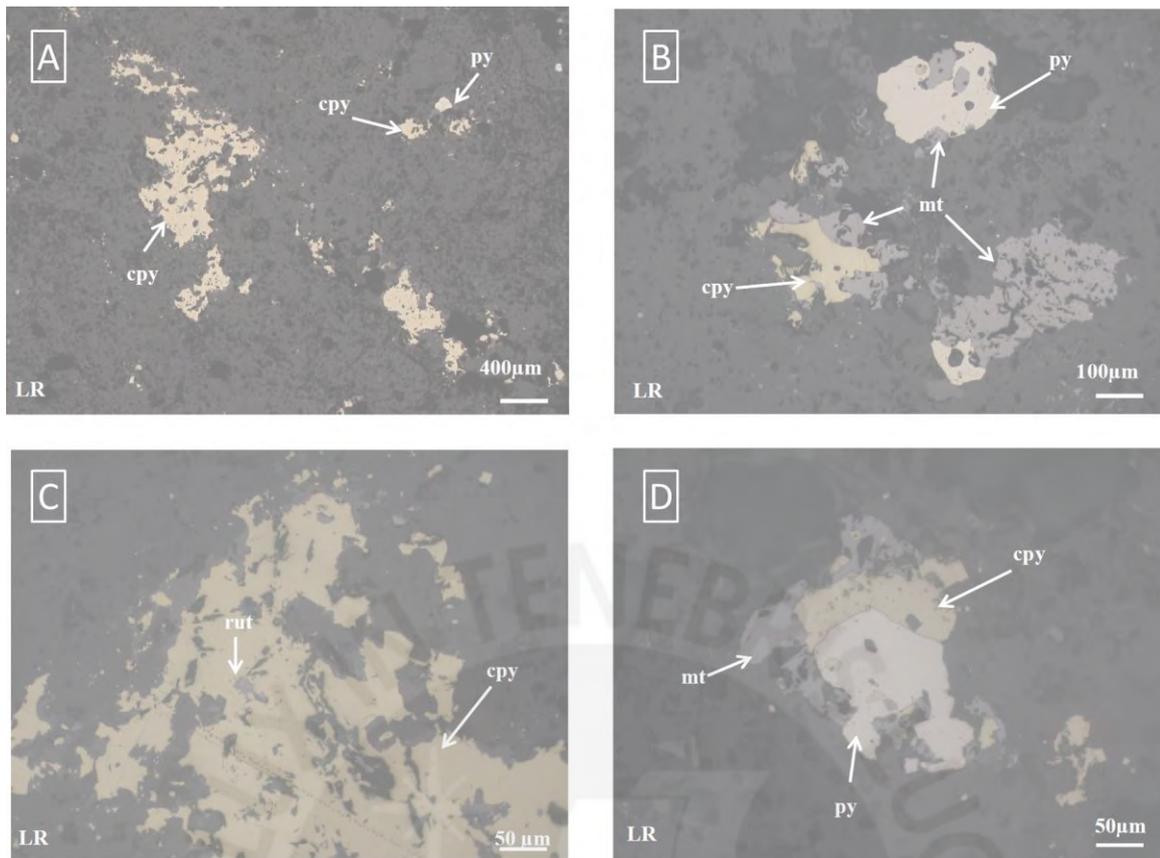


Figura 11: **A:** Vista al objetivo 2.5, de agregados anhedral de calcopirita (cpy) <math><1,000\ \mu\text{m}</math>, relleno de una vetilla. A la derecha de la foto se observan 2 granos anhedral de calcopirita de $200\ \mu\text{m}$, diseminados en la ganga y acompañados de un grano subhedral de pirita (py). **B:** Vista al objetivo 10, a la izquierda se observa un cristal anhedral de calcopirita (cpy) en contacto simple con magnetita. Arriba, cristal subhedral de pirita en contacto con magnetita y con una inclusión de este último mineral. Abajo, grano anhedral de magnetita con contacto simple a un grano subhedral de pirita. **C:** Vista al objetivo 20, de agregados anhedral de calcopirita. Al centro de la foto se ubica una inclusión de un grano anhedral de rutilo. **D:** Vista al objetivo 20, de un grano subhedral de pirita con inclusiones de calcopirita y magnetita, en contacto simple con un grano subhedral de calcopirita y granos anhedral de magnetita. Los granos anhedral de magnetita presentan inclusiones de calcopirita.

5.1.1.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia

Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 2: Resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Plagioclasa (Andesina)	$(Ca, Na)(Al, Si)_4O_8$	48
Cuarzo	SiO_2	24
Clorita (Clinocloro)	$(Mg, Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	14
Feldespato - K (Ortoclasa)	$KAlSi_3O_8$	6
Calcopirita	$CuFeS_2$	<L. D.
Mica (Biotita)	$K(Mg, Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH, F)_2]$	<L. D.
Magnetita	Fe_3O_4	<L. D.
Pirita	FeS_2	<L. D.
Rutilo	TiO_2	<L. D.

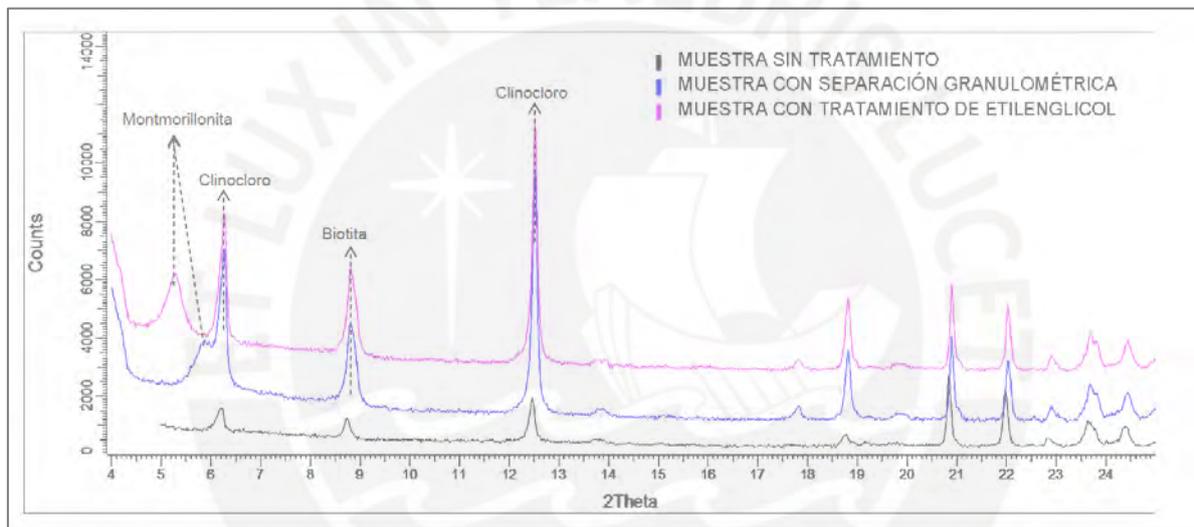


Figura 12: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica y de etilenglicol

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

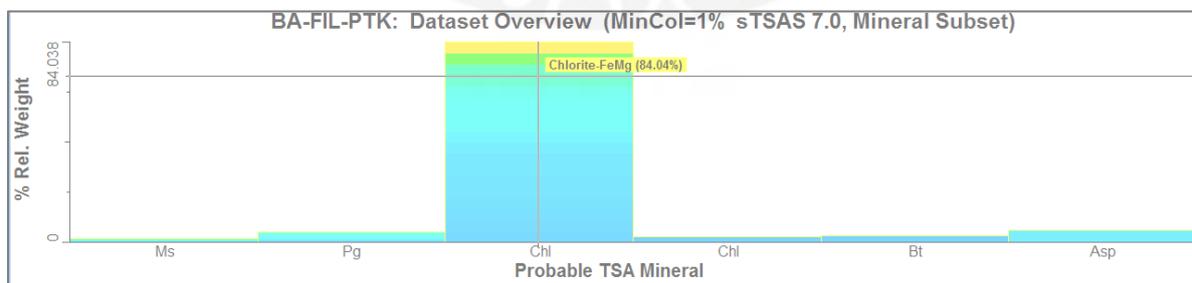


Figura 13: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Clorita Fe-Mg (Chl izquierda), paragonita (Pg), biotita (Bt), clorita Mg (Chl derecha), muscovita (Ms), sin espectro (Asp).

5.1.2. Unidad Andesita Basáltica-BA. Muestra CS2 (Tomada de la Subunidad BA PTK)

5.1.2.1. Resumen de observaciones

Muestra recolectada del área de la mina mapeada como Andesita Basáltica con alteración potásica (código BA PTK). El presente trabajo la describe como un pórfido de color gris oscuro verdoso con fenocristales medios de plagioclasa y matriz muy fina oscura dominante (alterada a biotita secundaria) con intensa alteración potásica y débil alteración filica, mineralización de calcopirita y pirita con trazas de pirrotita, hematita, magnetita y rutilo. En la [tabla 3](#) se presentan mayores detalles.

Tabla 3: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS2 (Subunidad BAPTK)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados (≈%)
Roca	Pórfido feldespático de color gris oscuro verdoso	Plagioclasa Feldespato potásico	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita -btII, clo, qzII, kfsII (contacto simple); clo (subcorona). No hay relación entre cpy y sericita	30 6
Alteración	Alteración potásica y filica, que afectan los bordes de plagioclasas y la matriz muy fina (63% del volumen de la roca). Código de mina: potásica. BA-PTK	Biotita secundaria cloritizada Feldespato potásico secundario Cuarzo secundario Muscovita (sericita)		Intensa Débil
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 250 μm (vetillas) y menor a 300 μm (diseminada)	Calcopirita Pirita Pirrotita, hematita, magnetita, rutilo	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita - py, mt (contacto simple, inclusiones)	1 Trazas Trazas
			Suma	100

5.1.2.2. Descripción detallada

Muestra de mano

Pórfido feldespático con fenocristales de plagioclasa (plag <2mm), en una matriz muy fina de color gris oscuro. La roca esta alterada, la matriz y probablemente algunos fenocristales de plagioclasa presentan intensa biotización. Trazas de calcopirita y pirita (cpy, py <1mm) diseminadas en las gangas y en vetillas de cuarzo hialino (qzII), rectas y muy

delgadas (<2mm). La muestra presenta magnetita y trazas de molibdenita diseminada en las gangas (figura 14).

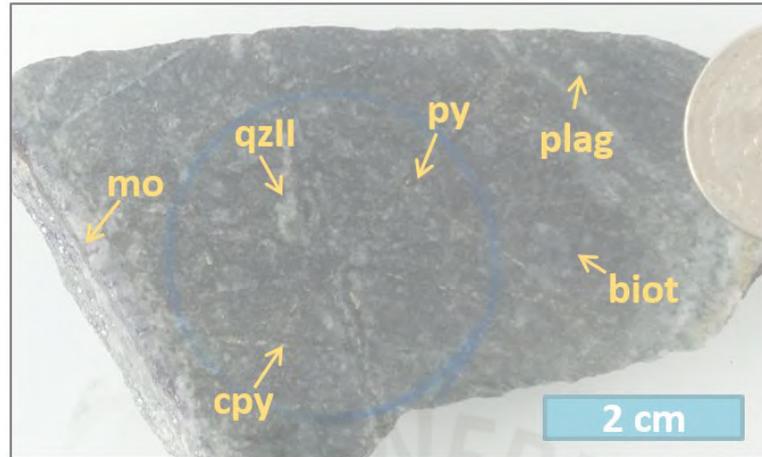


Figura 14: Muestra de mano CS2 (Subunidad BA-PTK)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Plagioclasa (≈30%) en relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales <1,600 μm, con un tamaño promedio de 800 μm. **Feldespato potásico** (≈6%, <300 μm). La matriz es muy fina (≈63%, granos anhedral y subhedral <50 μm) y se encuentra completamente alterada.

La muestra presenta **débil alteración filica** de cuarzo secundario que reemplaza fenocristales de plagioclasa (grano de cuarzo <150 μm) y a los minerales primarios de la matriz muy fina. Además, se presenta rellenando fracturas como vetillas, algunas de estas vetillas son de potencia (<25 μm) y no presentan halo de sericita; otras posteriores (relación de corte) presentan halo de sericita y tienen potencia (300-700 μm), relacionados a estos dos tipos de vetillas se tiene presencia de pirita y calcopirita. La sericita (grano <25 μm) se presenta preferentemente como halo en vetillas de cuarzo, también en menor intensidad reemplazando fenocristales de plagioclasa y a la matriz. **Intensa alteración potásica**, con biotita secundaria (<50 μm) que reemplaza fenocristales de plagioclasa y a los minerales primarios de la matriz en granos anhedral y subhedrales que suelen formar agregados y en su mayoría están cloritizados; y granos de feldespato potásico secundario reemplazando minerales de la matriz y en vetillas (grano <300 μm), asociado a opacos, cloritas y cuarzo secundario. En la figura 15 se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Minerales opacos

Calcopirita (1%, <1,000 μm), en trazas en forma de agregados anhedrales y granos subhedrales, que se presenta principalmente diseminada con tamaños máximo y promedio de 300 y 40 μm , se encuentra principalmente asociada a pirita y en contacto simple o formando sub-coronas con clorita, también presenta contacto con el cuarzo y biotita secundaria de la matriz. Por otro lado, la calcopirita en vetillas aparece sin asociación y también asociada a la pirita y magnetita, intercrecidos con granos de feldespato potásico, cuarzo secundario y en contacto con la matriz alterada por cuarzo secundario o biotita secundaria, alcanzando tamaños máximo y promedio de 250 y 50 μm respectivamente. **Pirita (<1,000 μm)**, algunos granos de pirita contienen inclusiones globulares de pirrotita (<20 μm), así como inclusiones de cristales de hematita (variedad especularita) y granos anhedrales de magnetita (<75 μm) y rutilo (<20 μm) como reliquias de una fase más antigua. También suelen presentar bordes y porosidades (<50 μm) reemplazadas por granos anhedrales de calcopirita. Presencia en trazas de **magnetita, rutilo, hematita y pirrotita**. Se destaca que los minerales opacos no presentan relación con las arcillas. En la [figura 16](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos.

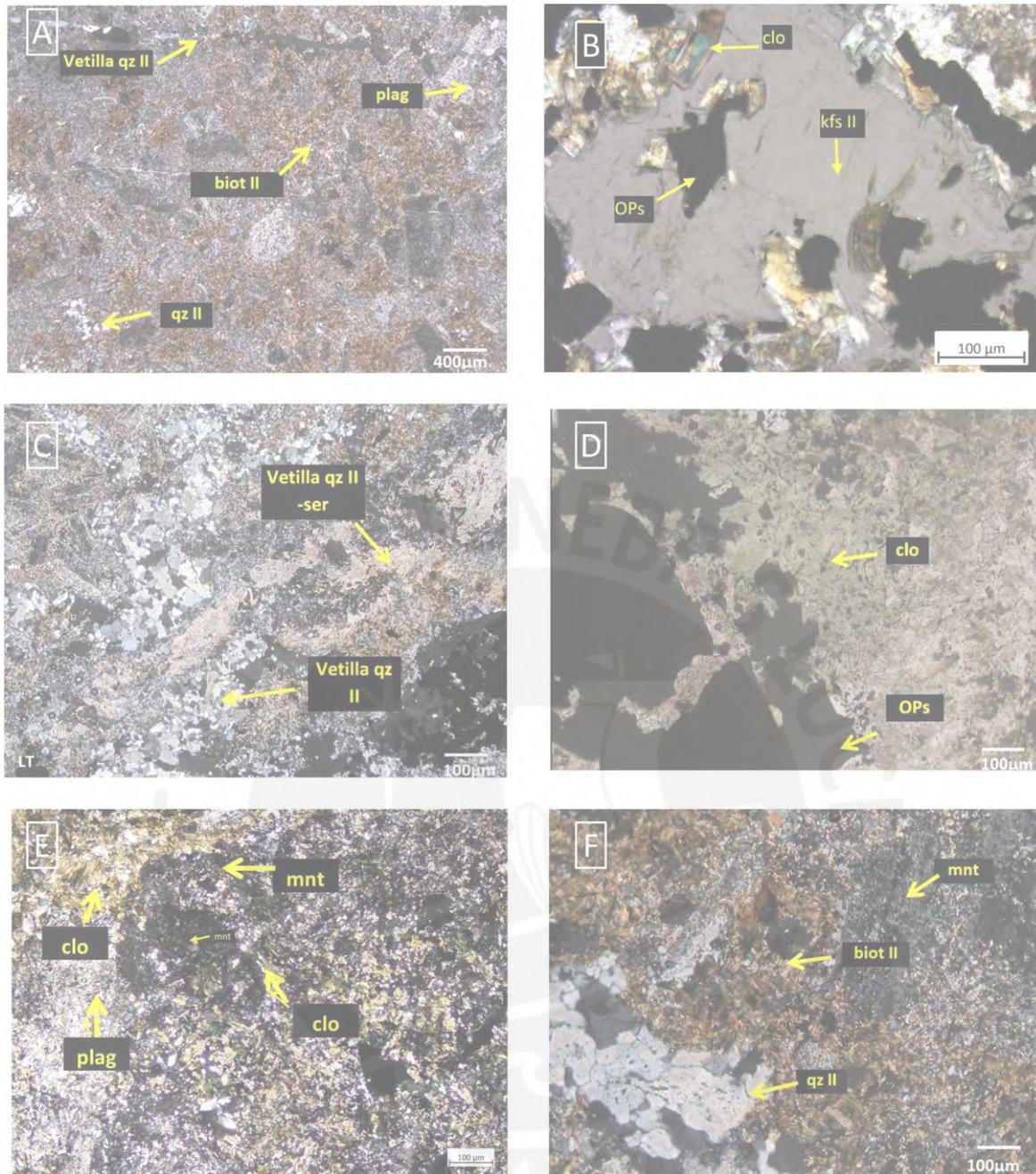


Figura 15: **A:** Vista al objetivo 2.5, en modo polarizadores cruzados, de fenocristales euhedrales de plagioclasa (plag) alterados por biotita secundaria (biot II). La matriz se observa fuertemente alterada también por la biotización (biot II). En la esquina inferior izquierda se tiene silicificación (alteración filica) como reemplazo de molde de un fenocristal (qzII) y en la parte superior se observa una vetilla de cuarzo con potencia <math>< 25 \mu\text{m}</math>. Los ensambles demuestran la fuerte alteración potásica y sobreimposición propílica que ha tenido la muestra. **B:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de grano de feldespato potásico secundario (kfs II), en contacto con opaco (OPs, probable pirita) y granos de clorita (clo). **C:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de una vetilla de cuarzo con halo de sericita que corta una vetilla cuarzo sin halo de mayor potencia. **D:** Vista al objetivo 10, en luz polarizada de agregado de granos subhedrales de biotita secundaria totalmente cloritizados (clo), en contacto con minerales opacos (OPs). **E:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados del molde de un fenocristal de plagioclasa (plag) totalmente alterado por clorita (clo) y montmorillonita (mnt). **F:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de fenocristal de plagioclasa reemplazado por biotita secundaria (biot II) que está cloritizada notándose esto en los tonos amarillos que se superponen al color café de la biotita; cuarzo secundario reemplazando molde de plagioclasa (qzII) y montmorillonita (mnt, también alterando molde).

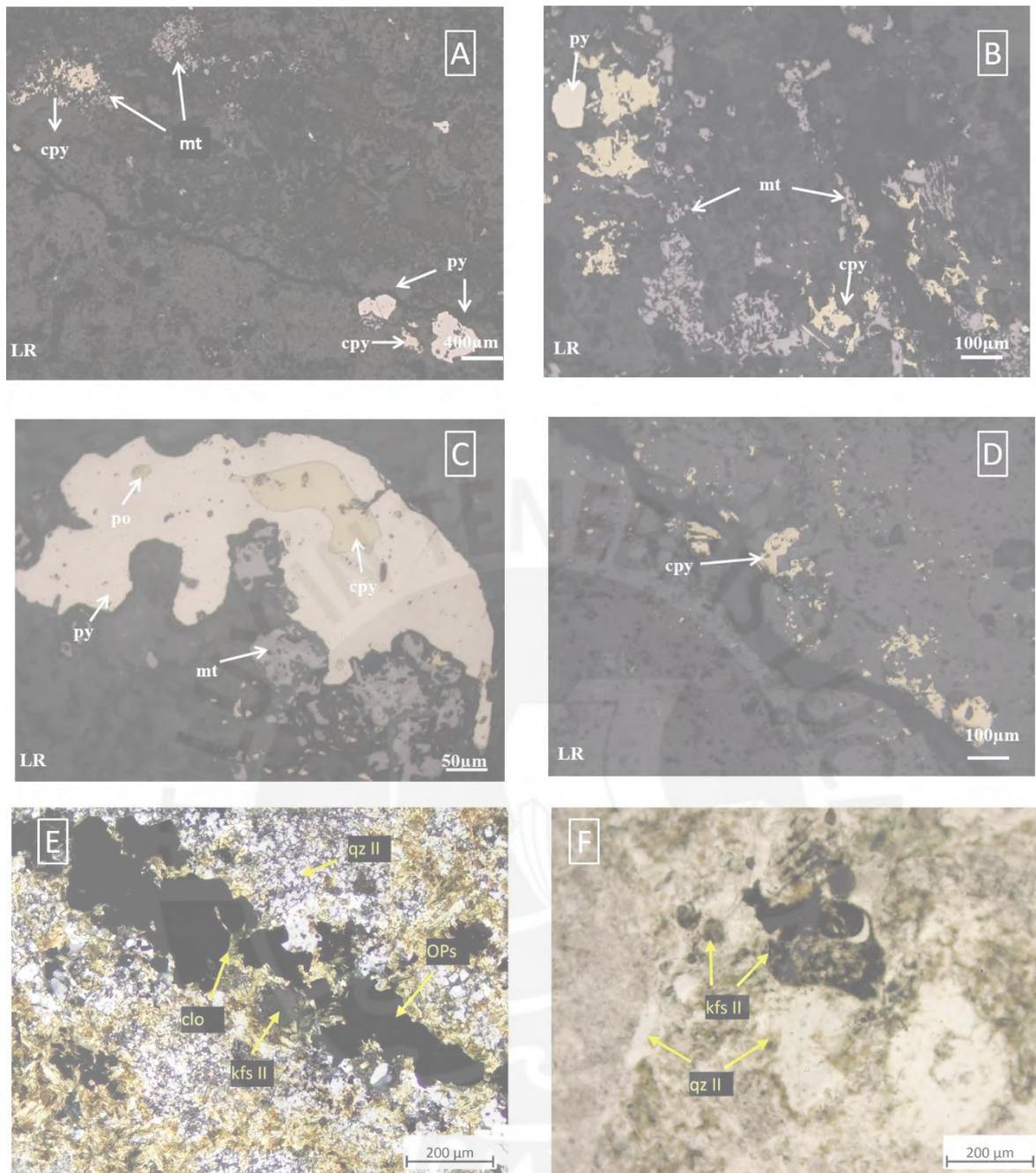


Figura 16: **A:** Vista al objetivo 2.5 de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) en contacto con agregados anhedrales de magnetita (mt). Abajo, se tienen dos granos subhedrales de pirita (py) y un grano anhedral de calcopirita, todos ellos diseminados en las gangas. **B:** Vista al objetivo 10, de agregados anhedrales de magnetita (mt) con reemplazamientos en bordes por granos anhedrales de calcopirita (cpy). A la izquierda se observan 3 granos anhedrales de calcopirita y un grano subhedral de pirita (py). **C:** Vista al objetivo 20, de un grano anhedral de pirita (py) con una inclusión de 100 μm de calcopirita (cpy) y otra inclusión de 25 μm de pirrotita (po). Grano de pirita en contacto con magnetita (mt). **D:** Vista al objetivo 10, calcopirita (cpy) sin asociación con otro mineral reflectante en vetillas. **E:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de una vetilla, con granos de calcopirita y pirita (OPs) intercrecidos con clorita (clo) y feldespato potásico secundario (kfsII). En contacto con la matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y biotita secundaria. **F:** Vista al objetivo 10, en luz transmitida de una vetilla de cuarzo (qzII) y feldespato potásico secundario (kfsII).

5.1.2.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 4: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Plagioclasa (Andesina)	$(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$	38
Cuarzo	SiO_2	24
Feldespato - K (Ortoclasa)	$KAlSi_3O_8$	18
Clorita (Clinocloro)	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	11
Mica (Biotita)	$K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]$	2
Calcopirita	$CuFeS_2$	<L. D.
Rutilo	TiO_2	<L. D.
Pirita	FeS_2	<L. D.
Montmorillonita	$(Na,Ca)_0,3(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n(H_2O)$	<L. D.



Figura 17: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica y de etilenglicol

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

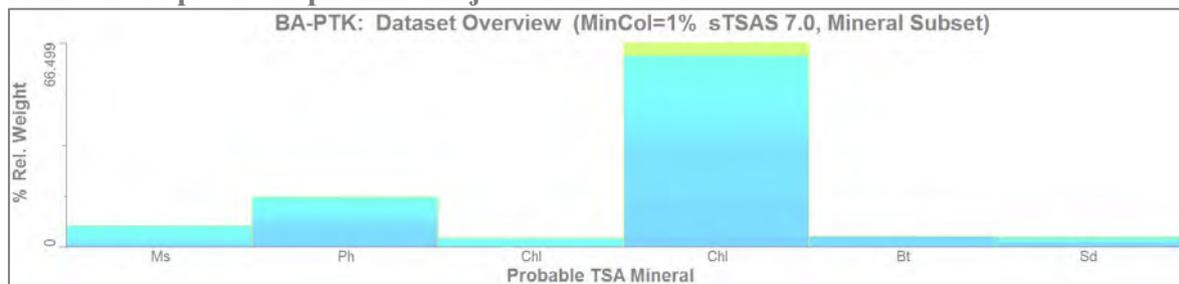


Figura 18: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Clorita Fe-Mg (Chl derecha), fengita (Ph), muscovita (Ms), clorita Fe (Chl izquierda), biotita (Bt), siderita (Sd).

5.1.3. Unidad Andesita Basáltica-BA. Muestra CS3 (Tomada de la Subunidad IA-FILPTK)

5.1.3.1. Resumen de observaciones

Muestra extraída de la región de la mina mapeada como Andesita Basáltica con intensa alteración filica (código IA FIL PTK). El presente trabajo la describe como un pórfido de color gris oscuro verdoso con fenocristales medios de plagioclasa y matriz muy fina oscura dominante (alterada a biotita secundaria) con muy intensa alteración filica, intensa alteración potásica y muy débil alteración argílica, mineralización de calcopirita y pirita con trazas de molibdenita, pirrotita, magnetita y rutilo. En la [tabla 5](#) se presentan mayores detalles.

Tabla 5: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS3 (Subunidad IAFILPTK)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados (≈%)
Roca	Pórfido feldespático de color gris oscuro verdoso	Plagioclasa Feldespato potásico		13 5
Alteración	Alteración filica, potásica, de arcillas y carbonatos, que afectan los bordes de plagioclasas y la matriz muy fina (79% del volumen de la roca). Código de mina: IA-FIL-PTK	Biotita secundaria cloritizada Feldespato potásico secundario Calcita Cuarzo secundario Illita Muscovita (sericita) Arcillas (Montmorillonita)	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita -clo, mnt, mus, cac (contacto simple); clo, mnt (subcorona)	Intensa Muy intensa Muy débil
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 3000 μm (vetillas) y menor a 500 μm (diseminada)	Calcopirita Pirita Molibdenita, pirrotita, magnetita, rutilo.	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita - py, rt (contacto simple, inclusiones); mo (veteado)	1 2 trazas
Suma				100

5.1.3.2. Descripción detallada Muestra de mano

Pórfido feldespático con fenocristales de plagioclasa (plag, <2mm), en una matriz muy fina de color gris verdoso. La roca esta alterada, se distingue una intensa biotización en la matriz que ha sido sobreimpuesta por una muy intensa sericitización-silicificación (color blanquecino y por zonas se raya muy fácilm o difícilmente). Trazas de calcopirita y pirita

(cpy, py <1mm) disseminadas en las gangas y en vetillas de sulfuro, rectas y con halo de sericita. Presenta también, cristales subhedrales finos de molibdenita, disseminados en las gangas y venillas de cuarzo secundario (figura 19).

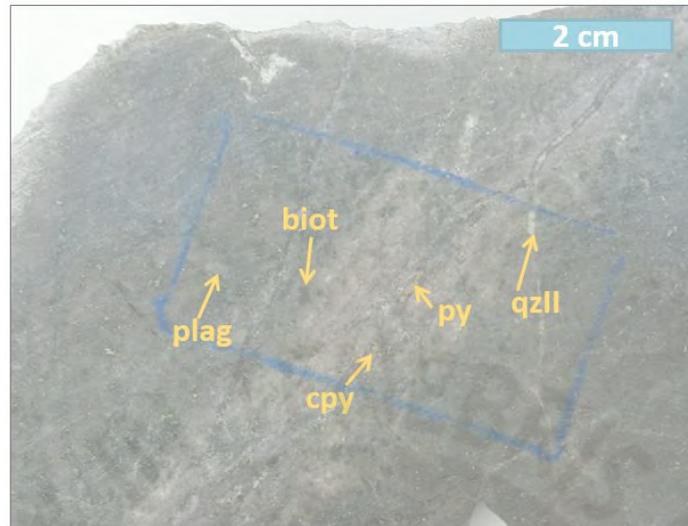


Figura 19: Muestra de mano CS3 (Subunidad IA-FILPTK)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Plagioclasa (≈13%) en relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales <1,600 μm, con un tamaño promedio de 700 μm. **Feldespato potásico** (≈5%, <250 μm). La matriz es muy fina (≈79%, granos anhedrales y subhedrales <50 μm) y se encuentra completamente alterada.

La muestra presenta **muy intensa alteración filica** de cuarzo secundario y sericita. El cuarzo reemplaza fenocristales de plagioclasa (grano de cuarzo <600 μm) y a los minerales primarios de la matriz muy fina, también se presenta rellenando fracturas como vetillas (grano de cuarzo secundario <600 μm); y sericita (grano <200 μm) reemplazando fenocristales de plagioclasa y a la matriz. **Intensa alteración potásica**, con biotita secundaria (<100 μm) que reemplaza fenocristales de plagioclasa y a los minerales primarios de la matriz en granos anhedrales y subhedrales y que en su mayoría están cloritizados y argilizados; calcita en la matriz (<10 μm) y en vetillas (<400 μm), asociada con cuarzo secundario; granos de feldespato potásico secundario en vetillas (grano <200 μm). Finalmente, **muy débil alteración de arcillas** alterando sobre todo las plagioclasas y biotitas primarias. En la figura 20 se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Minerales opacos

Calcopirita (1%, <1,000 μm), se observa igual cantidad de calcopirita diseminada que en vetillas. En esta última ocurrencia (vetillas), la calcopirita aparece sin asociación alcanzando tamaños máximo y promedio de 3000 y 400 μm respectivamente. Por otro lado, la calcopirita diseminada presenta tamaños máximo y promedio de 500 y 250 μm respectivamente, asociada preferentemente con rutilo (inclusiones <75 μm) y molibdenita. Tanto en morfología de vetilla o diseminada, la calcopirita ocurre en contacto simple con clorita, montmorillonita, sericita y calcita (de mayor a menor en frecuencia de la asociación). Se destaca que en este caso si hay asociación entre calcopirita y arcillas. **Pirita (2%, <4,000 μm)**, contiene inclusiones globulares de pirrotita (<150 μm) así como de rutilo (<25 μm) como reliquias de una fase más antigua, también suelen presentar bordes y porosidades reemplazadas por calcopirita (<150 μm), tiene pequeñas inclusiones de magnetita (<20 μm). Presencia muy poco abundante de **rutilo** en inclusiones en pirita, y en inclusiones y bordes de calcopirita. Trazas de cristales euhedrales prismáticos de **molibdenita** en ocasiones interpenetrados entre ellos (<200 μm), asociados en relaciones de contacto simple y de penetración a calcopirita y pirita. Finalmente, trazas de **magnetita y pirrotita** como inclusiones en pirita. En la [figura 21](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos.

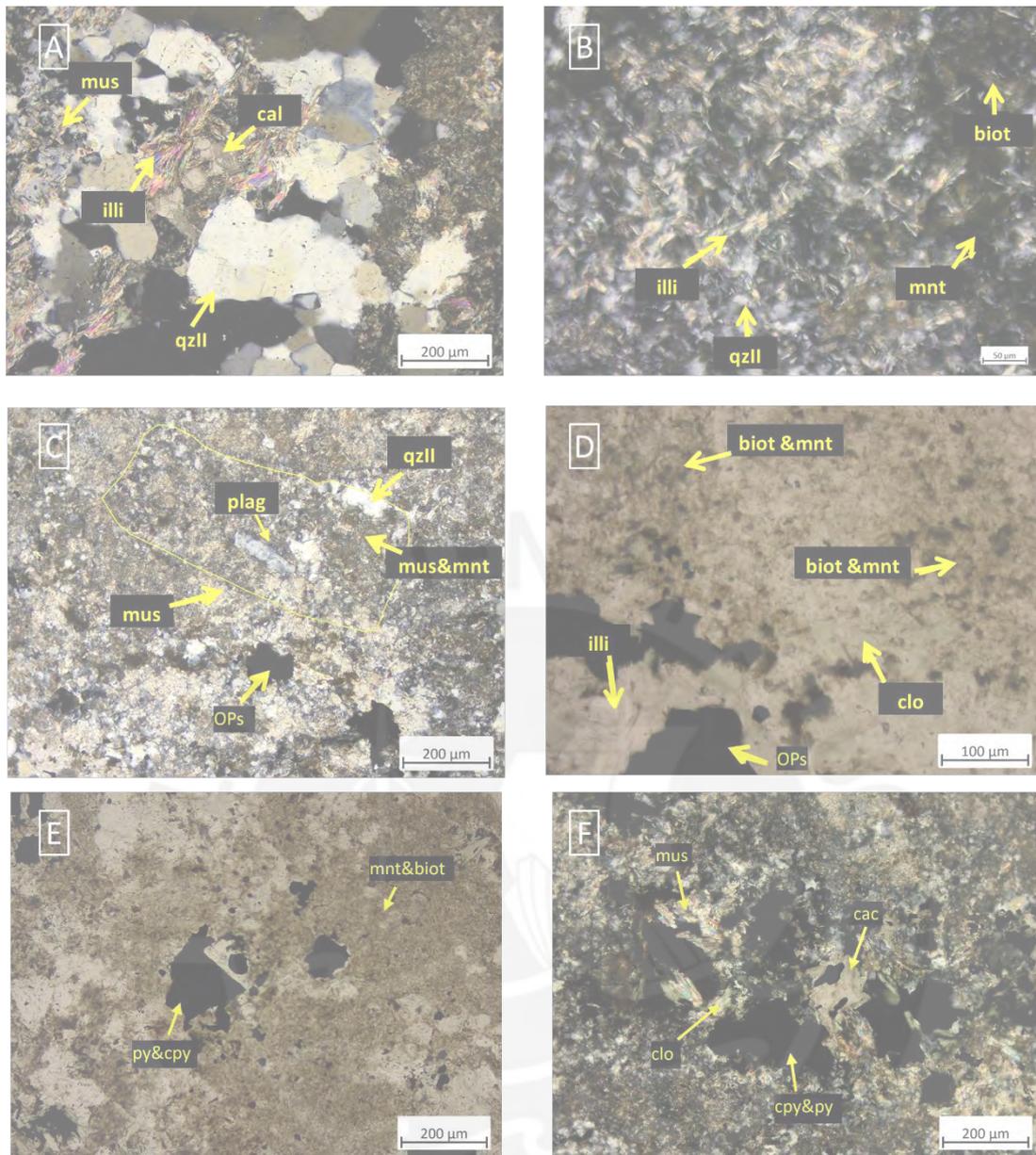


Figura 20: **A:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de una vetilla de cuarzo secundario (qzII), en contacto con granos de calcita (cal) y de illita (illi). A los costados de la vetilla, se observa la matriz fina alterada por muscovita de grano fino (mus) y por cuarzo secundario. **B:** Vista al objetivo 20, en modo polarizadores cruzados de la matriz de la matriz fina. Se observa que esta ha sido intensamente silicificada, presentando abundantes granos de cuarzo secundario <25 μm (qzII), que están asociados a granos de illita (illi). A la derecha, relictos de biotita (biot), que ha sido alterada por montmorillonita (mnt). **C:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de grano de relictos de un fenocrystal de plagioclasa (plag), que ha sido reemplazado por muscovita (mus) y montmorillonita (mnt), así como por cuarzo secundario (qzII). También se observa un opaco (probable pirita o calcopirita), que está rodeado por muscovita y montmorillonita (mnt). **D:** Vista al objetivo 20, en luz polarizada de relictos de granos de biotita (biot) que han sido completamente alterados por montmorillonita (mnt). Asociados a granos de clorita (clo) e illita (illi). **E:** Vista al objetivo 10, en luz polarizada (luz transmitida) de granos de pirita y calcopirita (cpy&py) disseminados en una matriz de biotita secundaria fuertemente alterada por montmorillonita (mnt&biot). **F:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de una vetilla con granos de calcopirita y pirita (cpy&py), intercrecidos con clorita (clo), calcita (cac) y sericita (mus).

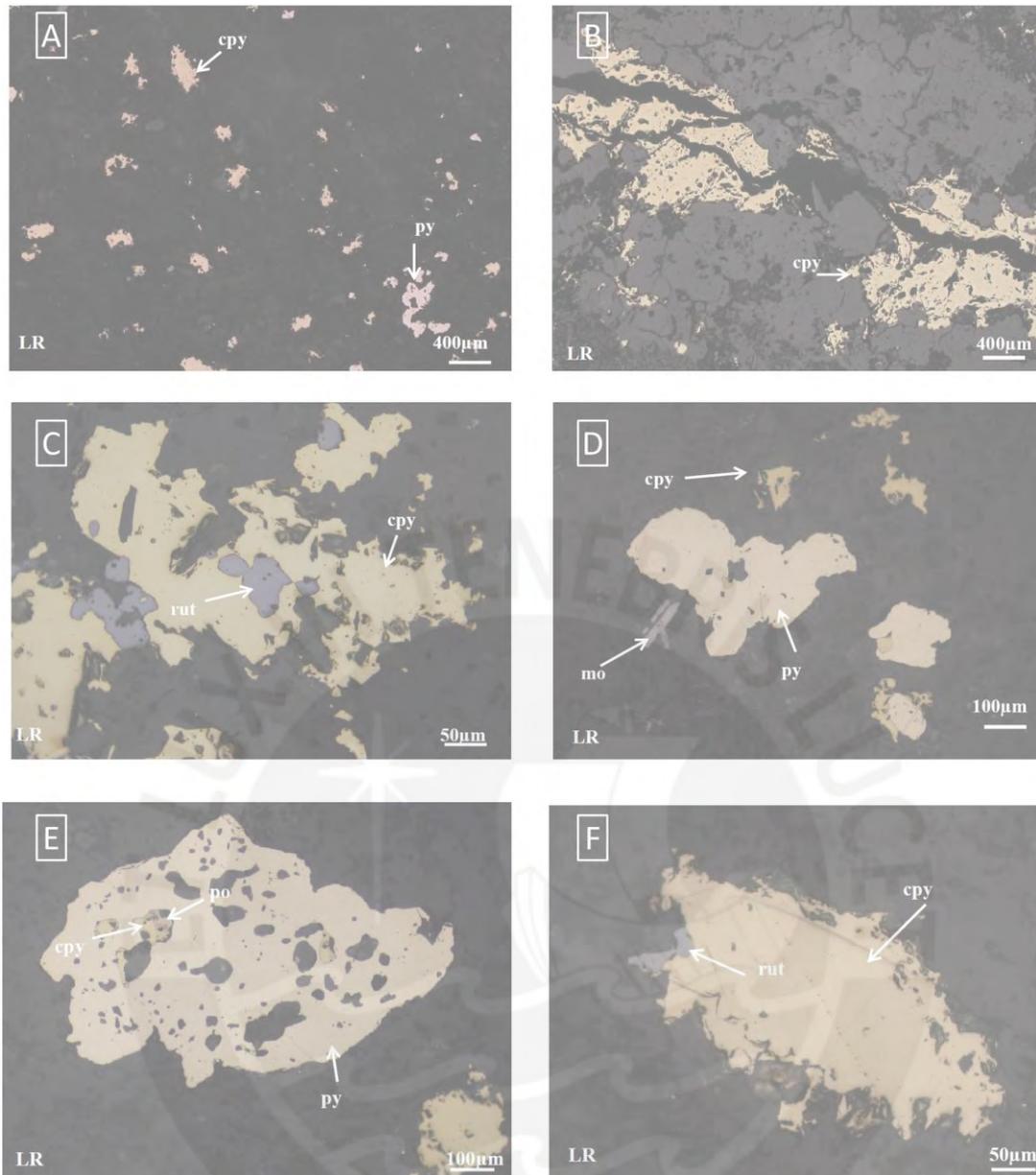


Figura 21: **A:** Vista al objetivo 2.5, se observan granos anhedrales de calcopirita (cpy) con tamaño promedio de 300 μm , diseminados en las gangas y granos subhedrales de pirita (py) en la esquina inferior derecha; mayor abundancia de calcopirita sobre pirita. **B:** Vista al objetivo 2.5, de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) relleno de vetillas. **C:** Vista al objetivo 20, de un agregado anhedral de calcopirita (cpy) con inclusiones de granos subhedrales de rutilo (rut). **D:** Vista al objetivo 10, de izquierda a derecha, cristales euhedrales prismáticos de molibdenita (mo); granos subhedrales de pirita (py) con inclusiones y reemplazamientos de calcopirita (cpy); y granos de calcopirita no asociados a otro mineral reflectivo, diseminados en las gangas. **E:** Vista al objetivo 10, grano anhedral de pirita (py) con inclusiones de calcopirita (cpy) y pirrotita (po). **F:** Vista al objetivo 20, de un grano anhedral de calcopirita (cpy) en contacto simple a su izquierda con un grano anhedral de rutilo (rut).

5.1.3.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 6: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Plagioclasa (Andesina)	$(Ca,Na)(Al,Si)4O8$	25
Illita	$(K,H3O)(Al,Mg,Fe)2(Si,Al)4O10[(OH)2(H2O)]$	19
Cuarzo	$SiO2$	15
Feldespato - K (Ortoclasa)	$KAlSi3O8$	9
Mica (Biotita)	$K(Mg,Fe)3[AlSi3O10(OH,F)2]$	9
Clorita (Clinocloro)	$(Mg,Fe)5Al(Si3Al)O10(OH)8$	9
Montmorillonita	$(Na,Ca)0,3(Al,Mg)2Si4O10(OH)2 \cdot n(H2O)$	8
Calcopirita	$CuFeS2$	2
Pirita	$FeS2$	<L. D.
Magnetita	$Fe3O4$	<L. D.
Rutilo	$TiO2$	<L. D.

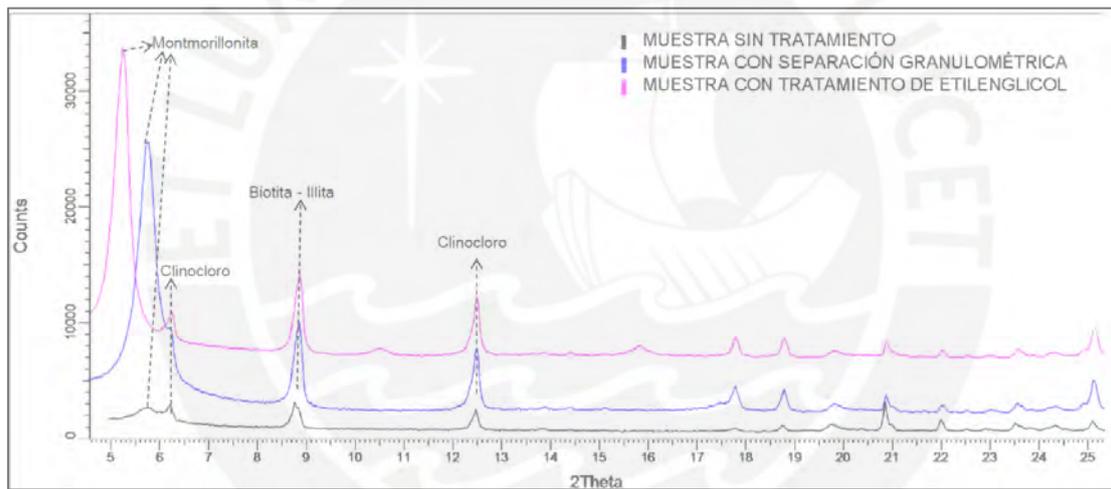


Figura 22: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica y de etilenglicol

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

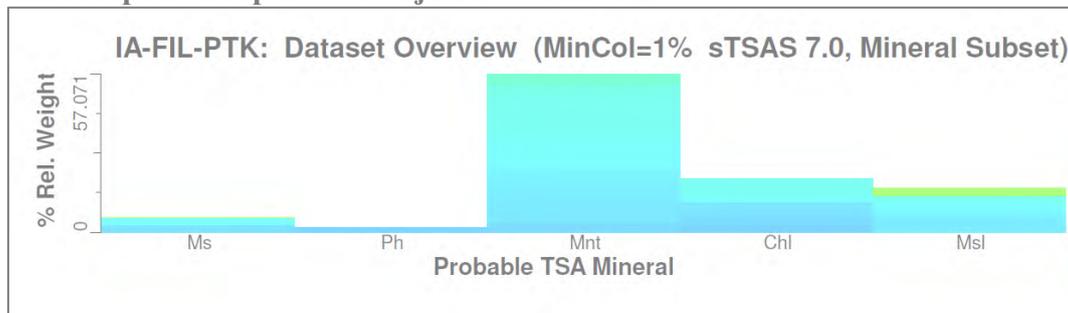


Figura 23: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Montmorillonita (Mnt), clorita Fe-Mg (Chl izquierda), mezcla illita-muscovítica (MsI), muscovita (Ms), fengita (Ph).

5.1.4. Unidad Latita Porfirítica-LP. Muestra CS4 (Tomada de la Subunidad LP PTK)

5.1.4.1. Resumen de observaciones

Muestra recolectada del área de la mina mapeada como Latita Porfirítica con alteración potásica (código LP PTK). El presente trabajo la describe como un pórfido cuarzo-feldespático de color gris claro verdoso con fenocristales medios dominantes de cuarzo, plagioclasa y biotita, con intensa alteración filica, débil alteración potásica-propilítica y muy débil alteración argílica, mineralización de calcopirita y pirita con trazas de magnetita, rutilo y esfalerita. En la [tabla 7](#) se presentan mayores detalles.

Tabla 7: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS4 (Subunidad LP PTK)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados (≈%)
Roca	Pórfido cuarzo-feldespático de color gris claro verdoso	Plagioclasa Feldespato potásico I Cuarzo primario Biotita	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita - qzII, clo, mus (contacto simple). No hay relación entre la calcopirita y la montmorillonita	36
Alteración	Alteración potásica, filica, de arcillas y carbonatos, que afectan los bordes de los feldespatos, la biotita y la matriz muy fina (43% del volumen de la roca). Código de mina: LP-PTK	Cuarzo secundario Muscovita (sericita) Feldespato potásico secundario Calcita Montmorillonita		4
				12
			5	
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 600 μm (vetillas) y menor a 200 μm (diseminada)	Calcopirita Pirita Magnetita, rutilo, esfalerita	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita - py, rt (contacto simple, inclusiones); ef (contacto s.)	Intensa
				Débil
				Muy débil
				0.3
				0.4
				trazas
			Suma	100

5.1.4.2. Descripción detallada

Muestra de mano

Pórfido cuarzo feldespático con fenocristales de cuarzo (qz, <2 mm), biotita (bt, <2 mm) y plagioclasa (plag, <3 mm), en una matriz muy fina de color gris verdoso. La roca esta alterada, la matriz y algunos fenocristales de biotita presentan color verdoso que sugiere cloritización o sericitización moderada, los feldespatos a su vez son rayados muy fácilmente

sugiriendo una sericitización moderada-intensa. Trazas de calcopirita y pirita (cpy, py <2 mm) en vetillas de cuarzo (qz II) y diseminadas en las gangas, ligero magnetismo (probables trazas de magnetita), y cristales subhedrales de molibdenita (<1 mm) en vetilla de cuarzo y diseminados en las gangas (Figura 24).

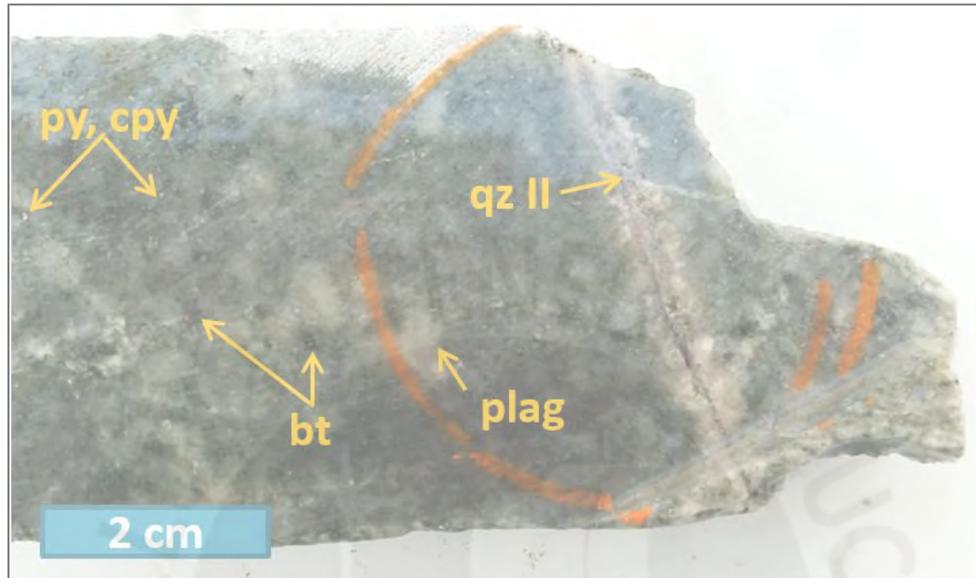


Figura 24: Muestra de mano CS4 (Subunidad LP-PTK)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Plagioclasa ($\approx 36\%$) en fenocristales euhedrales y subhedrales $< 3,000 \mu\text{m}$. **Feldespato potásico** ($\approx 4\%$, $< 250 \mu\text{m}$). **Cuarzo primario** ($\approx 12\%$) en fenocristales anhedrales redondos $< 2,000 \mu\text{m}$. **Biotita** ($\approx 5\%$) en fenocristales euhedrales y subhedrales $< 2,400 \mu\text{m}$. La matriz es muy fina ($\approx 43\%$, granos anhedrales y subhedrales $< 50 \mu\text{m}$) y se encuentra completamente alterada a cuarzo, sericita, feldespato potásico secundario, calcita y arcillas.

La muestra presenta **intensa alteración filica** de cuarzo secundario y muscovita de grano fino que reemplaza fenocristales de plagioclasa (grano de cuarzo $< 300 \mu\text{m}$, grano de muscovita $< 25 \mu\text{m}$) y a los minerales primarios de la matriz muy fina. **Débil alteración potásica** sobreimpuesta por calcita, con vetillas de feldespato potásico (tamaño de grano $< 200 \mu\text{m}$); clorita después de biotita y calcita en la matriz ($< 10 \mu\text{m}$) y en vetillas asociada con cuarzo secundario (grano de calcita $< 200 \mu\text{m}$, grano de cuarzo $< 1,200 \mu\text{m}$). Y finalmente, **muy débil alteración argílica**, de montmorillonita que afecta a los fenocristales de plagioclasa y sobre todo a la matriz. En la figura 25 se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Minerales opacos

Calcopirita, en trazas en forma de agregados anhedrales y granos subhedrales, que se presenta principalmente en vetillas, asociada a pirita (como inclusiones de calcopirita en pirita y reemplazando bordes de pirita) y esfalerita (que reemplaza bordes de calcopirita), alcanzando tamaños máximo y promedio de 600 y 200 μm respectivamente. Por otro lado, la calcopirita diseminada presenta tamaños máximo y promedio de 200 y 80 μm respectivamente, y está asociada preferentemente con pirita (inclusiones y reemplazamiento de bordes) y rutilo (que reemplaza bordes de calcopirita). Tanto en morfología de vetilla o diseminada, la calcopirita ocurre en contacto simple con cuarzo secundario, clorita y sericita (de mayor a menor en frecuencia de asociación). **Pirita**, como traza en granos euhedrales y subhedrales, algunos cristales contienen inclusiones de rutilo ($<50 \mu\text{m}$) y de magnetita ($<10 \mu\text{m}$), y también suelen presentar inclusiones y bordes reemplazados por calcopirita. **Magnetita** en trazas como granos euhedrales y subhedrales preferentemente diseminados en las gangas y en pequeña proporción como inclusiones en la pirita. **Esfalerita** y **rutilo**, en trazas como granos anhedrales que reemplazan bordes de calcopirita. Se destaca que los minerales opacos no presentan relación con las poco abundantes arcillas. En la [figura 26](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos.

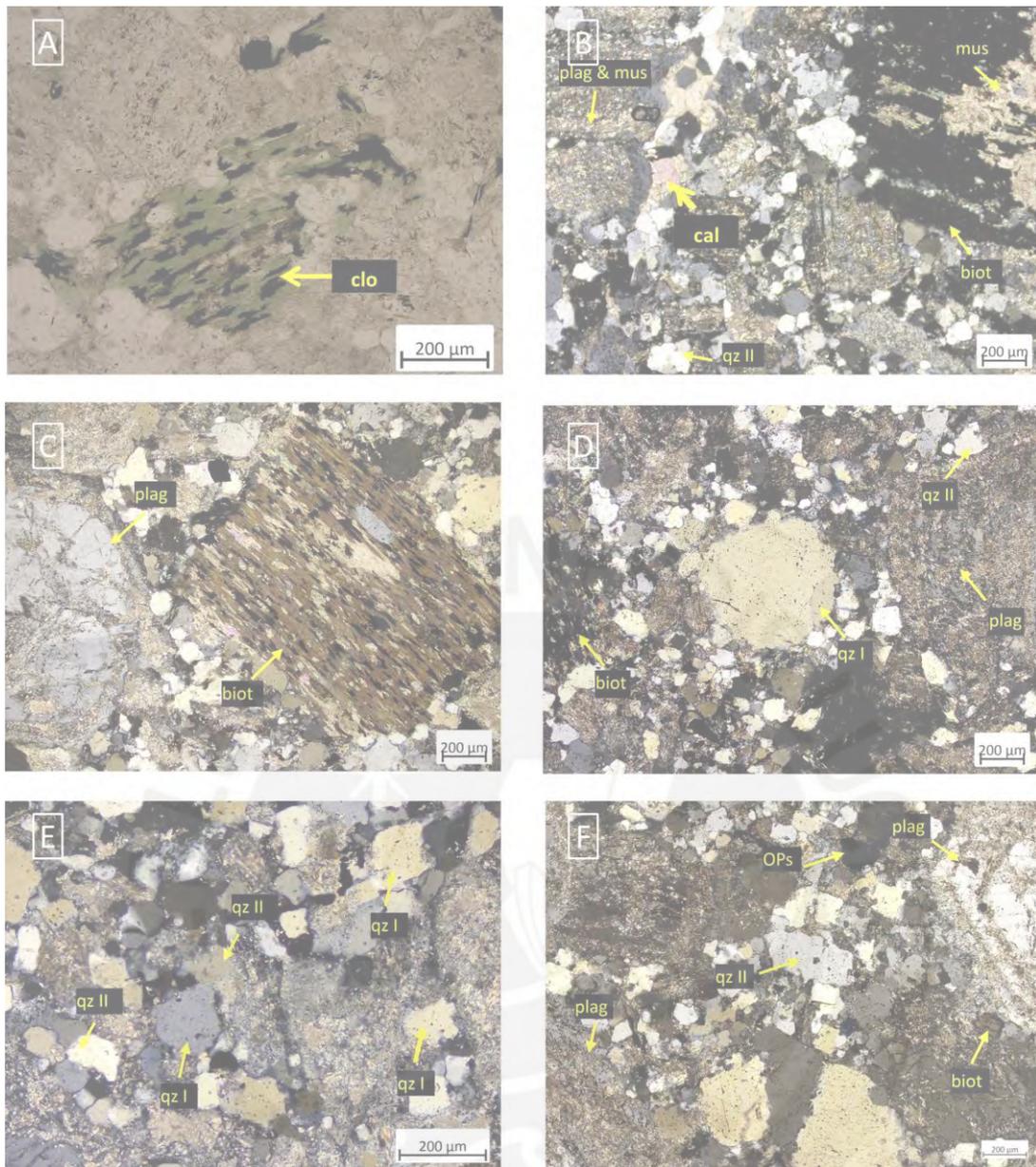


Figura 25: **A:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de fenocristal euhedral de biotita totalmente cloritizado (clo). **B:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de fenocristal de plagioclasa totalmente alterado por muscovita de grano fino (plagimus). Al centro de la foto, vetilla de cuarzo secundario (qzII) y calcita (cal). A la derecha, fenocristal de biotita (biot) alterado por muscovita de grano fino (mus). **C:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de fenocristal de plagioclasa (plag), que presenta alteración de muscovita de grano fino (sericita) en fracturas. Al centro de la foto, matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y muscovita (mus). A la derecha, fenocristal de biotita (biot) alterado por muscovita de grano fino (mus). **D:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de fenocristal redondeado de cuarzo (qzI). A la izquierda, fenocristal de biotita (biot) alterado por montmorillonita. A la derecha de la foto, plagioclasa (plag) alterada por cuarzo secundario (qzII) y muscovita. **E:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados fenocristales redondeados de cuarzo (qzI), que se encuentran aislados en la matriz fina. Por otro lado, se tienen los granos de cuarzo secundario (qzII), que se presentan asociados y en contacto a lo largo de sus bordes. **F:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de vetilla de cuarzo secundaria (qzII), asociada con granos de minerales opacos (OPS), pirita. Se observan fenocristales de plagioclasa (plag), alterados por sericita, y a la derecha un relicto de un fenocristal de biotita (biot).

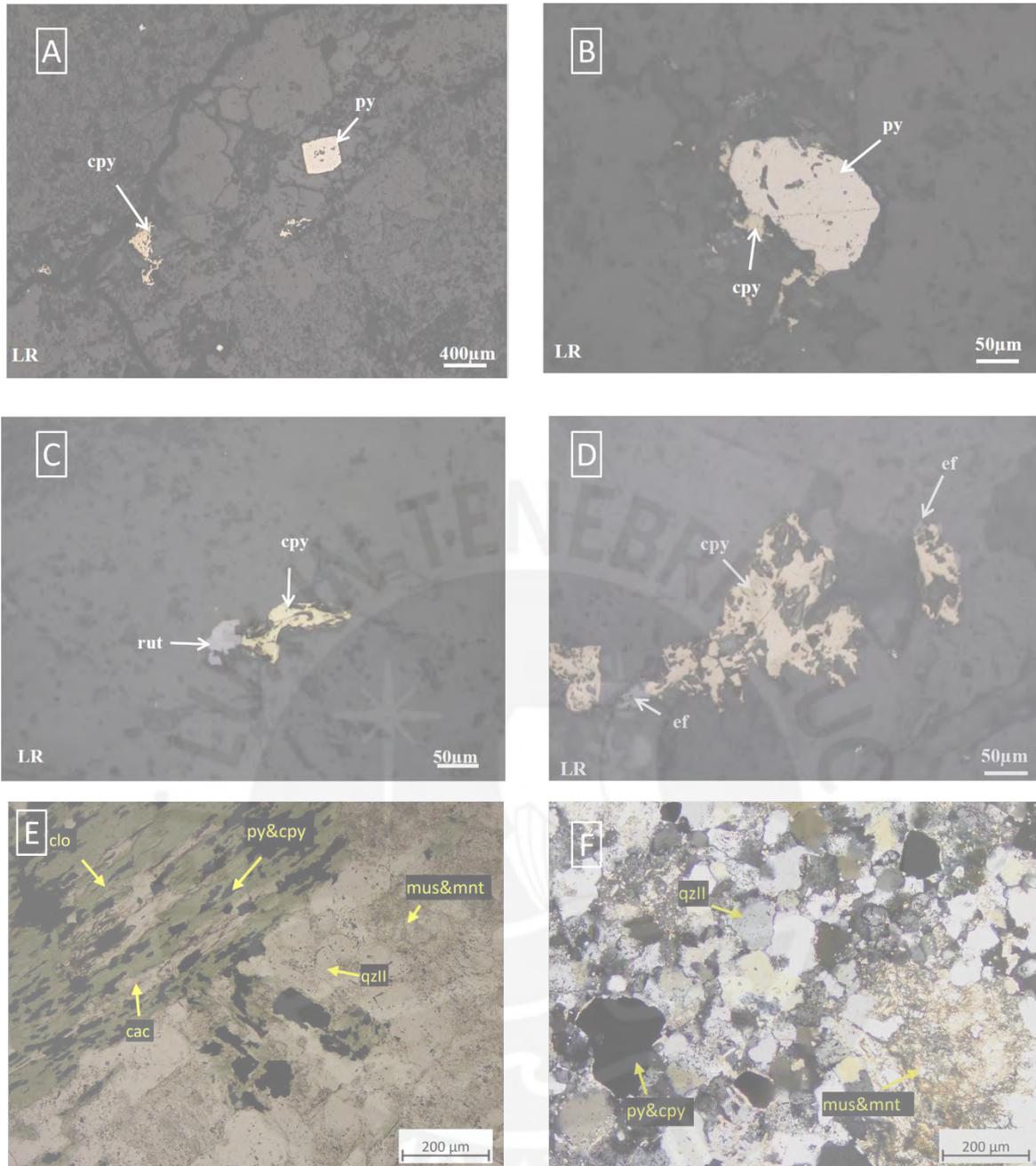


Figura 26: **A:** Vista al objetivo 2.5 de un cristal euhedral de pirita (py) y de agregados anhedral de calcopirita (cpy), todos ellos relacionados a fracturas de la muestra. Esta fotomicrografía con el menor acercamiento permite visualizar la poca abundancia de calcopirita que hay en comparación con las demás secciones. **B:** Vista al objetivo 20, de un grano anhedral de pirita (py) con reemplazamientos en bordes por granos anhedral de calcopirita (cpy). También se observan finas inclusiones de calcopirita en el grano anhedral de pirita. **C:** Vista al objetivo 20, de un grano anhedral de calcopirita (cpy) en contacto con un grano anhedral de rutilo (rut). **D:** Vista al objetivo 20, de agregados anhedral de calcopirita (cpy) con reemplazamientos en bordes por esfalerita (ef) que se observan cerca de la esquina inferior izquierda y de la esquina superior derecha. **E:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un grano euhedral de biotita que ha sido cloritizado (clo), presenta cavidades en las zonas de clivaje que han sido rellenados por pirita y calcopirita (cpy&py) y calcita (cac). En la foto también se observa la matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y sericita y arcillas (mus&mnt). **F:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos de pirita y calcopirita (cpy&py) diseminados en matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y sericita y arcillas (mus&mnt).

5.1.4.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia

Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 8: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	25
Plagioclasa (Andesina)	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	39
Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ (H ₂ O)]	11
Feldespato - K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	9
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	5
Calcita	CaCO ₃	3
Mica (Muscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	2
Pirita	FeS ₂	<L. D.
Rutilo	TiO ₂	<L. D.
Calcopirita	CuFeS ₂	<L. D.
Magnetita	Fe ₃ O ₄	<L. D.
Montmorillonita	(Na,Ca) _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·n(H ₂ O)	<L. D.

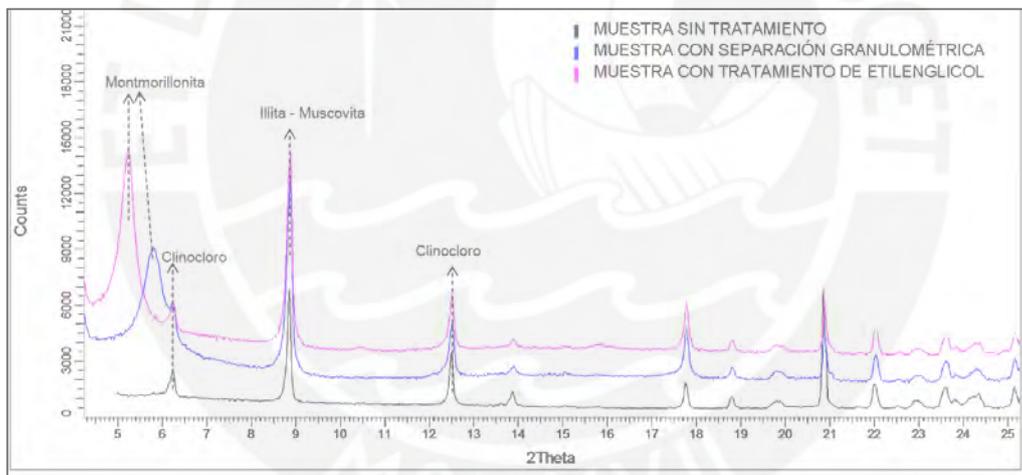


Figura 27: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica.

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

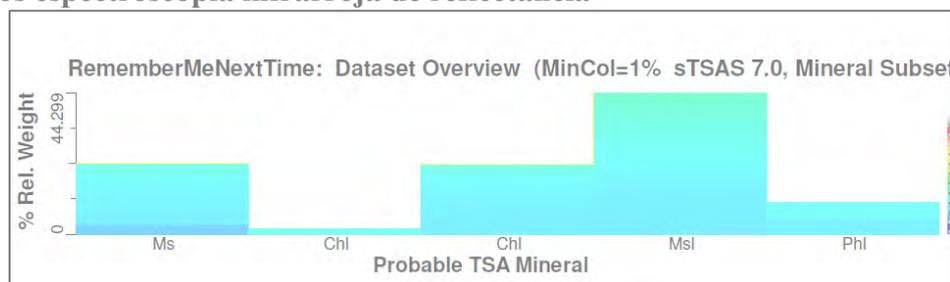


Figura 28: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): mezcla illita-muscovita (Msl), muscovita (Ms), clorita Fe-Mg (Chl derecha), mezcla fengita-illita (Phi), clorita Fe (Chl izquierda).

5.1.5. Unidad Latita Porfirítica-LP. Muestra CS5 (Tomada de la Subunidad LPQS)

5.1.5.1. Resumen de observaciones

Muestra recolectada del área de la mina mapeada como Latita Porfirítica con alteración cuarzo-sericita (código LP QS). El presente trabajo la describe como un pórfido cuarzo-feldespático de color gris claro verdoso con fenocristales de cuarzo de tamaño mediano, plagioclasa y biotita, con muy intensa alteración fílica, débil alteración potásica y muy débil alteración argílica, mineralización de calcopirita y pirita con trazas de magnetita, molibdenita, calcosita, digenita, bornita, pirrotita, rutilo y esfalerita. En la [tabla 9](#) se presentan mayores detalles.

Tabla 9: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS5 (Subunidad LPQS)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados (~%)
Roca	Pórfido cuarzo-feldespático de color gris claro	Plagioclasa Feldespato potásico Cuarzo primario Biotita primaria (cloritizada)		10 3 15 3
Alteración	Alteración fílica, potásica y de arcillas, que afectan los bordes de los feldespatos, la biotita y la matriz muy fina (66% del volumen de la roca). Código de mina: LP-QS	Cuarzo secundario y sericita Feldespato potásico secundario Arcillas (Montmorillonita)	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita -mus, mnt, qzII, clo, kfsII, cac (contacto simple); mus, mnt (subcorona)	Muy intensa Débil Muy débil
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 800 µm (vetillas) y menor a 400 µm (diseminada)	Calcopirita Pirita Magnetita, molibdenita, calcosita, digenita, bornita, pirrotita, rutilo, esfalerita.	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita -py, mt, rut (contacto s.), mo (veteado); cc, dg, bn (corona)	2 1 Trazas
			Suma	100

5.1.5.2. Descripción detallada Muestra de mano

Pórfido cuarzo feldespático con fenocristales de cuarzo (qz, <2 mm), y plagioclasa (plag, <3mm), en una matriz muy fina de color gris verdoso-blanquecino. La roca esta

alterada, la matriz y los feldespatos, son rayados muy difícilmente y presentan tonos blanquecinos sugiriendo una silicificación moderada-intensa. Calcopirita y pirita (cpy, py) en agregados finos que pueden llegar a ser centimétricos en las venillas. Se presentan diseminados en las gangas y en venillas de calcopirita-pirita con bandas de magnetita (mt). Venillas de cuarzo hialino (qzII) de 1 cm de potencia, rectas y sin halo (Figura 29).

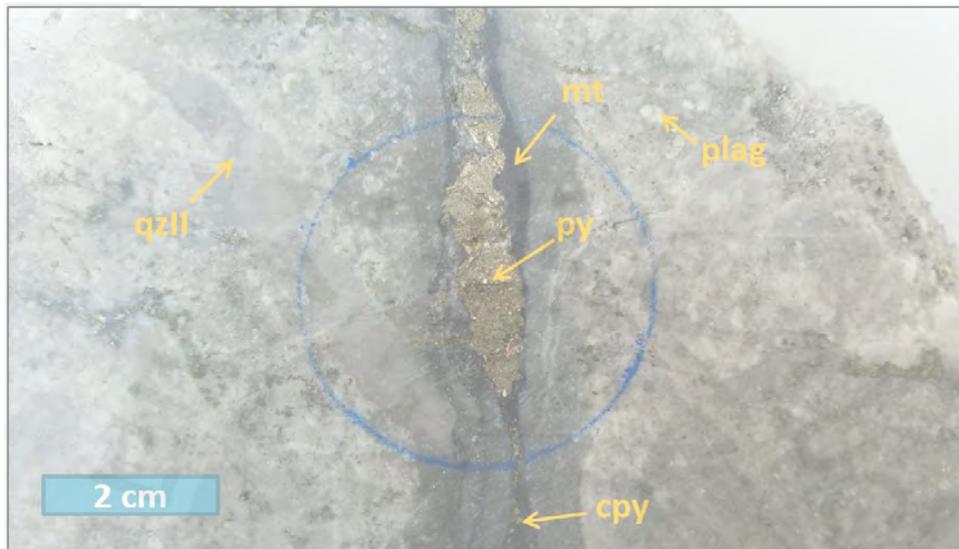


Figura 29: Muestra de mano CS5 (Subunidad LP-QS)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales de **Plagioclasa** ($\approx 10\%$) $< 2,400 \mu\text{m}$. **Feldespato potásico** ($\approx 3\%$, $< 250 \mu\text{m}$). **Cuarzo primario** ($\approx 15\%$) en fenocristales anhedrales redondos $< 2,300 \mu\text{m}$. **Biotita** ($\approx 3\%$) en relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales $< 2,000 \mu\text{m}$ y que ha sido completamente cloritizada. La matriz es muy fina ($\approx 66\%$, granos anhedrales y subhedrales $< 50 \mu\text{m}$) y se encuentra completamente alterada a cuarzo, sericita, feldespato potásico secundario, calcita y arcillas.

La muestra presenta **alteración filica muy intensa** con cuarzo secundario y muscovita que reemplazan fenocristales de plagioclasa (grano de cuarzo $< 150 \mu\text{m}$, grano de muscovita $< 25 \mu\text{m}$) y a los minerales primarios de la matriz muy fina, además el cuarzo también se presenta en vetillas. **Débil alteración potásica** sobreimpuesta por calcita, con vetillas de feldespato potásico, clorita después de biotita primaria y calcita en la matriz. Finalmente, **alteración argílica muy débil**, que afecta a los fenocristales de biotita,

plagioclasa y a la matriz. En la [figura 30](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Minerales opacos

Calcopirita (2%, <700 μm), en forma de agregados anhedrales y granos subhedrales, que se presentan principalmente diseminados, con tamaños máximo y promedio de 400 y 200 μm respectivamente, y está asociada preferentemente con pirita (inclusiones y reemplazamiento de bordes) y rutilo (que reemplaza bordes de calcopirita). En vetillas, la calcopirita aparece sola y también asociada a la pirita y a feldespatos potásicos, alcanzando tamaños máximo y promedio de 800 y 400 μm respectivamente, es importante destacar que los procesos de enriquecimiento supergénico se dan preferentemente en los granos de calcopirita cercanos a fracturas. Tanto en morfología de vetilla o diseminada, la calcopirita ocurre en contacto simple con sericita, sericita más arcillas, cuarzo secundario, clorita y calcita (de mayor a menor en frecuencia de asociación). Se destaca que en esta muestra si hay asociación entre calcopirita y arcillas. **Pirita (1%, <1,600 μm)**, algunos cristales de pirita suelen presentar bordes y porosidad rellena por calcopirita (<250 μm) y algunas inclusiones de pirrotita (<20 μm). **Molibdenita (<150 μm)** en trazas se presenta bajo forma de cristales euhedrales prismáticos en ocasiones interpenetrados entre ellos, y asociados en relaciones de contacto simple y de penetración a la calcopirita. **Esfalerita y rutilo**, en trazas como granos anhedrales que reemplazan bordes de calcopirita. En la [figura 31](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos. La muestra ha pasado por un proceso de **enriquecimiento supergénico**, representado por coronas (potencia de coronas <50 μm) y reemplazamientos en vetillas (potencia de vetillas <50 μm) con el ensamble, de adentro hacia afuera de: bornita, digenita, calcosita sobre núcleo de calcopirita.

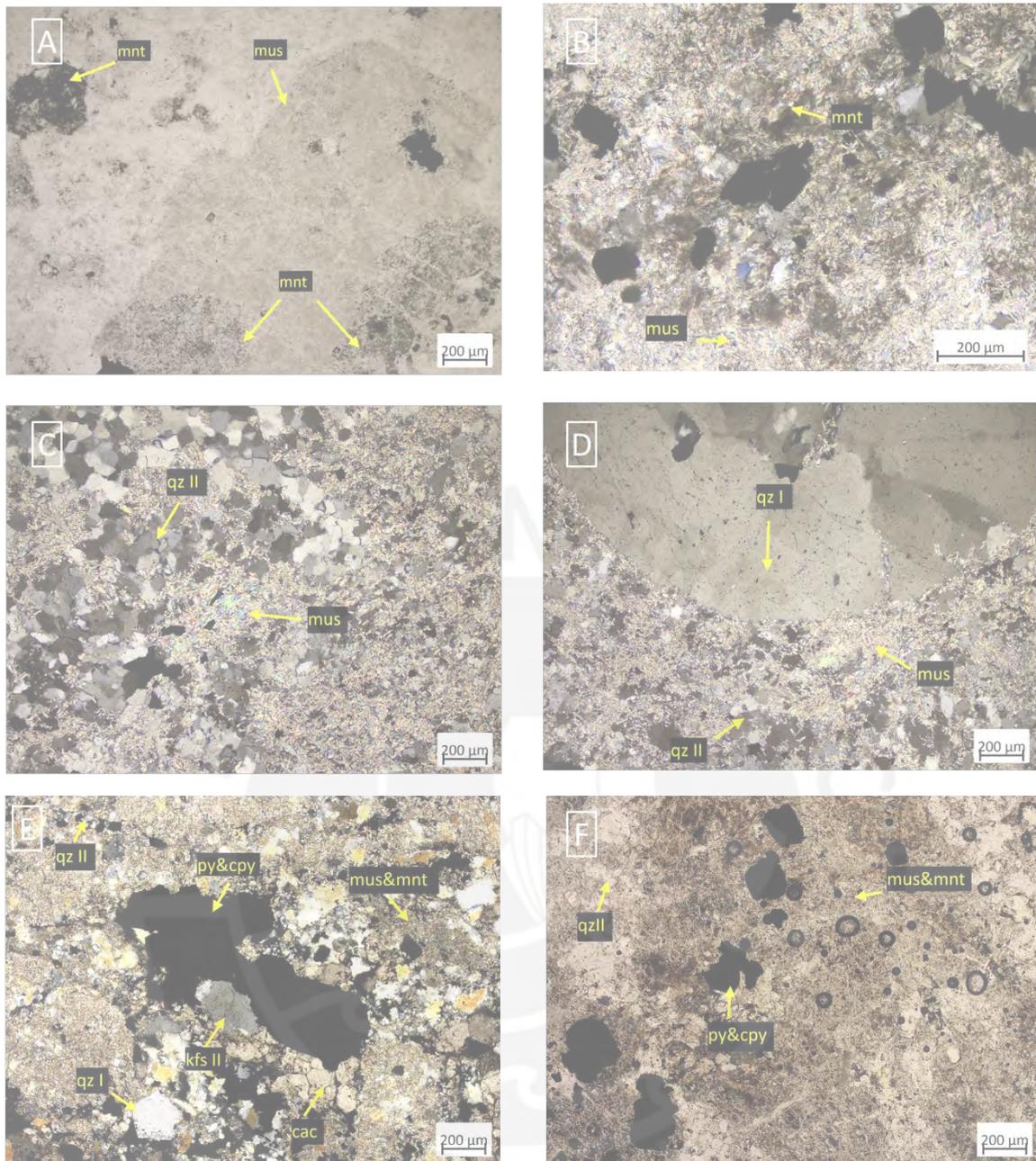


Figura 30: **A:** Vista al objetivo 5, en luz polarizada, de molde de fenocristal de plagioclasa que ha sido completamente alterada por muscovita de grano fino (mus) y arcillas (montmorillonita, mnt complementando con la DRX). A la izquierda, relicto de fenocristal de biotita alterado por montmorillonita (mnt). **B:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de minerales opacos (calcopirita y piritita), rodeados por una matriz alterada por muscovita (mus) y montmorillonita (mnt). Se observa la intensa alteración cuarzo-sericita que ha pasado la muestra. **C:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de vetilla de cuarzo secundario (qz II) y vista de la matriz intensamente alterada por muscovita (mus). **D:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de fenocristal redondeado de cuarzo (qz I) de diámetro $\approx 2,000 \mu\text{m}$, rodeado por una matriz alterada por muscovita (mus) y cuarzo secundario (qz II). **E:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos piritita y calcopirita (py & cpy) intercrecidos en morfología de vetilla con calcita (cac) y feldespato potásico secundario (kfsII). En la foto también se observa la matriz alterada por cuarzo secundario (qzII) y sericita y arcillas (mus&mnt). **F:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos de piritita y calcopirita (py & cpy) diseminados en matriz alterada por cuarzo secundario sericita y arcillas (mus&mnt). También se observa una vetilla de cuarzo secundario (qzII). Se destaca la relación entre los opacos (calcopirita) y las arcillas (mnt).

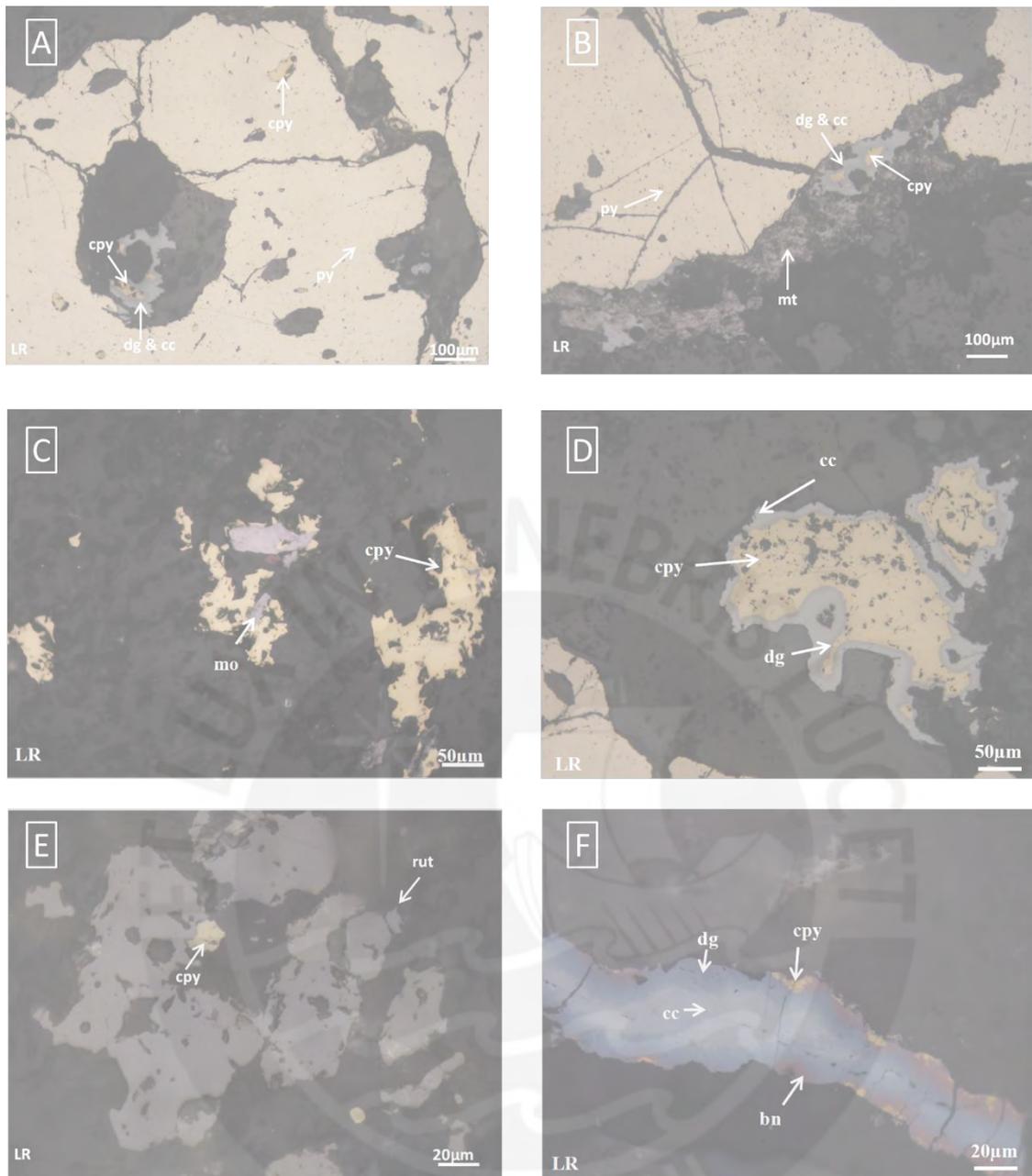


Figura 31: **A:** Vista al objetivo 10, de granos anhedral de pirita (py) con inclusiones de calcopirita (cpy) <100 μm . Al centro de la foto también se observa un grano anhedral de calcopirita con reemplazamientos por digenita y calcosita (dgycc). **B:** Vista al objetivo 10, se observan granos anhedral de pirita (py). También se observa un grano anhedral de calcopirita con reemplazamientos de digenita y calcosita (dgycc). En la esquina inferior izquierda se tiene agregados anhedral de magnetita (mt). **C:** Vista al objetivo 20, de dos granos euhedral de molibdenita (mo) incrustados en granos anhedral de calcopirita (cpy). **D:** Vista al objetivo 20, de dos granos anhedral de calcopirita (cpy) diseminados en las gangas, con texturas de coronas (potencia de coronas <50 μm). Las coronas están formadas por digenita (dg) al contacto con la calcopirita y más distal calcosita (cc). **E:** Vista al objetivo 50, de agregados anhedral de rutilo (rut). Se muestra a la izquierda un contacto simple con un grano subhedral de calcopirita y a la derecha se observan finas inclusiones globulares. **F:** Vista al objetivo 50, de vetilla de calcopirita (cpy) con enriquecimiento supergénico. La calcopirita está totalmente reemplazada por bornita (bn), digenita (dg) y calcosita (cc).

5.1.5.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia

Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 10: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	37
Mica (Muscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	26
Feldespato - K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	13
Plagioclasa (Andesina)	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	10
Montmorillonita	(Na,Ca) _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·n(H ₂ O)	6
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	3
Calcopirita	CuFeS ₂	<L. D.
Rutilo	TiO ₂	<L. D.
Pirita	FeS ₂	<L. D.

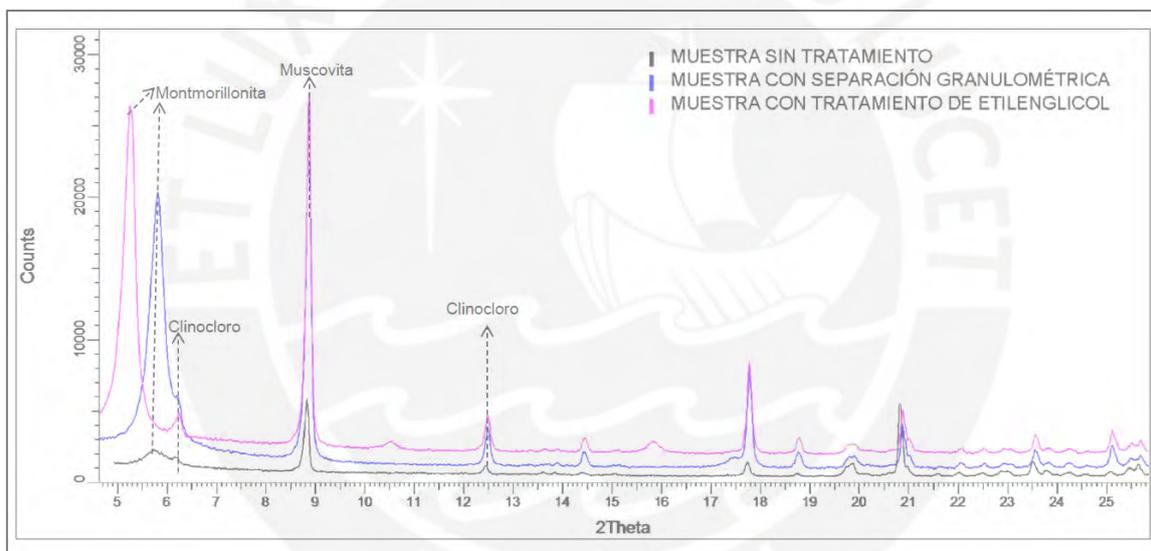


Figura 32: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica.

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

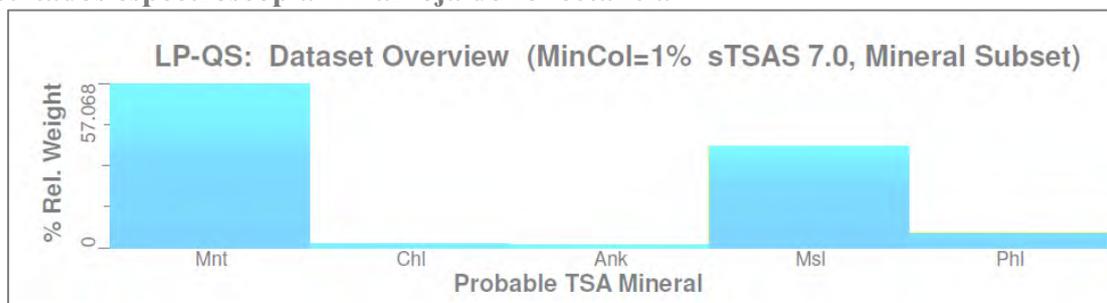


Figura 33: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Montmorillonita (Mnt), mezclas illita-muscovita (Msl), mezcla fengita-illítica (Phl), clorita Fe-Mg (Chl izquierda), ankerita (Ank).

5.1.6. Unidad Latita Porfirítica-LP. Muestra CS6 (Tomada de la Subunidad BXLP)

5.1.6.1. Resumen de observaciones

Muestra recolectada del área de la mina mapeada como Brecha de Latita Porfirítica (código BX LP). En este trabajo se la describe como una brecha hidrotermal con clastos de pórfido cuarzo-feldespático y cemento de calcita, calcopirita y feldespato potásico con una razón clastos/cemento ($\approx 6/4$). Los clastos presentan intensa alteración potásica-propilítica, débil alteración filica y muy débil alteración argílica, el cemento de brecha presenta mineralización de calcopirita y pirita con trazas de molibdenita, rutilo y esfalerita. En la *tabla 11* se presentan mayores detalles.

Tabla 11: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS6 (Subunidad BXLP)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados ($\approx\%$)
Roca	Brecha hidrotermal de órfido cuarzo-feldespático de color gris claro verdoso	Plagioclasa Feldespato potásico Cuarzo primario Biotita primaria (cloritizada)		1 3 15 6
Alteración	Alteración potásica, filica, de arcillas y carbonatos, que afectan los bordes de los feldespatos, la biotita y la matriz muy fina (60% del volumen de la roca) de los clastos de la brecha. Calcita y kfsII como cemento junto a minerales opacos. Código de mina: BX-LP	Feldespato potásico secundario (vetillas, reemplazamiento; cemento de brecha) Calcita Cuarzo secundario Muscovita (sericita) Montmorillonita	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita - kfsII, cac, mus, qzII, clo (contacto simple). No hay relación entre la calcopirita y la montmorillonita	Intensa Débil Muy débil
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 300 μm (diseminada) en clastos de brecha. Granos centrimétricos de calcopirita en cemento de brecha.	Calcopirita Pirita Molibdenita, rutilo, esfalerita.	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita - rut (inclusiones), ef (contacto s., inclusiones)	15 Trazas Trazas
			Suma	100

5.1.6.2. Descripción detallada

Muestra de mano

Brecha hidrotermal con clastos angulosos de la LP (pórfido cuarzo-feldespático) y cemento de calcita (cac, en granos anhedral y subhedral, centimétricos) y calcopirita (cpy, en granos anhedral y subhedral, centimétricos). En los clastos de roca, se observan fenocristales de plagioclasa que se rayan muy fácilmente, sugiriendo sericitización. La razón clastos/cemento es aproximadamente 60%/40% (Figura 34). Esta brecha tiene unas reservas de 30 Mt a 0.66% de Cu y 0.02% de Mo, representando un 2% del total de reservas (1,883 Mt), es de importancia ya que es la subunidad con ley promedio más alta de Cu.



Figura 34: Muestra de mano CS6 (BX LP) Calcita (cac), calcopirita (cpy)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Brecha hidrotermal con clastos angulosos de LP y cemento de feldespato potásico (en granos anhedral y subhedral $<450 \mu\text{m}$), calcita (en granos anhedral y subhedral $<800 \mu\text{m}$) y calcopirita (en granos anhedral y subhedral que llegan a ser centimétricos). Ratio clastos/cemento ($\approx 6/4$). A continuación, se describen los minerales formadores de roca en los clastos. **Plagioclasa** ($\approx 1\%$) y **feldespato potásico** ($\approx 3\%$) en relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales que han sido completamente alterados por sericita y arcillas. **Cuarzo primario** ($\approx 15\%$) en fenocristales anhedral redondos $<2,000 \mu\text{m}$. **Biotita** ($\approx 6\%$) en fenocristales euhedrales y subhedrales que han sido cloritizados. La matriz de los clastos es muy fina ($\approx 30\%$, granos anhedral y subhedral $<50 \mu\text{m}$) y se encuentra completamente alterada.

En los clastos de la brecha hidrotermal. La muestra presenta **intensa alteración potásica – sobrepuesta por clorita y calcita**, con feldespato potásico reemplazando a la matriz muy fina y en vetillas (tamaño de grano $<100\ \mu\text{m}$); clorita después de biotita primaria y calcita en la matriz. **Débil alteración filica** de cuarzo secundario ($<150\ \mu\text{m}$) que reemplaza fenocristales de plagioclasa y minerales de la matriz y en vetillas (potencia ($<500\ \mu\text{m}$); y sericita que reemplaza fenocristales de plagioclasa ($<25\ \mu\text{m}$) y a los minerales primarios de la matriz muy fina. Y finalmente, **muy débil alteración argílica**, de arcillas que afecta a los fenocristales de plagioclasa, biotita y sobre todo a la matriz. En la [figura 35](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Minerales opacos

Calcopirita (15%, centimétrico), se observa mayor cantidad de calcopirita en cemento de brecha que diseminada o en vetillas en los clastos de la brecha. Como cemento de brecha, la calcopirita aparece sin asociación y también asociada a esfalerita y rutilo (inclusiones en calcopirita $<400\ \mu\text{m}$ y $<150\ \mu\text{m}$, respectivamente), alcanzando agregados de tamaños centimétricos y en contacto generalmente con clastos de la brecha alterados por feldespato potásico secundario o cuarzo secundario. Por otro lado, en los clastos, la calcopirita diseminada presenta tamaños máximo y promedio de 300 y $150\ \mu\text{m}$ respectivamente y cuando se encuentra en morfología de vetilla dentro de los clastos de la brecha alcanza tamaños máximo y promedio de 450 y $200\ \mu\text{m}$ respectivamente. En ambas morfologías, la calcopirita ocurre en contacto con feldespato potásico secundario, clorita, sericita, cuarzo secundario y calcita (de mayor a menor en frecuencia de asociación). No hay asociación entre calcopirita y arcillas, ya que estas aparecen alterando únicamente a los feldespatos de la roca. Presencia en trazas de **molibdenita** ($<50\ \mu\text{m}$) y de **pirita** ($<300\ \mu\text{m}$) que se encuentra diseminada en las gangas y sin asociación a otro mineral reflectivo. En la [figura 36](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos.

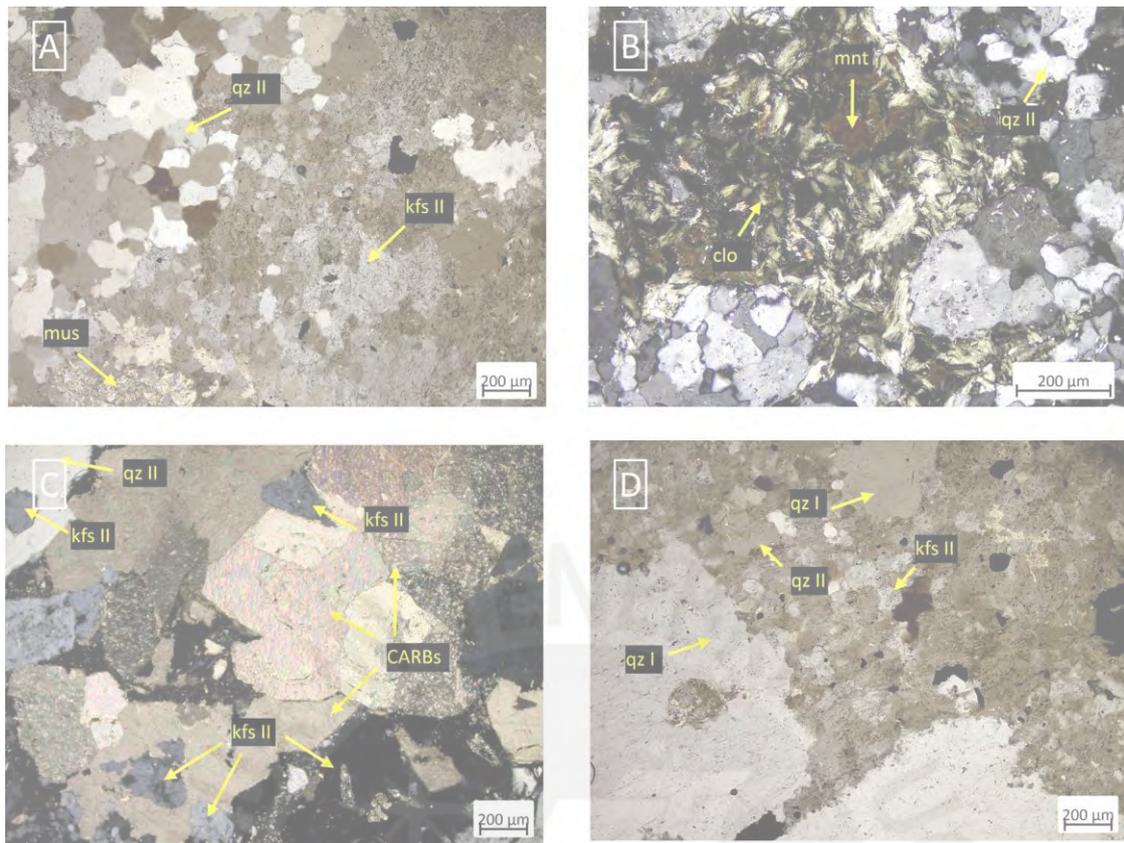


Figura 35: **A:** Vista al objetivo 5, en luz polarizada de clasto de la brecha, intensamente alterado por cuarzo secundario (qzII), sericita (mus) y feldespato potásico secundario (kfsII). **B:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de clasto de la brecha, se observa biotita primaria que ha sido cloritizada (clo) y luego alterada por montmorillonita (mnt), también se observa que los minerales de la matriz han sido silicificados (qzII). **C:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de cemento de brecha, con cristales calcita intercrecidos con granos de feldespato potásico secundario (kfsII) y cuarzo secundario (qzII). **D:** Vista al objetivo 5, en luz polarizada de fenocristal de cuarzo (qzI) rodeado por una matriz alterada a cuarzo (qzII) y feldespato potásico secundario (kfsII).

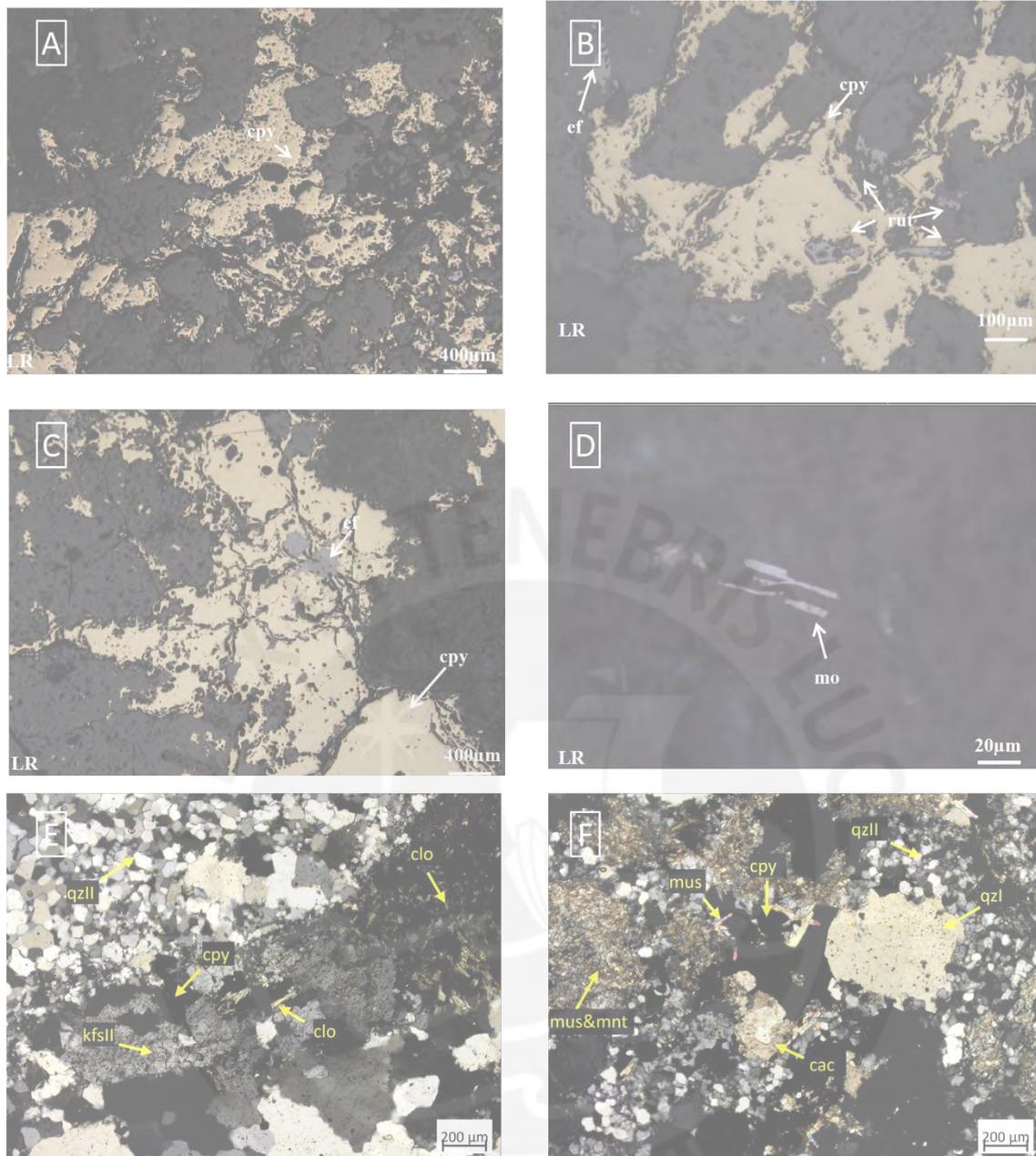


Figura 36: **A:** Vista al objetivo 2.5, de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) como relleno de cavidades que constituyen la fase dominante de esta sección. **B:** Vista al objetivo 10, de agregados anhedrales de calcopirita (cpy) con inclusiones de granos euhedrales y subhedrales de rutilo (rut); granos anhedrales de rutilo diseminados en las gangas; y grano anhedral de esfalerita (ef). **C:** Vista al objetivo 2.5 de agregados anhedrales de calcopirita (cpy), con inclusiones de granos subhedrales de esfalerita (ef). **D:** Vista al objetivo 50 de 4 cristales euhedrales de molibdenita (mo), <50 μm . **E:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de vetilla de calcopirita (cpy), clorita (clo) y feldespato potásico secundario (kfsII). A la derecha de la vetilla se tiene una zona donde predomina la clorita sobre el feldespato potásico. La vetilla está rodeada por cuarzo secundario (qzII). **F:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos de calcopirita (cpy) intercrecidos con granos de calcita (cac) y sericita (mus). Estos granos de calcopirita están en contacto con cuarzo secundario (qzII) y zonas alteradas por sericita y arcillas (mus&mnt).

5.1.6.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 12: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	29
Feldespato - K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	25
Calcopirita	CuFeS ₂	11
Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ (H ₂ O)]	9
Calcita	CaCO ₃	7
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	6
Mica (Muscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	4
Montmorillonita	(Na,Ca)0.3(Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·n(H ₂ O)	2
Pirita	FeS ₂	<L. D.
Rutilo	TiO ₂	<L. D.
Plagioclasa (Andesina)	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	2

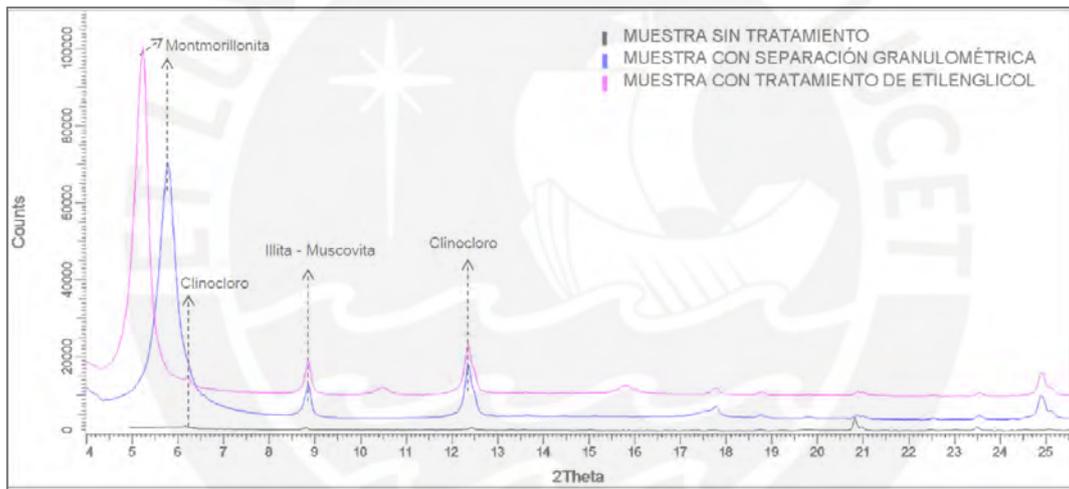


Figura 37: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica.

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

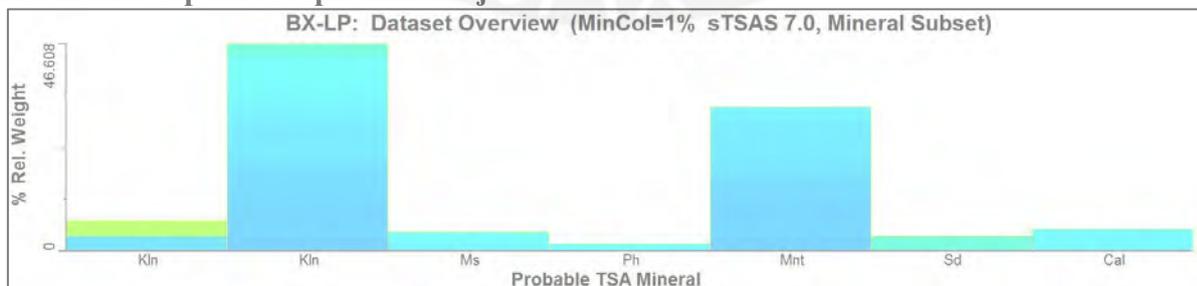


Figura 38: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): Caolinita WX (Kln), montmorillonita (Mnt), caolinita PX (Kln), calcita (Cal), muscovita (Ms), siderita (Sd), fengita (Ph).

5.1.7. Unidad Latita Porfirítica2-BLP. Muestra CS8 (Tomada de la Subunidad BLPFRES)

5.1.7.1. Resumen de observaciones

Muestra recolectada del área de la mina mapeada como Latita Porfirítica 2 fresca (código **BLP FRES**). El presente trabajo la describe como un pórfido gris claro verdoso con matriz muy fina dominante y fenocristales de cuarzo, de tamaño medio, plagioclasa y biotita, con intensa alteración fílica y muy débil alteración potásica y argílica, mineralización de calcopirita y pirita con trazas de hematita, magnetita y rutilo. En la **Tabla 13** se presentan mayores detalles.

Tabla 13: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS8 (Subunidad BLPFRES)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados (≈%)
Roca	Pórfido cuarzo-feldespático de color gris claro verdoso	Plagioclasa Cuarzo primario Biotita primaria (cloritizada)	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita -qzII, clo, mus (contacto simple). No hay relación entre la calcopirita y la montmorillonita	36
Alteración	Alteración fílica, de arcillas y carbonatos, que afectan los bordes de la plagioclasa, la biotita y la matriz muy fina (45% del volumen de la roca) . Código de mina: BLP-FRES	Calcita		Muy débil
		Cuarzo secundario Muscovita (sericita) Montmorillonita		Intensa Muy débil
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 350 μm (vetillas) y menor a 300 μm (diseminada)	Calcopirita	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita -py (contacto simple, ameboidal, inclusiones)	Trazas
		Pirita		Trazas
		Hematita, magnetita, rutilo		Trazas
Suma				100

5.1.7.2. Descripción detallada

Muestra de mano

Pórfido cuarzo feldespático con fenocristales de cuarzo (qz, <5 mm), y plagioclasa (plag, <4mm), en una matriz muy fina dominante de color gris verdoso-blanquecino. La roca esta alterada, la matriz y los feldespatos, son rayados muy difícilmente o fácilmente por zonas y presentan tonos blanquecinos sugiriendo una silicificación-sericitización. Pirita (py) diseminada en las gangas y en venillas de pirita-magnetita, sin halo y rectas (**figura 39**).

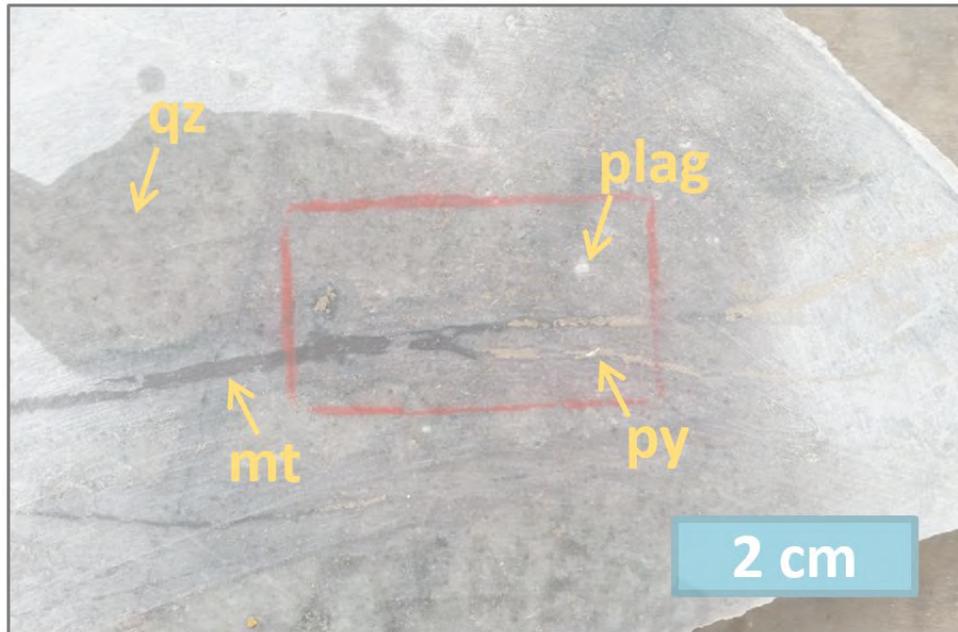


Figura 39: Muestra de mano CS8 (Subunidad BLP-FRES)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Plagioclasa ($\approx 36\%$) en fenocristales euhedrales y subhedrales $< 3,400 \mu\text{m}$. **Cuarzo primario** ($\approx 15\%$) en fenocristales euhedrales y subhedrales $< 3,800 \mu\text{m}$. **Biotita** ($\approx 4\%$) en fenocristales euhedrales y subhedrales $< 1,500 \mu\text{m}$. La matriz es muy fina ($\approx 45\%$, granos anhedrales y subhedrales $< 50 \mu\text{m}$) y se encuentra completamente alterada.

La muestra presenta **intensa alteración filica**, representada por cuarzo secundario ($< 150 \mu\text{m}$) que reemplaza fenocristales de plagioclasa, minerales de la matriz y en vetillas. Además de sericita ($< 50 \mu\text{m}$) que se presenta reemplazando fenocristales de plagioclasa y en la matriz. **Muy débil alteración** de clorita alterando a la biotita primaria y de calcita en los minerales de la matriz ($< 10 \mu\text{m}$). Y finalmente, **muy débil alteración** de arcillas que afecta a los fenocristales biotita, plagioclasa y a la matriz. En la figura 40 se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Minerales opacos

Calcopirita ($< 400 \mu\text{m}$), se presenta diseminada y en vetillas. En esta última ocurrencia (vetillas), la calcopirita aparece asociada a pirita alcanzando tamaños máximo y promedio de 350 y $250 \mu\text{m}$ respectivamente. Por otro lado, la calcopirita diseminada presenta tamaños máximo y promedio de 300 y $100 \mu\text{m}$ respectivamente y se presenta sin asociación o en contacto simple con pirita. Tanto en vetillas como diseminada, la calcopirita presenta primordialmente contacto con el cuarzo secundario de la matriz fina alterada y con granos de

clorita, también aparece en contacto simple con granos de magnetita y rutilo. En algunos casos también se da un contacto simple con la sericita fina de la alteración de la matriz fina. La calcopirita no presenta relación con las arcillas, estas solo alteran a los fenocristales de plagioclasa y biotita. **Pirita (<500 µm)**, algunos cristales de pirita suelen presentar bordes y porosidades ocupadas por calcopirita, también presentan porosidades rellenas por granos de hematita. **Hematita, magnetita y rutilo**, en trazas y relacionadas a granos de pirita y calcopirita. En la **figura 41** se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos.

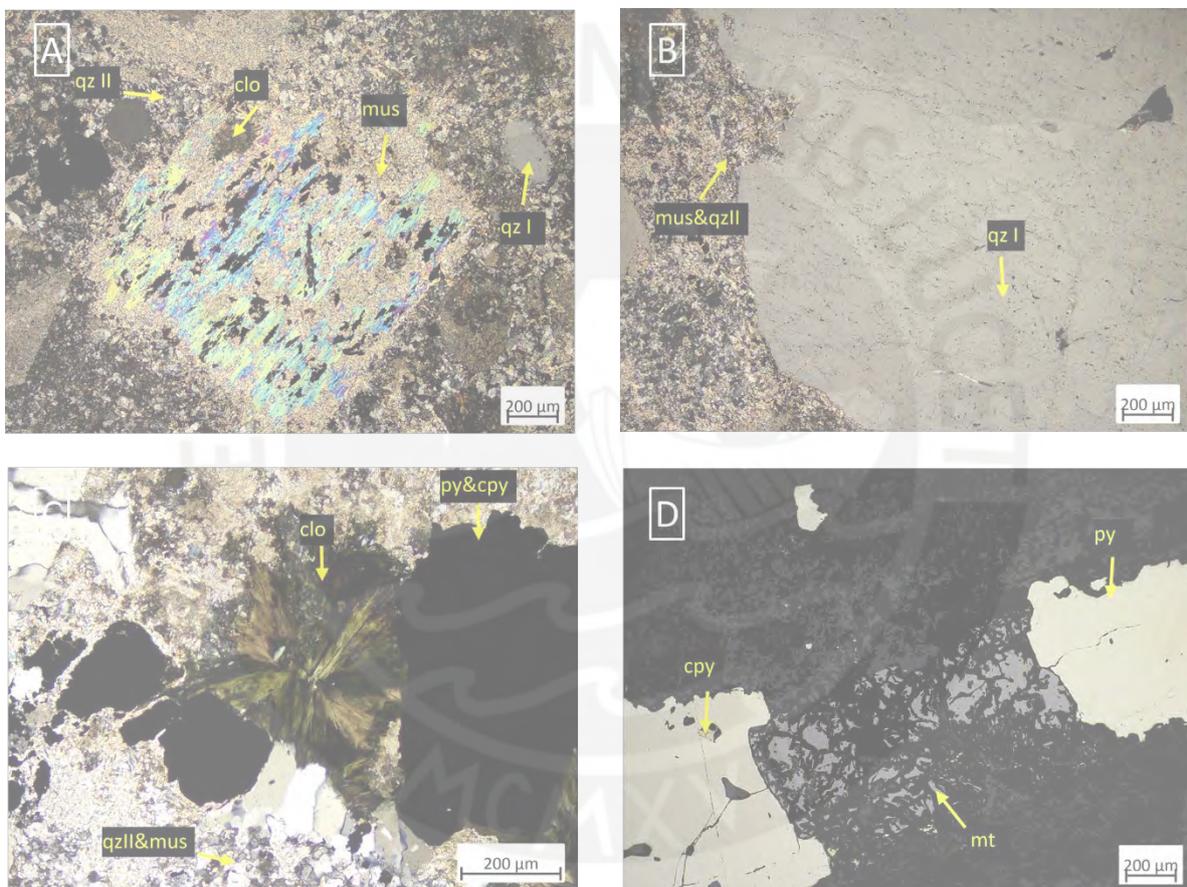


Figura 40: **A:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un fenocristal de biotita que ha sido completamente sericitizado (mus), este fenocristal presenta también una zona reemplazada por cloritas (clo). Se encuentra rodeada por granos euhedrales y anhedrales de cuarzo primario (qz I), la matriz esta alterada por cuarzo secundario (qz II) y sericita. **B:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un fenocristal de cuarzo primario (qzI) rodeado por la matriz alterada por cuarzo secundario y sericita (musyqzII), con cuarzo fino ígneo también en la matriz, pero indistinguible del cuarzo hidrotermal. **C:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de una vetilla de granos de calcopirita y pirita (py & cpy), intercrecidos con granos de cuarzo secundario (qzII), y granos de clorita (clo). Rodeados por la matriz alterada por cuarzo y sericita (musyqzII). **D:** Vista al objetivo 5 en luz reflejada de una vetilla con granos de pirita (py) y granos de magnetita (mt). Se observa también un grano de calcopirita (cpy), relleno una porosidad en la pirita.

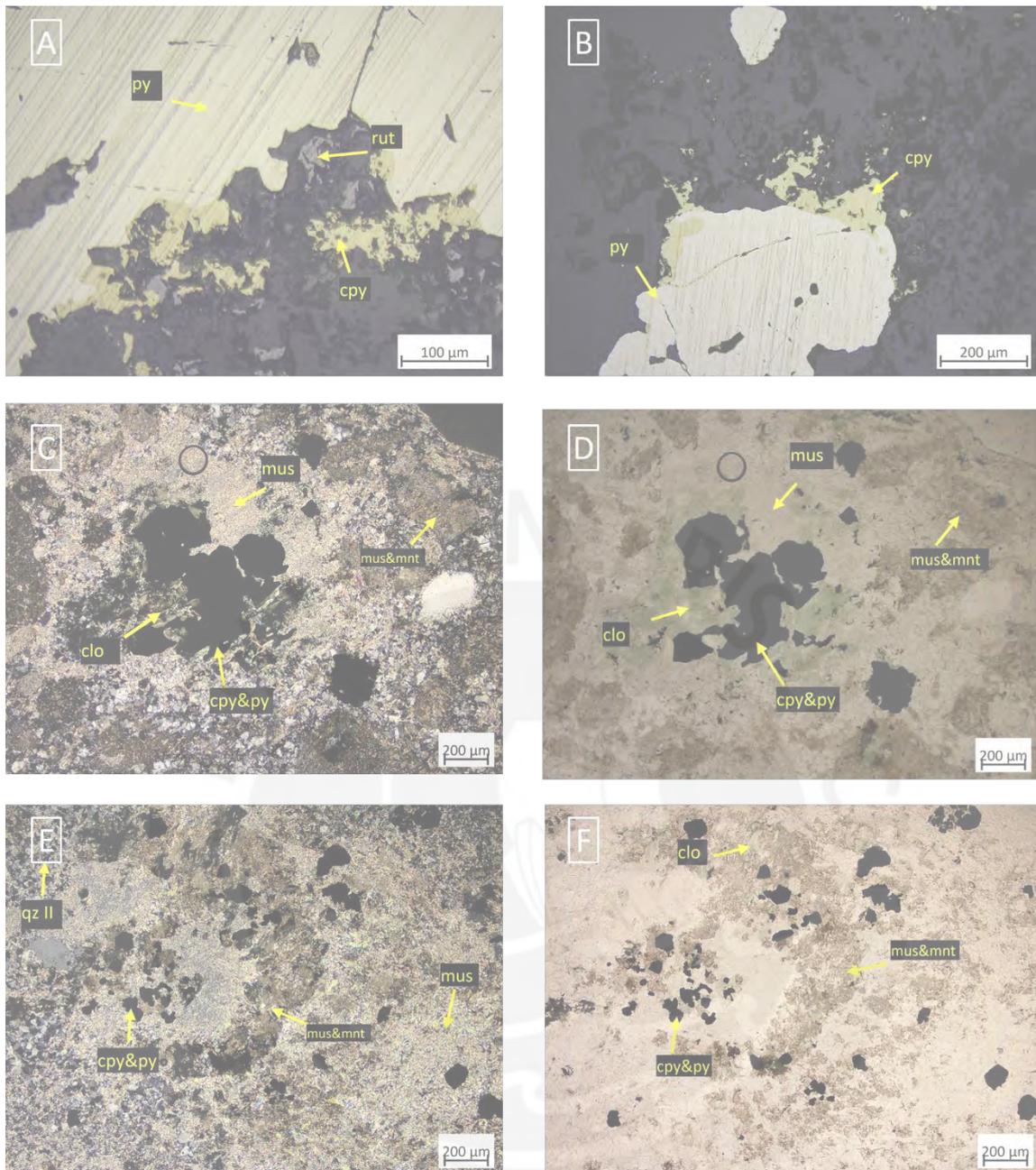


Figura 41: **A:** Vista al objetivo 20 en luz reflejada, de una vetilla de pirita (py), presenta algunos de sus bordes reemplazados por calcopirita (cpy). Presencia de rutilo (rut). **B:** Vista al objetivo 10, en luz reflejada de una vetilla de pirita (py). Agregados anhedrales de calcopirita (cpy), están en contacto simple en los bordes de pirita y relleno de fracturas. **C:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida). Se observan granos subhedrales de calcopirita y pirita (cpy&py), en contacto con granos de clorita (clo) y de sericita (mus). La matriz está fuertemente alterada solo por sericita (mus) en ciertas zonas y en otras por sericita y arcillas (mus&mnt). **D:** Vista al objetivo 5, en luz transmitida de la misma región de la fotomicrografía C. Se observan los mismos elementos que en la descripción C. Se pretende destacar la relación de los minerales opacos con la clorita (clo) y las diferentes zonas alteradas de la matriz, una solo alterada por sericita (mus) y la otra por arcillas y sericita (mus&mnt). **E:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de granos subhedrales de calcopirita (cpy&py). La matriz ha sido alterada por sericita (mus), arcillas y sericita (mus&mnt) y cuarzo secundario (qz II). **F:** Vista al objetivo 5, en luz transmitida de la misma región de la fotomicrografía E. Se destacan la clorita (clo), en contacto con los minerales opacos. Y las arcillas y sericita (mus&mnt) que no están en contacto con los opacos y más bien se encuentran reemplazando posibles fenocristales y a la matriz.

5.1.7.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia

Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 14: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Plagioclasa (Oligoclasa)	(Ca,Na)(Al,Si)4O8	36
Cuarzo	SiO2	31
Mica (Muscovita)	KAl2(Si3Al)O10(OH,F)2	22
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe)5Al(Si3Al)O10(OH)8	4
Calcita	CaCO3	3
Calcopirita	CuFeS2	<L. D.
Pirita	FeS2	<L. D.
Montmorillonita	(Na,Ca)0.3(Al,Mg)2Si4O10(OH)2·n(H2O)	<L. D.

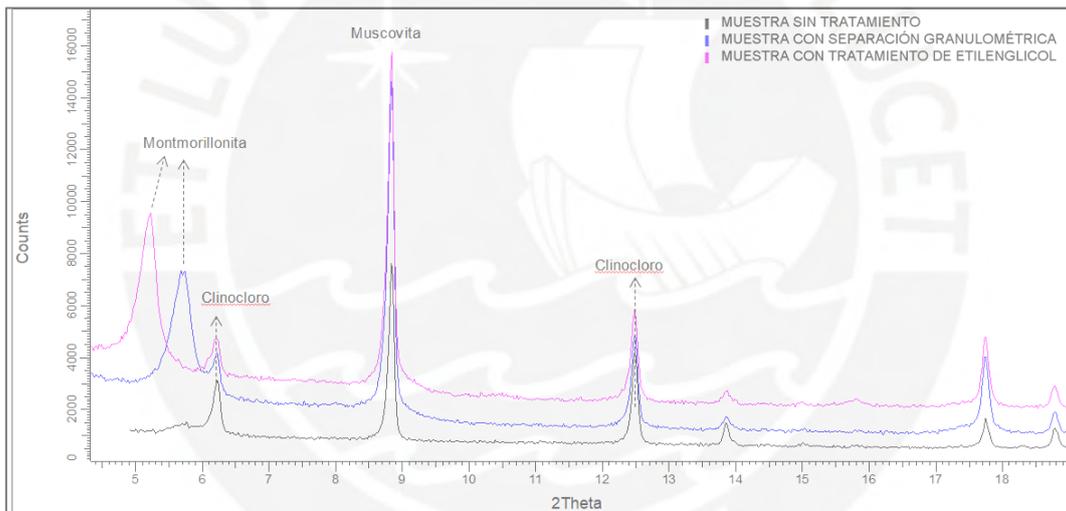


Figura 42: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

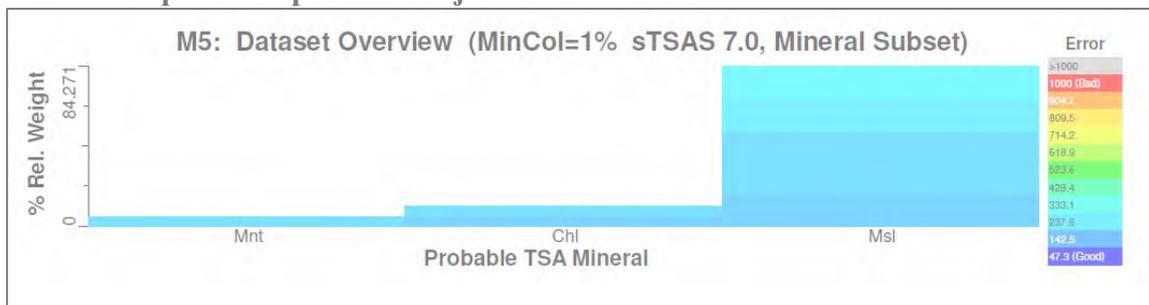


Figura 43: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): mezcla muscovita-illita (Msl), clorita (Chl), montmorillonita (Mnt).

5.1.8. Unidad Latita Porfirítica2-BLP. Muestra CS9 (Tomada de la Subunidad BLPFRES)

5.1.8.1. Resumen de observaciones

Muestra recolectada del área de la mina mapeada como Latita Porfirítica 2 fresca (código **BLP FRES**). El presente trabajo la describe como un pórfido gris claro verdoso con matriz muy fina dominante y fenocristales medios de cuarzo, plagioclasa y biotita, con muy intensa alteración fílica y muy débil alteración potásica y argílica, mineralización de calcopirita y piritita con trazas de hematita, magnetita y rutilo. En la [tabla 15](#) se presentan mayores detalles.

Tabla 15: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS9 (Subunidad BLPFRES)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados (≈%)
Roca	Pórfido cuarzo-feldespático de color gris claro verdoso	Plagioclasa Cuarzo primario Biotita primaria (cloritizada)	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita -qzII, mus (contacto simple). No hay relación entre la calcopirita y las arcillas	10
Alteración	Alteración fílica, de arcillas y carbonatos, que afectan los bordes de la plagioclasa, la biotita y la matriz muy fina (69% del volumen de la roca). Código de mina: BLP-FRES	Calcita Cuarzo secundario Muscovita (sericita) Arcillas (Montmorillonita y Kaolinita)		15
				3
			Muy débil	
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 400 μm (vetillas) y menor a 300 μm (diseminada)	Calcopirita Piritita Magnetita Hematita, rutilo	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita -py, (contacto simple e inclusiones); mt (contacto s.)	Muy intensa
				Muy débil
				1
				2
				Trazas
				Trazas
			Suma	100

5.1.8.2. Descripción detallada

Muestra de mano

Pórfido cuarzo feldespático con fenocristales de cuarzo (qz, <4 mm), biotita (biot, <1mm) y plagioclasa (plag, <2 mm), en una matriz muy fina dominante de color gris verdoso. La roca esta alterada, la matriz y los feldespatos, son rayados muy fácilmente y

presentan tonos verdosos sugiriendo sericitización. Pirita (py) diseminada en las gangas y en vetillas de pirita con trazas de magnetita, sin halo y rectas (Figura 44).

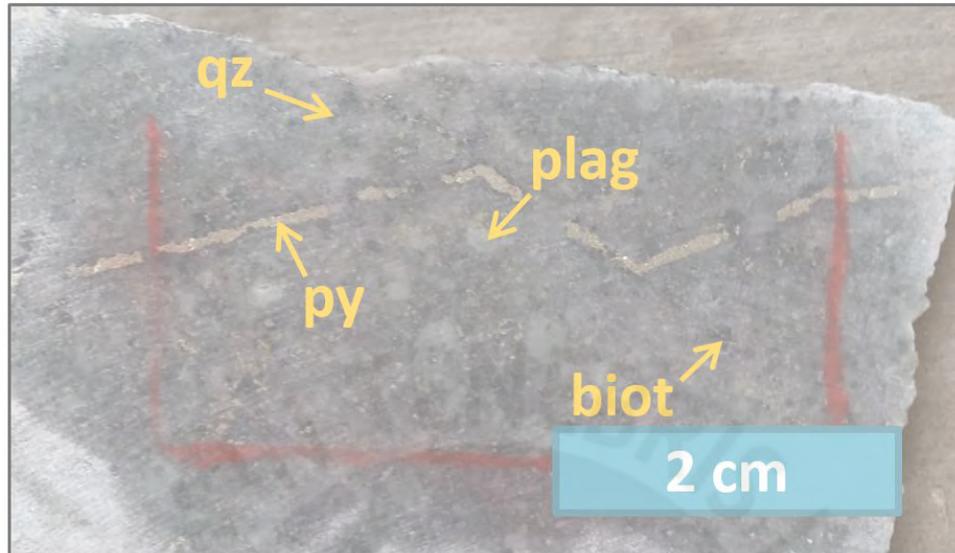


Figura 44: Muestra de mano CS9 (Subunidad BLP-FRES)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Plagioclasa ($\approx 10\%$) en relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales $< 600 \mu\text{m}$. **Cuarzo primario** ($\approx 15\%$) en fenocristales euhedrales y subhedrales $< 2,000 \mu\text{m}$. **Biotita** ($\approx 3\%$) en relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales $< 600 \mu\text{m}$. La matriz es muy fina ($\approx 69\%$, granos anhedrales y subhedrales $< 50 \mu\text{m}$) y se encuentra completamente alterada. La muestra presenta una **muy intensa alteración filica** de cuarzo secundario ($< 100 \mu\text{m}$) que reemplaza fenocristales de plagioclasa y minerales de la matriz y también se presenta en vetillas (grano $< 150 \mu\text{m}$); y sericita ($< 50 \mu\text{m}$) que se presenta reemplazando fenocristales de plagioclasa y en la matriz. **Muy débil alteración** de clorita alterando a la biotita primaria y de calcita (grano $< 1,000 \mu\text{m}$) en vetillas asociada con cuarzo, sericita y minerales opacos (calcopirita, pirita y hematita). Y finalmente, **muy débil alteración** de arcillas que afecta a los fenocristales biotita, plagioclasa y a la matriz. En la figura 45 se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Minerales opacos

Calcopirita (1% , $< 400 \mu\text{m}$), La calcopirita se presenta diseminada y en vetillas. En esta última ocurrencia (vetillas), la calcopirita aparece asociada a pirita y magnetita (mushketovita: magnetita reemplazando cristales prismáticos de hematita) e intercrecidos con

granos de cuarzo secundario, alcanzando tamaños máximo y promedio de 400 y 250 μm respectivamente. Por otro lado, la calcopirita diseminada presenta tamaños máximo y promedio de 300 y 150 μm respectivamente y se presenta sin asociación o en contacto simple con pirita. Tanto en vetillas como diseminada, la calcopirita presenta primordialmente contacto con el cuarzo secundario de la matriz fina alterada. En algunos casos hay intercrecimiento con granos de sericita de tamaño medio y también contacto con la sericita fina de la alteración de la matriz fina. Se destaca que los minerales opacos no presentan relación con las arcillas, ya que estas solo se encuentran alterando a los fenocristales de plagioclasa y de biotita. **Pirita (2%, <350 μm)**, presenta bordes y porosidades ocupadas por calcopirita. **Magnetita (<200 μm reemplazando habito prismático de hematita)**. **Rutilo**, en trazas en contacto simple con granos de calcopirita. En la [figura 46](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos.



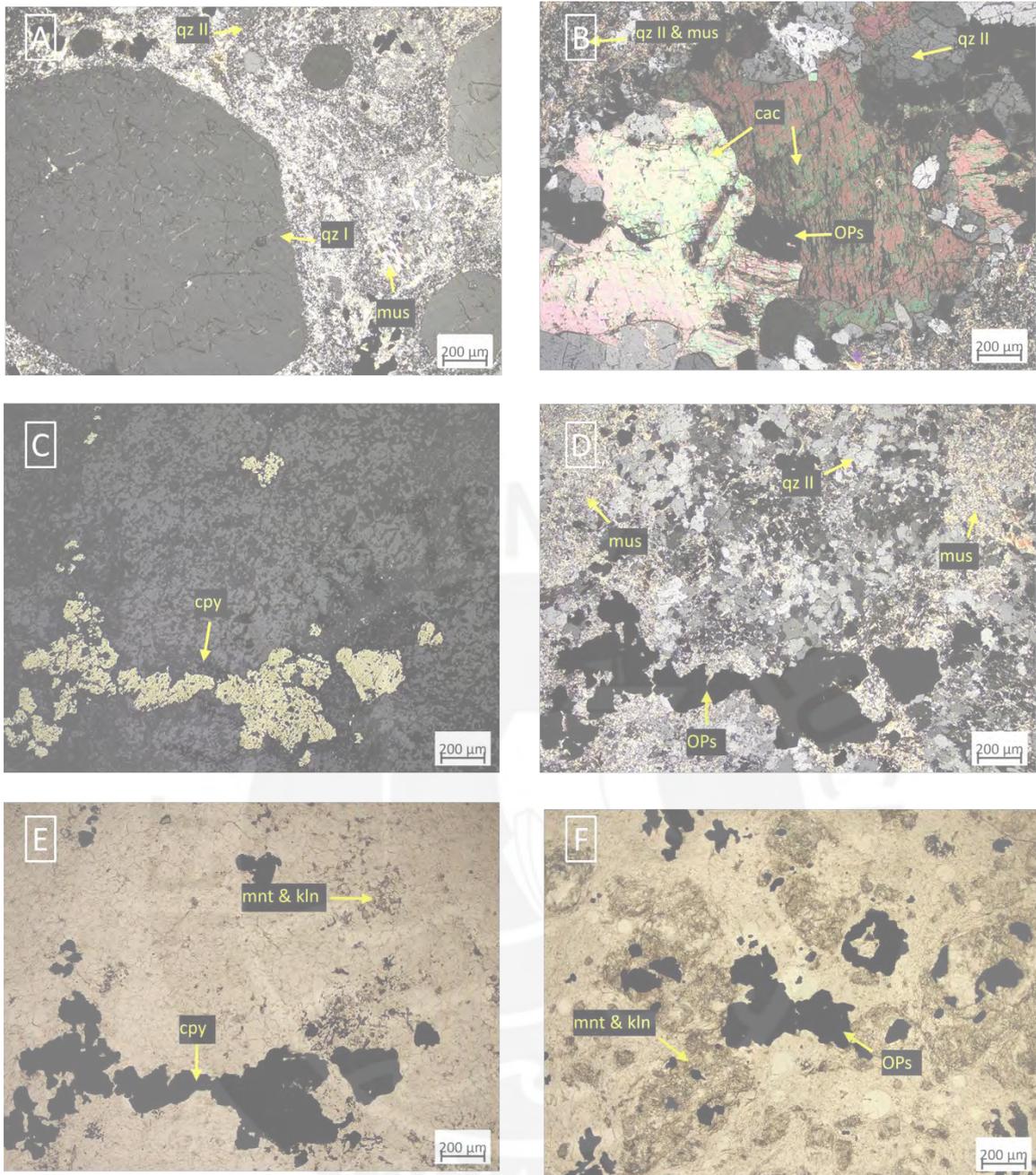


Figura 45: **A:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de fenocristales de cuarzo euhedrales y subhedrales (qz I). En una matriz de cuarzo secundario y sericita, muscovita de grano fino (mu). **B:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de una vetilla de opacos, OPs (calcopirita, pirita, hematita), calcita (cac), con halo de cuarzo secundario (qz II) y sericita (mus). **C:** Vista al objetivo 5, en luz reflejada de una vetilla con granos anhedral de calcopirita (cpy). **D:** Vista al objetivo 5, modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de la misma región de la fotomicrografía C y E. Se observa una vetilla de opacos, OPs (calcopirita). En las partes superiores se observan los productos de la intensa alteración filica, cuarzo secundario (qz II) y sericita (mus). **E:** Vista al objetivo 5, en luz transmitida de la misma región de la fotomicrografía C y D de una vetilla con granos anhedral de calcopirita (cpy). Se pretende enfatizar la ausencia de coronas de arcillas en calcopirita. En su lugar las arcillas (mnt & kln), se encuentran junto con la sericita en la parte superior de la foto. **F:** Vista al objetivo 5, en luz transmitida de opacos (OPs), y relictos de fenocristales de posibles plagioclasas o biotitas que han sido completamente reemplazadas por montmorillonita y caolinita (mnt & kln).

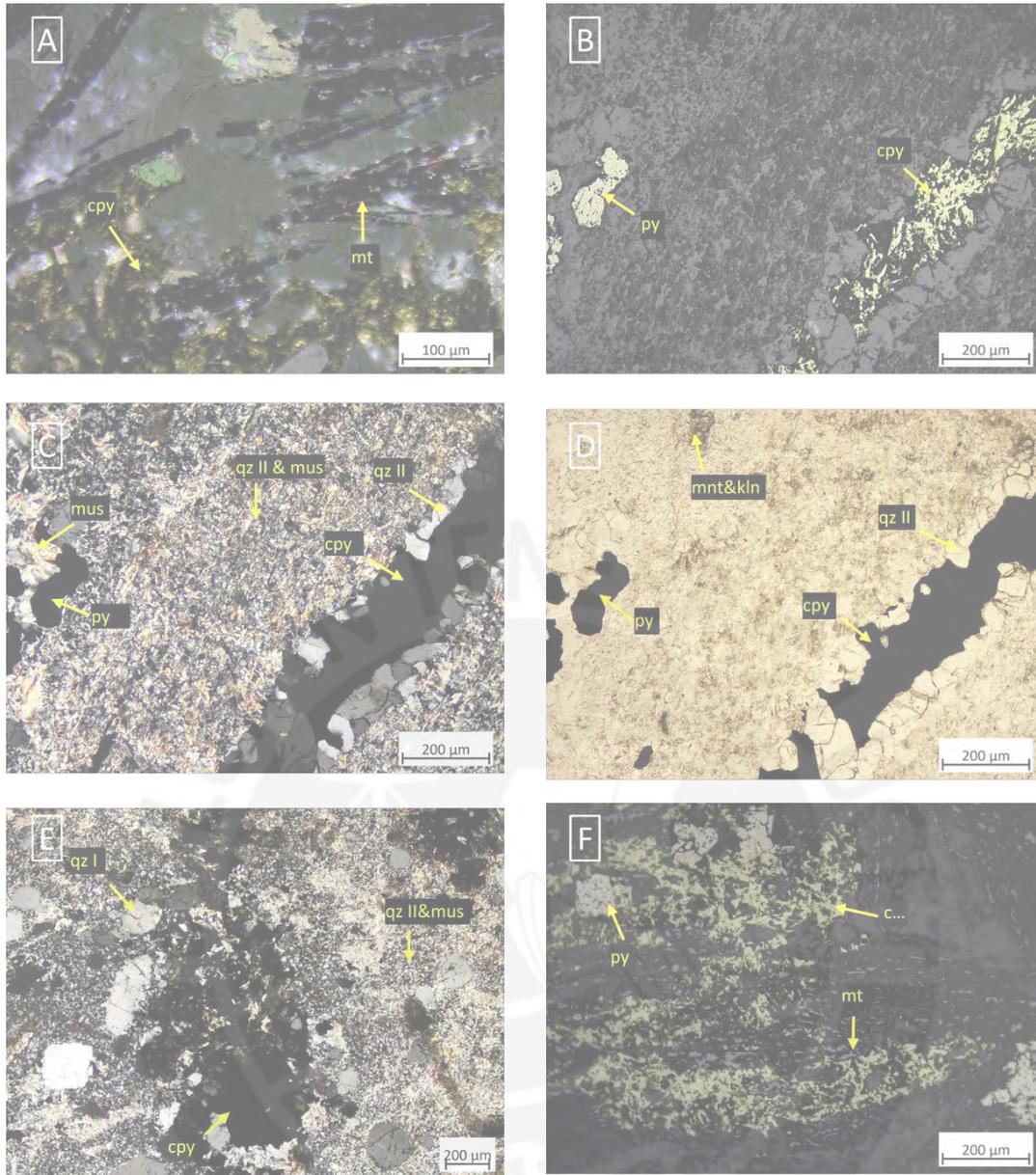


Figura 46: **A:** Vista al objetivo 20 (luz reflejada), en modo polarizadores cruzados de una vetilla de agregados anhedral de calcopirita (cpy) intercrecidos con pseudomorfo prismático de magnetita (mt) después de hematita (mushketovita, leves reflejos internos rojos). **B:** Vista al objetivo 10, en luz reflejada de una vetilla de calcopirita (cpy) a la derecha, y a la izquierda granos anhedral diseminados de pirita (py). **C:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de la misma región de la fotomicrografía B. Se observa una vetilla de granos de calcopirita (cpy), intercrecidos con granos de cuarzo secundario (qz II). Los granos de pirita (py), presenta contacto simple con granos subhedral de muscovita. La matriz está fuertemente alterada por sericita y cuarzo secundario (mus y qz II) **D:** Vista al objetivo 10, en luz transmitida de la misma región de la fotomicrografía B. Se observa la vetilla de granos de calcopirita (cpy), intercrecidos con granos de cuarzo secundario (qz II). Nótese que las arcillas (mnt&kln) no presentan relación con la calcopirita y pirita, sino que se presentan reemplazando fenocristales de feldspatos y de posibles biotitas. **E:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de un grano subhedral de calcopirita (cpy), fenocristales subhedral y anhedral de cuarzo (qz I) y la matriz alterada por sericita y cuarzo (qz II y mus). **F:** Vista al objetivo 10, en luz reflejada de una vetilla de agregados anhedral de calcopirita (cpy) intercrecidos con granos subhedral de magnetita (mt), y granos subhedral de pirita (py).

5.1.8.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia

Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 16: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	37
Mica (Muscovita)-Illita	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	35
Plagioclasa (Oligoclasa)	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ (H ₂ O)]	10
Clorita (Clinocloro)	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	5
Montmorillonita	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	4
Pirita	(Na,Ca) _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·n(H ₂ O)	3
Calcita	FeS ₂	2
Calcopirita	CaCO ₃	<L. D.
Caolinita	CuFeS ₂	<L. D.
Magnetita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	<L. D.
	Fe ₃ O ₄	<L. D.

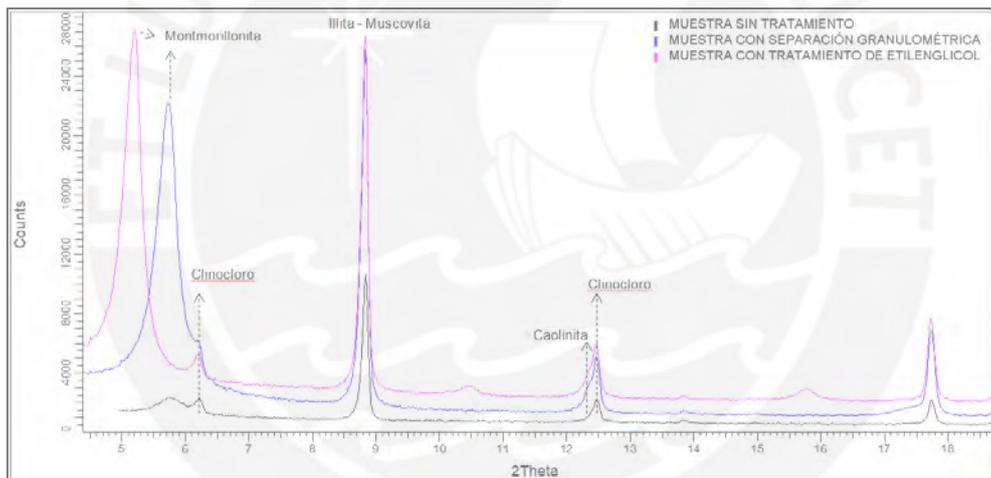


Figura 47: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica.

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

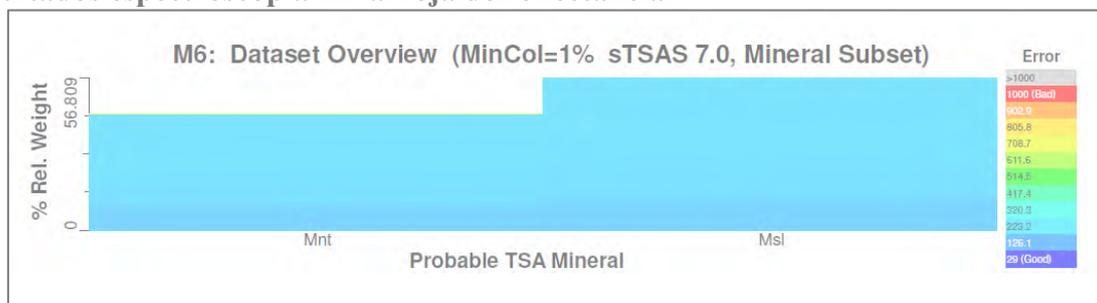


Figura 48: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): mezcla muscovita-illita (Msl), montmorillonita (Mnt)

5.1.9. Pórfido Blanco. Muestra CS7

5.1.9.1. Resumen de observaciones

Muestra recolectada del fondo de mina, aún sin código oficial. El presente trabajo la describe como un pórfido gris blanquecino, con fenocristales de cuarzo y feldespato potásico, con intensa alteración fílica, débil alteración potásica y muy débil alteración argílica, mineralización de calcopirita y pirita con trazas de bornita, molibdenita, rutilo, esfalerita, galena y cobres grises. En la [tabla 17](#) se presentan mayores detalles.

Tabla 17: Resumen de las descripciones de roca, mineralización y alteración de la muestra CS7 (Subunidad Pórfido Blanco)

	Descripción	Minerales	Ensamblajes/ Tipo de intercrecimiento	Porcentajes Aproximados (≈%)
Roca	Pórfido cuarzo-feldespático de color gris blanquecino	Plagioclasa Feldespato potásico Cuarzo primario	Intercrecimientos con minerales de ganga: calcopirita - mus, mnt, kln (coronas y subcorona); qzII (contacto simple)	14
Alteración	Alteración fílica, potásica, de arcillas y carbonatos, que afectan los bordes de los feldespatos, y la matriz muy fina (55% del volumen de la roca). Código de mina: Porfido Blanco	Feldespato potásico secundario Calcita Cuarzo secundario Muscovita (sericita) Montmorillonita		Débil
				Intensa
			Muy débil	
Mineralización	Granos anhedrales y subhedrales de calcopirita de tamaño menor a 250 μm (vetillas) y menor a 500 μm (diseminada)	Calcopirita Pirita Bornita, molibdenita, rutilo, esfalerita, galena, cobres grises.	Intercrecimientos con minerales opacos: calcopirita - py (contacto simple, inclusiones, veteado), bn, rt, ef (contacto s.)	1
				Trazas
				Trazas
			Suma	100

5.1.9.2. Descripción detallada

Muestra de mano

Pórfido cuarzo feldespático con fenocristales de plagioclasa (plag, <1 mm), en una matriz muy fina dominante de color gris blanquecino. La roca esta alterada, la matriz y los feldespatos, son rayados muy difícilmente y presentan tonos blanquecinos, **se infiere una silicificación muy intensa**. Abundante pirita y posible calcopirita (py, <1 mm) diseminadas en las gangas (figura 49).

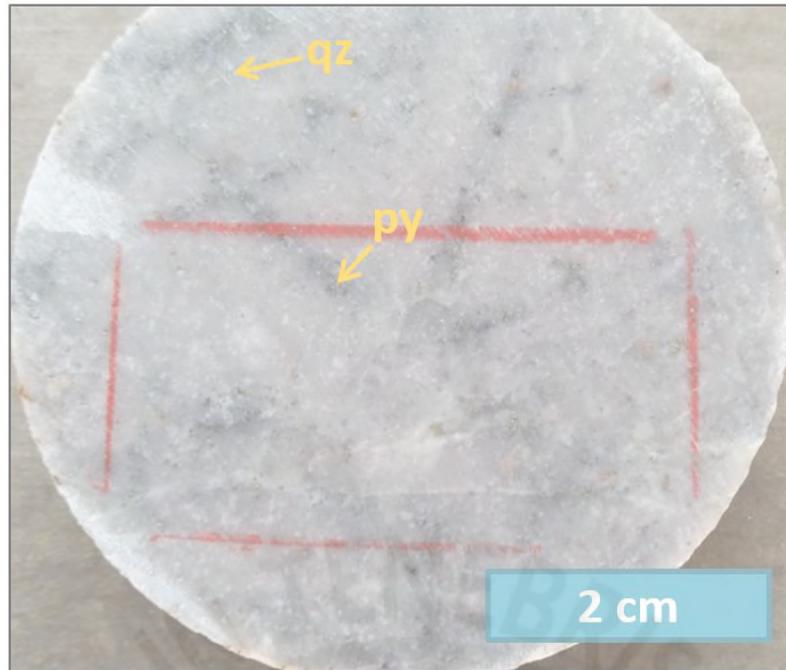


Figura 49: Muestra de mano CS7 (Subunidad Pórfido Blanco)

Descripción microscópica

Roca y alteración hidrotermal

Plagioclasa ($\approx 14\%$) en relictos de fenocristales euhedrales y subhedrales $< 1,000 \mu\text{m}$.
Cuarzo primario ($\approx 15\%$) en fenocristales euhedrales, subhedrales y anhedrales $< 800 \mu\text{m}$.
Feldespato potásico ($\approx 15\%$) en relictos de fenocristales subhedrales y anhedrales $< 600 \mu\text{m}$.
La matriz es muy fina ($\approx 55\%$, granos anhedrales y subhedrales $< 50 \mu\text{m}$) y se encuentra completamente alterada.

La muestra presenta **intensa alteración filica** con cuarzo secundario ($< 50 \mu\text{m}$) y de sericita ($< 75 \mu\text{m}$) que reemplazan fenocristales de feldespato y a los minerales de la matriz. **Débil alteración potásica** de feldespato potásico secundario ($< 50 \mu\text{m}$) reemplazando la matriz fina y de fenocristales de feldespato. Y finalmente, **muy débil alteración** de arcillas que afecta a los fenocristales de feldespatos y a la matriz y de calcita ($< 200 \mu\text{m}$). En la figura 50 se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en la roca y alteración hidrotermal.

Descripción de roca y alteración hidrotermal (énfasis en minerales arcillosos)

Minerales opacos

Calcopirita (1% , $< 500 \mu\text{m}$), se observa mayor cantidad de calcopirita diseminada que en vetillas. En esta última ocurrencia (vetillas), la calcopirita aparece sin asociación y también asociada a esfalerita, alcanzando tamaños máximo y promedio de 250 y $100 \mu\text{m}$ respectivamente. Por otro lado, la calcopirita diseminada presenta tamaños máximo y

promedio de 500 y 150 μm respectiva y predominantemente asociada en contacto simple a pirita (calcopirita en vetillas dentro de pirita), bornita y rutilo. Los opacos y en especial la calcopirita, presentan coronas y subcoronas de sericita y arcillas. También se encuentra contacto simple con cuarzo secundario de la matriz de la roca. **Pirita (<400 μm)**, presenta bordes y porosidades ocupadas por calcopirita (grano <250 μm). **Esfalerita, bornita, rutilo**, en trazas en contacto simple con granos de calcopirita y trazas de cristales euhedrales prismáticos de molibdenita y granos muy finos de galena y de cobres grises. En la [figura 51](#) se muestran 6 fotomicrografías con énfasis en los minerales opacos.



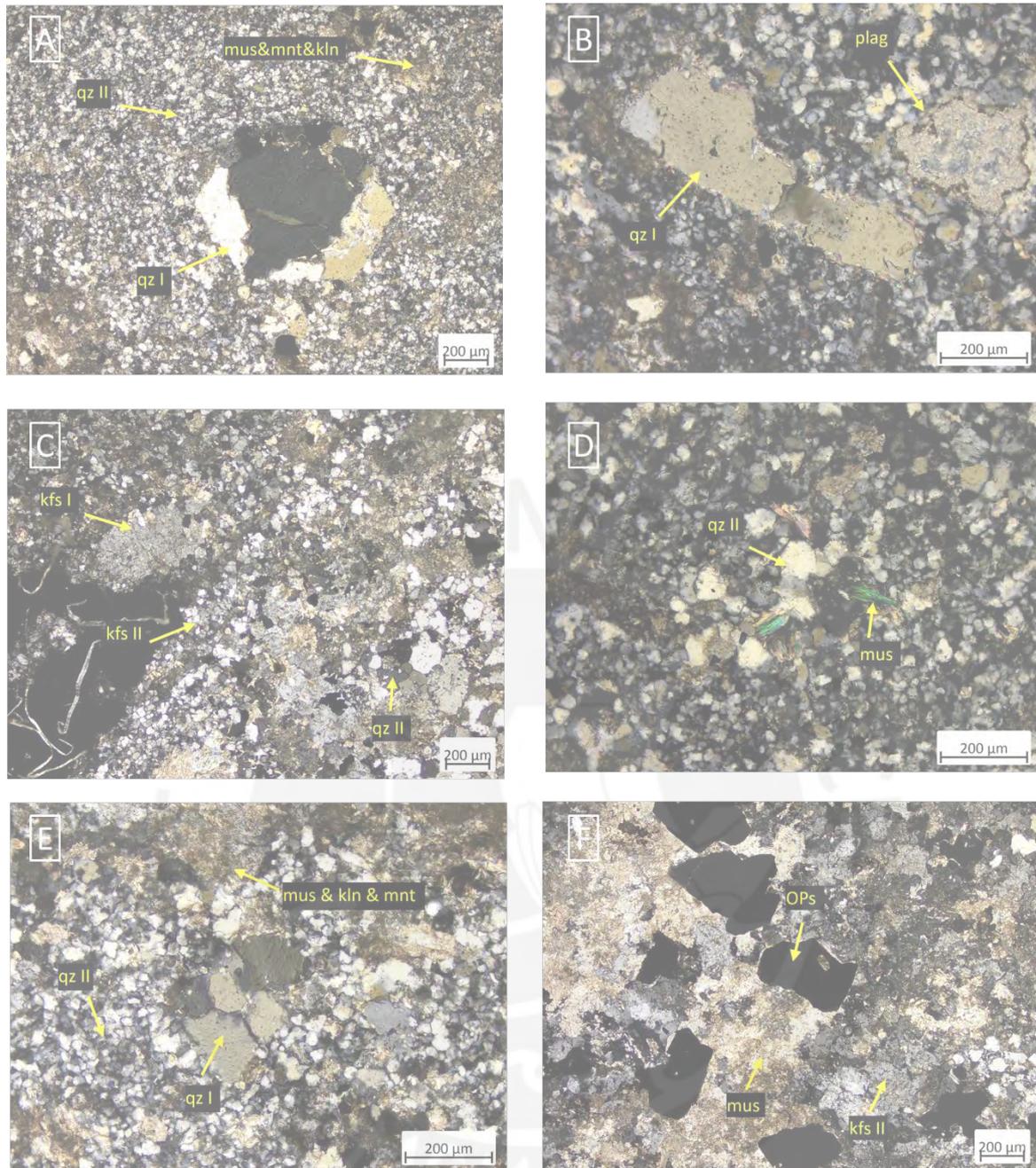


Figura 50: **A:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de un fenocristal de cuarzo (qz I), rodeado por granos finos de cuarzo secundario (qz II) y zonas que han sido reemplazadas por muscovita de grano fino (mus), montmorillonita (mnt) y caolinita (kln). **B:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de un fenocristal de cuarzo (qz I), y de un fenocristal de plagioclasa (plag), que ha sido reemplazado en sus bordes por cuarzo secundario, sericita (muscovita de grano fino) y arcillas (caolinita y montmorillonita). **C:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de un fenocristal de feldespato potásico (kfs I), en contacto con granos de feldespato potásico secundario (kfs II), cuarzo secundario (qz II) rodeado de sericita y arcillas. **D:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de granos euhedrales de muscovita secundaria (mus) en contacto con cuarzo secundario (qz II). **E:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados de un fenocristal de cuarzo (qz I), rodeado por granos finos de cuarzo secundario (qz II) y zonas que han sido reemplazadas por muscovita de grano fino (mus), montmorillonita (mnt) y caolinita (kln). **F:** Vista al objetivo 5, en modo polarizadores cruzados de granos de minerales opacos (OPs), calcopirita y pirita, que están en contacto con zonas que han sido reemplazadas por muscovita de grano fino y por feldespato potásico secundario (kfs II).

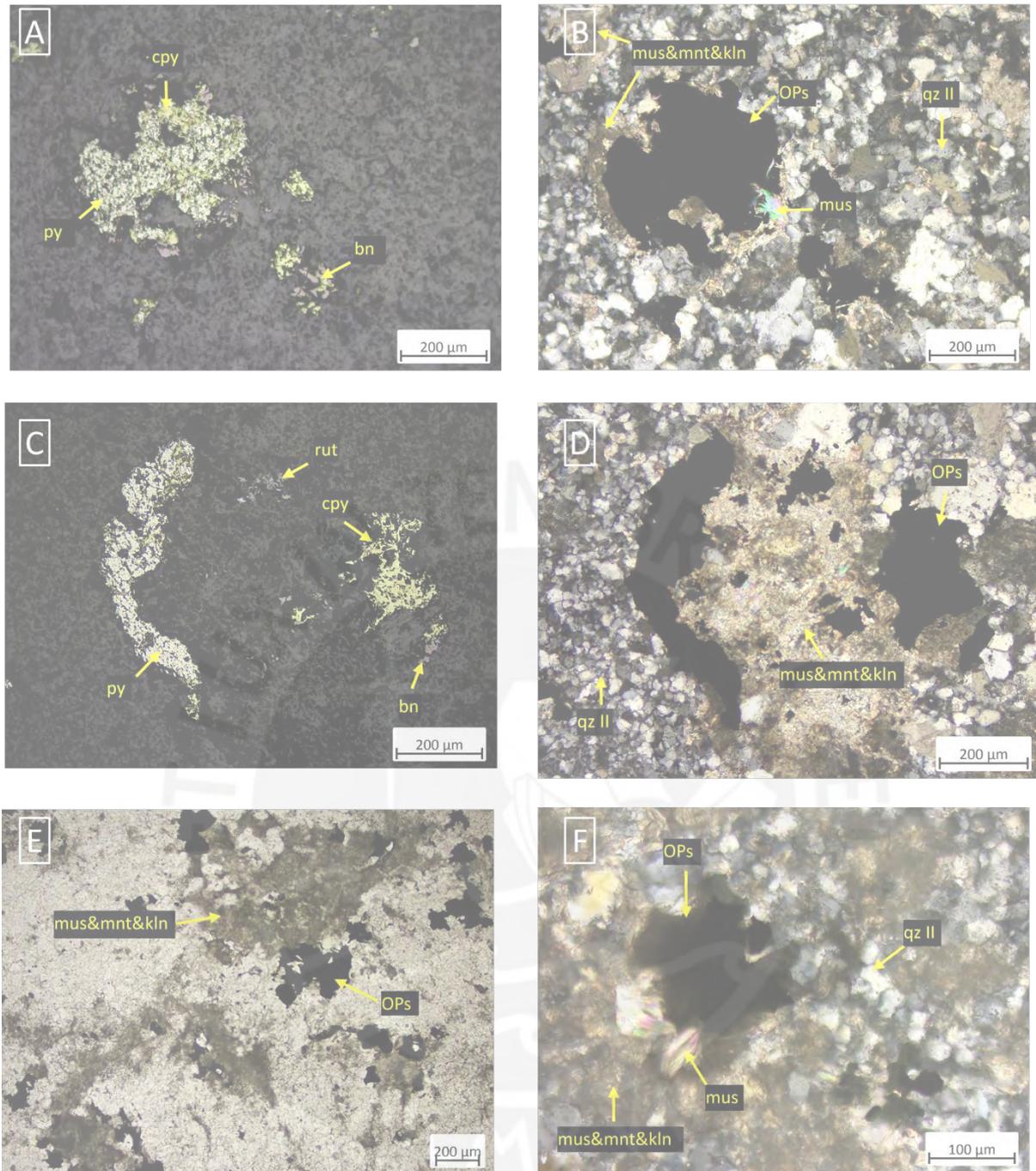


Figura 51: **A:** Vista al objetivo 10, en luz reflejada de agregados anhedral de pirita (py), que presentan contacto simple con bornita (bn), especialmente a los bordes, y con calcopirita (cpy). Además, el agregado anhedral de pirita, a la izquierda de la foto, presenta fracturas rectilíneas que han sido rellenadas por calcopirita, a manera de un intercrecimiento del tipo vetado. **B:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de la misma región de la fotomicrografía A. Se observa el agregado anhedral de pirita a la izquierda (py), rodeado por un agregado de sericita y arcillas (mus&mnt&kln), a manera de una sub-corona, y por cuarzo secundario (qz II). A la derecha los granos de bornita y calcopirita (bn&cpy) presentan los mismos contactos con sericita, arcillas y cuarzo secundario. **C:** Vista al objetivo 10, en luz reflejada de un agregado anhedral de pirita (py), en contacto simple a los bordes con granos anhedral de calcopirita (cpy). Al centro, agregado anhedral de rutilo (rut) en contacto simple con calcopirita y pirita. A la derecha, agregado anhedral de calcopirita en contacto simple con un grano de bornita (bn). **D:** Vista al objetivo 10, en modo polarizadores cruzados (luz transmitida) de la misma región de la fotomicrografía C. Se observa el agregado anhedral de pirita a la izquierda, rodeado por un agregado de sericita y arcillas (mus&mnt&kln), a manera de una sub-corona, y por cuarzo secundario (qz II). A la derecha los granos de bornita y calcopirita (bn&cpy) presentan los mismos

contactos con sericita, arcillas y cuarzo secundario. Es importante destacar que en el caso de los granos de minerales opacos de la derecha se llegan a formar coronas casi completas de sericita y arcillas. **E:** Vista al objetivo 5, en luz transmitida de agregados de sericita y arcillas (mus&mntykln), que están relacionados espacialmente a los minerales opacos (OPs), calcopirita y pirita. **F:** Vista al objetivo 20, en luz reflejada de un grano subhedral de calcopirita en contacto simple con rutilo (OPs). Este grano de minerales opacos está rodeado por un agregado sericita y arcillas (mus&mntykln) que forma una sub corona y por cuarzo secundario. Se observan también algunos granos euhedrales de muscovita junto con los granos más finos y las arcillas.

5.1.9.3. Difracción de rayos X-espectroscopía infrarroja de reflectancia
Resultados Difracción de Rayos X

Tabla 18: Tabla resumen del análisis por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	40
Feldespatos - K (Ortoclase)	KAlSi ₃ O ₈	28
Plagioclasa (Oligoclase)	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	19
Mica (Muscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	6
Calcita	CaCO ₃	2
Calcopirita	CuFeS ₂	<L. D.
Pirita	FeS ₂	<L. D.
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	<L. D.
Montmorillonita	(Na,Ca) _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·n(H ₂ O)	<L. D.

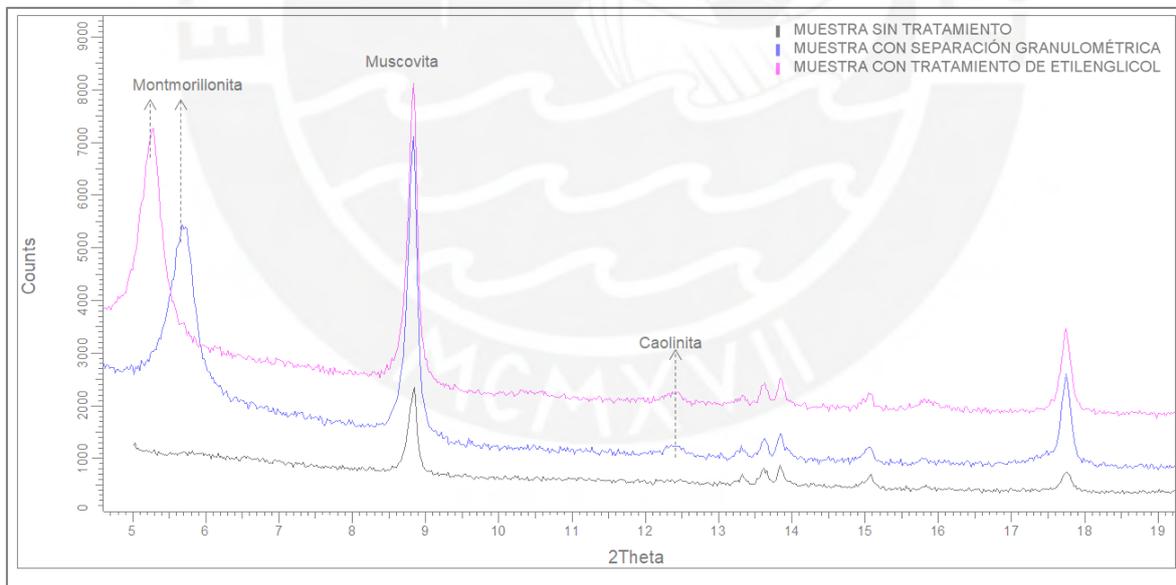


Figura 52: Difractogramas de la muestra sin tratamiento y con tratamientos de separación granulométrica y de etilenglicol

Resultados espectroscopía infrarroja de reflectancia

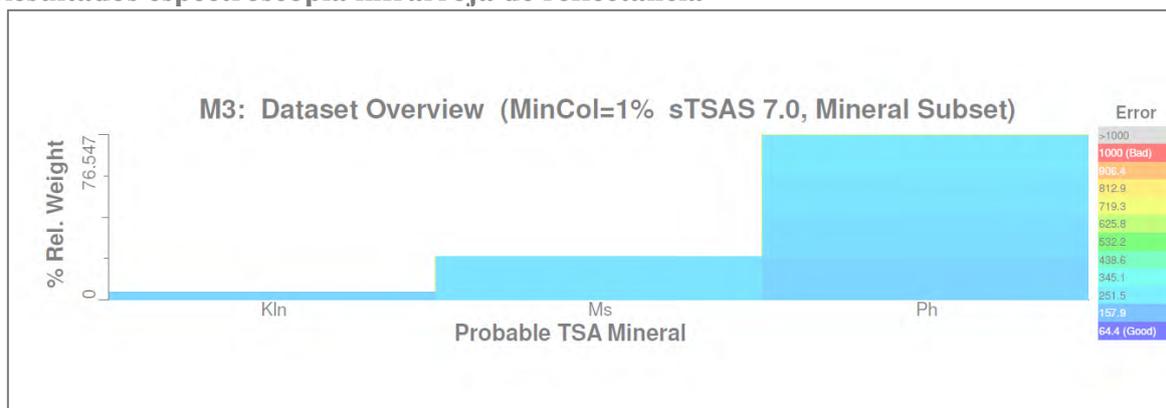


Figura 53: Distribución de minerales detectados (de mayor a menor en abundancia): fengita (Ph), muscovita (Ms), caolinita PX (Kln).

5.2. Análisis Geoquímico

Las rocas de Cuajone tienen en promedio 50% de minerales producto de la alteración hidrotermal (principalmente en la matriz, que es muy fina). La mineralogía hidrotermal y su cuantificación se ha realizado con la observación microscópica y se corrobora con los resultados de los análisis geoquímicos, que se muestran en el gráfico de Warren *et al.* (2007). La intensa alteración hidrotermal no hace posible determinar la composición del protolito con porcentajes modales de los minerales formadores de roca. Como alternativa se usó una clasificación geoquímica usando elementos trazas inmóviles, como se muestra en la figura 54 (gráfico de Pearce, 1996).

Para los análisis geoquímicos se utilizó el método ICP-MS para 48 elementos con disolución en 4 ácidos (ME-MS61, ALS LIMA). Parte de los resultados se muestran en el gráfico Zr/Ti vs Nb/Y de Pearce (1996), modificado de Winchester y Floyd (1973), estos elementos inmóviles nos permiten la clasificación de roca. 3 unidades mineralizadas caen dentro del campo de las andesitas basálticas-andesitas (BA, Andesita Basáltica; LP, Latita Porfírica y BLP, Latita Porfírica 2) y el "Pórfido Blanco" en el campo de la dacita-riolita (Figura 54).

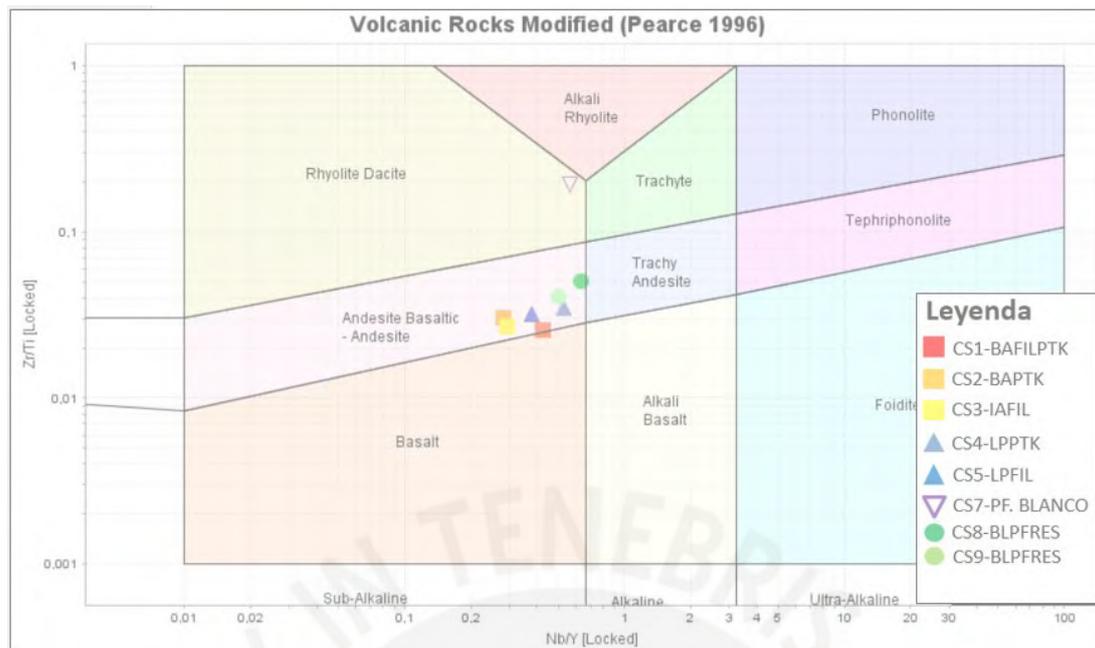


Figura 54: Gráfico Zr/Ti vs Nb/Y de Pearce (1996) muestra que tres, de los cuatro pórfidos, tienen composición andesita basáltica-andesítica y uno presenta composición riolita-dacítica.

Para la alteración, se usó el método ICP-AES para 13 óxidos de elementos mayores con fusión en metaborato de litio (ME-ICP06, ALS LIMA) para garantizar que se puedan liberar los elementos de los silicatos más resistentes. Los elementos mayores Na, Ca y K son bastante móviles y son enriquecidos o empobrecidos en las rocas cuando son afectadas por los fluidos hidrotermales. Los resultados están en el gráfico de Warren *et al.* (2007; Figura 55), sugieren que el mineral más abundante de alteración hidrotermal es la sericita. Esto correlaciona bien con lo observado y medido con los otros métodos utilizados en este estudio.

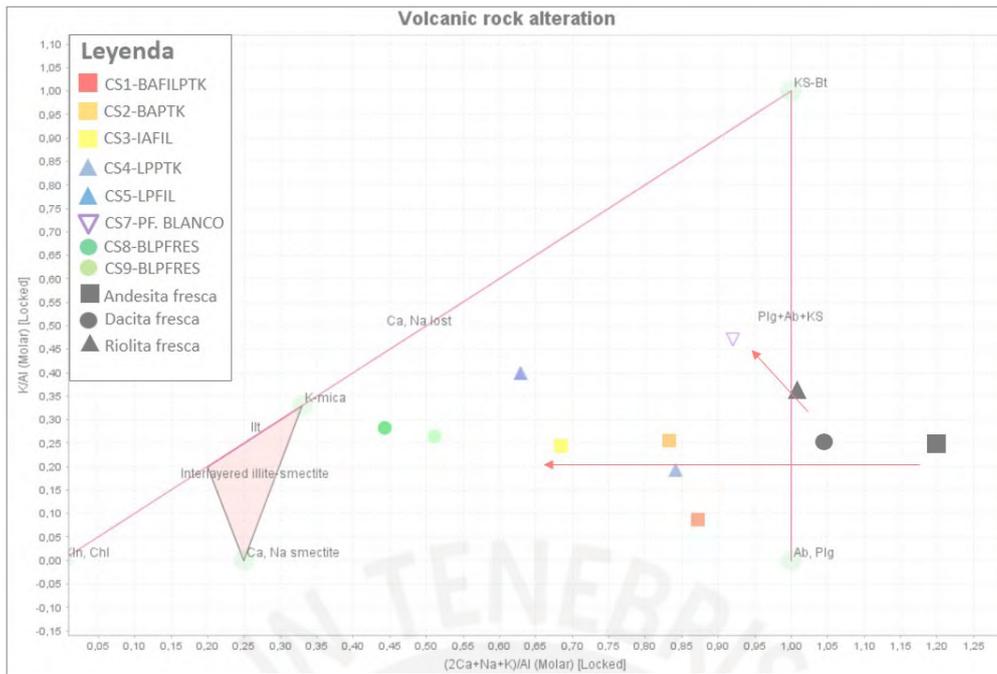


Figura 55: En este gráfico (Warren et al., 2007) se observa que todas las muestras están alteradas y es evidente la transferencia de los elementos mayores para formar la sericita (K-mica), seguida de la biotita secundaria.

Adicionalmente utilizando los elementos inmóviles Ti y Zr, como lo propuso Hallberg (1984), también se logra definir claramente los protolitos, como se observa en la figura 56.

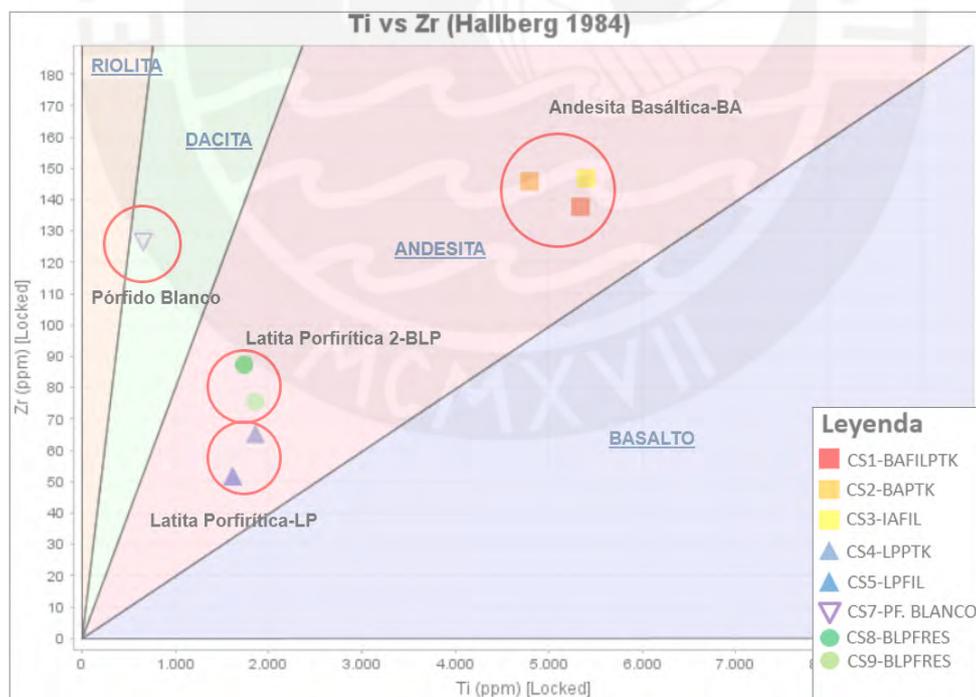


Figura 56: Gráfico de Ti vs Zr de Hallberg (1984), mostrando como los 4 pórfidos de Cuajone tienen una firma distinta.

En el diagrama de araña (Figura 57) usando la condrita C1 de McDonough Sun (1995) se puede notar lo siguiente:

- Que las muestras analizadas siguen el mismo patrón, y se agrupan de acuerdo a unidad litológica.
- El Pórfido Blanco se formó a partir de un magma más diferenciado, más félsico, demostrado por el empobrecimiento en Co, Ti y enriquecimiento en Ce, Hf, La, Nb, Ta, Th, U y Zr. En la figura 58 Se resalta el enriquecimiento en Th y empobrecimiento en Co, usando el gráfico de Hastie *et al.*, 2007.
- Las cantidades de Hf en el Porfido Blanco, son las mayores de todas las unidades. Este enriquecimiento del magma en Hf según Linnen (1998) demuestran que el Pórfido Blanco proviene de un magma más diferenciado.
- Segun Harker (1909), las series calcoalcalinas tienden a aumentar la concentración de P al inicio de los pulsos y luego decrece con el tiempo, sugiriendo un indicativo de temporalidad. En el caso de Cuajone la concentración de P decrece de la siguiente manera: BA > LP> BLP > Pórfido Blanco. Esto correlaciona con las dataciones existentes y solo faltaría comprobarlo con una datación radiométrica en el Pórfido Blanco.

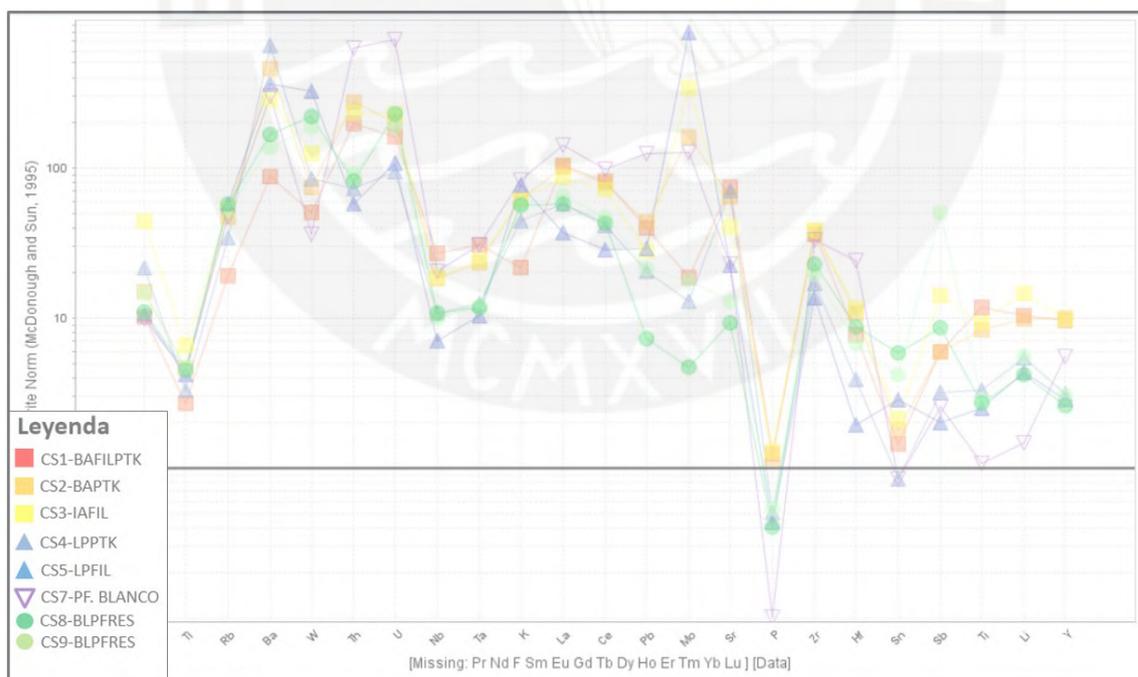


Figura 57: Notar patrones agrupados de acuerdo a la unidad litológica, y empobrecimiento en Ti y enriquecimiento en Ce, Hf, La, Nb, Ta, Th, U y Zr del pórfido blanco frente a las demás unidades.

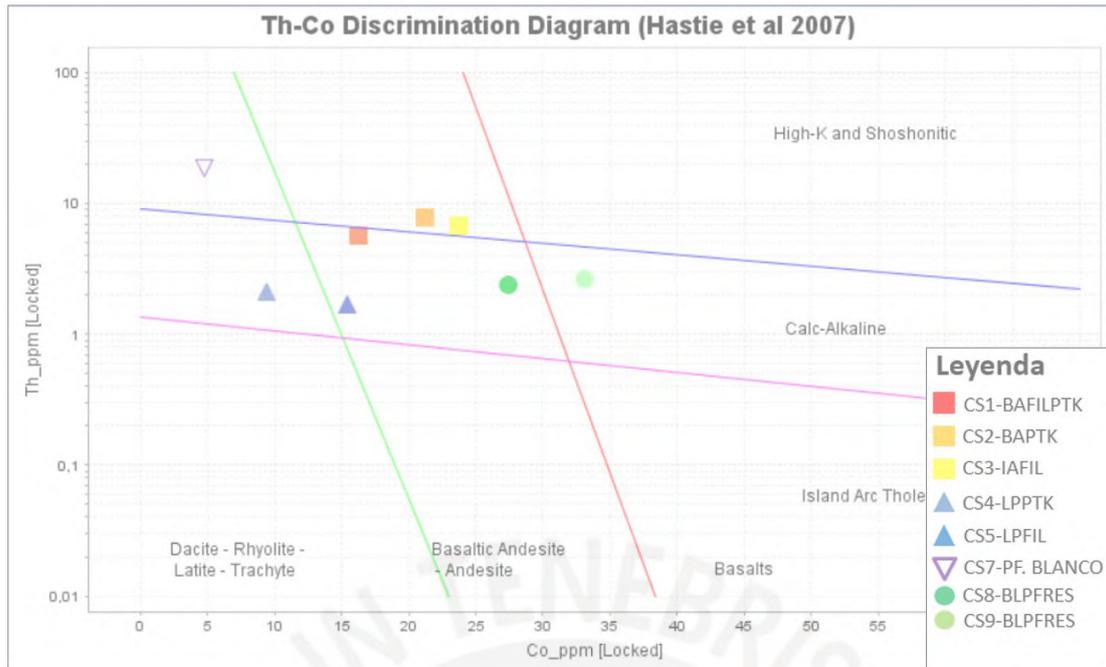


Figura 58: Pórfido Blanco proviene de un magma más diferenciado. En este diagrama se evidencia su enriquecimiento en Th (elemento incompatible) y empobrecimiento en Co (elemento compatible)

6. Discusión

6.1. Discusion de resultados

6.1.1. Caracterización Petromineralógica usando microscopía, DRX-espectroscopía infrarroja de reflectancia y geoquímica

En esta sección, se hace una descripción del nombre geoquímico-textural dado por la presente caracterización petrominerográfica usando la información de todas las técnicas usadas. Se tomó esta decisión ya que al tener aproximadamente un 50% de la matriz alterada no se puede hacer una clasificación de mineralogía modal.

Andesita Basáltica-BA

Se le ha descrito previamente como una lava ya que en muestra macroscópica o seccion delgada la roca tiene textura porfirítica en una matriz muy fina alterada, que no permite distinguir si la matriz original era cristalina (hipabisal) o presentaba vidrio o desvitricación (roca volcánica). Aquí se le clasifica como un stock hipabisal dado que en el tajo abierto no se observa texturas volcánicas como: vesículas, flow banding o pseudo estratificación. Además, en los largos años de la mina nunca se ha llegado a cortar un cuerpo, supuestamente volcánico, que debería ser subhorizontal y tener una potencia menor a 500 m (Geología de Mina Cuajone, 2019) y principalmente porque se cuenta con dataciones U-Pb en zircón (Simmons, 2013) que le dan una edad muy joven (55 Ma) para pertenecer al grupo Toquepala (> 67 Ma).

Este trabajo la describe como un pórfido de composición andesítica de color gris oscuro verdoso con fenocristales medios de plagioclasa y feldespato potásico y matriz muy fina oscura dominante (alterada a biotita secundaria), con abundante calcopirita diseminada y en vetillas.

Las muestras de las 3 subunidades, presentan intensa alteración potásica (biotita secundaria y feldespato potásico secundario) la diferencia entre las 3 subunidades, la da el aumento en abundancia de los minerales de alteración filica (cuarzo secundario y sericita) y argílica intermedia (arcillas). La muestra CS2-BA PTK tiene minerales que denotan una débil alteración filica, que aumenta ligeramente en CS1-BA FILPTK y se hace muy intensa en CS3-IAFILPTK, acompañada además de una muy débil alteración argílica. Este aumento en abundancia de los minerales de alteración filica (cuarzo secundario y sericita) y alteración argílica intermedia (arcillas), explica el cambio de color de la roca (observación macroscópica) desde un negro verdoso (BA PTK), a negro blanquecino-verdoso (BA FIL PTK), hasta un gris blanquecino (IA FIL PTK).

Latita Porfirítica-LP

En este trabajo se clasifica como un pórfido (estructura subvertical) de composición andesítica de color gris claro verdoso con fenocristales medios de plagioclasa, cuarzo, biotita y feldespato potásico dominantes y matriz muy fina, con abundante calcopirita diseminada y en vetillas.

A continuación, se hace una comparación entre las subunidades. La CS6-BXLP corresponde a una brecha hidrotermal, los clastos pertenecen a la unidad litológica LP, corroborado por la microscópica óptica y por la geoquímica. Se destaca que los clastos de esta brecha presentan intensa alteración potásica y alteración argílica débil. Las muestras CS4-LP PTK y CS5-LP QS presentan débil alteración potásica (feldespato potásico secundario), por el contrario, son abundantes los minerales de alteración filica (cuarzo secundario y sericita) y argílica intermedia (arcillas), pasando de intensa en la CS4-LP PTK a muy intensa en la CS5-LP QS. Este aumento explica el cambio de color de la roca, de un gris blanquecino-verdoso (LP PTK; sericita > cuarzo), a un gris blanquecino (LP QS; cuarzo > sericita).

Latita Porfirítica 2-BLP

En este trabajo se describe como un pórfido (estructura subvertical) de composición andesítica de color gris claro verdoso con matriz muy fina dominante y fenocristales medios de cuarzo, plagioclasa y biotita, con escasa calcopirita en venillas y diseminada. A continuación, se hace una comparación entre las dos subunidades identificadas. Las muestras CS8 y CS9 fueron tomadas del área de código de mina BLP FRES, la diferencia se da en la alteración filica y argílica intermedia, pasando de intensa en la CS8-BLP FRES FIL PTK a muy intensa en la CS9- BLP FRES FIL ARG. Este aumento en porcentaje en peso de los minerales de alteración filica (cuarzo secundario y sericita) y alteración argílica intermedia (arcillas), se manifiesta por el cambio de color de la roca, desde un gris blanquecino en la muestra CS8 (predominancia de cuarzo secundario), a un gris verdoso en CS9 (predominancia de arcillas: montmorillonita e illita). Cabe destacar que actualmente se presenta un único código (BLP FRES) para esta unidad, en este trabajo se usó los nombres CS8-BLPFRES FILPTK y CS9-BLPFRES FIL ARG, para poder diferenciarlas con facilidad. Como se ha mencionado estas variaciones se dan debido al cambio de la abundancia de sericita y arcillas. Estos cambios, podrían afectar la recuperación ya que influyen en el Work index de la roca y la abundancia de sericita podría dificultar la flotación. Cuando se revisó los 42 mil datos de recuperación (Geología de Mina Cuajone, 2019) se encontró que se hizo una subdivisión entre una BLP con alteración potásica dominante (Recuperación=83.45%) y otra

con alteración filica dominante (Recuperación=83.19%), concordando con la hipótesis de cómo afectan a la recuperación la abundancia de micas y arcillas.

Pórfido Blanco

Este trabajo es la primera contribución a su caracterización. A diferencia de la LP y la BLP, esta roca no presenta fenocristales de biotita (ligado al empobrecimiento en Ti, figura 55 y 56), tiene mayor abundancia de feldespato potásico primario y la mena se encuentra preferentemente diseminada.

El Pórfido Blanco se formó a partir de un magma más diferenciado, más félsico, como lo muestra la geoquímica de elementos traza. Específicamente por el empobrecimiento en Co, Ti y enriquecimiento en Ce, Hf, La, Nb, Ta, Th, U y Zr; nótese también, que su porcentaje de SiO₂ llega al 75%, versus las otras unidades que fluctúan entre 55% y 70%. Estas proporciones de elementos hacen que en diagramas clásicos de clasificación petrológica en base a elementos trazas, como el diagrama de Hallberg (1984) o el de Pearce (1995), el Pórfido Blanco se distingue de las otras 3 unidades ubicándose en el campo de la composición rio-dacítica, mientras que las demás unidades se ubican en el campo andesítico.

Las observaciones de microscopía óptica y la información de campo (Pórfido Blanco tiene contacto subvertical con el pórfido LP y tiene incluidos clastos de esta, sugiriendo que es una unidad mas joven), brindada por los ingenieros de Southern Peru (Geología de Mina Cuajone, 2019), permiten la hipótesis que corresponde a un stock hipabisal. Aquí se describe como un pórfido de composición riodacítica de color gris blanquecino, con fenocristales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, de textura porfírica, con escasa calcopirita diseminada y una relación fenocristales-matriz de 45/55.

La muestra presenta débil alteración potásica (feldespato potásico secundario), intensa alteración filica (cuarzo-sericita) y muy débil alteración argílica intermedia (montmorillonita-caolinita). Presenta elevada abundancia de cuarzo secundario y arcillas (montmorillonita y caolinita) que explican parcialmente el color blanco de la roca, junto con su origen a partir de un magma mas diferenciado. Además, las arcillas forman coronas y subcoronas ubicadas preferencialmente alrededor de granos de calcopirita (Figura 50).

El resumen de los resultados de caracterización de este trabajo se presenta en la [tabla 19](#).

Tabla 19: Resumen de las características observadas en la caracterización petromineralográfica-textural de las muestras del presente trabajo. Además, se presentan Leyes de Cu, Work index y Recuperación recolectados de las bases de datos de la empresa y brindados por Geología de Mina Cuajone (2019).

Unidad Litológica	Subunidad Litológica (código de muestra)	Geometalurgia: Intercrecimientos de (calcopirita - especie mineral)		Tamaño de calcopirita máx. / promedio (µm)		WORK INDEX (kW.h/t)	Ley de Cu Muestra ICP-MS/ Modelo (%)	Recuperación de Cu (%)
		Minerales de ganga (tipo de intercrecimiento)	Minerales Opacos (tipo de intercrecimiento)	Vetillas	Diseminada			
BA-Andesita Basáltica	BA FIL PTK (CS1)	btII, clo, qzII (contacto simple)	py, mt (contacto simple, inclusiones); rut (inclusiones)	1200 / 350	800 / 150	19.2	0.3510/ -	82.41
	BA PTK (CS2)	btII, clo, qzII, kfsII (contacto simple); clo (subcorona)	py, mt (contacto simple, inclusiones)	250 / 50	300 / 40	21	0.4420/ 0.4973	82.68
	IA FIL PTK (CS3)	clo, mnt, mus, cac (contacto simple); clo, mnt (subcorona)	py, rt (contacto simple, inclusiones); mo (veteado)	3000 / 400	500 / 250	18.4	0.5740/ 0.6217	81.59
LP-Latita Porfírica	LP PTK (CS4)	qzII, clo, mus (contacto simple)	py, rt (contacto simple, inclusiones); ef (contactos.)	600 / 200	200 / 80	15.3	0.1370/ -	85.3
	LP QS (CS5)	mus, mnt, qzII, clo, kfsII, cac (contacto simple); mus, mnt (subcorona)	py, mt, rut (contacto s.), mo (veteado); cc, dg, bn (corona)	800 / 400	400 / 200	14.4	0.5440/ 0.5132	85.7
	BX LP (CS6)	kfsII, cac, mus, qzII, clo (contacto simple)	rut (inclusiones), ef (contacto s., inclusiones)	Centimétrico (cemento de brecha)	300 / 150	15.8	4.298 (XRF) / -	85.52
BLP-Latita Porfírica 2	BLP FRES FIL PTK (CS8)	qzII, clo, mus (contacto simple)	py (contacto simple, ameboidal, inclusiones)	350 / 250	300 / 100	19.7	0.1050/ 0.2996	83.19
	BLP FRES FIL ARG (CS9)	qzII, mus (contacto simple)	py, (contacto simple e inclusiones); mt (contacto s.)	400 / 250	300 / 150	19.7	0.1580/ 0.2996	83.45
Pórfido Blanco	Pórfido Blanco (CS7)	mus, mnt, kln (coronas y subcorona); qzII (contacto simple)	py (contacto simple, inclusiones, veteado), bn, rt, ef (contacto s.)	250 / 100	500 / 150	X??	0.3570/ ?	80??

6.1.2. Mineralogía de arcillas y micas

Es importante identificar los minerales del grupo de los filosilicatos ya que estos tienen influencia sobre la tasa de recuperación de cobre durante la flotación. Los filosilicatos: sericita (muscovita e illita), montmorillonita, caolinita, talco, clorita entre otros tienen los siguientes seis efectos en la flotación (Cropp *et al.*, 2013): 1. Incrementan la viscosidad de la pulpa; 2. Reducen la eficiencia de flotación (modifican el pH); 3. Arrastran partículas finas de ganga; 4. Adsorben agua y reactivos; 5. Alteran la composición iónica de la pulpa (suspensión en agua de roca mineralizada molida) ya que se dan intercambios de cationes entre las arcillas y la solución; 6. Aumentan la estabilidad de la espuma.

Los efectos más adversos en Cuajone se podrían dar de mayor a menor a causa de la presencia de: montmorillonita, caolinita y sericita. La caolinita y la montmorillonita pueden retener agua en su estructura hasta del 50% y 70%, respectivamente, de su peso sólido (Malghan, 1984). En el yacimiento Cuajone se han identificado estos minerales como parte de la alteración argílica, además de muscovita y clorita que ya habían sido detectados en la microscopia. Los estudios de Difracción de Rayos X y Terraspec han permitido identificar y cuantificar principalmente los filosilicatos, de esta manera se detectó illita en la unidad CS3-IAFILPTK; caolinita en CS7- Pórfido Blanco y CS9- BLP FRES FIL ARG y montmorillonita en todas las muestras a excepción de CS1 y CS2. En la [figura 59](#) se presenta un resumen de los filosilicatos identificados en las unidades mineralizadas de Mina Cuajone y en la [figura 60](#) se muestran solo los porcentajes de montmorillonita y caolinita, que se destacan por ser las arcillas más problemáticas para la recuperación.

Para menguar este problema y evitar que estos minerales arcillosos se adhieran a la superficie de la calcopirita y eviten su flotación, se recomienda lo siguiente:

1. Continuar e intensificar el trabajo con el Terraspec Hi-Res 4 en taladros geológicos y geotécnicos, para recolectar información que permita delimitar con mayor precisión (modelamiento) las zonas de alteración argílica problemática.
2. Hacer pruebas piloto con material de alimentación de flotación, usando un dispersante aniónico de adsorción preferencial por las arcillas (compuesto apolar), que evita que estas se adhieran a los minerales de cobre y dificulten su flotación (Seaman *et al.*, 2012). Se debe encontrar el dispersante aniónico ideal para Cuajone, lo cual contribuirá en el ahorro de agua y en la mejora de la recuperación en las unidades que son ricas en arcillas.

- Se debe decidir si sería más beneficioso el hacer “blending” de material con abundante y poco contenido de arcillas y usar dispersante aniónico de manera usual en concentradora; o acumular todo el material rico en arcillas y darle un tratamiento especial con dispersante aniónico. Para tomar la decisión correcta, se debe de realizar un análisis considerando tonelajes de roca y costos por litro del dispersante aniónico.

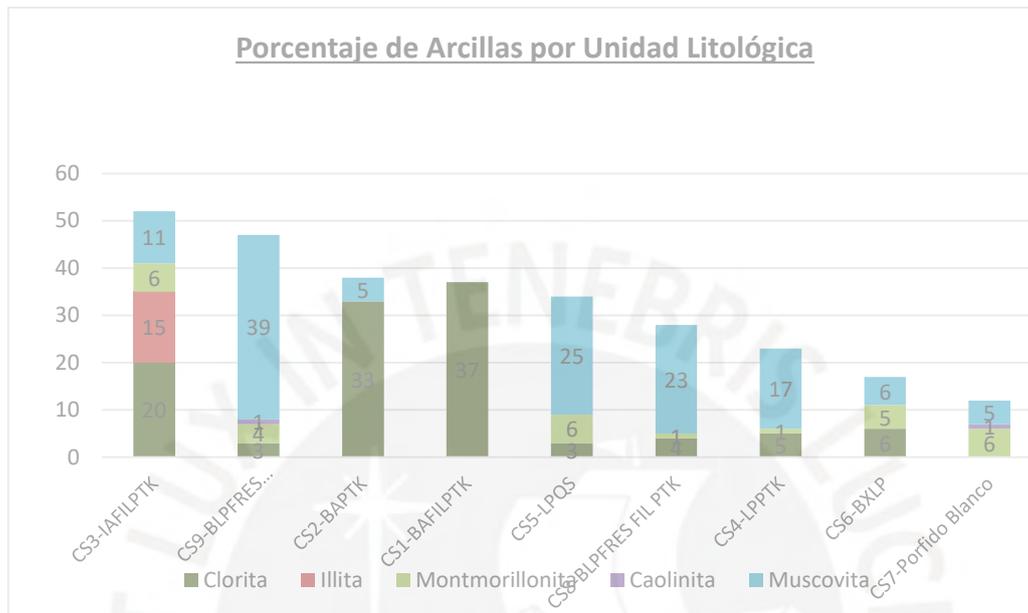


Figura 59: Resumen de las micas (clorita y muscovita) y arcillas (montmorillonita y caolinita) identificados en las unidades mineralizadas de Mina Cuajone.

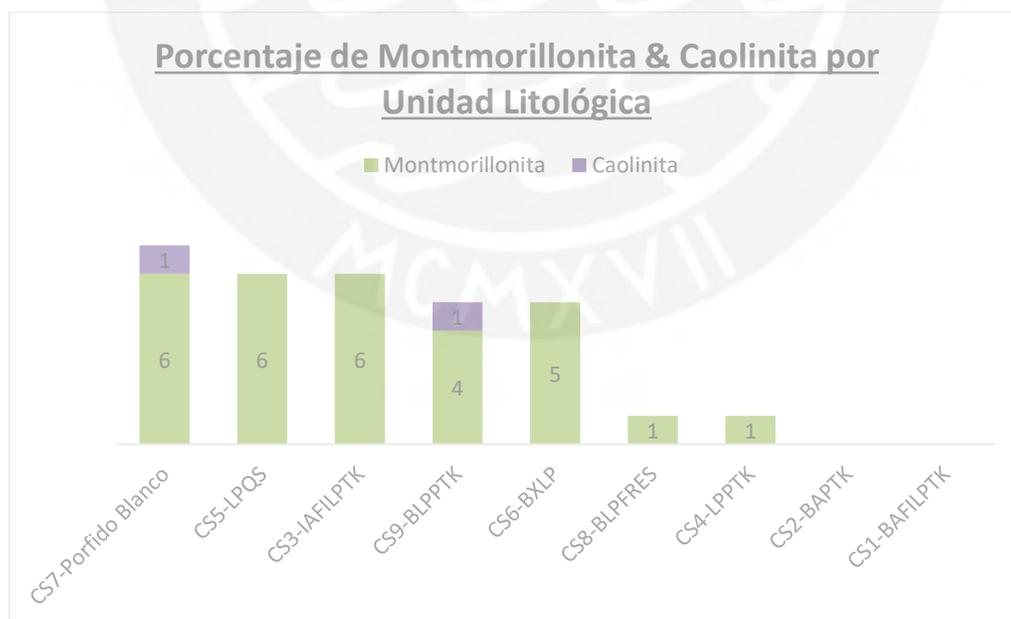


Figura 60: Porcentajes de montmorillonita y caolinita en las unidades mineralizadas. Notar que la muestra CS7-Porfido Blanco presenta altas cantidades de montmorillonita y caolinita, pero comparativamente no tiene mucha abundancia de muscovita y clorita. Por otro lado, las muestras CS3-IAFILPTK y CS9-BLP FRES FIL ARG presentan abundancia tanto en muscovita y clorita como en montmorillonita y caolinita.

6.1.3. Tamaños máximo y promedio de granos de calcopirita

Los tamaños suelen ser mayores conforme la roca presenta mayor abundancia de cuarzo y sericita (alteración filica más intensa). Aplica en el caso de las unidades LP, BA y BLP. Para el Pórfido Blanco no se puede hacer esta afirmación ya que solo se ha observado una subunidad con intensa alteración filica y argílica intermedia superpuestas. Los tamaños suelen ser mayores cuando ocurre en vetillas. Tomando en cuenta que todas las rocas reciben el mismo tratamiento y que entran al proceso de flotación con un tamaño a un 80% pasante la malla 65 (208 μm), los tamaños de grano de calcopirita son adecuados, estando en un promedio simple de 205 μm ; la única excepción es la unidad Pórfido Blanco donde el tamaño promedio es 125 μm . En la [tabla 20](#) se presenta un resumen de los tamaños de grano de calcopirita e intercrecimientos para cada unidad y subunidad, medidas en el presente trabajo con microscopía óptica

Tabla 20: Resumen de los tamaños de grano de calcopirita para cada unidad y subunidad.

Subunidad Litológica (código de muestra)		BA FIL PTK (CS1)	BA PTK (CS2)	IA FIL PTK (CS3)	LP PTK (CS4)	LP QS (CS5)	BX LP (CS6)	BLP FRES FIL PTK (CS8)	BLP FRES FIL ARG (CS9)	Pórfido Blanco (CS7)
Tamaño de calcopirita máx. / promedio (μm)	Vetillas	1200 / 350	250 / 50	3000 / 400	600 / 200	800 / 400	Centimétrico (cemento de brecha)	350 / 250	400 / 250	250 / 100
	Diseminada	800 / 150	300 / 40	500 / 250	200 / 80	400 / 200	300 / 150	300 / 100	300 / 150	500 / 150

6.1.4. Tipos de intercrecimientos de calcopirita con los demás minerales

En los estudios microscópicos se observaron 4 tipos de intercrecimientos principales de calcopirita con otros minerales. Cabe destacar que la asociación mineralógica más abundante es calcopirita y pirita. Las texturas en orden de abundancia son.

1. **Contacto simple:** calcopirita con pirita, magnetita, rutilo, pirrotita y galena.
2. **Inclusiones (diseminado):** calcopirita en pirita y magnetita.
3. **Compenetración (veteado):** calcopirita con molibdenita
4. **Corona:** calcopirita con bornita, calcosita y digenita.
5. **Corona de arcillas:** sobre los minerales opacos: La observación en secciones delgadas-pulidas, revela que en la muestra CS7-Porfido Blanco y en CS3 IAFILPTK se dan intercrecimientos en los que; sericita, montmorillonita y caolinita (arcillas); forman coronas alrededor de las partículas intercrecidas de calcopirita-minerales opacos (Figura 60). Se tiene la hipótesis que en el Pórfido Blanco se deposita la calcopirita junto con la

alteracion cuarzo sericita reemplazando a minerales máficos de tamaño fino, luego las arcillas de la posterior alteracion argilica intermedia, reemplazaron los relictos de los minerales máficos, lo cual crea la textura de coronas y subcoronas que se observa al microscopio.

Como estas texturas podrían afectar la recuperación de cobre: El intercrecimiento más abundante es el de contacto simple, que de ser necesario puede ser solucionado con una molienda más fina. En segundo lugar, los intercrecimientos de tipo veteados y corona (que no son abundantes), también pueden ser solucionados con una molienda ligeramente más fina (que representa una considerable inversión, por lo que se debería estudiar la rentabilidad de hacerlo). El único intercrecimiento problemático es la calcopirita diseminada dentro de magnetita y pirita, ya que debido al tamaño fino de estos granos ($<50 \mu\text{m}$) la molienda requerida para liberarlos no es factible y estos granos de mena se perderán en los relaves. Finalmente, las coronas (arcillas-calcopirita) en el Pórfido Blanco, junto con el pequeño tamaño de partícula de calcopirita ($125 \mu\text{m}$) podrían explicar la baja recuperación en esta unidad. En la [figura 61](#), se muestran los tipos de intercrecimientos observados en las unidades litológicas de la Mina Cuajone, en base a la clasificación de [Amstutz \(1961\)](#) y modificada por [Canchaya y Cardozo \(1977\)](#). Ver [tabla 19](#) para un resumen de los intercrecimientos para cada unidad y subunidad.

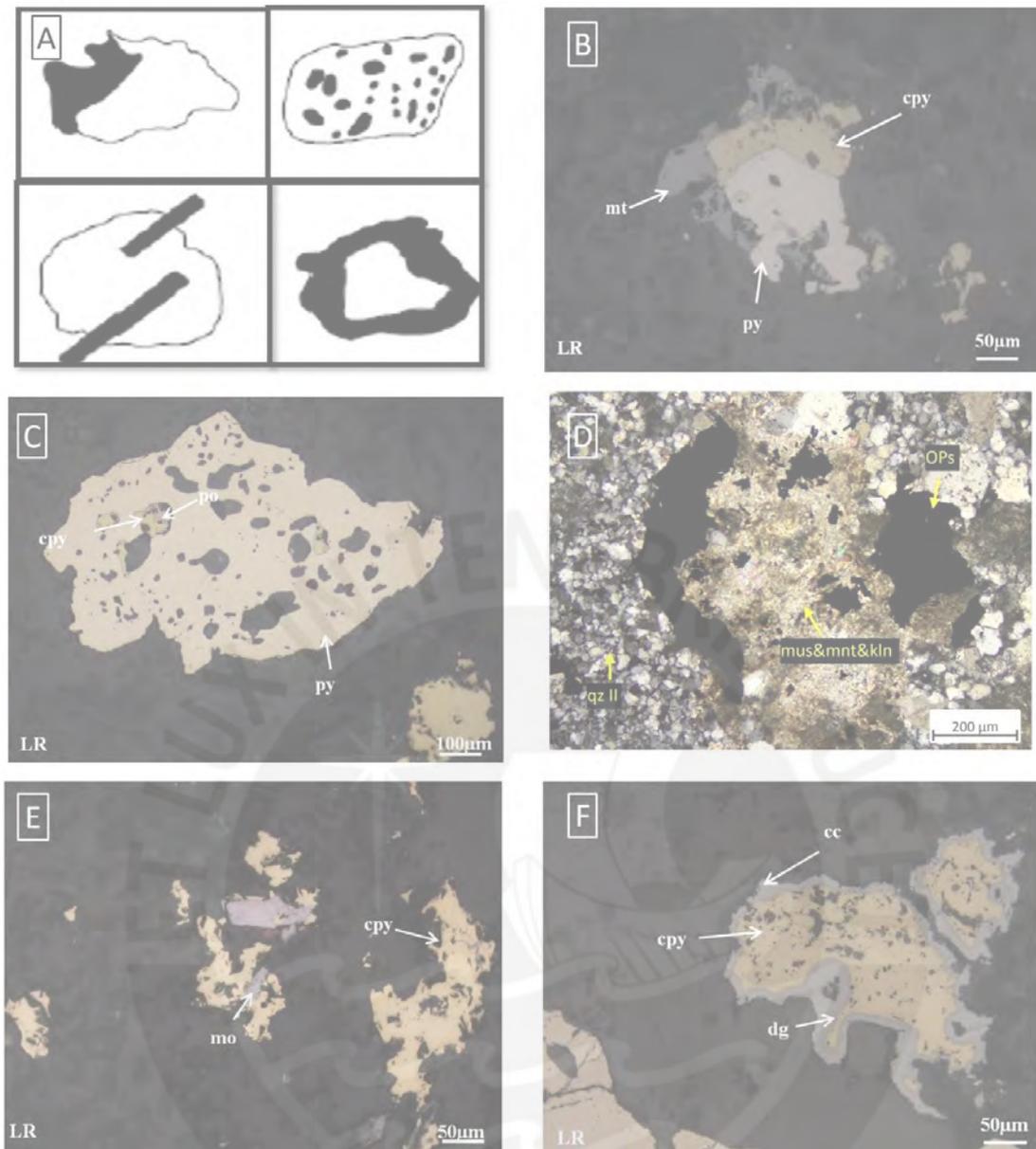


Figura 61: A: Tipos de intercrecimientos, modificado de Canchaya y Cardozo (1977), después de Amstutz (1961). B: contactos simples e inclusiones entre calcopirita, magnetita y pirita de la muestra de BA con ligera alteración filica sobre alteración potásica. C: Inclusiones de calcopirita y pirrotita en contacto simple dentro de pirita. D: Sub-corona de montmorillonita, sericita y caolinita en partícula intercrecida de calcopirita-pirita. E: Compenetración entre calcopirita y molibdenita. F: Corona entre calcopirita y calcosita-digenita (E y F, pertenecen a la muestra de LP con fuerte alteración filica).

6.1.5. Relación textura de roca-work index

En base a las observaciones al microscopio de 731 muestras, Oyarzun y Arévalo (2011) establecen una relación directa entre la textura de la roca y el work index. Este trabajo indica que la energía requerida para la molienda de una roca es proporcional a la energía inter-cristalina de los minerales de la roca (energía “congelada” al pasar de fase líquida a sólida). Esta energía inter-cristalina disminuye si los cristales se desarrollan adecuadamente, es decir, si la roca es más fanerítica, de granos más gruesos y sobre todo si estos granos tienen intercrecimientos poligonales (bordes bien desarrollados entre ellos) entonces el work index será más bajo. Por el contrario, si la roca tiene abundante matriz (cristales pequeños) y los minerales crecieron caóticamente, entonces los contactos entre los granos son más sinuosos y la energía de superficie será más alta y aumenta el work index (por ejemplo, textura afanítica, y porfirítica con predominancia matriz sobre fenocristales y crecimiento caótico de minerales).

Basado en los datos de work index recopilados de las bases de datos de Cuajone para un gran número de muestras y observaciones al microscopio de las 9 muestras de subunidades de la Mina Cuajone, se encontró una clara relación entre la textura y valores del work index. Además, se observó que dentro la misma unidad litológica debido a alteración hidrotermal, el cuarzo secundario, disminuye fuertemente el work index ya que sus granos reemplazan a la matriz muy fina y tienen contactos poligonales entre sí; la muscovita e illita, tienen un comportamiento similar al del cuarzo secundario; y se cree que la biotita secundaria, no afecta o aumenta ligeramente el work index.

A continuación, se detallan los motivos que otorgan el valor de work index a cada unidad litológica (de mayor a menor):

1. **Unidad litológica BA (W.I =18.4-21 kWh/t, de acuerdo a la alteración hidrotermal)**
De las 3 unidades litológicas oficiales (BA, LP, BLP), es la que presenta mayor porcentaje de matriz ($\approx 70\%$), en comparación con 45% en la LP. Además, presenta una alteración de biotita secundaria muy intensa, todos estos factores están relacionados con lo planteado por Oyarzun y Arévalo (2011) respecto a cómo los bordes sinuosos entre minerales formadores de roca contribuyen a un alto work index.
2. **BLP (W.I. BLP-FRES=19.7 kWh/t).** Presenta elevado porcentaje de matriz muy fina ($\approx 60\%$) y estos minerales están intercrecidos con bordes sinuosos entre sí.
3. **LP (W.I =14.4-15.8 kWh/t, de acuerdo a la alteración hidrotermal).** Es la unidad con menor porcentaje de matriz muy fina ($\approx 45\%$), relacionada a bordes sinuosos. Tiene

fenocristales bien desarrollados que llegan a tener tamaños medios y tienden a tener intercrecimientos poligonales entre sí: cuarzo, $<2000 \mu\text{m}$; feldespato potásico, $<250 \mu\text{m}$; y plagioclasa, $<3000 \mu\text{m}$.

4. **Pórfido Blanco** No tiene pruebas de laboratorio de work index. Se esperan valores de tendencia baja similares a los de la LP, debido a los intercrecimientos poligonales del cuarzo secundario.

En la [figura 62](#) se presentan una comparación de los work index de algunas rocas de la mina El Teniente ([Oyarzun y Arévalo, 2011](#)) y de Cuajone, con el objetivo de demostrar que las rocas con una textura similar tienen work index similares (ver [tabla 19](#) para valores de work index de cada subunidad litológica).

Finalmente se puede recomendar el uso de esta técnica de estimación de work index en base a microscopía óptica, para la predicción del comportamiento geometalúrgico de las rocas de la Mina Cuajone involucradas en los planes de producción de mediano a largo plazo, es decir, cuando no se dispone de muestra de superficie sino solo de testigo diamantino. La ventaja de esta técnica es que no requiere de gran cantidad de masa ($<2 \text{ kg}$, contribuyendo a no perder testigo), en comparación con 7 a 30 kg de masa que se requieren para un ensayo mecánico de laboratorio (solo aplicable en muestras de superficie). Se resalta que estimar work index con microscopía óptica sería útil solo cuando no se puede tener masa suficiente para un ensayo mecánico (BBWI), por ejemplo, cuando solo se cuenta con muestras de taladros diamantino.

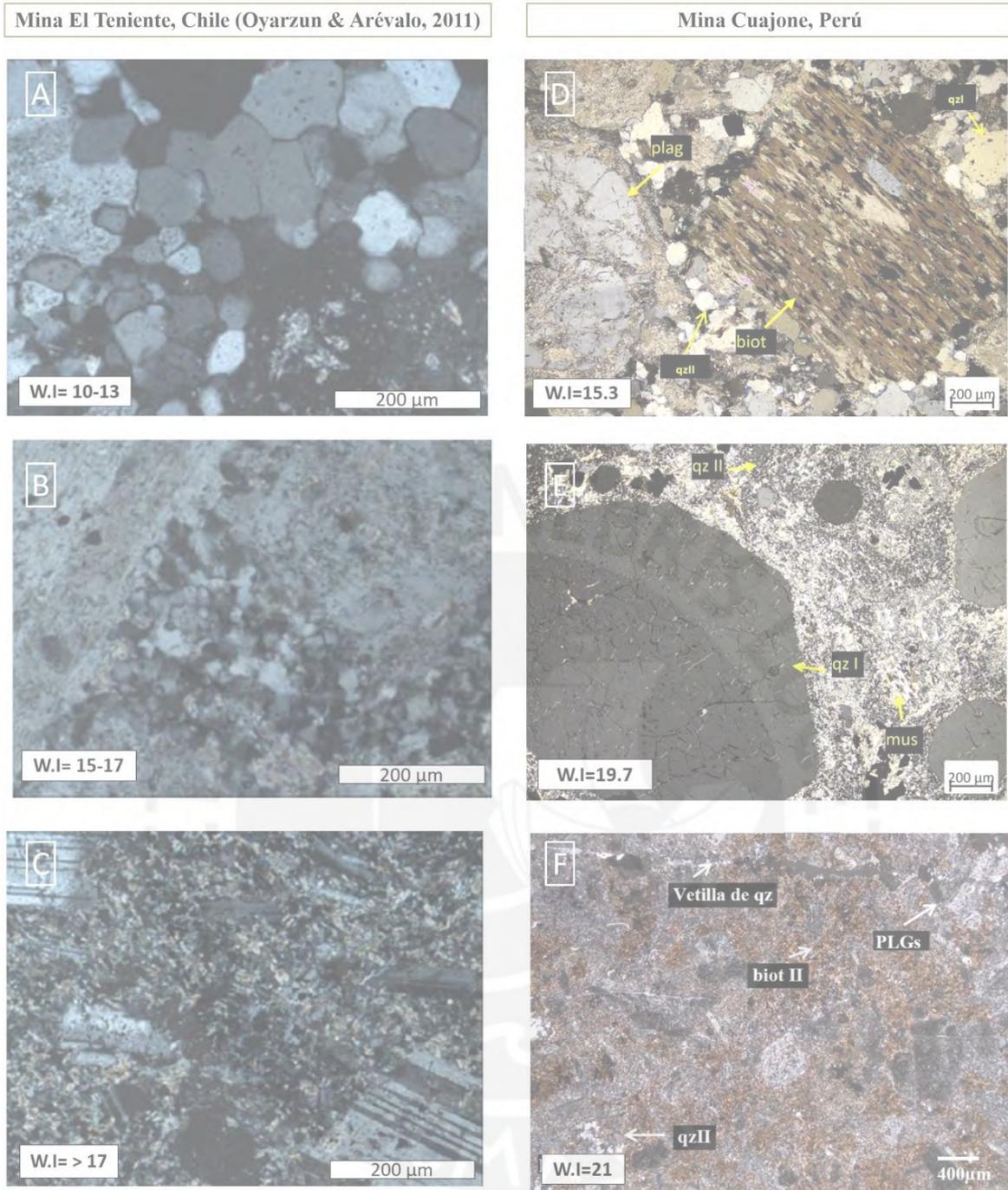


Figura 62: A la izquierda fotomicrografías de rocas pertenecientes a la mina El Teniente Oyarzun y Arévalo (2011): **A:** Dacita Porfirítica; **B:** Fase porfirítica de Diorita Sewell; **C:** Basalto Porfirítico. A la derecha fotomicrografías de rocas de la Mina Cuajone: **D:** LP PTK; **E:** BLP FRES FIL ARG; **F:** BA PTK. Se muestra como varía el Work index de acuerdo a la textura. Si la roca tiene cristales bien desarrollados y estos tienen intercrecimientos poligonales entre sí el Work index será bajo, conforme la roca presenta mayor abundancia de matriz fina y los contactos entre minerales son más sinuosos, el Work index será mayor.

6.1.6. Análisis con enfoque geometalúrgico

6.1.6.1. Comentario de trabajos pasados en Geometalurgia de Cuajone

Gagliuffi y Vera (2018) describieron 21 muestras de Cuajone. Su principal contribución en la caracterización geometalúrgica, es hacer una separación y cuantificación entre minerales competentes e incompetentes. Los minerales competentes, son aquellos que son compactos, duros y que en concentradora consumen energía y restringen tonelajes, generan problemas sobre todo en la chancadora primaria, en Cuajone son: plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo. Los minerales incompetentes, son los que se muestran deleznales, consumidores de ácidos, generadores de finos y aportadores de iones, lo que dificulta la flotación, minerales como: calcita, muscovita, sericita, clorita, arcillas. Este trabajo llega a caracterizar, pero no llega a relacionar que unidades tienen mayor Work Index (más resistencia en el chancado) debido a su abundancia de minerales competentes y textura de roca identificados; y tampoco relaciona la abundancia de arcillas a cómo afectan la recuperación en Cuajone. Por otro lado, esta tesis liga esos resultados a los valores de Work Index y recuperación de Cuajone, demostrando la directa relación entre estos parámetros.

Complementos de esta tesis al trabajo de Gagliuffi y Vera (2018)

1. Se identificó arcillas en la microscopía, pero no se pudo distinguir específicamente que tipo (montmorillonita, kaolinita, illita, dickita). Diferentes tipos de arcillas afectan variadamente el proceso de flotación. Importante usar TerraSpec y difracción de rayos X
2. Se describe a las unidades LP y BLP como pórfidos dacíticos. Lo cual petrográficamente tiene sentido; sin embargo, eso podría causar que ambas unidades sean tratadas metalúrgicamente como la misma. Esto no sería adecuado ya que tienen características geometalúrgicas muy diferentes como la ley de cobre, y textura de roca.
3. Este trabajo le da importancia a la paragénesis de todos los minerales, pero no le da un trato especial a la calcopirita (mena). Por ejemplo, es importante describir todos los tipos de intercrecimientos de esta, como inclusiones dentro de pirita e inclusiones dentro de magnetita; importante también medir los tamaños máximos y promedio de la partícula calcopirita para estimar si es que serán recuperados a la malla usada para el proceso de flotación. Estos puntos son tratados por la presente tesis.

6.1.6.2. Contribuciones del presente trabajo

Se presentan las siguientes hipótesis que explicarían la causa de las diferentes recuperaciones en las unidades litológicas de Cuajone

Factores que influyen en la recuperación

De los 4 factores geometalúrgicos que afectan la recuperación (1. work index; 2. mineralogía de mena, ganga y arcillas; 3. textura de mena y ganga; y 4. ley de cobre), 3 son decisivos en Cuajone:

- **Factor 1**, el work index que es una consecuencia de la textura de la roca (arreglos mineralógicos). Una roca con alto work index tiene dificultades en la liberación de partículas de la calcopirita durante la molienda. Todas las unidades litológicas de Cuajone reciben la misma molienda por lo de acuerdo a su work index (resistencia a la molienda) tendrán diferentes recuperaciones.
- **Factor 2**, la abundancia de micas y arcillas es el factor que causa la diferencia de recuperación dentro cada unidad litológica (misma litología-diferente alteración). Mayor cantidad de micas y arcillas, dificulta la recuperación.
- **Factor 3**, el tamaño del grano de calcopirita, es el factor que afecta negativamente solo al Pórfido Blanco, por el menor tamaño que en las demás unidades ($<150 \mu\text{m}$).

Se puede afirmar que en Cuajone **los factores 1 y 2** son los que más afectan la recuperación y ambos están controlados por la textura y mineralogía de de roca y minerales de alteracion hidrotermal (en especial micas y arcillas).

A continuación, se profundiza en los 4 componentes geometalúrgicos analizados: 1. Work index, 2. Mneralogia, 3 Textura y 4. Ley

- **Work index. Factor determinante en Cuajone entre las unidades litológicas.** Dado que las unidades litológicas reciben los mismos procesos y tiempos de conminución, las rocas con mayor work index son la BA PTK (W.I.=21 kWh/t; Recuperación=82.68%) y BLP FRES FIL ARG (W.I. =19.7 kWh/t; Recuperación=83.19%), ambas presentan recuperaciones bajas porque no se da una liberación óptima de calcopirita. Por otro lado, la unidad LP que tiene un work index más bajo QS (W.I.=14.4 kWh/t) y un tamaño de calcopirita similar al de la BA y BLP, tiene una recuperación considerablemente más alta (Recuperación=85.70%, hasta 3% superior).

- **Mineralogía.** Factor determinante en Cuajone entre las sub-unidades (subunidad=mismo tipo de roca, diferente alteración hidrotermal). La mena es solo la calcopirita; las cantidades de bornita, calcosina, covelina y digenita no son volumétricamente importantes por lo que no influyen en las variaciones de recuperación entre subunidades. El factor que causa la variación de recuperación entre las subunidades es la abundancia de micas (sericita y clorita) y arcillas (montmorillonita y caolinita) en la roca.
- **Texturas** (intercrecimientos y tamaños) de mena y ganga. El intercrecimiento predominante entre la calcopirita y los minerales de ganga transparentes (micas, arcillas, silicatos) y opacos (pirita, magnetita) es el contacto simple que no afecta negativamente a la recuperación, ya que permite liberar las partículas de cobre con una molienda apropiada. Los tamaños de calcopirita son aceptables en todas las unidades (205 μm) a excepción del Pórfido Blanco donde el tamaño es considerablemente menor (125 μm); además, esta unidad tiene alto contenido de arcillas que forman coronas alrededor de la calcopirita lo que ocasiona que el Pórfido Blanco tenga recuperación más baja de las 4 (Dato no oficial, observado puntualmente por Geología de Mina y Concentradora)
- **Ley de Cobre.** La mena de cobre es la calcopirita. El tamaño de calcopirita no varía significativamente en relación directa al aumento o disminución de la ley de cobre (facilitando la liberación y flotación del grano de calcopirita); es decir, en zonas con leyes bajas se mantiene el tamaño promedio de calcopirita lo que permite que estos granos se recuperen.

Variación de la recuperación por Unidad Litológica

A continuación, se presentan las hipótesis que explican la variación de la recuperación para cada unidad litológica. Estas hipótesis están basadas en las 9 muestras estratégicamente seleccionadas

1. **BA.** La recuperación es baja debido a su alto work index. Dentro de las subunidades el factor que modifica la recuperación es la mineralogía de la ganga. En la BA PTK, la recuperación es de 82.68%; en la BA PTK FIL, la recuperación disminuye a 82.41% debido al aumento de muscovita; y en la IA FIL PTK vuelve a disminuir el Work Index hasta 81.59%, debido al incremento de illita, muscovita y montmorillonita.

2. **LP.** La recuperación es comparativamente superior debido a su bajo work index. Dentro de las subunidades el factor que modifica la recuperación es la mineralogía de la ganga (arcillas). En la LP PTK, la recuperación es de 85.30%. En el caso de la LP la alteración filica está constituida por cuarzo, con menor cantidad de sericita y arcillas. La reducción en work index se explica por el mayor contenido de cuarzo y esto ocasiona que la recuperación aumente a 85.70% en la unidad LP QS.
3. **BLP.** La recuperación es baja por su alto work index. Dentro de las subunidades el factor que modifica la recuperación es la mineralogía de ganga (arcillas). En la BLP FRES FIL PTK, la recuperación es de 83.45%; en la BLP FRES FIL ARG, la recuperación disminuye a 83.19% debido al aumento de sericita y montmorillonita.
4. **Pórfido Blanco.** El tamaño de calcopirita es considerablemente menor ($<150\mu\text{m}$) que en el resto de unidades ($<250\mu\text{m}$) y la roca tiene alto contenido de arcillas (montmorillonita y caolinita), que tienden a formar coronas alrededor de la calcopirita lo que podría ocasionar que el Pórfido Blanco tenga una recuperación baja.

En la [figura 63](#) se presenta un resumen de las recuperaciones de las unidades litológicas de Cuajone, ordenadas de mayor a menor.

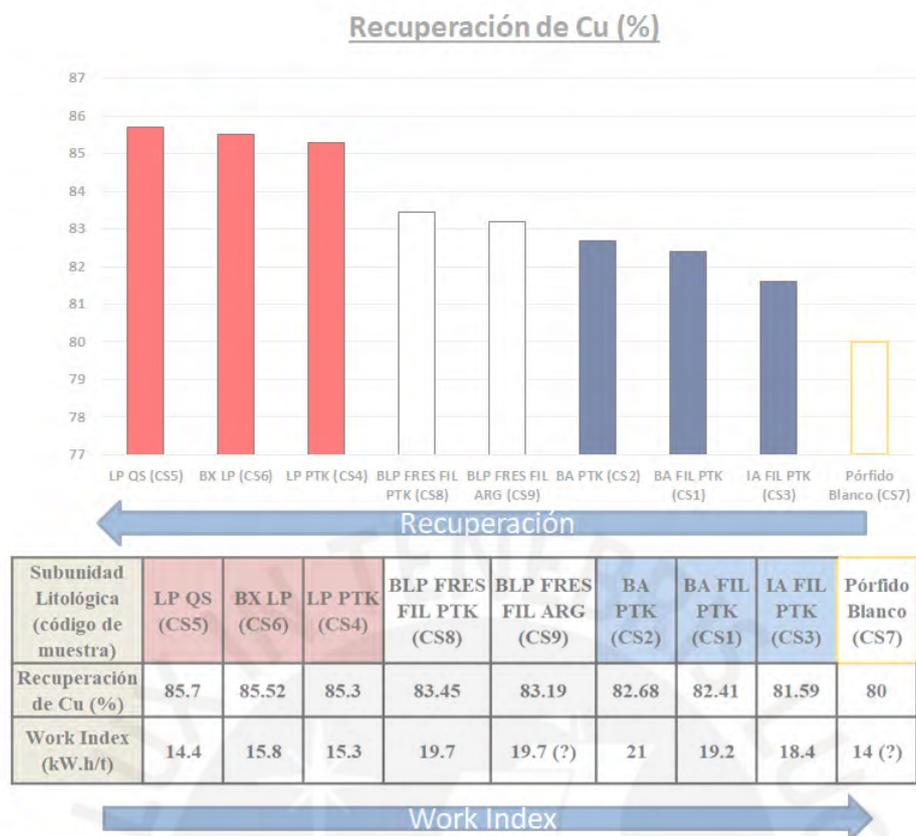


Figura 63: Resumen de las recuperaciones de las 3 unidades litológicas oficiales y el Porfido Blanco

6.2. Recomendaciones para mejorar la eficiencia de la metodología

Para futuros trabajos enfocados en la caracterización petromineralógica y textural en pórfidos de cobre-molibdeno se recomienda las siguientes mejoras a la metodología empleada en el presente trabajo:

1. En esta tesis se usaron 3 tipos de secciones para microscopía óptica: secciones delgadas (minerales formadores de roca y de alteración hidrotermal), pulidas (minerales opacos) y delgadas-pulidas (formadores de roca-alteración hidrotermal y opacos). Las 3 probaron ser muy útiles, sin embargo, dado que esta tesis se enfoca en la calcopirita y en sus intercrecimientos con minerales de ganga (opacos y transparentes), la secciones delgadas-pulidas probaron ser las más útiles ya que permiten hacer una mejor descripción de la relación entre ambos tipos de minerales.
2. La fluorescencia de rayos X demostró ser un método muy versátil ya que cuantifica los elementos mayores (Si, Al, Na, Ca, K) expresados como óxidos, elementos menores (Zr, Ti) y elementos de interés económico (Cu, Mo). Se recomienda contar con un equipo portable pXRF para obtener información preliminar y rápida en el campo. Se recomienda complementar con ICP-MS con disolución en 4 ácidos que otorga información más exacta y sobretodo ofrece concentraciones de un mayor número de elementos inmóviles que permiten realizar clasificaciones geoquímicas que son de vital importancia cuando las rocas han sido muy alteradas.
3. La difracción de rayos X, fue un buen complemento ya que brinda porcentajes de minerales ayudando en la estimación de porcentajes modales de la microscopía óptica (estimación de porcentajes visuales de minerales).
4. Se ratificó que el equipo Terraspec Hi Res 4, funciona adecuadamente en Cuajone, ya que tiene una buena correlación con la difracción de rayos X. El Terraspec es un equipo confiable y conveniente al ser un método más rápido y económico para identificar arcillas (montmorillonita y caolinita), permitiendo definir dominios ricos en arcillas y luego darle control cualitativo y cuantitativo con la difracción de rayos X. Al ser un equipo de campo se debe tener especial cuidado con su adecuada calibración y mantenimiento. También es una buena práctica darle un control de calidad periódico, a través del análisis de duplicados con difracción de rayos X. El Terraspec tiene la ventaja comparativa de ser rápido y de no requerir preparación de la muestra, identificar algunos minerales como la fengita (cuya detección es complicada a través difracción).

7. Conclusiones

1. A través de las técnicas ya mencionadas en la caracterización petrominerográfica y la correlación con los resultados de recuperación (Geología de Mina, 2019); se llevó a cabo un **análisis con enfoque geometalúrgico** en 9 muestras de las Unidades Litológicas mineralizadas (ubicadas en las zonas más representativas de cada unidad), enfocado en la combinación de: a) work index; b) mineralogía de mena y ganga; c) textura (intercrecimientos y tamaños) de mena y ganga y, d) ley de cobre. Este estudio piloto concluye, que los **3 factores que controlan las diferencias de recuperación en la mina**

Cuajone son:

- El work index es una consecuencia de la textura de los minerales formadores de roca y de alteración hidrotermal, que ocasiona la diferencia de recuperación entre las 4 diferentes unidades litológicas. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Oyarzun y Arévalo (2011), quienes vinculan textura de roca y Work Index en rocas de la mina El Teniente en Chile.
 - La abundancia de micas y arcillas es el factor que causa la diferencia de recuperación dentro cada unidad (misma litología- diferente alteración).
 - El tamaño del grano de la calcopirita es el factor que afecta negativamente al Pórfido Blanco, éste es más pequeño que el de las demás unidades (<150 μm en relación al promedio de <250 μm).
2. Basado en la información existente (Concha y Valle, 1999; Cánepa, 2012 y Simmons, 2013), la data recolectada por la sección de Geología de Mina (Geología de Mina, 2019), y las técnicas usadas en Cuajone (microscopía óptica y Terraspec Hi-Res 4) y las técnicas adicionales usadas para este estudio (Difracción de Rayos X y análisis geoquímico de elementos inmóviles) junto con un enfoque geometalúrgico en el análisis de las muestras, permitió decidir que es mejor no darle un nombre petrográfico a los 4 pórfidos de Cuajone, ya que al tener aproximadamente el 50% de la matriz alterada, la clasificación por mineralogía modal tendría mucha incertidumbre. Por ello, se decidió darles un **nombre geoquímico-textural**, que describe la composición geoquímica de la roca (elementos traza), textura, tono y abundancia de calcopirita. Dichas descripciones se encuentran en la sección 6.1.1 de la Discusión de resultados.

8. Recomendaciones

1. Referente a la **primera conclusión**, análisis con enfoque geometalúrgico. Se recomienda que la empresa realice un estudio similar a esta tesis con mayor número de muestras. En primer lugar, **enfocándose en pruebas grado de liberación con QEMSCAN y pruebas de flotación a mallas más finas que P80=208 µm** para tratar de **optimizar la correcta liberación de la partícula de calcopirita** y resolver el Factor 1 (liberación parcial por Work Index) y el Factor 3 (tamaño de grano de calcopirita). En segundo lugar, **caracterizar cuantitativa y cualitativamente** toda la data de **arcillas** con espectroscopía (TerraSpec) y DRX, y finalizar con pruebas piloto de flotación para **identificar el dispersante aniónico ideal** para cada ensamble de arcillas en las diferentes subunidades de la mina, optimizando el Factor 2 (abundancia de micas y arcillas). Se recomienda que se inicie por la unidad BA y el Pórfido Blanco (dos unidades críticas), lo que podría potencialmente aumentar las ganancias para la empresa.
2. En relación a la **segunda conclusión**, caracterización petrominerográfica de los 4 pórfidos de Cuajone.
 - Dado que **cada una unidad tiene una firma geoquímica** bien marcada se puede usar cualquiera de los gráficos presentados en esta tesis para ayudar en la clasificación de una muestra cuando esta ha sido muy alterada y es difícil diferenciar.
 - **Datar el Pórfido Blanco por U-Pb**, y también **datar molibdenita por Re-Os** (de preferencia de la unidad LP).
3. **Si se llega a dar el estudio geometalúrgico a gran escala**, de acuerdo a la información otorgada por las pruebas de QEMSCAN, pruebas piloto de flotación (a diversas mallas), dispersante aniónico y simulaciones, se podría llegar a la conclusión de ajustar el proceso de concentración a la medida de cada unidad litológica. Este nuevo proceso podría incluir: molienda más fina solo para las unidades BA (Alto work index) y Pórfido Blanco (Tamaño pequeño de calcopirita) y uso del dispersante aniónico adecuado en las subunidades más ricas en arcillas (IA-FIL-PTK). Estas modificaciones podrían permitir optimizar el cobre total obtenido y por ende obtener mayores ingresos para la empresa.

9. Bibliografía

- Alfaro, E. (2017). Conceptos básicos, Metalurgia Extractiva [diapositivas]. Lima: PUCP
- Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Villarreal, E., Paico, D., y Santisteban, A. (2011). Mapa Metalogenético del Perú 2009. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)
- Amstutz, G. C. (1961). Microscopy applied to mineral dressing. Quarterly of the Colorado School of Mines, v.56, pp. 445-481
- Baumgartner, R., Gomez, P. y Escobar, G. (2016). Comprehensive Mineralogical Characterization at the Cerro Corona Cu-Au Porphyry Mine - The Fundamental Key for Geometallurgical Applications: The third AUSIMM Geometallurgy Conference. Perth
- Bellido, E. (1979a). Geología del Cuadrángulo de Moquegua (hoja: 35-u): Lima, Peru, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 78 p.
- Bellido, E. (1979b). Mapa geológico del cuadrángulo de Moquegua (hoja: 35-u): Lima, Peru, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 78 p.
- Boekhout, F., Spikings, R., Sempere, T., Chiaradia, M., Ulianov, A. y Schaltegger, U. (2012). Mesozoic arc magmatism along the southern Peruvian margin during Gondwana breakup and dispersal. Lithos.
- Boekhout, F., Sempere, T., Spikings, R. y Schaltegger, U. (2013). Late Paleozoic to Jurassic chronostratigraphy of coastal southern Peru: Temporal evolution of sedimentation along an active margin. Journal of South American Earth Sciences
- Canchaya, S. y Cardozo, M. (1977). Clasificación de intercrecimientos minerales.
- Cánepa, C. (2012). Microscopía óptica (50 secciones pulidas y 50 secciones delgadas). Informe preparado para Southern Perú Copper Corporation como consultoría externa: Lima.
- Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M.P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile, in Moreno, T., and Gibbons, W., eds., The Geology of Chile: London, The Geological Society of London, p. 21–114.
- Clark, A.H., Tosdal, R.M., Farrar, E. y Plazolles V.,A. (1990). Geomorphologic environment and age of supergene enrichment of the Cuajone, Quellaveco, and Toquepala porphyry copper deposits, southeastern Peru: Economic Geology, v. 85, p. 1604–1628.
- Concha, O. y Bernabé, H. (1999). Geología y Génesis de Cuajone: Seminario de Metalogenia y Exploración de Yacimientos Polimetálicos
- Concha, O. y Valle, J. (1999). Prospección, Exploración y Desarrollo del yacimiento de Cuajone: ProExplo.
- Concha, O. (2017). Proceso Productivo del Cobre Mina Cuajone [diapositivas]. Cuajone: Southern Peru Copper Corporation
- Cropp, A., Goodall, W. y Bradshaw, D. (2013). The Influence of Textural Variation and Gangue Mineralogy on Recovery of Copper by Flotation from Porphyry Ore – A Review. The second AUSIMM Geometallurgy Conference. Brisbane.
- Dávila, M. (2016). Concentradora de Cuajone [diapositivas]. Moquegua: Southern Peru Copper Corporation
- Farías, M., Charrier, R., Comte, D., Martinod, J. y Hérial, G. (2005). Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from the depositional, tectonic, and geomorphic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19°30'S): Tectonics, v. 24, p. TC4001, doi: 10.1029/2004TC001667.
- Gagliuffi, P. y Vera, M. (2018). Caracterización Petromineralógica de los Yacimientos Toquepala y Cuajone. Boletín Serie B: Geología Económica N49. Ingemmet. Lima
- Geología de Mina Cuajone (2019). Informes internos e información preparada a solicitud: Southern Perú Copper Corporation.

Gustafson, L.B. y Hunt, J.P. (1975). The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile: *Economic Geology*, v. 70, p. 857–912.

Hallberg, J.A. (1984). A geochemical aid to igneous rock type identification in deeply weathered terrain. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 20, pp. 1-8

Harker A (1909). *The natural history of igneous rocks*. Macmillan, New York

Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A. y Mitchell, S.F. (2007). Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks using Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram. *Journal of Petrology*, v. 48, p. 2341-2357

Linnen, R.L. (1998). The solubility of Nb–Ta–Zr–Hf–W in granitic melts with Li and LiqF: constraints for mineralization in rare metal granites and pegmatites. *Econ. Geol.* 93, 1013–1025.

McDonough WF y Sun S-S (1995). The composition of the Earth. *Chem Geol* 120:223-253

Malghan, S. (1984). *Treatment Methods for Difficult to Float Copper Porphyry Ores*. SME: Littleton

Mamani, M., Wörner, G. y Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13_S to 18_S): tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin* 122, pp. 162-182.

Martínez, W. y Zuloaga, A. (2000a). Memoria explicativa de la Geología del Cuadrángulo de Moquegua (hoja: 35-u): Lima, Peru, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Martínez, W. y Zuloaga, A. (2000b). Mapa geológico del cuadrángulo de Moquegua (hoja: 35-u): Lima, Peru, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico

Martínez, W., Marchena, A., Otero, J., Cervantes, J. y León, W. (2017). Geología y controles Tectonomagmáticos de los Sistemas Porfiríticos en el Arco Magmático Occidental, Sur del Perú. Lima: INGEMMET.

Ministerio de Energía y Minas. (2016). Producción Minera 2016. LiMa Consulta: 16 de abril de 2017. http://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=1yidEstadistica=11299

Mukasa, S.B. (1986). Zircon U-Pb ages of super-units in the Coastal Batholith, Peru, *Geological Society of America Bulletin*, v. 97, p. 241-254.

Ocharán, G. (2017). Microscopía óptica (22 secciones pulidas y 22 secciones delgadas). Informe preparado para Southern Perú Copper Corporation como consultoría externa: Lima

Oyarzún, M. y Arévalo, A. (2011). Rock Texture and BWi Relationships, El Teniente Ore Deposit, Chile. The First Ausimm International Geometallurgy Conference. Brisbane

Pardo-Casas, F. y Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time: *Tectonics*, v. 6, p. 233–248, doi:10.1029/TC006i003p00233.

Park, G. (1998). Petrographic and Lithochemical Alteration Study of the Cuajone and Toquepala Porphyry Copper Deposits, Peru: Internal Report Southern Peru Copper Corporation

Pearce, J.A. (1996). A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D. A. (ed.) *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, 79 to 113.

Pitcher, W.S., Atherton, M.P., Cobbing, E.J. y Beckinsale, R.D. (1985). Magmatism at the Plate Edge, The Peruvian Andes, Blackie, John Wiley and Sons, Glasgow, p. 328.

Salcedo, C. (2017). Contribución a la Caracterización Petromineralográfica-Textural y su posible influencia en el Work index y Recuperación Metalúrgica de las 4 Unidades Litológicas Mineralizadas del Pórfido de Cobre Cuajone, Sur del Perú. – GEM 309. Trabajo de Tesis 2. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú

Seaman, D., Lauten, R., Kluck, G. y Stoitis, N. (2012). Usage of anionic dispersants to reduce the impact of clay particles in flotation of copper and gold at the Telfer Mine, in Proceedings 11th AusIMM Mill Operators Conference, pp 207-214. (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.)

Sempere, T., Noury, M., Garcia, F. y Bernet, M. (2014). Elementos para una actualización de la Estratigrafía del Grupo Moquegua, sur del Perú. XVII Congreso Peruano de Geología. Lima

SGS (2019). Exploration services: Geometallurgy. Consulta: 8 de enero de 2019.

<https://www.sgs.com/en/mining/exploration-services/geometallurgy>

Simmons, A. (2013). Magmatic and Hydrothermal Stratigraphy of Paleocene and Eocene Porphyry Cu-Mo Deposits in Southern Peru: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy with mention in Geological Sciences. Vancouver: The University of British Columbia.

Simmons, A., Tosdal, R., Wooden, J., Mattos, R., Concha, O., Mccracken, S. y Beale, T. (2013). Punctuated Magmatism Associated with Porphyry Cu-Mo Formation in the Paleocene to Eocene of Southern Peru: *Economic Geology*, v. 108, pp. 625–639

Somoza, R. (1998). Updated Nazca (Farallon)–South America relative motions during the last 40 My: Implications for the mountain building in the Central Andean region: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, p. 211–215, doi: 10.1016/S0895-9811(98)00012-1.

Stamboliadis, E., Emmanouilidis, S. y Petrakis, E. (2005). A New Approach to the Calculation of Work index and the Potential Energy of a Particulate Material, *Geomaterials*, Vol. 1 No. 2, 2011, pp. 28-32. doi: 10.4236/gm.2011.12005.

Tosdal, R. M., Farrar, E., y Clark, A. H. (1981). K-Ar geochronology of the late Cenozoic volcanic rocks of the Cordillera Occidental, southernmost Peru: *Jour. Volcanology Geotherm. Research*, v. 10, p. 157-173.

Tosdal, R.M., Clark, A.H., y Farrar, E. (1984). Cenozoic polyphase landscape and tectonic evolution of the Cordilleran Occidental, southernmost Peru, *Geological Society of America Bulletin*, v. 95, p. 1318-1332.

Vallance, J. (2016). Texturas de rocas metamórficas - MIN312, Microscopía de Minerales, Rocas y Concentrados [diapositivas]. Lima: PUCP

Vallance, J. (2017). Yacimientos de tipo pórfidos de Cu-(Mo-Au) - GEM289, Geología de Minas [diapositivas]. Lima: PUCP

Warren I., Simmons S. F., y Mauk J. L., (2007). Whole-Rock Geochemical Techniques for Evaluating Hydrothermal Alteration, Mass Changes, and Compositional Gradients Associated with Epithermal Au-Ag Mineralization, *Economic Geology*, v.102, pp.923-948, 2007

Winchester J.A. y Floyd P.A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343

Wörner, G., Hammerschmidt, K., Henjes-Kunst, F., Lezaun, J. y Wilke, H. (2000). Geochronology (40Ar-39Ar-, K-Ar-, and He-exposure-) ages of Cenozoic magmatic rocks from northern Chile (18°–22°S). Implications for magmatism and tectonic evolution of the Central Andes: *Revista Geologica Chile*, v. 27, p. 205–240.

Como citar esta tesis:

Salcedo, C.A. (2021). Contribución a la Caracterización Petrominerográfica-Textural-Geoquímica y su posible influencia en el Work Índice y Recuperación Metalúrgica de las Unidades Litológicas Mineralizadas del Pórfido de Cobre Cuajone, Sur del Perú. Tesis para optar el título de Ingeniero Geólogo-Bachelor of Engineering (Hons). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú - Facultad de Ingeniería.

10. Anexos

10.1. Definiciones e información complementaria

1. Escala de abundancias relativas para descripciones microscópicas (respecto a toda la sección)

- Muy abundante: más de 40 %
- Abundante: 20-40%
- Escaso: 10-20 %
- Muy escaso: 1-10%
- Trazas: menos de 1%

2. Reservas de la Mina Cuajone

La [tabla 11](#) presenta las reservas de la Mina Cuajone, clasificadas por tipo de litología. Cada litología es definida por seis parámetros esenciales que son:

- CU1: Concentración de cobre en porcentaje
- MO1: Concentración de molibdeno en porcentaje
- AG1: Concentración de plata en gramos entre tonelada métrica
- CUSA1: Concentración de cobre soluble en ácido en porcentaje
- CUSC1: Concentración de cobre soluble en cianuro en porcentaje
- GE1: Gravedad específica en gramos entre centímetro cúbico.

Las unidades litológicas con mayor cantidad de reservas son por orden decreciente: la Andesita Basáltica (BA), la Latita Porfírica (LP), Latita Porfírica 2 (BLP), en este cuadro no aparece el Pórfido Blanco debido a que no es una unidad oficial y hacen falta más datos para poder estimar sus reservas

Tabla 11: Reservas con ley de corte de 0.204% en Cu. Las abreviaturas y su correspondiente explicación se presentan líneas arriba. (Geología de Mina Cuajone, 2019).

Reservas con ley de corte de 0.204								
CODIGO DE MINA	ROCA	ORE (kt)	CU1 (%)	MO1 (%)	AG1 (g/t)	CUSA1 (%)	CUSC1 (%)	GE1 (g/cm3)
66	IA	229266	0.6217	0.0158	0.1314	0.0183	0.0463	2.6943
67	LP	669737	0.5132	0.0249	0.1143	0.015	0.0619	2.6458
68	BLP	144179	0.2996	0.014	0.1093	0.0135	0.0399	2.67
69	RP	11097	0.3723	0.0107	0.1033	0.0309	0.1076	2.6471
70	BA	786949	0.4973	0.0143	0.1302	0.0169	0.0389	2.7036
75	BX IA	2156	0.6651	0.0283	0.1369	0.0218	0.052	2.68
76	Bx BLP	10246	0.4489	0.0207	0.1153	0.0159	0.0706	2.6384
77	Bx LP	29451	0.5722	0.0221	0.1254	0.0183	0.0725	2.6598
SUMMARY		1,883,081	0.503	0.018	0.123	0.016	0.049	2.678

3. Calculo de ingresos por variación en la recuperación de la BA PTK

Tabla 12: Cálculos de como varían los ingresos de la mina, de acuerdo a la variación de la recuperación metalúrgica

Unidad	Produccion dia (TM/d)	Ley Cu Modelo(%)	Recuperacion (%)	Cu total (TM/d)	Cu total (TM/año)	Precio Cu, promedio 5 años (USD/TM)	Ingreso Bruto en 1 año (USD)
BA PTK/MZDIO PTK	40,000.00	0.4973	82.68	164.47	60,030.48	5,904.00	354,419,927.00
BA PTK/MZDIO PTK	40,000.00	0.4973	83.68	166.46	60,756.53	5,904.00	358,706,573.43
Diferencia de 1% en Recuperacion (USD)							4,286,646.43

4. Abreviaturas usadas en los datos que otorga el equipo Terraspec de análisis de arcillas

A continuación, se nombra las: **Ank**, Ankerita; **Asp**, Minerales sin espectro en los rangos SWIR y VNIR; **Bt**, Biotita; **Cal**, Calcita; **Chl**, Clorita; **Kln**, Caolinita; **Mnt**, Montmorillonita; **Ms**, Muscovita; **MsI**, Muscovita illítica; **Pg**, Paragonita; **Ph**, Fengita; **PhI**, Fengita illítica; **Sd**, Siderita.

5. Escala de tamaños de grano de minerales en milímetros

De 0.01 a 0.1, muy fino; de 0.1 a 1, fino; de 1 a 4, medio; de 4 a 16, muy grueso.

10.2. Resultados geoquímica

Se presentan concentraciones para los elementos mayores obtenidos a través del método de análisis ICP-AES con fusión en metaborato de litio (ME-ICP06, ALS LIMA) y para elementos traza, usando ICP-MS para 48 elementos con disolución en 4 ácidos. Estas tablas son un complemento a las descripciones de la sección “5. Resultados”.

Tabla 13: Concentración de elementos mayores como porcentaje en óxidos y de elementos traza en partes por millón.

	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	CS7	CS8	CS9
Elementos mayores (wt%)								
SiO ₂	57.9	62.4	56.3	68.3	70.3	75	64.5	61.5
TiO ₂	0.89	0.8	0.9	0.31	0.27	0.11	0.29	0.31
Al ₂ O ₃	17.5	16.95	17.65	16	13.85	12.4	15.1	14.65
Fe ₂ O ₃	7.11	5.6	6.13	2.97	2.99	2.21	7.63	8.98
MnO	0.19	0.05	0.17	0.16	0.04	0.03	0.03	0.07
MgO	3.06	2.47	3.21	0.9	0.9	0.25	0.81	1.15
CaO	4.83	2.55	2.7	2.69	0.97	1.2	0.6	1.08
Na ₂ O	3.01	3.13	1.75	3.33	0.87	2.06	0.8	1
K ₂ O	1.42	3.99	3.97	2.86	5.09	5.4	3.95	3.58
P ₂ O ₅	0.31	0.28	0.3	0.12	0.1	0.03	0.1	0.13
ZrO ₂	0.0186	0.0197	0.0198	0.0088	0.007	0.0171	0.0118	0.0102
Elementos trazas (ppm)								
Au	0.012	0.015	0.01	0.006	0.008	0.007	<LD	0.005
Ag	2.12	1.16	2.51	0.72	2.6	1.71	0.76	1.17
As	25.5	3.4	39.4	1.6	4.1	9.8	3.4	6.1
Ba	210	1110	690	1580	870	730	400	330
Be	1.74	2.01	2.33	1.27	1.33	1.52	0.79	1.01
Bi	1.13	0.16	0.96	0.35	0.39	0.83	1.08	1.38
Cd	0.47	0.1	0.35	0.18	0.5	0.31	0.18	0.14
Ce	49.8	48.5	43.9	25.5	17.45	60.5	26.1	28.6
Co	16.2	21.2	23.7	9.4	15.4	4.8	27.4	33.1
Cr	115	84	7	97	9	8	5	6
Cs	1.93	2.85	8.38	4.1	2.02	1.85	2.1	2.8

Cu	3510	4420	5740	1370	5440	3570	1050	1580
Ga	18.3	15.9	17.1	17.2	13.9	13.3	23	19.7
Ge	0.15	0.14	0.14	0.09	0.27	0.1	0.17	0.14
Hf	0.8	1.1	1.2	0.4	0.2	2.5	0.9	0.7
In	0.325	0.059	0.103	0.034	0.148	0.156	0.103	0.119
La	24.7	24	20.5	13.7	8.8	33.5	13.6	15.5
Li	15.5	14.8	21.9	8.1	6.5	2.2	6.3	8.3
Mo	16.75	144.5	306	11.7	714	113.5	4.26	16
Nb	6.5	4.4	4.5	2.6	1.7	4.9	2.6	2.4
Ni	17.2	11.5	7.4	9	4.5	5.1	2.6	3.7
Pb	21.9	24	15.5	11.3	15.9	68.5	4	11.6
Rb	44.2	108.5	123.5	78.9	131.5	110	131	121.5
Re	0.013	0.088	0.076	0.002	0.134	0.045	0.002	0.01
S	1.24	1.53	2.89	1.22	1.77	1.62	5.01	6.21
Sb	0.83	0.83	1.98	0.45	0.28	0.36	1.21	7.04
Sc	16.7	15.1	17.5	4.8	5.3	5.5	6.8	5.4
Se	1	2	3	1	4	1	2	2
Sn	2.4	3	3.5	1.4	4.7	1.4	9.7	6.9
Sr	535	467	293	514	161.5	164.5	67.1	93.1
Ta	0.42	0.32	0.33	0.17	0.14	0.42	0.16	0.16
Te	0.32	0.07	0.14	<0.05	0.32	0.1	<0.05	0.09
Th	5.75	7.9	6.81	2.12	1.68	18.4	2.38	2.65
Tl	0.38	0.65	0.92	0.46	0.59	0.61	0.63	0.66
U	1.2	1.5	1.7	0.7	0.8	5.3	1.7	1.4
V	149	119	152	37	32	17	44	37
W	4.7	6.9	11.6	7.9	30	3.4	20.4	17.4
Y	15.2	15.7	15.4	4.9	4.5	8.7	4.1	4.8
Zn	150	37	101	67	40	78	32	51

10.3. Clasificación de intercrecimientos minerales de Canchaya y Cardozo (1977), basado en Amstutz (1961)

