

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Metalogénesis en minerales opacos de
un yacimiento de Cerro de Pasco**

Danilo Alexis Cardenas Meza
Julhino Huincho Cahuana

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Nelida Tantavilca Martinez
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 5 de Marzo de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

METALOGÉNESIS EN MINERALES OPACOS DE UN YACIMIENTO DE CERRO DE PASCO

Autores:

1. Danilo Alexis Cardenas Meza – EAP. Ingeniería de Minas
2. Julhino Huincho Cahuana – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18% de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi luz y guía en cada paso de este camino. A mi familia, por su amor, apoyo y sacrificios incondicionales. Y a mis docentes, por su dedicación, conocimiento y ejemplo, que me motivaron a alcanzar este logro.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| ÍNDICE | 2 |
| RESUMEN | 6 |
| INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO | 9 |
| 1.1. Planteamiento y formulación del problema | 9 |
| 1.1.1. Problema general..... | 9 |
| 1.1.2. Problemas específicos..... | 10 |
| 1.2. Objetivos..... | 10 |
| 1.2.1. Objetivos generales | 10 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 10 |
| 1.3. Justificación e importancia..... | 11 |
| CAPÍTULO II | 12 |
| MARCO TEÓRICO | 12 |
| 2.1. Antecedentes del problema | 12 |
| 2.1.1. Antecedentes locales..... | 12 |
| 2.1.2. Antecedentes nacionales | 14 |
| 2.1.3. Antecedentes internacionales..... | 16 |
| 2.2. Bases teóricas | 17 |
| Refracción y reflexión..... | 18 |
| Minerales opacos..... | 19 |
| Yacimiento de Cerro de Pasco | 19 |
| Metalogénesis | 20 |
| CAPÍTULO III | 23 |
| HIPÓTESIS Y VARIABLES | 23 |
| 3.1. Hipótesis de la investigación..... | 23 |
| 3.2. Hipótesis general..... | 23 |
| 3.3. Hipótesis específicas | 23 |
| 3.4. Identificación de variables | 23 |
| 3.5. Variables independientes | 23 |
| 3.6. Variables dependientes | 24 |
| 3.7. Operacionalización de variables | 24 |
| CAPÍTULO IV | 27 |
| METODOLOGÍA | 27 |
| 4.1. Enfoque de investigación..... | 27 |
| 4.2. Tipo de investigación | 27 |
| 4.3. Nivel de investigación | 27 |
| 4.4. Diseño de investigación..... | 27 |
| 4.5. Métodos de investigación..... | 27 |
| 4.6. Población y muestra | 27 |
| 4.6.1. Población..... | 27 |
| 4.6.2. Muestra | 27 |
| 4.7. Unidad de análisis | 28 |
| 4.8. Tamaño de muestra | 28 |

| | |
|--|-----------|
| 4.9. Técnicas e instrumentación de recolección de datos..... | 28 |
| CAPÍTULO V..... | 29 |
| Distribucion volumétrica porcentual | 40 |
| PARAGENESIS..... | 41 |
| FOTOMICROGRAFIAS..... | 41 |
| DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA PORCENTUAL..... | 44 |
| FOTOMICROGRAFÍAS..... | 45 |
| CAPÍTULO VI..... | 51 |
| DISCUSIONES DE RESULTADOS..... | 51 |
| CONCLUSIONES..... | 53 |
| RECOMENDACIONES..... | 55 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICO..... | 60 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Métodos para obtener luz linealmente polarizada..... | 17 |
| Figura 2. Rayo incidente (Ri), reflejado (RI) y refractado (Rr) y sus respectivos ángulos con la normal..... | 17 |
| Figura 3. Mapa geológico del cuadrángulo de cerro de pasco..... | 27 |
| Figura 4. Unidades litoestratigraficas..... | 29 |
| Figura 5. Cristales anhedrales de pirita (py) y de rutilo (rt), están algo aglomerados en un sector de la muestra, aparentemente en la zona de mayor alteración de la roca. 200X..... | 39 |
| Figura 6. Cristales euhedrales, subhedrales y anhedrales de pirita (py), están diseminadas en las gangas (GGs). 200X..... | 39 |
| Figura 7. Cristales lamelares de molibdenita (mb) están algo concentrados en un sector de la ganga (GGs) con mayor alteración. 200X..... | 40 |
| Figura 8. Cristal subhedral de pirita (py) mostrando intenso reemplazamiento hacia el rutilo ... | 40 |
| Figura 9. Cristal anhedral de bornita (bn) ha reemplazado intensamente a la pirita (py), consecuencia de ellos se observan remanentes de este mineral dentro de la bornita | 41 |
| Figura 10. Cristales anhedrales de pirita (py) están diseminadas en las gangas (GGs)..... | 43 |
| Figura 11. Cristales anhedrales de calcopirita (cp) algo concentrados, | 43 |
| Figura 12. Cristales anhedrales de rutilo (rt) con hábito algo acicular, están ubicados en la zona que rodean a las gangas (GGs) integrantes de los microclastos de la microbrecha. 200X. | 44 |
| Figura 13. Cristales aciculares de rutilo (rt) están ubicados en los clivajes de los microclastos que integran la roca, posiblemente pizarras. 200X..... | 44 |
| Figura 14. Cristales subhedrales y anhedrales de pirita (py) están diseminados en las gangas (GG)..... | 45 |
| Figura 15. Cristal anhedral de calcopirita (cp) está diseminada y ubicada en la zona de mayor alteración de la ganga (GGs). 200X. | 45 |
| Figura 16. Cristales anhedrales de calcopirita (cp) y de rutilo (rt) están dentro del sector que engloban a los microclastos de brecha, es decir, la matriz. 200X..... | 46 |
| Figura 17. Cristales anhedrales de calcopirita (cp) dentro de la zona de mayor alteración de las gangas (GGs)..... | 46 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla. 1. Operacionalizacion de las variables | 23 |
| Tabla. 2 Distribución volumétrica porcentual, muestra 1 | 38 |
| Tabla. 3 Distribución volumétrica porcentual, muestra 2 | 42 |

RESUMEN

El trabajo se centra en caracterizar los procesos geológicos, geoquímicos y físico-químicos que controlan la formación y evolución de minerales opacos en el yacimiento de Cerro de Pasco, con el objetivo de optimizar su explotación de manera eficiente y sostenible. El estudio adoptó un enfoque cualitativo y descriptivo. Se realizaron análisis petrográficos mediante microscopía óptica para identificar y caracterizar minerales en muestras recolectadas del yacimiento. Las técnicas incluyeron observaciones estructurales, fotomicrografías y evaluaciones de distribución volumétrica de los minerales. Además, se analizó la relación de los minerales con las estructuras geológicas y los procesos hidrotermales responsables de su génesis. Los minerales opacos identificados incluyen pirita, calcopirita, bornita, molibdenita y rutilo. La pirita es el mineral dominante, con evidencias de reemplazo por calcopirita y bornita, lo que refleja un sistema hidrotermal policíclico. Se observaron texturas de reemplazo, relleno de espacios vacíos y diseminación, que indican condiciones fluctuantes en el sistema hidrotermal. La secuencia paragenética incluye etapas iniciales de formación de rutilo, seguidas de sulfuros como pirita y calcopirita. Los fluidos hidrotermales y las estructuras tectónicas desempeñaron un papel crucial en la concentración y distribución de minerales. La actividad minera en la región genera desafíos ambientales relacionados con la movilización de metales pesados por procesos biológicos y químicos. La comprensión detallada de los procesos metalogénicos en Cerro de Pasco permite proponer estrategias para una explotación minera más eficiente y sostenible. La información obtenida podrá ser utilizada para optimizar procesos metalúrgicos, reducir costos y mitigar impactos ambientales. Palabras clave: Metalogénesis, minerales opacos, pirita, calcopirita, Cerro de Pasco, hidrotermal, paragénesis, impacto ambiental.

Palabras claves: Metalogenesis, Mineral Opaco, Yacimiento Mineral, Analisis Geologico, Estudio de secciones

ABSTRACT

The work focuses on characterizing the geological, geochemical, and physicochemical processes that control the formation and evolution of opaque minerals in the Cerro de Pasco deposit, with the objective of optimizing its exploitation in an efficient and sustainable manner. The study adopted a qualitative and descriptive approach. Petrographic analyses were performed using optical microscopy to identify and characterize minerals in samples collected from the deposit. The techniques included structural observations, photomicrographs, and volumetric distribution evaluations of the minerals. Additionally, the relationship of the minerals with geological structures and hydrothermal processes responsible for their genesis was analyzed. The identified opaque minerals include pyrite, chalcopyrite, bornite, molybdenite, and rutile. Pyrite is the dominant mineral, with evidence of replacement by chalcopyrite and bornite, reflecting a polycyclic hydrothermal system. Replacement textures, void filling, and dissemination were observed, indicating fluctuating conditions in the hydrothermal system. The paragenetic sequence includes initial stages of rutile formation, followed by sulfides such as pyrite and chalcopyrite. Hydrothermal fluids and tectonic structures played a crucial role in the concentration and distribution of minerals. Mining activity in the region generates environmental challenges related to the mobilization of heavy metals through biological and chemical processes. A detailed understanding of the metallogenic processes in Cerro de Pasco allows for the proposal of strategies for more efficient and sustainable mining exploitation. The information obtained can be used to optimize metallurgical processes, reduce costs, and mitigate environmental impacts.

Keywords: Metallogenesis, Opaque Minerals, Mineral Deposit, Geological Analysis, Section Study.

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, los depósitos polimetálicos han sido fundamentales para el desarrollo de la industria minera debido a su alto contenido de metales como plomo, zinc, cobre, molibdeno y plata. Estas concentraciones minerales se encuentran generalmente asociadas a procesos hidrotermales y a intrusiones ígneas, y son explotadas por su gran valor económico y su aplicación en diversas industrias, desde la fabricación de aleaciones hasta la electrónica y tecnología de punta. Regiones como los Cinturones Metalogénicos de los Andes, los Apalaches en Norteamérica y los sistemas hidrotermales de Europa del este han demostrado ser fuentes importantes de estos recursos, sosteniendo economías locales y globales.

En el contexto nacional, el Perú es reconocido como uno de los principales países productores de minerales en el mundo, ocupando posiciones de liderazgo en la producción de plata, zinc, plomo y cobre. La riqueza geológica del país, especialmente en la sierra central, ha dado lugar a importantes regiones mineras como Pasco, Junín y La Libertad. Estos depósitos polimetálicos han impulsado significativamente la economía peruana y han favorecido el desarrollo de infraestructura y tecnologías mineras avanzadas. Sin embargo, también han generado desafíos ambientales y sociales que requieren soluciones sostenibles.

A nivel local, el yacimiento de Cerro de Pasco representa uno de los depósitos polimetálicos más importantes y emblemáticos del Perú. Su explotación histórica ha contribuido al desarrollo de la región y del país, pero al mismo tiempo ha generado impactos ambientales considerables. El estudio de la metalogénesis en los minerales opacos presentes en este yacimiento no solo permite comprender los procesos de formación de estos recursos, sino también optimizar su explotación y mitigar sus impactos. Esta investigación busca aportar conocimientos valiosos para la industria minera y las comunidades locales, fortaleciendo la base científica para futuras exploraciones y prácticas responsables.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

El estudio de la metalogénesis en minerales opacos es fundamental para comprender los procesos de formación y distribución de yacimientos minerales y mejorar su aprovechamiento. A nivel internacional, investigaciones en regiones como los Montes Urales y el cinturón de rocas verdes de Canadá han permitido identificar patrones de mineralización en sulfuros como galena, esfalerita y calcopirita. Sin embargo, en Perú, a pesar de la existencia de importantes yacimientos como Antamina y Toquepala, la comprensión de la génesis y evolución de los minerales opacos sigue siendo limitada, lo que afecta la eficiencia en los procesos de extracción y procesamiento.

Los yacimientos en Cerro de Pasco, son una de las zonas mineras más importantes del país, presenta una mineralización compleja dominada por galena, esfalerita y argentita en un entorno hidrotermal. A pesar de su relevancia económica e histórica, existen vacíos de conocimiento sobre los procesos formativos de estos minerales y su distribución espacial. Esta falta de información dificulta la optimización de los métodos de extracción y tratamiento metalúrgico, afectando la rentabilidad y aumentando el impacto ambiental de las operaciones.

Por ello, es necesario profundizar en la investigación de la metalogénesis en minerales opacos de Cerro de Pasco. Caracterizar los procesos que dieron origen a estos minerales permitirá mejorar las estrategias de explotación y procesamiento, optimizar costos y reducir el impacto ambiental. Esta investigación contribuirá a una explotación más eficiente y sostenible en una región que históricamente ha sido afectada por actividades mineras.

1.1.1. Problema general

¿Cómo se pueden caracterizar de manera integral los procesos geológicos, geoquímicos y físico-químicos que controlan la formación y evolución de los minerales opacos en el yacimiento de Cerro de Pasco para optimizar su aprovechamiento de manera eficiente y sostenible?

1.1.2. Problemas específicos

- a) ¿Qué relaciones existen entre las estructuras geológicas y las mineralizaciones presentes en los depósitos opacos del yacimiento de Cerro de Pasco?
- b) ¿Cuáles son las fuentes magmáticas y los procesos hidrotermales responsables de la génesis de los minerales opacos en la región?
- c) ¿Cuál es la secuencia paragenética que describe la formación temporal y espacial de los minerales opacos en el yacimiento?
- d) ¿Qué condiciones físico-químicas controlan la precipitación de sulfuros y óxidos de hierro en el yacimiento de Cerro de Pasco?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

- a) Caracterizar integralmente los procesos geológicos, geoquímicos y físico-químicos responsables de la formación y evolución de los minerales opacos en el yacimiento de Cerro de Pasco, con el fin de optimizar su exploración, explotación y manejo sostenible.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Analizar las relaciones entre las estructuras geológicas y las mineralizaciones presentes en los depósitos de minerales opacos del yacimiento de Cerro de Pasco.
- b) Identificar las fuentes magmáticas y los procesos hidrotermales que contribuyeron a la génesis de los minerales opacos en la región.
- c) Establecer una secuencia paragenética detallada que describa el orden temporal y espacial de formación de los minerales opacos en el yacimiento.
- d) Determinar las condiciones físico-químicas, como temperatura, presión y composición de

fluidos, que controlaron la precipitación de sulfuros y óxidos de hierro en el yacimiento.

1.3. Justificación e importancia

El estudio de los procesos geológicos, geoquímicos y físico-químicos que controlan la formación y evolución de los minerales opacos en el yacimiento de Cerro de Pasco representa una contribución significativa tanto al ámbito académico como al sector minero. Este trabajo busca llenar vacíos críticos de conocimiento al proporcionar una caracterización integral de los factores que originan y controlan la mineralización de estos depósitos. La importancia de este enfoque radica en que los minerales opacos constituyen una fuente valiosa de metales de interés económico, cuya comprensión permite diseñar estrategias más eficientes para su exploración y explotación.

Además, el análisis detallado de las relaciones entre estructuras geológicas y mineralización, así como la identificación de las fuentes magmáticas y procesos hidrotermales involucrados, puede ofrecer información clave para predecir la ubicación de nuevos recursos minerales en la región. Establecer la secuencia paragenética y determinar las condiciones físico-químicas de formación no solo fortalece el entendimiento científico de la génesis mineral, sino que también puede tener aplicaciones directas en la optimización de procesos metalúrgicos, reduciendo costos y aumentando la eficiencia en la recuperación de metales.

Este trabajo también tiene un impacto potencial en la sostenibilidad ambiental de la minería. Al comprender los procesos que dan origen a las mineralizaciones, es posible desarrollar prácticas de extracción que minimicen el impacto ecológico, favoreciendo la conservación del medio ambiente. Además, los resultados obtenidos pueden servir como base para futuros estudios relacionados con la geología y metalogénesis en yacimientos similares, consolidando así el conocimiento sobre los recursos minerales del país y fomentando la formación de especialistas en este campo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes locales

Según Solis Luciano (2020), en el trabajo *"Estructuras de mineralización del yacimiento minero de Atacocha – Cerro de Pasco"* tuvo como objetivo determinar las diferentes estructuras de mineralización en el yacimiento minero de Atacocha mediante la evaluación geológica. Este análisis se basó en principios geológicos, observaciones de campo y datos analíticos, así como en conceptos químicos relacionados con la distribución y dispersión de los elementos en los componentes de la Tierra. El estudio aplicó un enfoque descriptivo con métodos de observación directa en campo. Se recopiló datos geológicos y se realizaron análisis químicos para identificar las estructuras de mineralización. La metodología incluyó estudios litológicos y estructurales en diferentes sectores del yacimiento, complementados por la revisión de datos históricos y recursos conocidos. Los resultados indicaron que el yacimiento de Atacocha se encuentra en el distrito de Yarusyacan, Pasco, Perú, entre los 3,900 y 4,400 m.s.n.m., en un distrito minero importante, donde los aspectos litológicos y estructurales son cruciales. El potencial geológico del área varía entre la superficie y la profundidad, y cada sector presenta características diferenciadas. En las conclusiones se destaca que el yacimiento de Atacocha presenta diversas estructuras de mineralización, entre las que se encuentran cuerpos de contacto (skarn), rellenos de fracturas (vetas) en rocas intrusivas y calizas, vetas asociadas al eje del anticlinal dentro del corredor estructural y brechas hidrotermales. Este potencial geológico sugiere la posibilidad de nuevos recursos adicionales a los ya conocidos, dependiendo de cada sector del yacimiento. (1)

Cotrina (2019), en su tesis "Caracterización de la geoquímica magmática y su relación con la mineralización de Cu – Au (10°38' – 10°48' Latitud Sur), Cerro de Pasco", plantearon como objetivo clarificar la evolución magmática y volcánica en la región de Cerro de Pasco, con el propósito de relacionarla con la mineralización de cobre y oro, además de orientar estrategias de prospección geo-económica. La metodología empleada fue descriptiva y exploratoria, utilizando técnicas de análisis geoquímico, caracterización litológica y estudios estructurales, en concordancia con el enfoque de Hernández y Sampieri. El autor se centró en identificar las características químicas y estructurales de las rocas andesíticas presentes, típicas de la Cordillera Occidental de los Andes, y en determinar la influencia de estructuras sub-volcánicas en la mineralización. Los resultados revelaron la existencia de depósitos de tipo epitermal de alta sulfuración y mineralización con tendencia a sistemas tipo pórfido Cu-Au, lo que destaca la importancia de los procesos magmáticos y tectónicos en la formación de estos depósitos. Este trabajo es relevante como base comparativa para analizar la influencia de procesos geológicos y geoquímicos en yacimientos como Cerro de Pasco, especialmente en la caracterización de minerales opacos. (2)

Quispe Cárdenas, Christian Patrick (2020), en su tesis "Geología, geoquímica y mineralogía del yacimiento portador de indio de Ayawilca, Pasco, Perú", planteó como objetivo caracterizar mineralógicamente el yacimiento de Ayawilca, ubicado en la región de Pasco, y establecer espacial y temporalmente los contenidos de indio (In) presentes en sus recursos minerales. La investigación utilizó un enfoque descriptivo y exploratorio según el modelo de Hernández y Sampieri, aplicando técnicas de análisis mineralógico, geoquímico y paragenético. El autor analizó dos estilos de mineralización predominantes: vetas, distribuidas en dos dominios (NO y NE), y mantos. Los resultados indicaron un contenido total de 983 toneladas de indio con una ley de 84 ppm, distribuido en tres estadios paragenéticos. El estadio A incluyó la cristalización de minerales como cuarzo, pirrotina, casiterita, esfalerita rica en Fe y calcopirita. En el estadio B se observó la cristalización de pirita y marcasita, mientras que el estadio C estuvo marcado por la formación de carbonatos y sulfosales de plata, asociados a una alteración de caolinita-dickita. Este trabajo contribuye significativamente a la comprensión de los procesos mineralogénicos en la región, sirviendo como un modelo para estudios relacionados con la secuencia paragenética y las condiciones de formación en yacimientos cercanos, como Cerro de Pasco, con énfasis en los minerales opacos y sus implicancias económicas. (3)

2.1.2. Antecedentes nacionales

Según Jorge Acosta Ale y Thierry Sempere (2017), en su trabajo de investigación "Evolución tectónica y metalogénesis del Perú", consideró como objetivo interconectar la

historia geológica del Perú con los conocimientos de la metalogénesis para hacer que la exploración minera sea más eficiente. La metodología, según Hernández y Sampieri, consistió en una investigación documental basada en el análisis de datos geológicos y metalogenéticos disponibles, con énfasis en la recopilación y análisis de dataciones U-Pb en circón, además de la revisión de antecedentes históricos sobre la evolución tectónica del Perú. Los resultados permitieron reconstruir la evolución geológica y tectónica del Perú con base en investigaciones en curso y el análisis de los datos metalogenéticos. Se destacó la relación entre el magmatismo y la formación de depósitos minerales, vinculados a fenómenos magmáticos ocurridos en un arco de subducción. También se identificó un hito importante en la evolución proterozoica, donde se interpretaron colisiones entre los bloques continentales Laurentia, Amazonía y Arequipa-Antofalla (posiblemente parte del bloque Kalahari) entre ~1.2 y ~1.0 Ga. Se concluyó que la evolución tectónica y geológica del Perú puede ser reconstruida gracias al progreso en la investigación y la disponibilidad de nuevas dataciones geocronológicas, resaltando la importancia del magmatismo en la formación de depósitos minerales y el papel de los procesos tectónicos de colisión entre bloques continentales. (4)

Casaverde Mercado, Jorge Edgardo (2004), en su trabajo "Geología y metalogénesis del proyecto pórfido cuprífero Trapiche (Mollebamba-Apurímac-Perú)", abordó la caracterización de las unidades geológicas y las interacciones geoquímicas responsables de la formación del yacimiento Trapiche. La metodología utilizada fue descriptiva y exploratoria, siguiendo el enfoque de Hernández y Sampieri, combinando estudios litológicos, petrográficos y geoquímicos con análisis de datos históricos. El autor utilizó técnicas de mapeo geológico, análisis de muestras en laboratorio y modelamiento geológico preliminar para identificar patrones que expliquen la génesis del yacimiento. Los resultados destacaron la importancia de los intrusivos pórfidos y la influencia de las estructuras tectónicas locales en la formación de los depósitos. Este modelo es relevante para el estudio de Cerro de Pasco, dado que también se centra en procesos geoquímicos complejos y en las condiciones específicas de formación mineral. (5)

Según Jhinno Frank Moreno Marín y Magno Francisco Silva Quispe (2020), en su investigación "Caracterización petrominerográfica y su relación con la clasificación del depósito Las Vizcachas - La Libertad 2020", propone como objetivo fue relacionar las características petrominerográficas con la clasificación del depósito Las vizcachas y comprender su proceso de formación. La metodología, según Hernández y Sampieri, consistió en la recolección de muestras de tres zonas de estudio, que fueron enviadas al laboratorio de microscopía óptica para su caracterización petrominerográfica. Se aplicó un análisis minucioso de la paragénesis de alteración prógrada (granates, magnetita, piroxenos) y retrograda

(anfíboles, vesuvianita, carbonatos, cuarzo) con especial atención a la mineralización metálica de sulfuros de cobre, plomo, zinc y hierro. Los resultados permitieron identificar que el depósito Las vizcachas está ubicado en el cerro del mismo nombre, al norte del departamento de La Libertad, donde se observó mineralización metálica en rocas carbonatadas relacionada con la actividad ígnea. Las muestras recolectadas en la zona 1 incluyeron skarn de granates retrogradado a esfalerita, óxidos, carbonatos y esfalerita, mármol skarnizado y pizarra moteada. Se concluyó que la caracterización petrominerográfica del depósito Las vizcachas permitió establecer su clasificación, destacando la importancia de la interacción entre la actividad ígnea y la formación de rocas carbonatadas mineralizadas con presencia de sulfuros metálicos, lo que contribuye al entendimiento de su proceso de formación. (6)

Según Joe Louis Espinoza Montreuil (2018), en su investigación "Caracterización geológica y metodología de estimación de recursos en vetas angostas del Batolito de Pataz", tiene como objetivo determinar si la propuesta de metodología logra estimar apropiadamente los recursos minerales para este tipo de geología, como son las vetas auríferas angostas emplazadas en el Batolito de Pataz. La metodología, según Hernández y Sampieri, consistió en el desarrollo de una metodología de estimación de recursos centrada estrictamente en el oro. Esta metodología se aplicó y monitoreó en una estructura típica del Batolito de Pataz, utilizando topografía base para la digitación y ubicación de muestras, lo que permitió validar el enfoque propuesto. Los resultados evidenciaron la efectividad de la metodología para la estimación de recursos en vetas auríferas angostas, demostrando su aplicabilidad en este contexto geológico. Se concluyó que la metodología propuesta es válida y adecuada para la estimación de recursos en vetas auríferas angostas del Batolito de Pataz, destacándose la importancia del uso de topografía base para la ubicación y control de muestras, lo que permite una mayor precisión en la evaluación de los recursos minerales. (7)

2.1.3. Antecedentes internacionales

Bouhier, Verónica Emilia (2019), en su investigación "Metalogénesis del depósito polimetálico Loma Galena, Proyecto Navidad, Chubut". Este estudio exploró las características metalogenéticas del depósito Loma Galena, localizado en el Proyecto Navidad, Argentina. La investigación siguió un diseño no experimental y transversal, de tipo descriptivo y correlacional, basado en el análisis de datos petrográficos, geoquímicos e isotópicos. Se aplicaron técnicas avanzadas como difracción de rayos X, microscopía electrónica y análisis isotópicos para comprender los procesos hidrotermales que dieron lugar a la mineralización. El estudio concluyó que las condiciones tectónicas e hidrotermales fueron determinantes en la génesis del depósito, con implicancias prácticas para la exploración de minerales. Este antecedente internacional ofrece un marco metodológico y conceptual que puede adaptarse al

análisis de los procesos metalogénicos en el yacimiento de Cerro de Pasco. (8)

Según Remigio Ruiz (2012), en su investigación, "Geología y mineralizaciones del sector sudoccidental del Macizo del Deseado, Santa Cruz", plantea como objetivo fue entender e interpretar la geología regional y las mineralizaciones del Distrito Cerro Primero de Abril. La metodología, según Hernández y Sampieri, consistió en la caracterización de las unidades geológicas presentes en el distrito mediante estudios detallados de estratigrafía, petrografía, calcografía, mineralogía, geoquímica, geocronología e isótopos. Se llevó a cabo la identificación y análisis de las unidades volcánicas y de las mineralizaciones, así como la determinación de la relación entre la estructuración regional y las unidades volcánicas, lo que permitió la elaboración de un modelo estructural para el distrito. Los resultados permitieron definir el modelo geológico-metalogénico regional, explicando e integrando la geología con las mineralizaciones presentes en el Distrito Cerro Primero de Abril. Se reconstruyeron y caracterizaron los procesos volcánicos y su génesis, estableciendo la vinculación espacial, temporal y genética de las mineralizaciones con las unidades geológicas presentes en el distrito. Se concluyó que la estructuración regional influye directamente en la formación de las unidades volcánicas y las mineralizaciones del distrito. Además, se generó un modelo metalogénico distrital, extrapolando las conclusiones al ámbito de la provincia metalogénica del Deseado y comparando los resultados obtenidos con los logrados por otros investigadores en el área Mina Martha. (9)

2.2. Bases teóricas

Polarización

Los polarizadores son materiales que tienen la capacidad de transformar la luz blanca en luz polarizada linealmente, es decir, luz cuyas vibraciones ocurren únicamente en una dirección específica. Cuando la luz pasa a través de un polarizador, se filtran las vibraciones que no están alineadas con la dirección privilegiada del material. La dirección privilegiada es aquella en la cual el polarizador permite que la luz vibre de manera coherente. Existen varios métodos para obtener luz polarizada, siendo los más comunes la doble refracción y la absorción selectiva. En el caso de la doble refracción, ciertos cristales, como el espato de Islandia, dividen un rayo de luz incidente en dos rayos polarizados en direcciones perpendiculares. Por otro lado, en la absorción selectiva, materiales como el polaroid permiten solo el paso de luz con una vibración específica, absorbiendo el resto. Estos fenómenos son fundamentales en aplicaciones como la microscopía petrográfica, donde se utilizan polarizadores para identificar minerales por sus propiedades ópticas. También son importantes en tecnologías modernas, como pantallas de dispositivos electrónicos y gafas de sol polarizadas, que reducen los reflejos molestos (10).

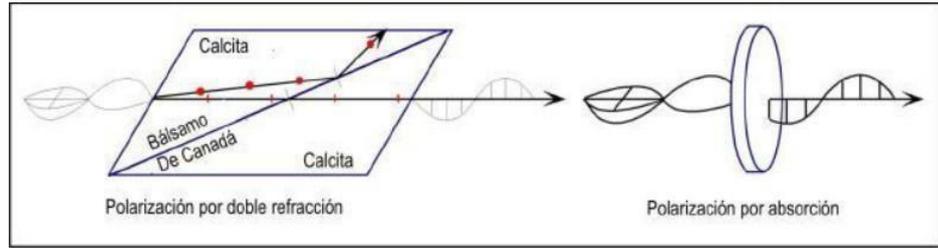


Figura 1. Métodos para obtener luz linealmente polarizada.
Fuente: Ingemmet

Refracción y reflexión

La refracción y la reflexión son fenómenos ópticos fundamentales que ocurren cuando la luz interactúa con distintos medios. La refracción se produce cuando un rayo de luz cambia su dirección al pasar oblicuamente de un medio a otro con diferente densidad óptica, debido a la variación en la velocidad de propagación de la luz entre ambos medios. Este cambio de dirección está gobernado por la Ley de Snell, que establece que el producto del índice de refracción del medio por el seno del ángulo de incidencia es igual al producto del índice de refracción del segundo medio por el seno del ángulo de refracción. Por otro lado, la reflexión ocurre cuando un rayo de luz incide sobre una superficie de separación entre dos medios y rebota sin penetrar en el segundo medio. En este caso, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Ambos fenómenos son esenciales en diversas aplicaciones prácticas, como en lentes ópticas, prismas, espejos y fibra óptica. En la microscopía de minerales opacos, la reflexión de la luz permite observar y caracterizar minerales que no permiten el paso de luz, facilitando su identificación mediante sus propiedades reflectivas y angulares (11)

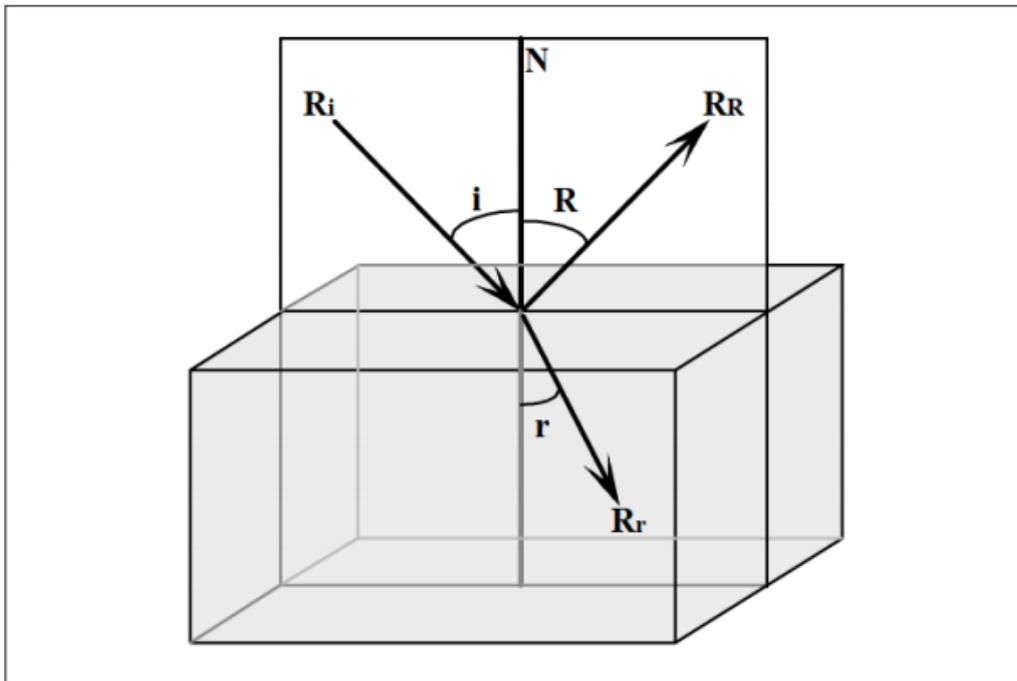


Figura 2. Rayo incidente (R_i), reflejado (R_r) y refractado (R_r) y sus respectivos ángulos con la normal: Ángulo de incidencia (i), de reflexión (I) y de refracción (R). Fuente: Ingemmet

Minerales opacos

Los minerales opacos son aquellos que no permiten el paso de luz, incluso cuando se encuentran en láminas delgadas. Su estudio se realiza mediante microscopía de luz reflejada, técnica que permite observar propiedades ópticas específicas como el color, la reflectividad, el pleocroísmo, y la birreflectancia. La reflectividad es una medida del porcentaje de luz reflejada por la superficie del mineral y es una característica fundamental para distinguir entre distintos minerales opacos. El pleocroísmo, por otro lado, se refiere al cambio de color del mineral según la orientación de la luz reflejada, mientras que la birreflectancia se manifiesta como una variación en la intensidad de la luz reflejada dependiendo de la orientación del cristal. Además, estos minerales presentan propiedades físicas como: dureza, hábito cristalino y forma específica. Ejemplos comunes de minerales opacos son la galena (PbS), la esfalerita (ZnS), la calcopirita (CuFeS₂) y la magnetita (Fe₃O₄). Su correcta identificación es crucial en el análisis de menas polimetálicas, donde su presencia define la calidad y viabilidad económica del yacimiento. Estos estudios son fundamentales para la industria minera, permitiendo optimizar procesos de extracción y concentración (12).

Yacimiento de Cerro de Pasco

El yacimiento de Cerro de Pasco, ubicado en la región central del Perú, es uno de los depósitos polimetálicos más importantes del país. A una altitud de 4380 m s. n. m., en la meseta del Bombón, este yacimiento es conocido como la “Capital Minera del Perú” debido a su vasta riqueza en minerales como plata, cobre, zinc y plomo. La mineralización en Cerro de Pasco es de origen hidrotermal, con procesos que involucran complejas interacciones entre fluidos magmáticos y rocas anfitrionas. En esta zona predominan minerales opacos como galena (PbS), esfalerita (ZnS) y calcopirita (CuFeS₂), asociados con estructuras de skarn, vetas y cuerpos masivos. La explotación de estos recursos ha tenido un impacto económico significativo, pero también ha generado problemas ambientales y sociales debido a la contaminación por metales pesados. Los estudios geológicos en Cerro de Pasco buscan entender los procesos metalogénéticos que dieron origen a estos depósitos, lo cual es esencial para desarrollar estrategias de explotación más eficientes y sostenibles. La investigación detallada de este yacimiento puede ayudar a mitigar los impactos ambientales y optimizar el beneficio de los recursos minerales (13).

Metalogénesis

La metalogénesis es el estudio de los procesos responsables de la formación y distribución de depósitos minerales en la corteza terrestre. Este campo de estudio busca entender cómo los minerales se agrupan en asociaciones específicas debido a factores como: temperatura, presión, composición de fluidos hidrotermales, y tiempo de formación. Los minerales no se encuentran de manera aislada; por el contrario, forman conjuntos que reflejan

condiciones geológicas específicas durante su génesis. Los procesos metalogénéticos incluyen etapas de movilización, precipitación y concentración de minerales. Por ejemplo, los depósitos hidrotermales se forman cuando fluidos calientes ricos en metales circulan por fracturas y fallas, precipitando minerales al enfriarse. En el caso de yacimientos polimetálicos como Cerro de Pasco, el estudio de la metalogénesis permite identificar las fuentes de los metales y entender su proceso de acumulación. Este conocimiento es esencial para guiar la exploración minera y optimizar las técnicas de extracción y procesamiento, contribuyendo a una minería más eficiente y con menor impacto ambiental (14).

Definición de términos básicos

Polarización de la Luz

La polarización es un fenómeno óptico en el cual las ondas de luz se restringen a vibrar en una sola dirección perpendicular a la dirección de propagación. La luz natural está compuesta por ondas que vibran en múltiples direcciones, pero al pasar por un polarizador, solo las vibraciones alineadas con la dirección privilegiada son permitidas. Existen distintos métodos para producir luz polarizada, como la polarización por reflexión, absorción selectiva y doble refracción. La polarización es ampliamente utilizada en la microscopía de minerales para estudiar sus propiedades ópticas, así como en dispositivos electrónicos y gafas para reducir el deslumbramiento (15).

Refracción de la Luz

La refracción es el cambio en la dirección de un rayo de luz cuando atraviesa la interfaz entre dos medios con diferente densidad óptica. Este fenómeno se debe a una variación en la velocidad de la luz al pasar de un medio a otro. La Ley de Snell describe este fenómeno mediante una relación matemática que involucra los índices de refracción de los dos medios. La refracción es esencial en óptica, permitiendo el funcionamiento de lentes, prismas y otros dispositivos. Además, es crucial en la identificación de minerales mediante el uso de microscopios petrográficos (11).

Reflexión de la Luz

La reflexión es el proceso mediante el cual un rayo de luz cambia de dirección al incidir sobre una superficie sin penetrar en el medio al que incide. El ángulo de reflexión es siempre igual al ángulo de incidencia, según la Ley de la reflexión. Este fenómeno es observable en superficies como espejos y en minerales opacos, los cuales se caracterizan por reflejar la luz incidente. En microscopía de luz reflejada, este fenómeno es fundamental para observar y distinguir minerales opacos en muestras pulidas, facilitando su identificación (12).

Minerales opacos

Los minerales opacos son aquellos que no permiten el paso de luz, incluso en láminas

delgadas. Su identificación se basa en propiedades ópticas observadas a través de luz reflejada, como el color, la reflectividad, el pleocroísmo y la birreflectancia. Ejemplos comunes incluyen la galena, esfalerita y calcopirita. Estos minerales son importantes en estudios de mineralogía aplicada y en la industria minera, ya que suelen contener metales económicamente valiosos. Su estudio ayuda a optimizar procesos de beneficio mineral y comprender la génesis de los depósitos (18).

Yacimiento polimetálico

Un yacimiento polimetálico es una concentración natural de minerales que contiene dos o más metales de interés económico. Ejemplos típicos incluyen combinaciones de plomo, zinc, cobre y plata. Estos yacimientos se forman a través de procesos geológicos complejos, como actividad hidrotermal o magmática. La explotación de yacimientos polimetálicos, como el de Cerro de Pasco, requiere técnicas de separación y concentración para recuperar los distintos metales de manera eficiente. Su estudio metalogénético permite optimizar la exploración y explotación de estos recursos (13).

Metalogénesis

La metalogénesis es el estudio de los procesos y condiciones que conducen a la formación de yacimientos minerales. Examina factores como la temperatura, la presión, la composición de los fluidos y el tiempo de formación. La metalogénesis permite identificar patrones de distribución de minerales en la corteza terrestre y entender su origen. Esta disciplina es crucial para la exploración minera, ya que ayuda a predecir la localización de nuevos depósitos y optimizar los recursos disponibles (14).

Doble refracción

La doble refracción es un fenómeno óptico en el que un rayo de luz se divide en dos rayos al atravesar ciertos cristales anisotrópicos, como el espató de Islandia (calcita). Estos rayos viajan a diferentes velocidades y se polarizan en planos perpendiculares entre sí. La doble refracción es una propiedad fundamental para identificar minerales transparentes en microscopía petrográfica. Permite determinar características cristalográficas específicas y distinguir entre minerales que a simple vista parecen similares (21).

Índice de refracción

El índice de refracción es una medida que indica cuánto se reduce la velocidad de la luz al pasar a través de un material en comparación con el vacío. Se expresa como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en el material. Este valor es característico para cada sustancia y se utiliza para identificar minerales y otros materiales. En la microscopía de polarización, el índice de refracción ayuda a diferenciar minerales con propiedades ópticas similares (22).

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis de la investigación

Se identificaron las siguientes hipótesis

3.2. Hipótesis general

Los procesos geológicos, geoquímicos y físico-químicos específicos en el yacimiento de Cerro de Pasco han generado una mineralización única de minerales opacos, influenciada por la interacción de estructuras tectónicas, fuentes magmáticas, fluidos hidrotermales y condiciones de formación específicas, lo que resulta en una concentración significativa de metales valiosos

3.3. Hipótesis específicas

- a) Las estructuras geológicas en el yacimiento de Cerro de Pasco presentan relaciones directas con la distribución y concentración de los minerales opacos.
- b) Las fuentes magmáticas y los fluidos hidrotermales que interactuaron en la región de Cerro de Pasco aportaron los elementos esenciales para la formación de sulfuros y óxidos de hierro presentes en los minerales opacos.
- c) La secuencia paragenética de los minerales opacos refleja un proceso geológico complejo y ordenado, determinado por las condiciones tectónicas y geoquímicas de la región.
- d) Las condiciones físico-químicas, como temperatura, presión y composición química de los fluidos, desempeñaron un papel crucial en la génesis y precipitación de los minerales opacos en el yacimiento de Cerro de Pasco.

3.4. Identificación de variables

Se identificaron las siguientes variables:

3.5. Variables independientes

Los factores geológicos y geoquímicos específicos de la región de Cerro de Pasco. Estos pueden incluir aspectos como la tectónica de placas, la actividad volcánica, y la composición geoquímica del yacimiento.

3.6. Variables dependientes

La formación de minerales opacos y la concentración de metales preciosos en el yacimiento de Cerro de Pasco.

3.7. Operacionalización de variables

Variable independiente: Factores geológicos y geoquímicos específicos de la región de Cerro de Pasco

Medición: Estos factores pueden ser medidos a través de estudios geológicos y análisis geoquímicos. Por ejemplo, la actividad volcánica puede ser medida a través de registros históricos y evidencia geológica, mientras que la composición geoquímica puede ser determinada a través de análisis de muestras de roca y suelo.

Variable dependiente: Formación de minerales opacos y concentración de metales preciosos en el yacimiento de Cerro de Pasco

Medición: La formación de minerales opacos puede ser observada y medida a través de técnicas de microscopía y espectroscopía. La concentración de metales preciosos puede ser determinada a través de análisis químicos de las muestras de roca y suelo.

Tabla. 1. Operacionalización de las variables

| VARIABLES INDEPENDIENTES | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DEFINICIÓN OPERACIONAL | DIMENSIONES | INDICADORES | ESCALA DE MEDICIÓN |
|--------------------------|---|---|----------------------------------|---|-----------------------------------|
| Factor geológico | Son las características geológicas específicas de una región, como la tectónica de placas, el vulcanismo, la litología, entre otros, que influyen en la formación de depósitos minerales. | Se refiere a las condiciones geológicas particulares de la zona de Cerro de Pasco, que se pueden medir a través del análisis petrológico, dataciones radiométricas, mapeo geológico, entre otros. | Vulcanismo | Edad en unidades volcánicas. | Cualitativa y Cuantitativa |
| | | | Litología | Composición de las rocas. | |
| | | | Estructuras geológicas | Presencia de estructuras como Diques, Domos, Etc. | |
| Factor geoquímico | Composición química de las rocas y minerales que influye en los procesos metalogénicos de una región. | Características geoquímicas particulares de las rocas y minerales en Cerro de Pasco, que se miden mediante análisis químicos. | Elementos mayoritarios | Contenidos de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , metales de transición, etc. | Cuantitativa |
| | | | Elementos de traza | Contenidos de elementos traza como Au, Ag, Cu, Pb, Zn | |
| | | | Isótopos radiogénicos y estables | Relaciones isotópicas Sr, Nd, Pb | |

| VARIABLES DEPENDIENTE S | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DEFINICIÓN OPERACIONA L | DIMENSIONES | INDICADORES | ESCALA DE MEDICIÓN |
|--|---|--|--------------------|--|-----------------------------------|
| Minerales opacos | Minerales no transparentes a la luz como sulfuros y óxidos que contienen metales económicamente valiosos. | Minerales no transparentes portadores de metales en el yacimiento de Cerro de Pasco, observables con microscopía óptica. | Sulfuros | Presencia de pirita, calcopirita, esfalerita, galena, etc. | Cualitativa |
| | | | Óxidos | Presencia de magnetita, hematites, limonita. | |
| Metales preciosos | Minerales que contienen metales valiosos como oro y plata. | Minerales portadores de oro y plata identificables mediante análisis químicos en el yacimiento de Cerro de Pasco. | Minerales con Au | Presencia de telururos de Au y Ag | Cuantitativa |
| | | | Minerales con Ag | Ley de Au y Ag | |

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Enfoque de investigación

Cualitativo, ya que se busca comprender en profundidad las características y propiedades de las muestras de rocas a través de descripciones detalladas.

4.2. Tipo de investigación

Básica, porque está enfocada en entender las propiedades y composición de las muestras minerales, sin un interés aplicado inmediato.

4.3. Nivel de investigación

Descriptivo, se limita a caracterizar y documentar las muestras de rocas mediante la microscopía.

4.4. Diseño de investigación

No experimental transversal descriptivo, se recolectan datos en un momento específico, sin manipulación de variables. Es un corte en el tiempo para describir las muestras.

4.5. Métodos de investigación

El método utilizado es un análisis petrográfico de muestras de rocas en secciones delgadas mediante microscopía óptica, El alcance es descriptivo y cualitativo, ya que se busca caracterizar en detalle la mineralogía, textura y alteraciones de las muestras de rocas.

4.6. Población y muestra

4.6.1. Población

La población estaría conformada por todas las muestras de rocas alteradas disponibles para su análisis.

4.6.2. Muestra

La muestra está conformada por 5 muestras delgadas de rocas alteradas (M-1 a M-5), seleccionadas para su análisis petrográfico.

4.7. Unidad de análisis

La unidad de muestra es la empresa “nombre de la empresa”

4.8. Tamaño de muestra

El tamaño de la muestra está integrado por el yacimiento de Cerro de Pasco

4.9. Técnicas e instrumentación de recolección de datos

La técnica utilizada es la observación microscópica en secciones delgadas de las muestras de rocas, El instrumento es el microscopio petrográfico, con el cual se analizan características mineralógicas, texturales y de alteración, También se utiliza registro fotográfico de las secciones para evidencia y análisis posterior.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1. Zona geográfica

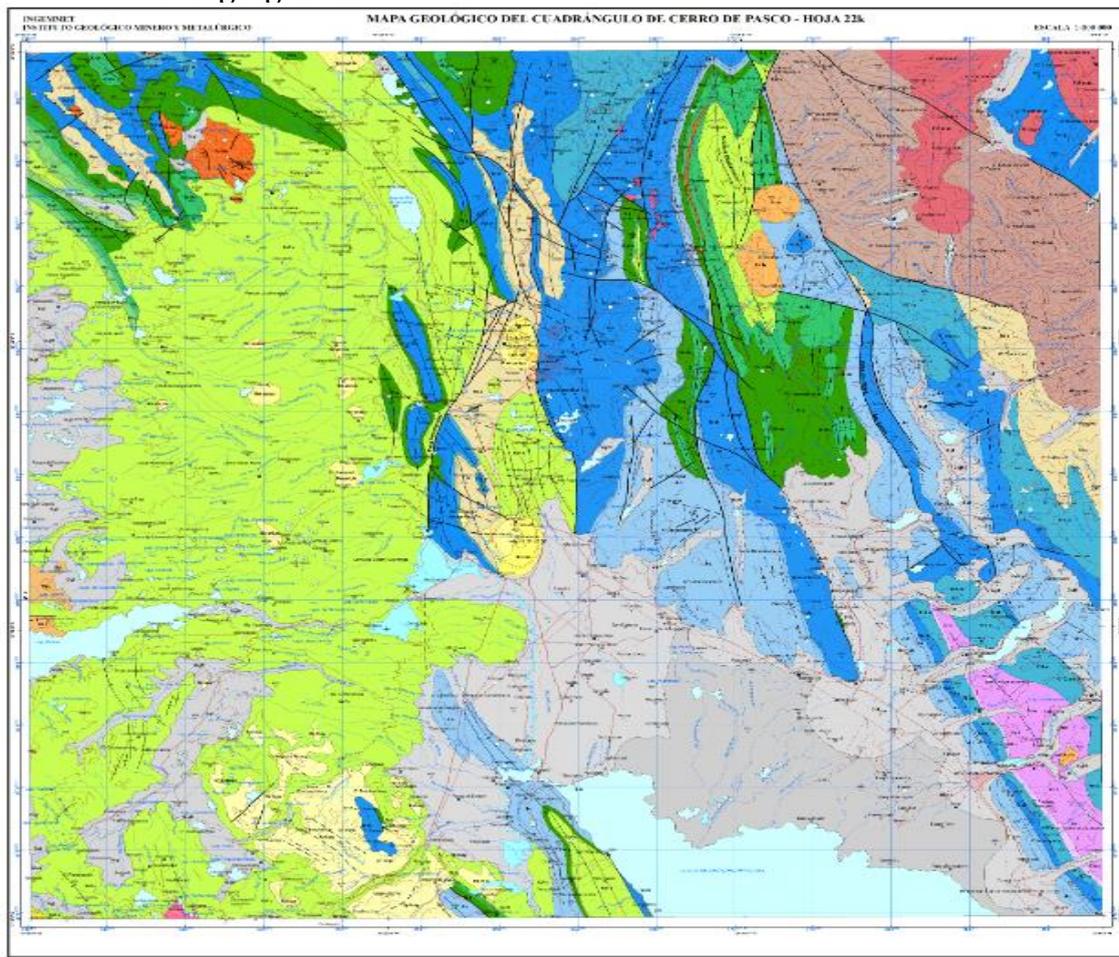


Figura 3. Mapa geológico del cuadrángulo de cerro de pasco

La imagen muestra el mapa geológico del cuadrángulo de Cerro de Pasco Hoja 23k, una representación detallada de la geología de la región. Los colores predominantes indican diferentes tipos de formaciones geológicas. Por ejemplo, los tonos verdes están asociados a rocas sedimentarias como lutitas, areniscas y calizas, mientras que los tonos azules pueden representar unidades volcánicas o intrusivas más jóvenes. Los tonos amarillos y marrones señalan depósitos cuaternarios y formaciones sedimentarias más recientes, y los tonos rosados y violetas están relacionados posiblemente con unidades intrusivas o alteradas debido a actividad minera.

En cuanto a la estructura tectónica, se observan fallas y pliegues representados por líneas negras y símbolos específicos, lo que evidencia una región con actividad tectónica considerable. Las zonas de fallas sugieren un control estructural sobre los depósitos minerales y la configuración actual del relieve. Cerro de Pasco es una de las regiones mineras más importantes del Perú, reconocida por sus depósitos de plomo, zinc, cobre y plata. La presencia de múltiples formaciones alteradas y estructuralmente complejas refuerza su potencial geológico para la explotación minera.

En términos de zonificación, la parte occidental del mapa muestra predominio de rocas sedimentarias, posiblemente pertenecientes a formaciones cretácicas y paleozoicas, mientras que la parte oriental incluye unidades volcánicas, intrusivas y sedimentarias más recientes, además de depósitos cuaternarios. Se identifican también ríos y cuerpos de agua que cruzan la región, probablemente influenciados por fallas y fracturas. La topografía es variada, con áreas montañosas en el centro y sureste, mientras que el oeste presenta superficies más suavizadas.

En resumen, el mapa refleja una región con una compleja historia geológica y tectónica, rica en recursos minerales y con gran relevancia en la industria minera peruana. La diversidad litológica y las estructuras geológicas indican un terreno ideal para estudios de exploración minera y geocientíficos.

5.2. Análisis estructural

| ERA/ETAPA | SISTEMA | ESQUE | TIPOLO (MA) | UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS | | | ROCAS INTRUSIVAS Y SUBVOLCÁNICAS | | | | | | | | | | |
|------------|-------------|---------------------------|--------------|---|--------------------|--|--|--|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|------|------------------|--------------|-------------------|
| CENOZOICO | CUATERNARIO | HOLOCENO | 0-0.01 | Depósito aluvial | Q-al | Gravas heterométricas y arenas con matriz limo arenosa. Se encuentra formando terrazas | <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f08080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: 8px; margin-right: 5px;">N-h-mz</div> <div style="font-size: 8px;">Monzonita</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ffff00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: 8px; margin-right: 5px;">Nm-and,da</div> <div style="font-size: 8px;">Andesita, dacita</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ffff00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: 8px; margin-right: 5px;">Nm-mar-da,da</div> <div style="font-size: 8px;">Dacita, cuarzolita</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ffa500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: 8px; margin-right: 5px;">Po-dap</div> <div style="font-size: 8px;">Dacita porfídica</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ffa500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: 8px; margin-right: 5px;">Pp-and,ba</div> <div style="font-size: 8px;">Andesita, basalto</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ffa500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: 8px; margin-right: 5px;">Pp-a-mgb</div> <div style="font-size: 8px;">Monzogabro</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ffa500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: 8px; margin-right: 5px;">P-rda</div> <div style="font-size: 8px;">Riodacita</div> </div> </div> | | | | | | | | | | |
| | | | | Depósito aluvial | Qh-al | Gravas y arenas con matriz limoarenosa | | | | | | | | | | | |
| | | Depósito biogénico | Q-bi | Intercalación de limos, arenas y niveles orgánicos | | | | | | | | | | | | | |
| | | Depósito glaciar, fluvial | Q-glf | Gravas y arenas, subredondeadas, en matriz limoarenosa | | | | | | | | | | | | | |
| | | Depósito glaciar | Q-g | Acumulaciones de bloques rocosos heterométricos, subangulosos con matriz arena-limosa | | | | | | | | | | | | | |
| | NEÓGENO | PLIOCENO | 5.33-2.58 | Formación Huayllay | Np-huay | Tobas de cristales blancos, fibrosos, intercaladas con toba de lapilli y bombos proclásticas | | | | | | | | | | | |
| | | | | Formación Millotingo | Miembro Parimachay | Nm-m/p-lb, and g | | Tobas y andesitas porfídicas | | | | | | | | | |
| | | | | | | Nm-rum | | Aglomerados de clastos angulosos y subangulosos de calizas, lutitas, chert e intrusivos, tobas blancas | | | | | | | | | |
| | | MIOCENO | 23.03-5.33 | Grupo Callpuy | PN-c | Intercalación de lavas andesíticas, tobas de cerizas y secuencias clásticas | | | | | | | | | | | |
| | | | | Formación Casapeca | Ks-p-c | Areniscas rojas intercaladas con limolitas, limoarcillitas, conglomerados, yeso y calizas | | | | | | | | | | | |
| MESOZOICO | CRETÁCICO | SUPERIOR | 100.5-66.0 | Formación Jumashsa | Ks-j | Calizas micríticas gris clara a beige en capas medianas o gruesas, intercaladas con calizas nodulares | | | | | | | | | | | |
| | | | | Formación Peritambo | K-pl | Calizas micríticas negras bituminosas intercaladas con lutitas gris oscuras | | | | | | | | | | | |
| | | INFERIOR | 146-100.5 | Formación Chulec | K-chu-pl | Calizas arenosas, areniscas calcáreas en capas medianas, coloraciones gris clara a beige. | | | | | | | | | | | |
| | | | | Formación Chulec | K-chu | Secuencias volcánicas basálticas, brechas, lavas con intercalaciones de areniscas y limolitas rojas | | | | | | | | | | | |
| | | | | Formación Chayllacatana | K-ch | Areniscas cuarzosas blancas intercaladas con limoarcillitas grises y niveles de carbón | | | | | | | | | | | |
| | JURÁSICO | INFERIOR | 174.1-146 | Formación Condorsingo | Jl-c | Calizas gris claras y oscuras y calcarenitas amarillentas en estratos gruesos | | | | | | | | | | | |
| | | | | Formación Aramachay | Jl-a | Areniscas calcáreas negras a gris claras intercaladas con calizas carbonosas con nódulos | | | | | | | | | | | |
| | | | | Formación Chambará | Js-ch | Calizas blancas, calizas arenosas y areniscas calcáreas con limoarcillitas, estratos de medianos a gruesos | | | | | | | | | | | |
| | | SUPERIOR | 201.3-174.1 | Grupo Mito | PET-m | Areniscas intercaladas con limoarcillitas y conglomerados volcánicos, tobas y lavas andesíticas y basálticas | | | | | | | | | | | |
| | | | | Formación Chambará | Js-ch | Calizas blancas, calizas arenosas y areniscas calcáreas con limoarcillitas, estratos de medianos a gruesos | | | | | | | | | | | |
| PALEOZOICO | PERMIANO | LOPINGIANO | 259.8-252.17 | Grupo Tarma | Cp-t | Areniscas gris verdosas en bancos gruesos, intercaladas con lutitas marrón oscuras, estratificadas en capas delgadas y areniscas calcáreas. | | | | | | | | | | | |
| | | | | Grupo Ambo | Cm-a | Areniscas cuarzosas en estratos gruesos con estratificación sesgada, intercaladas con limolitas y lutitas que poseen regular contenido de materia orgánica | | | | | | | | | | | |
| | | SUPERIOR | 359.8-259.8 | GRUPO EXCELSIOR | 259.8-252.17 | Grupo Excelsior | SD-e | Filitas intercaladas con cuarcitas gris oscuro, metaufos y mármoles | | | | | | | | | |
| | | | | | | MEDIOS | 410.2-359.8 | SILURICO | 429.4-359.8 | WENLOCKIANO | 429.4-359.8 | LLANDOVERIANO | 541.6-429.4 | 1000 | Complejo Marañón | NP-cm-esq | Esquistos |
| | | | | | | | | | | | | | | | Complejo Marañón | NP-cm-esq,gn | Esquistos y gneis |

Figura 4. Unidades litoestratigráficas

La imagen presenta una columna estratigráfica que organiza las unidades litoestratigráficas y las rocas intrusivas/subvolcánicas de una región determinada, con información sobre edades geológicas, litologías y características de las unidades. La columna temporal a la izquierda divide las unidades en Cenozoico, Mesozoico, Paleozoico y Neoproterozoico/Precámbrico. En el Cenozoico, se encuentran depósitos aluviales, conglomerados, calizas y areniscas en ambientes fluviales, glaciares y marinos, destacando también formaciones volcánicas. En el Mesozoico, específicamente en el Jurásico y Cretácico, predominan calizas, lutitas, areniscas y

brechas volcánicas, reflejando ambientes marinos y transicionales. En el Paleozoico, se destacan areniscas cuarcíticas, filitas y calizas, con unidades como el Grupo Tama y el Grupo Excélsior. En el Neoproterozoico y Precámbrico, aparecen rocas metamórficas como esquistos y gneises.

Las rocas ígneas intrusivas y subvolcánicas están clasificadas y asociadas a eventos tectónicos y magmáticos, predominando andesitas, dacitas, granitos, granodioritas y riolitas. En la columna central, cada unidad está clasificada por edad, nombre de la formación o grupo y características litológicas. Los colores específicos representan diferentes litologías, como verdes para lutitas y areniscas, grises y azules para calizas y sedimentitas marinas. Las unidades sedimentarias incluyen depósitos fluviales, glaciares y marinos, mientras que las unidades volcánicas y metamórficas reflejan condiciones tectónicas complejas. Las rocas ígneas se asocian con periodos geológicos específicos, como las andesitas y dacitas en la era Cenozoica y rocas graníticas y riolíticas en eventos anteriores. Los nombres y símbolos de las formaciones y grupos permiten identificar rápidamente las características y el contexto temporal de cada unidad.

5.3. Evaluación de muestreo

El análisis de las muestras obtenidas de los testigos de perforación refleja un entorno geológico caracterizado por procesos hidrotermales significativos. Ambas muestras provienen de una roca ígnea hipoabisal, específicamente dacita brechada, que presenta una fuerte alteración mineralógica y textural, probablemente vinculada a un sistema porfídico o epitermal activo en el pasado.

La muestra QDH-006 (1007,65 m) se caracteriza por una predominancia de minerales secundarios como sericita (64%) y arcilla (5%), resultado de una intensa alteración hidrotermal. Los fenocristales originales de plagioclasa han sido casi completamente reemplazados, dejando solo sus moldes, mientras que el cuarzo se encuentra en proporciones significativas (15%), tanto como parte de la matriz como rellenando microfracturas en forma de agregados microgranoblásticos. Este comportamiento del cuarzo y la sericita, junto con la textura porfidoclástica en matriz microgranular fina, sugiere la influencia de fluidos hidrotermales ricos en sílice y posiblemente con temperaturas moderadas a altas. Las inclusiones observadas en esta muestra incluyen zircón y apatito en trazas, ambos dispersos en la matriz. Estas inclusiones pueden ser indicativas del origen magmático de la roca y de procesos de

diferenciación química en profundidad. Además, la presencia de microclastos intensamente argilizados podría ser evidencia de un brechamiento hidrotermal previo.

En la muestra QDH-08-D (953,15 m), la composición muestra una fuerte preponderancia de arcillas (56%) y sericita (20%), lo que confirma procesos de alteración más avanzados que en la muestra anterior. Las plagioclasas están prácticamente ausentes como mineral primario y se presentan como moldes alterados a sericita y arcillas, lo que también refleja una interacción prolongada con fluidos hidrotermales. La matriz granular media y los microclastos de naturaleza metamórfica, con características similares a pizarras, sugieren que la roca ha experimentado deformaciones estructurales. En esta muestra, se aprecia un proceso de milonitización en algunos sectores, lo que implica esfuerzos tectónicos importantes que han triturado los minerales preexistentes, como el cuarzo y la arcilla.

Los minerales opacos en ambas muestras revelan un conjunto interesante de fases hipógenas y supergénicas. La pirita es el mineral más destacado, mostrando morfologías que van desde euhedrales a anhedrales y que rellenan microfracturas en forma de microvenillas. Su asociación con otros minerales como molibdenita, calcopirita y bornita, aunque en menor proporción, sugiere que las muestras forman parte de un sistema hidrotermal policíclico. Este sistema podría estar relacionado con un yacimiento tipo pórfido de cobre-molibdeno o un sistema epitermal de baja sulfuración, considerando la fuerte argilización y la distribución volumétrica de los minerales.

Desde el punto de vista estructural, la alteración intensa de las muestras, en combinación con las evidencias de brechamiento y microclastos orientados, indica que el área ha estado sometida a importantes esfuerzos tectónicos. Estos esfuerzos probablemente estén asociados con fallas locales que han actuado como canales para la circulación de fluidos hidrotermales. Las texturas observadas, como la porfidoclástica y la granular media, así como las evidencias de milonitización, refuerzan esta hipótesis. La presencia de gangas que ocupan el 94-99% del volumen de las muestras sugiere que los espacios vacíos generados por la actividad tectónica han sido eficientemente rellenos por minerales secundarios.

En términos de inclusión, las observaciones petrográficas muestran que los cristales de rutilo, ubicados en los clivajes de los microclastos o como remanentes reemplazados por pirita, podrían haberse formado durante etapas tempranas de la

mineralización hipógena. Esto implica un potencial para fases minerales de alto valor industrial, aunque en proporciones muy pequeñas. La interacción entre los minerales opacos también señala un sistema mineralizado complejo, donde procesos de reemplazo y recristalización son comunes. Ejemplo de ello es el reemplazo parcial de pirita por bornita o calcopirita, lo que sugiere condiciones de fluctuación en la química de los fluidos hidrotermales.

5.4. Análisis de opacos

El análisis de los minerales opacos en las muestras QDH-006 (1007,65 m) y QDH-08-D (953,15 m) revela detalles importantes sobre la génesis, evolución y alteración de estos minerales dentro del sistema hidrotermal. Este enfoque metodológico permite identificar sus implicancias geológicas y económicas en un contexto más amplio.

En la muestra QDH-006, la pirita constituye el mineral opaco más abundante (5%) y se presenta tanto diseminada como en forma de microvenillas que rellenan microfracturas. Estas venillas exhiben cristales que varían de euhedrales a anhedrales, con tamaños de hasta 0,540 mm. Este comportamiento es característico de un depósito hidrotermal donde la pirita cristaliza durante etapas de enfriamiento progresivo del fluido mineralizante. La textura de relleno de espacios vacíos y la asociación con microplayas alargadas sugiere una formación en condiciones de baja presión, lo que podría ser indicativo de una etapa tardía del sistema hidrotermal.

La relación de la pirita con otros minerales como rutilo, molibdenita, calcopirita y bornita es significativa. El rutilo, presente en proporciones menores (0,5%), se encuentra como remanentes en las gangas, indicando que fue reemplazado parcialmente por pirita y otros sulfuros. Esta secuencia de reemplazo refleja un proceso de mineralización hipógena donde la química de los fluidos evoluciona para favorecer la formación de sulfuros más complejos. La molibdenita aparece en trazas como cristales lamelares flexionados, a menudo en sectores de mayor alteración. Su relación con las microfracturas sugiere que se depositó en una etapa tardía del sistema, probablemente asociada con temperaturas más bajas y fluidos más silíceos.

La calcopirita y la bornita, presentes también en trazas, muestran un comportamiento típico de reemplazo, tanto de pirita como de rutilo. Este reemplazo implica una etapa mineralizante más oxidante, con una probable contribución de fluidos ricos en cobre. Ejemplo de ello es la Figura 5 (página 10 del documento), que

ilustra un cristal de bornita reemplazando parcialmente a la pirita, dejando remanentes de esta última dentro de la bornita. Esta interacción sugiere fluctuaciones químicas en el sistema, posiblemente debido a cambios en la presión o temperatura durante la deposición.

En la muestra QDH-08-D, la pirita nuevamente domina como mineral opaco, aunque su proporción relativa es menor (trazas). Se encuentra principalmente en clivajes de microclastos y como relleno de microfracturas. La textura diseminada y su reemplazo parcial por calcopirita en áreas de mayor alteración indican una asociación con procesos de recristalización y remobilización. La calcopirita en esta muestra tiene tamaños de hasta 0,095 mm y está concentrada en sectores donde también se encuentran remanentes de rutilo. Esto sugiere un sistema hidrotermal activo que favoreció la precipitación de sulfuros en etapas posteriores.

El rutilo en la muestra QDH-08-D presenta una morfología más variada, con cristales aciculares que se alinean en clivajes de microclastos, lo que indica condiciones de estrés tectónico local durante o después de su formación. Esta característica se observa claramente en la Figura 4 (página 11 del documento), donde los cristales aciculares de rutilo están alineados en los microclastos de la matriz.

La textura general de los opacos en ambas muestras, descrita como relleno de espacios vacíos y diseminación, apunta a un ambiente hidrotermal de múltiples pulsos. Las fases minerales principales (pirita, calcopirita, bornita) y accesorios (rutilo, molibdenita) reflejan un sistema con una fuerte interacción entre fluidos mineralizantes y la roca huésped. La pirita, como fase inicial predominante, fue seguida por minerales más complejos como calcopirita y bornita en etapas posteriores, mostrando una evolución hacia un sistema enriquecido en cobre.

Desde una perspectiva estructural, los minerales opacos muestran una clara interacción con las fracturas y clivajes en la roca. Esto indica que las fracturas sirvieron como canales principales para la circulación de fluidos hidrotermales, controlando la deposición de minerales. Además, los patrones de reemplazo y remanentes sugieren que las condiciones físico-químicas del sistema cambiaron dinámicamente, probablemente debido a variaciones en las condiciones tectónicas y la composición del fluido.

El análisis metodológico sugiere que este conjunto de minerales opacos está

vinculado a un sistema hidrotermal policíclico, con potencial de pertenecer a un yacimiento tipo pórfido de cobre-molibdeno o un sistema epitermal. La evaluación cuantitativa de los opacos indica que, aunque las proporciones de sulfuros metálicos como calcopirita y bornita son bajas, la asociación con molibdenita y las evidencias de reemplazo suponen un interés para exploraciones más detalladas que evalúen la viabilidad económica del sistema.

La continuidad y extensión de estos procesos deben ser evaluadas con datos complementarios, como análisis geoquímicos de los sulfuros y estudios isotópicos que permitan definir con precisión las fuentes de los fluidos y las condiciones de formación de los minerales. Esto también permitirá correlacionar el sistema con yacimientos similares en la región.

5.5. Descripción mineralúrgica

La descripción mineralúrgica es un análisis detallado de los minerales presentes en el yacimiento y sus características micrográficas y texturales. En el caso del yacimiento de Cerro de Pasco, se identificaron minerales opacos como pirita, rutilo, calcopirita, bornita y molibdenita, cada uno con una relación específica dentro del proceso de mineralización.

La pirita se presenta en formas euhedrales a anhedrales, con tamaños que varían desde 0,175 mm hasta 0,540 mm, siendo el mineral más abundante en ambas muestras. Se encuentra rellenando microfracturas y diseminada en la ganga, evidenciando su formación en una etapa hipógena inicial. El rutilo, aunque en menor proporción (0,50%), muestra una relación con la pirita y calcopirita, siendo reemplazado por estos minerales, lo que indica su cristalización previa en el proceso metalogénico. La calcopirita y bornita se encuentran en cantidades trazas, pero son fundamentales para entender el enriquecimiento en cobre del depósito. Estos minerales reemplazan a la pirita, indicando una secuencia de mineralización más compleja y una interacción hidrotermal prolongada.

Por su parte, la molibdenita se presenta en proporciones mínimas (0,01%), pero su morfología lamelar sugiere una cristalización tardía en zonas de fracturación secundaria. La presencia de estos minerales opacos indica un ambiente de formación hidrotermal polimetálico, típico de los depósitos de Cerro de Pasco, donde las etapas de reemplazo y relleno de fracturas han jugado un papel importante en la

configuración del yacimiento.

Esta descripción es esencial para determinar las características mineralúrgicas del yacimiento, ya que permite entender la distribución, forma, tamaño y asociación de los minerales opacos, lo cual tiene implicancias directas en los procesos de extracción y beneficio de los metales presentes en el depósito.

5.6. Ambiente biológico

El ambiente biológico en el contexto de la metalogénesis en Cerro de Pasco juega un papel indirecto pero significativo en la formación y alteración de los minerales presentes. Aunque el proceso de formación de minerales opacos es predominantemente hidrotermal e hipógeno, la interacción con el ambiente superficial, influenciado por factores biológicos, puede contribuir a la transformación y movilidad de estos minerales.

En la zona de Cerro de Pasco, el ambiente biológico está compuesto por microorganismos extremófilos que pueden oxidar y reducir sulfuros metálicos, como la pirita y la calcopirita. Estos procesos biológicos pueden provocar la oxidación de sulfuros y la generación de soluciones ácidas que facilitan la movilización de metales como hierro, cobre y molibdeno. Por ejemplo, la oxidación bacteriana de la pirita genera ácido sulfúrico, lo cual puede influir en la formación de minerales secundarios en las zonas supergénicas del depósito.

Además, las comunidades microbianas pueden facilitar procesos de biolixiviación, especialmente en áreas donde se han desarrollado actividades mineras. La actividad de bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* es relevante en este tipo de ambientes, ya que contribuyen a la degradación de sulfuros y a la liberación de metales disueltos.

Por otro lado, el ambiente biológico también puede influir en la estabilidad de los minerales. La presencia de materia orgánica y su descomposición puede generar condiciones reductoras que estabilizan minerales como la bornita y la calcopirita. Estos procesos biológicos pueden modificar la composición mineralógica del depósito, especialmente en zonas de mayor interacción con el agua superficial y subterránea.

Por tanto, entender el ambiente biológico en Cerro de Pasco es fundamental para evaluar no solo los procesos naturales de alteración y enriquecimiento, sino también para implementar estrategias de remediación ambiental y optimización de procesos minero-metalúrgicos en el yacimiento.

5.7. Análisis fotomicrográfico

El análisis fotomicrográfico constituye una herramienta fundamental en la caracterización de los minerales opacos presentes en el yacimiento de Cerro de Pasco. Mediante el uso de microscopía óptica con aumentos de hasta 200X, se identificaron detalles morfológicos, texturales y estructurales que permiten comprender los procesos de mineralización que dieron lugar a la formación de estos minerales.

En las muestras QDH-006 y QDH-08-D, se observó que la pirita es uno de los minerales predominantes. Se presenta con formas euhedrales, subhedrales y anhedrales, diseminada en la ganga y rellenando microfracturas. En varias imágenes, la pirita muestra reemplazos parciales del rutilo, lo que evidencia que este último cristalizó en una etapa previa a la formación de la pirita. Esta relación textural sugiere una secuencia de mineralización donde el rutilo representa una fase temprana dentro del proceso hidrotermal hipógeno.

Asimismo, se identificaron calcopirita y bornita en menor proporción. La calcopirita se presenta en forma de cristales anhedrales dispersos en la ganga, con tamaños de hasta 0,095 mm. Se constató que, en ciertos sectores, la calcopirita reemplaza tanto a la pirita como al rutilo, indicando una etapa de mineralización de cobre posterior a la formación de estos minerales. Por su parte, la bornita mostró un reemplazo más intenso de la pirita, con remanentes de este mineral atrapados en su estructura, lo cual sugiere una evolución progresiva del sistema hidrotermal hacia condiciones más ricas en cobre.

La molibdenita, observada únicamente en la muestra QDH-006, se presentó con un hábito lamelar subhedral y tamaños de hasta 0,060 mm. Se localizó principalmente en los intersticios de la ganga y en microfracturas, lo que indica una etapa de mineralización tardía vinculada a fluidos hidrotermales residuales. La distribución de molibdenita en zonas de fracturación sugiere un proceso de precipitación asociado a una etapa final de actividad hidrotermal.

El análisis fotomicrográfico también reveló una variedad de texturas, como el relleno de espacios vacíos y texturas de reemplazo, que reflejan una compleja historia de mineralización en múltiples etapas. La observación detallada de estas texturas permitió establecer una secuencia paragenética precisa para el yacimiento de Cerro de Pasco y proporcionó una base sólida para interpretar los procesos metalogénicos responsables de la formación de los minerales opacos presentes en las muestras.

5.7.1. Muestra -01

Descripción microscópica

La muestra se halla integrada por los minerales que a continuación se describen sus rasgos micrográficos:

Pirita

Este mineral se halla dentro de las microfracturas y consecuentemente se exhiben como microvenillas, también están diseminadas; en ambos casos presentan formas que varían de euhedrales a anhedrales y con tamaños hasta de 0,540 mm de longitud; en las microvenillas, cuando están como agregados microgranulares, se manifiestan como microplayas alargadas.

Rutilo

Diminutos cristales están incluidos en las gangas, donde se manifiestan como remanentes, por lo que sus formas varían desde subhedrales a anhedrales y con tamaños hasta de 0,028 mm de longitud; en algunos sectores están aglomerados y de ese modo han sido reemplazados por las piritas.

Calcovugiupirita

Escasos cristales anhedrales de calcopirita están dispersos en las gangas, tienen tamaños hasta de 0,060 mm de longitud; algunas han reemplazado a los rutilos.

Bornita

Al igual que la calcopirita, escasos cristales de bornita, con formas anhedrales están muy dispersos en las gangas, sus tamaños son hasta de 0,085 mm de longitud; han reemplazado a algunas piritas.

Molibdenita

Con formas subhedrales y con hábito lamelar algo flexionados, y aglomerados, están diseminados en las gangas, ubicados en los intersticios de las gangas, aparentemente están dentro de los minerales de alteración; sus tamaños son hasta de 0,060 mm de longitud.

Tabla. 2 Distribución volumétrica porcentual, muestra 1

| MINERALES | % HIPOGENOS | % SUPERGENOS |
|------------------|--------------------|---------------------|
| Rutilo | 0,50 | |
| Pirita | 5,00 | |
| Molibdenita | 0,01 | |
| Calcopirita | Trz | |
| Bornita | | Trz |
| Gangas | 94,49 | |
| TOTAL | 100,00 | |

Textura

Relleno de espacios vacíos y diseminado

Paragénesis

A.- Depositación hipógena de los minerales:

1. Rutilo
2. Pirita
3. Molibdenita
4. Calcopirita
5. Bornita

Observaciones

Aparentemente, las molibdenitas estarían como relleno de algunas microfracturas.

Fotomicrografías

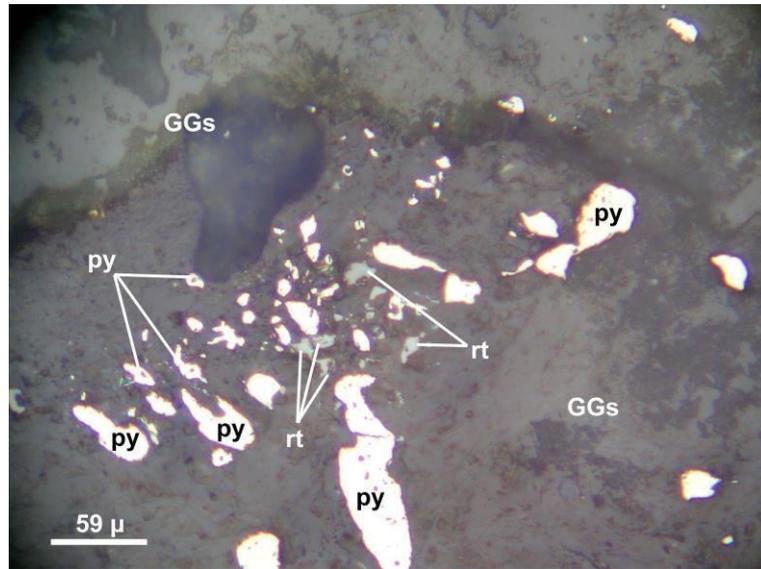


Figura 5. Cristales anhedrales de pirita (py) y de rutilo (rt), están algo aglomerados en un sector de la muestra, aparentemente en la zona de mayor alteración de la roca. 200X.

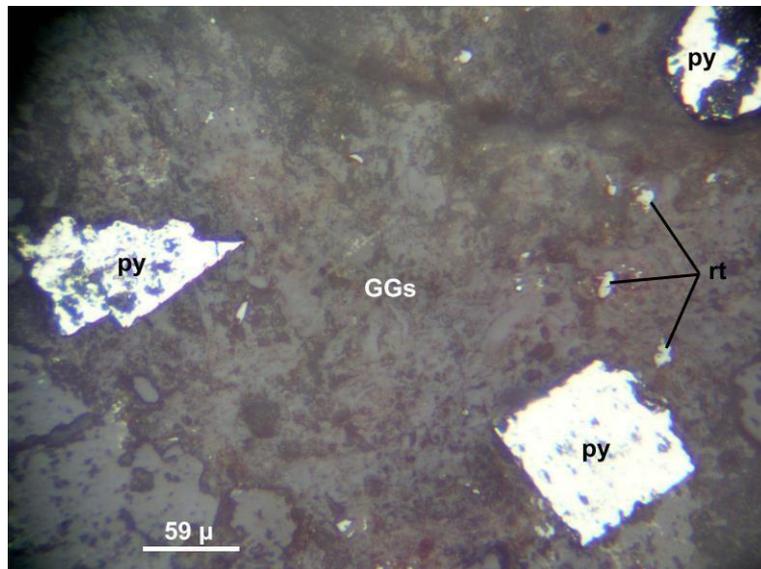


Figura 6. Cristales euhedrales, subhedrales y anhedrales de pirita (py), están diseminadas en las gangas (GGs). 200X.

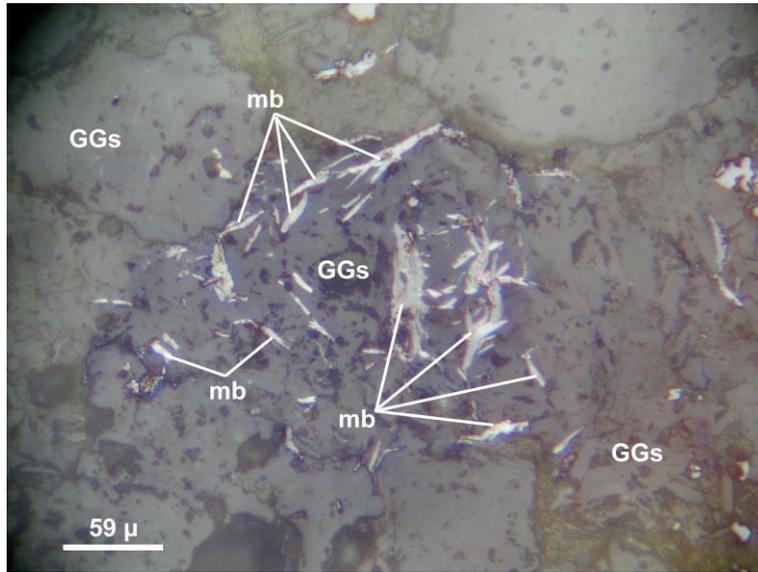


Figura 7. Cristales lamelares de molibdenita (mb) están algo concentrados en un sector de la ganga (GGs) con mayor alteración. 200X.

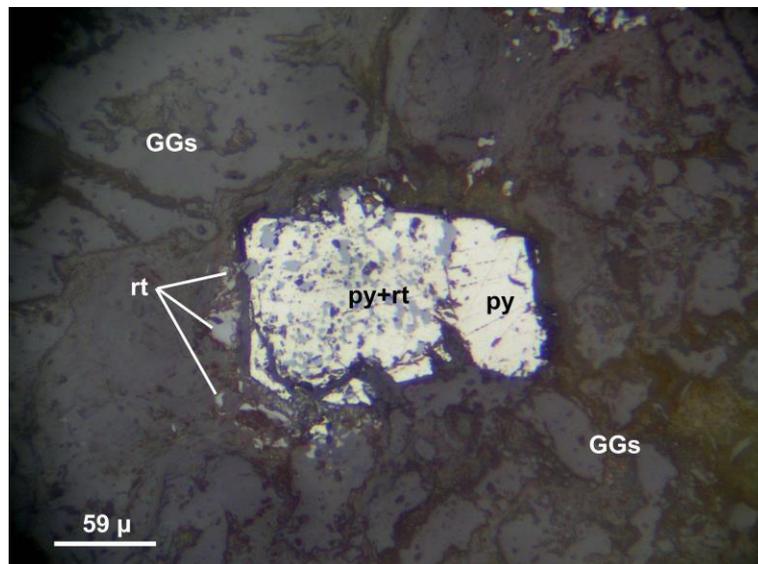


Figura 8. Cristal subhedral de pirita (py) mostrando intenso reemplazamiento hacia el rutilo (rt), motivo por lo que este último mineral se halla como remanentes, todos están dentro de la ganga (GGs). 200X.

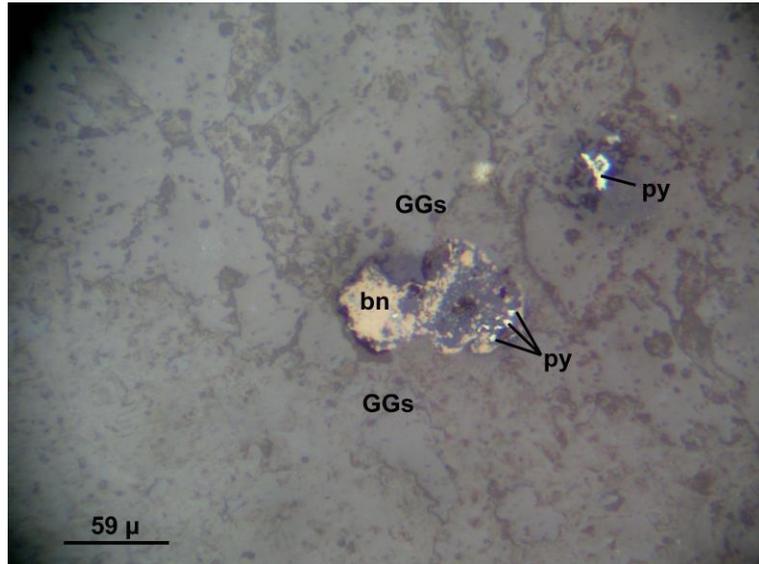


Figura 9. Cristal anhedral de bornita (bn) ha reemplazado intensamente a la pirita (py), consecuencia de ellos se observan remanentes de este mineral dentro de la bornita; adyacente se observa a la pirita (py) anhedral; todas ellas están diseminadas. 200X.

5.7.2. Muestra 02

Descripción microscópica

La muestra se halla constituida por los minerales que a continuación se describen sus rasgos micrográficos:

Pirita

Este mineral se halla diseminado y como relleno de algunas microfracturas, tienen formas que varían de subhedrales a anhedrales y con tamaños hasta de 0,175 mm de longitud; algunas están parcialmente reemplazadas por las calcopiritas y otras han reemplazado parcialmente a los rutilos.

Calcopirita

Cristales anhedrales de calcopirita se hallan diseminadas en las gangas, presentan tamaños hasta de 0,095 mm de longitud; en algunos sectores aparentan estar como relleno de algunas microfracturas y algo concentrados, donde han englobado y reemplazado a las piritas y a los rutilos. Algunos cristales se encuentran dentro de

algunos microclastos, en este caso también están diseminadas.

Rutilo

Como relleno de los espacios que rodean a los microclastos, donde se manifiestan con formas anhedrales, algo concentrados; mientras que en los microclastos están ubicados en los clivajes de éstos, consecuentemente están alineados; en este caso también son anhedrales, pero con cierto hábito prismático. Sus tamaños son hasta de 0,060 mm de longitud.

Distribución volumétrica porcentual

Tabla. 3 Distribución volumétrica porcentual, muestra 2

| MINERALES | % HIPOGENOS | % SUPERGENOS |
|------------------|--------------------|---------------------|
| Rutilo | 0,50 | |
| Pirita | Trz | |
| Calcopirita | 0,10 | |
| Gangas | 99,40 | |
| TOTAL | | 100,00 |

Textura

Relleno de espacios vacíos y diseminados.

Paragénesis

A.- Depositación hipógena de los minerales

1. Rutilo
2. Pirita
3. Calcopirita

Observaciones

Las calcopiritas están ubicadas en las áreas que rodean a los microclastos de brecha.

Fotomicrografías

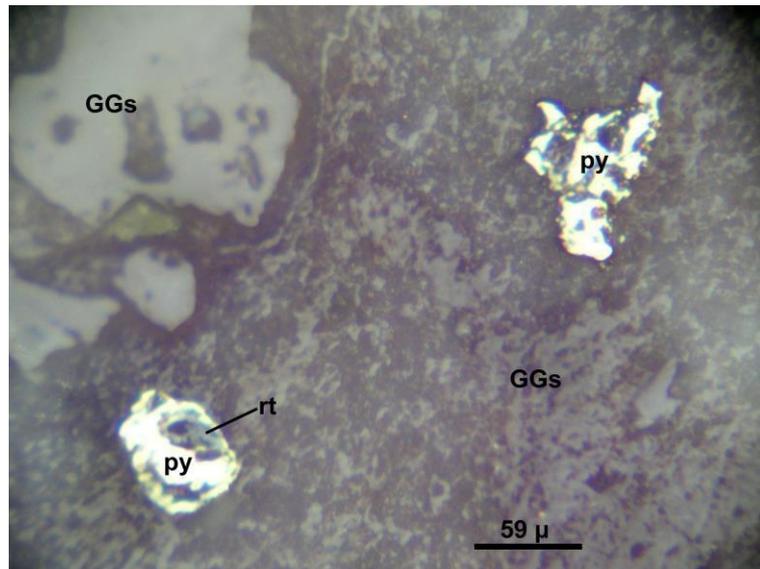


Figura 10. Cristales anhedrales de pirita (py) están diseminadas en las gangas (GGs); una de ellas ha reemplazado al rutilo (rt), por lo que este mineral se observa como remanente esquelético dentro de la pirita (py). 200X.

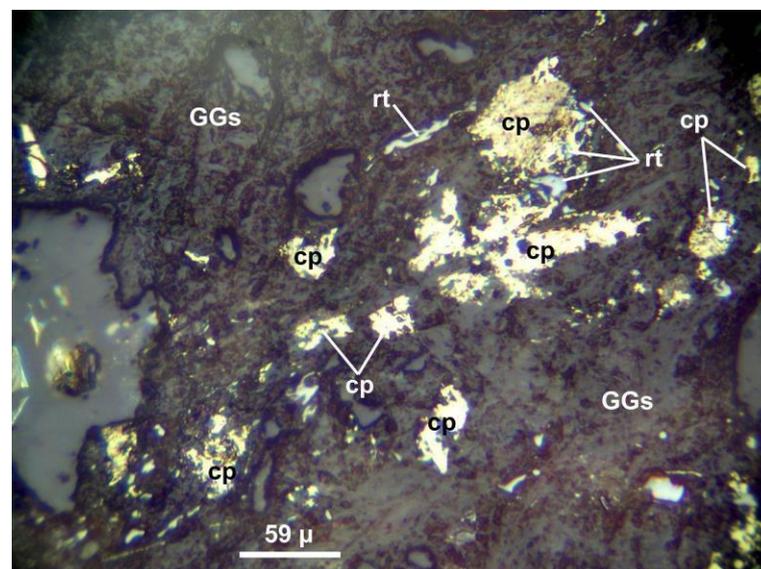


Figura 11. Cristales anhedrales de calcopirita (cp) algo concentrados, algunos de ellas han reemplazado al rutilo (rt); todos están diseminados en las gangas (GGs). 200X.

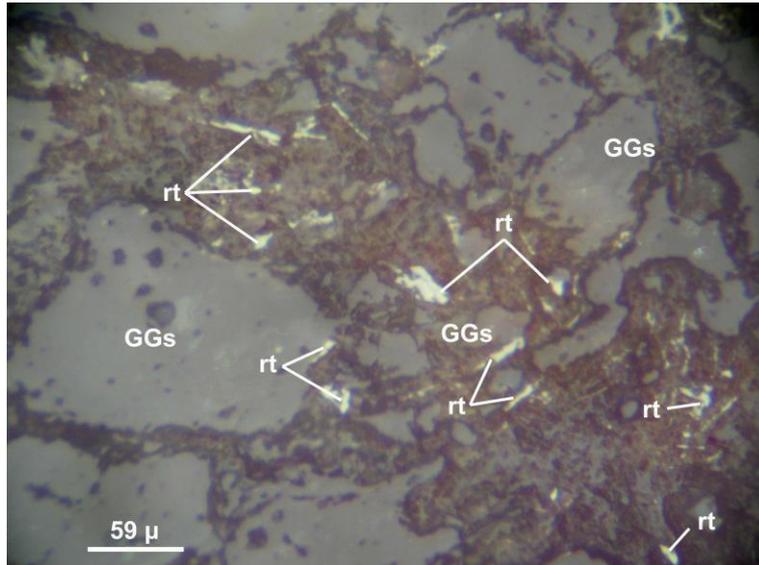


Figura 12. Cristales anhedrales de rutilo (rt) con hábito algo acicular, están ubicados en la zona que rodean a las gangas (GGs) integrantes de los microclastos de la microbrecha. 200X.

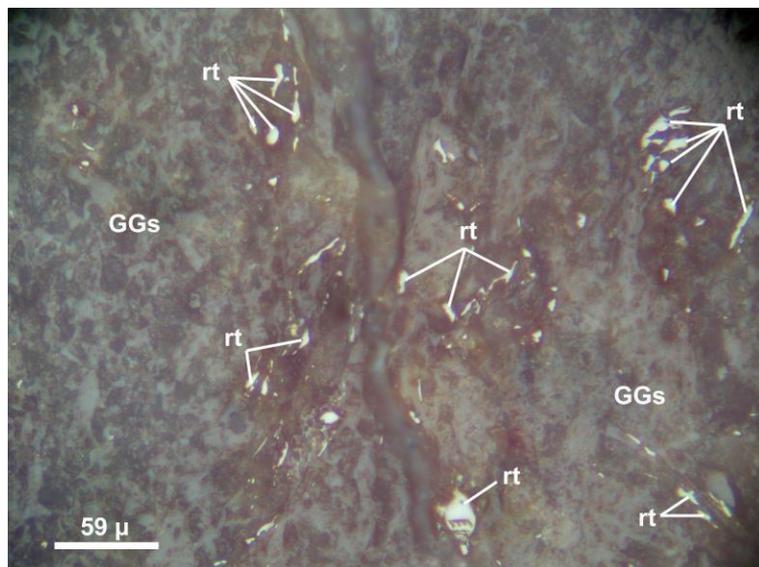


Figura 13. Cristales aciculares de rutilo (rt) están ubicados en los clivajes de los microclastos que integran la roca, posiblemente pizarras. 200X.

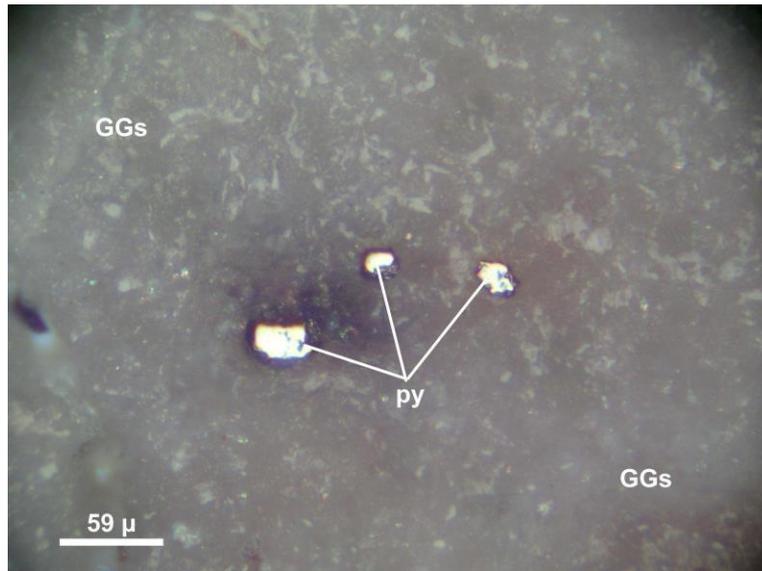


Figura 14. Cristales subhedrales y anhedrales de pirita (py) están diseminados en las gangas (GG

s). 200X.

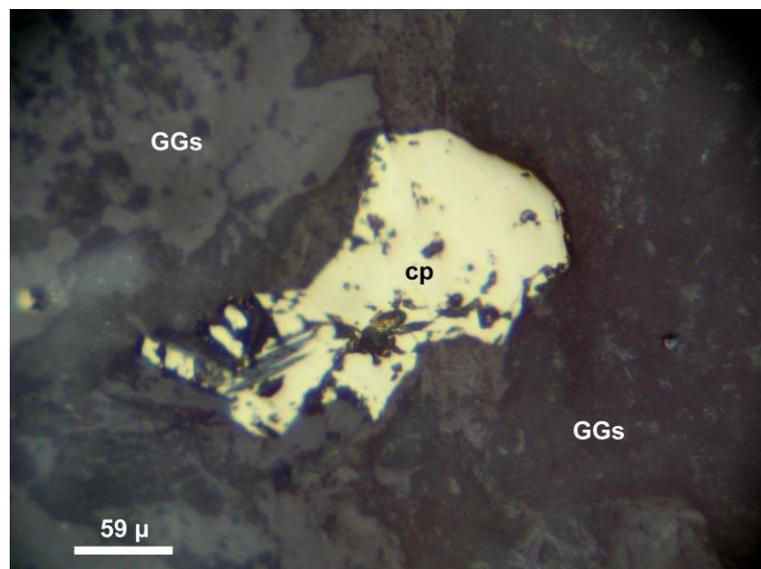


Figura 15. Cristal anhedral de calcopirita (cp) está diseminada y ubicada en la zona de mayor alteración de la ganga (GGs). 200X.

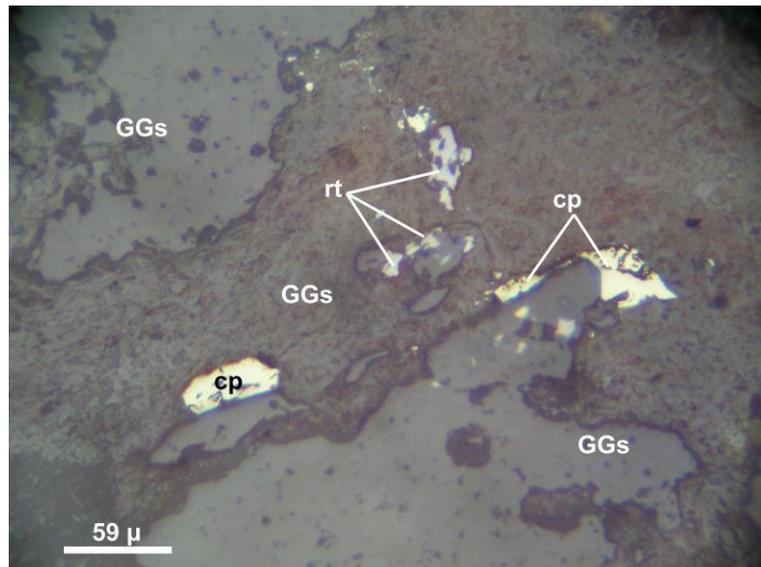


Figura 16. Cristales anhedrales de calcopirita (cp) y de rutilo (rt) están dentro del sector que engloban a los microclastos de brecha, es decir, la matriz. 200X.

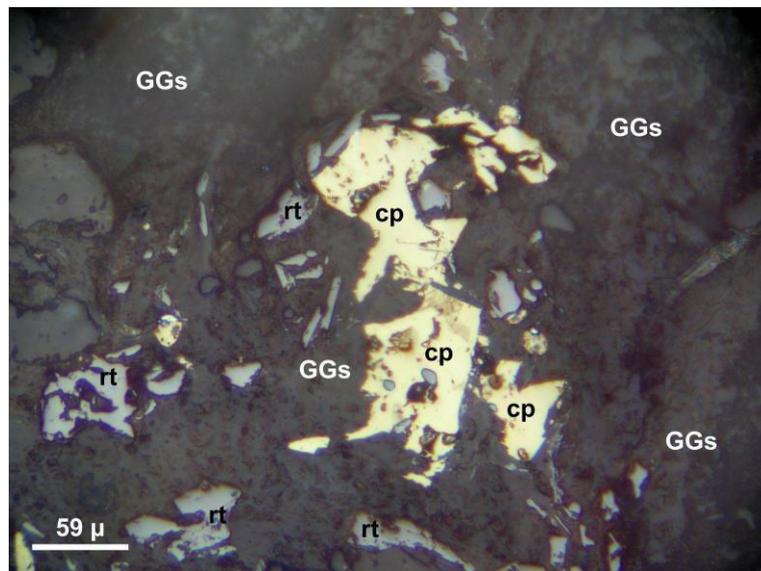


Figura 17. Cristales anhedrales de calcopirita (cp) dentro de la zona de mayor alteración de las gangas (GGs), algunos de ellos han reemplazado y englobado al rutilo (rt), éstos últimos también están diseminados, pero en esta vista muestran cierta concentración. 200X.

5.8. Minerales opacos presentes

5.8.1. Pirita

La pirita es uno de los minerales más abundantes encontrados en las muestras QDH-006 y QDH-08-D. Se presenta en diversas formas, desde euhedrales hasta anhedrales, con tamaños que varían entre 0,175 mm y 0,540 mm. Se encuentra principalmente en microfracturas, donde forma microvenillas o está diseminada en la ganga. En la muestra QDH-006, la pirita presenta una intensa asociación con rutilo, a menudo reemplazándolo parcialmente, lo que sugiere una relación genética de etapas sucesivas de mineralización. Esta interacción se observa en las fotomicrografías donde remanentes de rutilo aparecen encapsulados dentro de la pirita. En la muestra QDH-08-D, la pirita actúa también como relleno de microfracturas, aunque con tamaños menores y reemplazada en algunos sectores por calcopirita. La presencia de pirita en ambas muestras, asociada a procesos de alteración y relleno, indica un evento de mineralización hipógena. Esta distribución y sus características texturales sugieren condiciones de precipitación en sistemas hidrotermales polimetálicos, típicos de los depósitos de Cerro de Pasco.

5.8.2. Rutilo y molibdenita

El rutilo se encuentra presente en ambas muestras con una distribución volumétrica de 0,50%. En la muestra QDH-006, aparece como diminutos cristales subhedrales a anhedrales, de hasta 0,028 mm, incluidos en la ganga y reemplazados parcialmente por pirita y calcopirita. En QDH-08-D, el rutilo presenta un hábito prismático y acicular, localizado alrededor de microclastos y en clivajes de brechas, mostrando una cierta concentración en zonas de mayor alteración. Este mineral indica una cristalización temprana en la paragénesis hipógena.

La molibdenita, por otro lado, se presenta únicamente en la muestra QDH-006, con una presencia de 0,01%. Se observa con formas subhedrales y hábito lamelar, en ocasiones ligeramente flexionado. Está diseminada en los intersticios de la ganga, asociada a zonas de microfracturación. Esta mineralización de molibdenita en conjunto con la pirita y el rutilo sugiere una etapa tardía de precipitación hidrotermal y un potencial enriquecimiento de metales asociados al sistema mineralógico polimetálico.

5.8.3. Calcopirita y bornita

La calcopirita se encuentra en ambas muestras con distribución porcentual trazas (Trz) en QDH-006 y 0,10% en QDH-08-D. Se presenta como cristales anhedrales dispersos en la ganga, con tamaños que alcanzan hasta 0,095 mm. En QDH-006, reemplaza parcialmente a rutilo y pirita, sugiriendo una secuencia de mineralización donde la calcopirita cristaliza después de estos. En QDH-08-D, la calcopirita se observa concentrada en áreas de microfracturas y alrededor de microclastos de brechas, reflejando una deposición controlada por la estructura de la roca huésped.

La bornita aparece solo en la muestra QDH-006 en trazas (Trz). Se presenta con formas anhedrales y tamaños de hasta 0,085 mm. La bornita reemplaza a la pirita de manera intensa, dejando remanentes de pirita dentro de sus cristales, como se evidencia en las fotomicrografías. Esta relación sugiere una etapa de enriquecimiento en cobre posterior a la formación de pirita, lo que es característico de procesos de alteración hidrotermal en yacimientos polimetálicos. La bornita y calcopirita indican un evento de mineralización de cobre que podría estar vinculado a la actividad hidrotermal en el depósito de Cerro de Pasco.

CAPÍTULO VI

DISCUSIONES DE RESULTADOS

En este capítulo, se analizan los resultados obtenidos en el estudio de los minerales opacos del yacimiento de Cerro de Pasco, comparándolos con investigaciones previas para fortalecer las conclusiones de la presente tesis. Se profundiza en las características observadas en las muestras QDH-006 y QDH-08-D y se interpretan los hallazgos en función de los procesos metalogénicos y las condiciones geológicas del depósito.

Los análisis realizados en las muestras revelan una clara presencia de minerales opacos como pirita, rutilo, calcopirita, bornita y molibdenita. Esta composición es consistente con estudios previos que identifican una paragénesis similar en depósitos polimetálicos de la región central del Perú (19). La pirita, siendo el mineral predominante, muestra una distribución del 5,00% en la muestra QDH-006 y en trazas en la muestra QDH-08-D. La presencia de pirita con formas euhedrales, subhedrales y anhedrales, tanto en microfracturas como diseminada en la ganga, sugiere una cristalización en múltiples etapas. Esta variación de formas y tamaños es característica de los procesos hidrotermales observados en depósitos de reemplazo en Cerro de Pasco (20).

El rutilo, presente en ambas muestras con una proporción de 0,50%, indica condiciones de alta temperatura durante las etapas iniciales de la mineralización. Investigaciones en depósitos cercanos también reportan la presencia de rutilo como mineral accesorio en ambientes de skarn y reemplazo, lo que respalda su inclusión en

la secuencia paragenética propuesta (21). La relación de reemplazo entre rutilo y pirita, donde el rutilo aparece como remanente dentro de la pirita, sugiere una cristalización temprana del rutilo, seguida por un evento de sulfidación que generó la pirita.

Por otro lado, la coexistencia de sulfuros de cobre como calcopirita y bornita con pirita refuerza la hipótesis de una etapa de mineralización de cobre posterior. La calcopirita se presenta en forma de cristales anhedrales dispersos en la ganga y reemplazando parcialmente a la pirita y al rutilo. Esta relación de reemplazo es común en sistemas hidrotermales polimetálicos de la región central del Perú (20). Asimismo, la bornita, que también reemplaza a la pirita, indica una fase de enriquecimiento en cobre más tardía, coherente con otros estudios realizados en el distrito minero de Cerro de Pasco (22).

La presencia de molibdenita, aunque en menor proporción (0,01%), es significativa para entender la evolución del sistema hidrotermal. La molibdenita, con su hábito lamelar y ubicación en microfracturas, sugiere una etapa tardía de mineralización vinculada a fluidos magmáticos residuales. Esta interpretación es respaldada por estudios en depósitos similares, donde la molibdenita suele asociarse a intrusiones ígneas en fases finales de actividad hidrotermal (21).

Al comparar los resultados con otros yacimientos polimetálicos de la región central del Perú, se observa una similitud en la asociación de minerales opacos y en la secuencia de eventos mineralizantes. Por ejemplo, en el yacimiento de Colquijirca, cercano a Cerro de Pasco, se ha documentado una paragenesis que incluye pirita, calcopirita, bornita y molibdenita, lo que refuerza la validez de los hallazgos de este estudio (19). Además, las texturas observadas, como el relleno de espacios vacíos y los reemplazos parciales, son consistentes con descripciones de otros depósitos de reemplazo en la región (20).

Por ende, los resultados obtenidos en este estudio son coherentes con la información disponible en la literatura científica sobre la mineralogía y metalogenia de los yacimientos polimetálicos de Cerro de Pasco. La asociación de minerales opacos identificada y la secuencia paragenética propuesta proporcionan una comprensión más profunda de los procesos geológicos que dieron origen al yacimiento, fortaleciendo las bases para futuras investigaciones y exploraciones en la zona.

CONCLUSIONES

1. La investigación permitió caracterizar los procesos geológicos, geoquímicos y físico-químicos responsables de la formación y evolución de los minerales opacos en el yacimiento de Cerro de Pasco, alcanzando el objetivo general propuesto. Los datos obtenidos evidencian que el sistema hidrotermal de la región, de carácter policíclico, favoreció la formación de sulfuros metálicos como pirita, con un 5% de representación en las muestras analizadas, además de trazas de calcopirita y bornita, y proporciones mínimas de molibdenita (0,01%). Estas mineralizaciones se desarrollaron en un contexto tectónico activo, donde fracturas y microclastos actuaron como conductos principales para los fluidos mineralizantes. Aunque las gangas representan el 94-99% del volumen de las muestras, este estudio logró una comprensión relevante de las dinámicas formativas, aportando información útil para la exploración y gestión sostenible, aunque con limitaciones en términos de su viabilidad económica a gran escala.
2. Los resultados confirman que las estructuras geológicas tuvieron un rol crucial en la distribución de los minerales opacos, cumpliendo con el objetivo específico de analizar estas relaciones. Las fracturas y microclastos favorecieron la circulación de fluidos hidrotermales y la deposición de minerales en espacios vacíos. La pirita se formó durante etapas iniciales del sistema, mientras que la calcopirita y la bornita surgieron en etapas posteriores, reemplazando parcialmente a otros minerales. Las texturas observadas, como los reemplazos y el relleno de fracturas, respaldan la conclusión de que la tectónica local fue un factor determinante en los procesos mineralizantes.
3. En cuanto a las fuentes magmáticas y los procesos hidrotermales responsables de la génesis de los minerales opacos, el análisis identificó aportes magmáticos que enriquecieron los fluidos hidrotermales en sílice y sulfuros metálicos. El rutilo, presente en un 0,50%, fue el precursor en la paragenesis, seguido por la formación de pirita, calcopirita y bornita en un sistema controlado por fluctuaciones químicas y térmicas. Sin embargo, la ausencia de análisis isotópicos limita una identificación más precisa de estas fuentes, representando una oportunidad para investigaciones futuras que profundicen en la relación entre los eventos magmáticos y la mineralización observada.

Finalmente, se estableció una secuencia paragenética precisa donde el rutilo cristalizó

primero, seguido por la pirita y, en etapas más tardías, por molibdenita, calcopirita y bornita. Este orden refleja cambios en las condiciones físico-químicas del sistema, como temperatura, presión y composición de los fluidos. Las texturas de reemplazo y disseminación indican un sistema dinámico que evolucionó en múltiples etapas. Estas condiciones físico-químicas, controladas por la interacción entre los fluidos y las rocas huésped, permitieron la formación de las mineralizaciones observadas, cumpliendo con el objetivo de describir estas variables y sentando las bases para futuras estrategias de exploración en la región.

RECOMENDACIONES

1. Con base en los hallazgos de esta investigación, se recomienda ampliar los estudios mediante la inclusión de análisis geoquímicos e isotópicos que permitan identificar con mayor precisión las fuentes de los fluidos hidrotermales y las condiciones exactas de formación de los minerales opacos. Este enfoque fortalecería el entendimiento de los procesos metalogénicos en Cerro de Pasco y su relación con los eventos magmáticos regionales, proporcionando información clave para futuras exploraciones. A nivel metodológico, se sugiere aumentar la cantidad de muestras analizadas para mejorar la representatividad estadística de los resultados, lo que permitiría una caracterización más robusta y generalizable del yacimiento.
2. Desde una perspectiva académica, sería valioso fomentar la colaboración entre instituciones educativas y la industria minera para desarrollar investigaciones que integren técnicas avanzadas, como espectroscopía y modelado geológico en tres dimensiones. Estos estudios podrían enriquecer la formación de nuevos especialistas en geología y minería, además de generar conocimiento aplicable a otros yacimientos similares. Asimismo, se recomienda la elaboración de programas de capacitación para estudiantes y profesionales, centrados en el uso de herramientas petrográficas y técnicas de análisis mineralógico para interpretar datos de sistemas hidrotermales complejos.
3. En el ámbito práctico, las organizaciones mineras podrían implementar estrategias para explorar zonas cercanas con características similares al yacimiento estudiado, aprovechando la información obtenida sobre la secuencia paragenética y las estructuras geológicas. Estas exploraciones deben realizarse bajo principios de sostenibilidad, minimizando el impacto ambiental y utilizando prácticas de extracción más eficientes basadas en el conocimiento detallado de los procesos de mineralización. También se sugiere desarrollar planes de monitoreo ambiental y social que permitan mitigar los efectos de las actividades mineras en las comunidades locales y en el ecosistema circundante. Finalmente, la implementación de estas acciones contribuirá no solo al desarrollo económico de la región, sino también a la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones mineras en Cerro de Pasco.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. SOLIS LUCIANO, M. Estructuras de mineralización del yacimiento minero de Atacocha – Cerro de Pasco. Tesis, 2020.
- [2]. COTRINA SANTIAGO, G. Caracterización de la geoquímica magmática y su relación con la mineralización de Cu – Au (10°38' – 10°48' Latitud Sur), Cerro de Pasco. Tesis, 2019.
- [3]. QUISPE CÁRDENAS, C. Geología, geoquímica y mineralogía del yacimiento portador de indio de Ayawilca, Pasco, Perú. Tesis, 2020. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16709>.
- [4]. ACOSTA ALE, J. y SEMPERE, T. Evolución tectónica y metalogénesis del Perú. Tesis, 2017.
- [5]. CASAVARDE MERCADO, J. Geología y metalogénesis del proyecto pórfido cuprífero Trapiche (Mollebamba-Apurímac-Perú). Tesis, 2004. Disponible en: <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/12129>.
- [6]. MORENO MARÍN, J. y SILVA QUISPE, M. Caracterización petrominerográfica y su relación con la clasificación del depósito Las Vizcachas - La Libertad 2020. Tesis, 2020.
- [7]. ESPINOZA MONTREUIL, J. Caracterización geológica y metodología de estimación de recursos en vetas angostas del Batolito de Pataz. Tesis, 2018. Disponible en: http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/430/1/T026_40977937_T.pdf.
- [8]. BOUHIER, V. Metalogénesis del depósito polimetálico Loma Galena, Proyecto Navidad, Chubut. Tesis, 2019. Disponible en: <https://repositorio.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4053>.
- [9]. RUIZ, R. Geología y mineralizaciones del sector sudoccidental del Macizo del Deseado, Santa Cruz. Tesis, 2012.
- [10]. AGUILAR GÓMEZ, M. "Polarización de la luz y aplicaciones en óptica". Revista de Óptica Aplicada, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 112-118. Disponible en: <https://www.revistaoptica.edu.mx/polarizacion-112>.
- [11]. SÁNCHEZ LÓPEZ, P. Estudio de refracción y reflexión de la luz en medios anisotrópicos. Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Lima, 2020. Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/tesis-refraccion-reflexion>.
- [12]. CASTRO PÉREZ, J. "Caracterización óptica de minerales opacos en yacimientos polimetálicos". Boletín de Mineralogía Aplicada, 2021, vol. 45, no. 3, pp. 230-235. Disponible en: <https://www.boletinmineralogia.com/opacos-cerro>.

- [13]. HUAMÁN VILCA, J. Geología y mineralización del yacimiento de Cerro de Pasco. Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2018. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/cerro-pasco-yacimiento>.
- [14]. RIVERA RAMOS, M. Metalogénesis de yacimientos hidrotermales en la región central del Perú. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2019. Disponible en: <https://cybertesis.uni.edu.pe/metalogénesis-peru>.
- [15]. AGUILAR GÓMEZ, M. "Polarización de la luz y aplicaciones en óptica". Revista de Óptica Aplicada, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 112-118. Disponible en: <https://www.revistaoptica.edu.mx/polarizacion-112>.
- [16]. MARTÍNEZ HUERTA, E. Mineralogía aplicada a la industria minera. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 2018. Disponible en: <https://repositorio.unam.mx/mineralogia-industria>.
- [17]. TORRES QUISPE, S. Introducción a la óptica de minerales anisotrópicos. Cusco: Editorial Científica Andina, 2017. Disponible en: <https://editorialandina.com/optica-anisotropicos>.
- [18]. PÉREZ RIVERA, A. "Índices de refracción en minerales aplicados a la identificación petrográfica". Revista de Ciencias Geológicas, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 78-85. Disponible en: <https://revistageo.edu.pe/refraccion-minerales>.
- [19]. RODRÍGUEZ MEJÍA, R., CUEVA TINTAYA, E., & CARLOTTO CAILLAUX, V. S. Geología del cuadrángulo de Cerro de Pasco, hoja 22-k, escala 1:50,000. Boletín Serie A: Carta Geológica Nacional, No. 144. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). 2011. Disponible en: https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/106/6/A-144-Boletin_Cerro_de_Pasco-22k.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [20]. ESPINOZA BRUNO, M. Metalogénesis de los depósitos polimetálicos en la región central del Perú. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. 2017. Disponible en: https://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/431/1/TESIS%20MIGUEL%20ESPINOZA%20BRUNO.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [21]. LÓPEZ ROJAS, E. Análisis estructural de la falla longitudinal de Cerro de Pasco y su influencia en los depósitos de minerales. Tesis de licenciatura, Universidad Alas Peruanas. 2018. Disponible en: https://repositorio.uap.edu.pe/jspui/bitstream/20.500.12990/2426/1/Tesis_reducci%C3%B3n%20accidentes_desprendimiento%20roca_uso%20sostenimiento%20mecanizado_ernos%20de%20anclaje_en%20tajeos%20de%20producci%C3%B3n_Cerro%20SAC.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [22]. LEDESMA VELITA, M. Sistema de explotación minera en la ciudad de Cerro de

Pasco y la influencia en la economía local. Tesis de maestría, Universidad Nacional
Daniel Alcides Carrión. 2016. Disponible en:
https://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1381/1/Dr.%20Magno%20LEDESMA%20VELITA.pdf?utm_source=chatgpt.com