

Petrographic characterization to identify the exploitable mineral resources at the Paredones mine, San Bernardino, Cajamarca – 2025

Andrea Huamán¹ ; Diego Tasilla² ; Julio Carmona³ ; Rosa Pérez⁴  and Shonel Cáceres⁵ 

^{1,5}Universidad Privada del Norte, Perú, n00284348@upn.pe¹, n00276598@upn.pe², n00264665@upn.pe³, shonel.caceres@upn.edu.pe⁴

Abstract – *Our study focused on identifying the main mineral species present at the Paredones mine in Cajamarca, and characterizing their geochemical properties to assess the potential for exploitable minerals and the possible reactivation of mining operations. Twelve samples were collected: five for petrographic analysis using thin sections observed with an OPTIKA B-510POL-I trinocular polarizing petrographic microscope with HDMI/USB input, 4K/8 MP CMOS sensor (OPTIKA OP-A-0033), and an illuminator; and seven for geochemical studies, determining mineral concentration and average grade. The local geology includes andesites, tuffs, and volcanic breccias with pyroclastic, porphyritic, and infill textures, affected by potassic, phyllic, and propylitic alteration. The identified ore minerals are galena, chalcopyrite, and bornite, while the gangue consists of quartz, epidote, pyrite, and sericite. The geochemical analysis included spatial interpolation using Regularized Splines, which allowed for the identification of significant anomalies of Au, Ag, Cu, Pb, and Zn and the definition of areas of greater economic interest. The observed hydrothermal zonation, along with the mineralogical associations and geochemical results, demonstrates the presence of a polymetallic system with high economic potential, confirming that petro-mineragraphic and geochemical characterization is essential for identifying exploitable minerals and guiding sustainable exploration and exploitation strategies.*

Keywords-- *Petrographic characterization, ore, gangue, mineralization.*

Caracterización petrográfica para identificar los recursos minerales explotables en la mina Paredones, San Bernardino, Cajamarca – 2025

Resumen– Nuestro estudio se centró en identificar las principales especies minerales presentes en la mina Paredones, Cajamarca, y caracterizar sus propiedades geoquímicas para evaluar el potencial de minerales explotables y la posible reactivación de la operación minera. Se recolectaron 12 muestras: 5 para análisis petrográfico mediante láminas delgadas observadas con microscopio petrográfico trinocular de polarización OPTIKA B-510POL-I con cámara, de entrada, HDMI/USB, 4K/8 MP CMOS - OPTIKA OP-A-0033 y un iluminador, y 7 para estudios geoquímicos, determinando la concentración de minerales y la ley promedio. La geología local incluye andesitas, tobas y brechas volcánicas, con texturas piroclásticas, porfídicas y de relleno, afectadas por alteraciones potásica, filica y propilitica. Los minerales de mena identificados son galena, calcopirita y bornita, mientras que la ganga está compuesta por cuarzo, epidota, pirita y sericita. El análisis geoquímico incluyó interpolación espacial mediante Spline Regularizado, lo que permitió identificar anomalías significativas de Au, Ag, Cu, Pb y Zn y definir zonas de mayor interés económico. La zonación hidrotermal observada, junto con las asociaciones mineralógicas y los resultados geoquímicos, evidencia la presencia de un sistema polimetálico con alto potencial económico, confirmando que la caracterización petro-minerográfica y geoquímica es esencial para identificar minerales explotables y orientar estrategias de exploración y explotación sostenibles.

Palabras clave — Caracterización petrográfica, mena, ganga, mineralización.

I. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de reservas ha impulsado la explotación de minerales más complejos, haciendo esencial la caracterización mineralógica y el análisis petrográfico para identificar propiedades, asociaciones y alteraciones minerales, optimizar la extracción y mejorar la eficiencia operativa. [1]. Asimismo, el análisis petrográfico facilita la identificación de asociaciones minerales, tipos de mineralización y posibles alteraciones presentes en las rocas

La creciente complejidad de los yacimientos ha impulsado el uso de herramientas técnicas para mejorar la eficiencia minera. En este contexto, el Perú destaca como país minero líder, donde la minería es un pilar económico que genera empleo, infraestructura y bienestar. [2]. Asimismo, una gestión responsable y sostenible de la actividad minera favorece la inversión y el desarrollo a largo plazo.

En este contexto, la caracterización petrográfica adquiere un rol fundamental en la minería, ya que permite comprender la composición, textura y asociaciones minerales de los yacimientos.

Esta herramienta contribuye a optimizar los procesos de exploración, explotación y beneficio, favoreciendo una gestión más eficiente y sostenible de la actividad minera.

La identificación mineralógica mediante microscopio de polarización se basa en el análisis de las propiedades ópticas y morfológicas de las fases cristalinas. La microscopía en luz transmitida permite estudiar minerales transparentes y formadores de roca, así como sus procesos de alteración, siendo fundamental para la caracterización petrográfica [3], mientras que la microscopía en luz reflejada se emplea en el análisis de minerales opacos y constituye el método principal de la caracterización minerográfica, [4] ello permite una comprensión integral de la composición y naturaleza de la mineralización presente en las muestras analizadas.

El análisis se realizó a partir de una lámina delgada de 4×2 cm, con el objetivo de determinar la textura y composición mineralógica de la muestra y optimizar el beneficio de la mena. La caracterización petrográfica permite identificar minerales de mena, asociaciones y texturas relevantes para la exploración, así como definir la secuencia paragenética y el potencial económico del yacimiento [5].

En 2024, el subsector minero aportó aproximadamente 9.0 % al PBI nacional, consolidándose como uno de los sectores económicos más relevantes del país. Ese mismo año, las exportaciones mineras alcanzaron un récord de US 47 701 millones, con un incremento interanual de 11.5 % respecto a 2023 [6]. Asimismo, durante el primer semestre de 2025, las exportaciones superaron los US 26 553 millones, registrando un crecimiento de 16.6 % frente al mismo periodo de 2024 [7].

La región Cajamarca posee un alto potencial geológico-minero, con depósitos tipo pórfido Cu–Au, yacimientos de Au, Ag y polimetálicos, y sistemas epitermales asociados a volcanitas miocénicas. Según la Cartera de Proyectos de Inversión Minera 2025 del Ministerio de Energía y Minas, concentra aproximadamente US\$ 16 714 millones en inversión, equivalente al 26.1 % del total nacional, con ocho proyectos prioritarios, entre los que destacan Yanacocha Sulfuros, Michiquillay, Conga, El Galeno y La Granja [8].

La mina Paredones es un proyecto minero actualmente paralizado, con potencial polimetálico, ubicado al suroeste de Cajamarca, en el distrito de San Bernardino (San Pablo), dentro del corredor estructural San Pablo, reconocido por la producción de Zn, Pb y Ag. El yacimiento se emplaza en rocas volcánicas andesíticas del Terciario Superior sobre unidades cretácicas, condición favorable para la mineralización. Fue explotado entre 1952 y 1968, produciendo principalmente Zn, Pb y Ag, y presenta una mineralogía dominada por cuarzo, pirita, arsenopirita, esfalerita y galena, asociada a un depósito hidrotermal de relleno de fisuras, de tipo mesotermal a epitermal.

El objetivo principal de este estudio es determinar el impacto de la caracterización petrográfica en la identificación de los recursos minerales explotables en la mina Paredones, y así evaluar el potencial del yacimiento minero en una posible reactivación de la operación minera, lo que permitirá conocer la composición y distribución de los minerales.

Estos estudios permiten planificar una explotación futura eficiente y sostenible, asegurando la viabilidad económica y reduciendo el impacto Ambiental. La información petrográfica de campo complementa el conocimiento mineralógico de la zona y aporta al entendimiento técnico-científico de sus recursos. El estudio se enfocó en identificar las principales especies minerales de la mina Paredones y caracterizar sus propiedades geoquímicas, morfológicas, texturales y relaciones de contacto.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente capítulo comprende tres etapas metodológicas de investigación, que se detallan a continuación.

A. Trabajo de gabinete pre-campo

Se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos relacionados con la caracterización petrográfica. Además, se analizó información cartográfica y satelital de la zona de estudio y la geología regional del cuadrángulo 15-f para identificar recursos minerales explotables. Con base en ello, se definieron los procedimientos de levantamiento geológico local, el diseño del muestreo petrográfico, los análisis de laboratorio y la planificación logística del estudio.

B. Trabajo de campo

Esta etapa fue fundamental, ya que permitió registrar los datos necesarios para la ubicación y delimitación de la zona de estudio mediante coordenadas UTM en el sistema WGS 84. La revisión previa de la geología regional del INGEMMET facilitó el levantamiento detallado de la geología local en los puntos seleccionados para la descripción petrográfica.

Se realizó el análisis de los puntos mapeados para el reconocimiento de minerales y rocas, así como la evaluación de las condiciones litológicas, geomorfológicas y estructurales asociadas a la Veta Murciélagu, donde se recolectaron 12 muestras tipo rock chip: cuarzo, galena, cobre, pirita, calcopirita, goetita, bornita y hematita en pequeñas cantidades. La selección de muestras se efectuó considerando criterios de representatividad geológica, variabilidad mineralógica, grado de alteración y distribución espacial dentro de la veta, priorizando aquellas que evidenciaban mayor interés económico y textural. De éstas, 5 se destinaron al estudio petrográfico por su representatividad mineralógica y textural, y 7 al análisis geoquímico según su grado de mineralización y variación composicional. El análisis petrográfico inició con el uso del microscopio Estereoscopio Universal ZEISS y posteriormente con láminas delgadas analizadas en el microscopio petrográfico Trinocular de Polarización OPTIKA B-510POL-I.



Fig. 1 Microscopio Estereoscopio Universal ZEISS, utilizado para la observación macroscópica de muestras de mano, permitiendo reconocer características morfológicas, texturales y estructurales preliminares.



Fig. 2 Microscopio Trinocular De Polarización OPTIKA B-510POL-I, utilizado para el análisis de propiedades ópticas, identificación mineralógica y caracterización textural de las muestras.

Con el fin de contextualizar la distribución geológica y el muestreo en la mina Paredones, se elaboró un plano geológico y de muestreo que integra todos los niveles de la veta Murciélagu. En la figura 4 se presenta una sección del plano donde se observa parte de los niveles 4 y 5 de dicha veta.

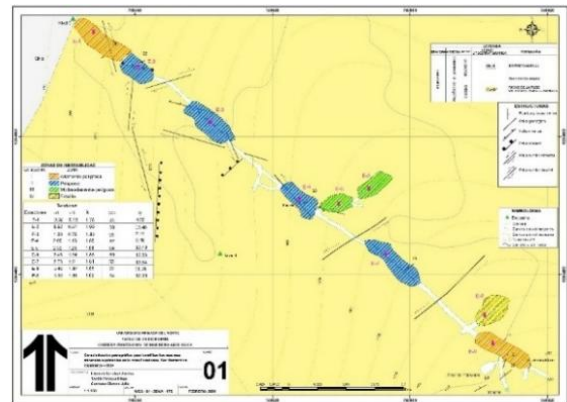


Fig. 3 Plano geológico y de muestreo de la mina paredones (Se observan todos los niveles de la veta Murciélagu)

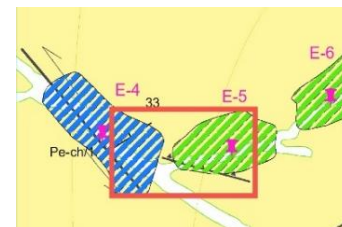


Fig. 4 Sección del Plano, donde se observa parte del nivel 4 y 5 de la veta murciélagu en la mina Paredones.

C. Trabajo de gabinete post-campo

Con la información obtenida, se recopiló y procesó la petrología y mineralogía del área. Para la caracterización

petrográfica se realizaron estudios microscópicos, para lo cual las muestras seleccionadas fueron enviadas al laboratorio y preparadas como láminas delgadas para su análisis.

El equipo empleado para el análisis petrográfico textural fue el equipo Microscopio Trinocular de Polarización OPTIKA B-510POL-I, ya que este modelo cuenta con un iluminador, cámara profesional, y cables con entrada HDMI/USB.

Para Morales, la interpretación más precisa de las texturas se logra con el microscopio petrográfico de luz transmitida, criterio que también aplica al estudio de minerales opacos mediante luz reflejada [9].



Fig. 5 Vista desde el Microscopio Estereoscopio Universal ZEISS, donde se aprecian características macroscópicas como color, morfología y rasgos texturales relevantes para la caracterización preliminar.



Fig. 6 Secciones delgadas para el estudio petrográfico, utilizadas para el análisis mineralógico y textural de las muestras bajo microscopio de polarización.

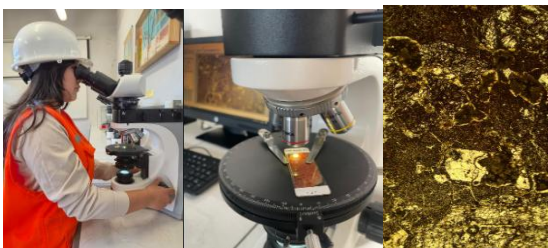


Fig. 7 Vista desde el Microscopio Petrográfico OPTIKA B-510POL-I, donde se analizan las propiedades ópticas, asociaciones mineralógicas y texturas en luz polarizada.

Con toda la información organizada por tipo de estudio se procedió a realizar el procesamiento mediante el uso de softwares especializados como ArcGIS.

Para el análisis espacial de Au, Cu, Pb y Zn, se aplicó interpolación mediante Spline Regularizado en ArcGIS, por su capacidad de generar superficies continuas y suaves acordes a la variabilidad geoquímica. Se empleó un tamaño de celda acorde a la distancia de muestreo para evitar distorsiones, y se mantuvieron parámetros constantes en todos los elementos, permitiendo una comparación homogénea e identificación de anomalías superpuestas.

En el procesamiento de los datos se definió una resolución

espacial de 10×10 m, adecuada a la extensión del área de estudio (1 km^2). Asimismo, se estableció un radio de búsqueda de 100 a 150 m, equivalente a varias veces la distancia promedio entre puntos de muestreo, con el fin de representar tendencias geoquímicas regionales y reducir la influencia de variaciones locales no significativas.

La delimitación de anomalías geoquímicas se realizó mediante un criterio estadístico basado en la media aritmética y la desviación estándar. El fondo geoquímico se definió a partir de la media, mientras que el umbral de anomalía se estableció como la media más una desviación estándar ($\bar{x} + \sigma$), lo que permitió identificar concentraciones elevadas asociadas a posibles procesos de mineralización.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. UBICACIÓN

Nuestra zona de estudio se ubica en la mina Paredones, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, región Cajamarca, e incluye los centros poblados de Chilete, Santa Ana y Pueblo Nuevo. Las coordenadas centrales del área se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 1 COORDENADAS PRINCIPALES DE LA MINA PAREDONES		
Punto	Este (m)	Norte (m)
1	740059	9204095
2	740020	9204026
3	740002	9204024
4	740000	9204172

NOTA: Coordenadas en sistema UTM, Datum WGS84, Zona 17S.

El acceso principal a la zona de estudio se realiza mediante la carretera afirmada Cajamarca–San Bernardino–Paredones, con un tiempo promedio de recorrido de aproximadamente 2 horas.

TABLA 2 RUTA TOMADA PARA LA EXPLORACIÓN		
Ruta	Tipo de vía	Longitud (km)
Cajamarca - San Bernardino – Mina Paredones	Asfaltada	98.2

NOTA: Trayecto para la exploración, tipo de vía y longitud.

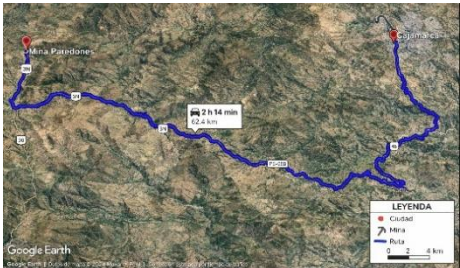


Fig. 8 Accesibilidad a la Mina Paredones

B. GEOLOGÍA

Geología Regional

La geología regional del área de la mina Paredones está dominada por unidades volcánicas cenozoicas del Grupo Calipuy, asociadas al Arco Volcánico de la Cordillera Occidental del norte del Perú. En la zona de estudio aflora

principalmente el Volcánico Chilete, constituido por secuencias piroclásticas de composición andesítica a dacítica, conformadas por tufos, brechas volcánicas y niveles de lavas.

El Volcánico Chilete infrayace en discordancia erosional al Volcánico San Pablo, y ambas unidades presentan intrusiones subvolcánicas en forma de sills dacíticos gris blanquecinos, dispuestos en capas intercaladas. Este volcanismo se desarrolló entre el Eoceno inferior y el Mioceno superior, como parte del arco magmático regional [10].

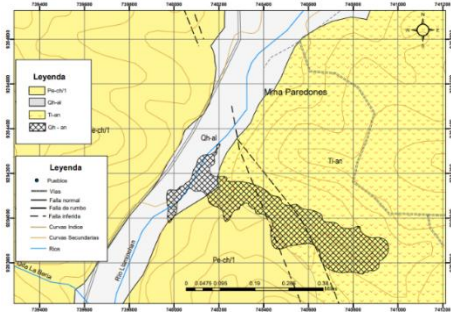


Fig. 9 Plano regional de la Mina Paredones

Geología Local.

La geología local de la mina Paredones está conformada por andesitas ígneas de grano medio, textura afanítica y color gris verdusco, con pseudoestratificación asociada a procesos volcánicos y orientación Az = 231° y Bz = 33° NW [11]. La veta presenta un espesor promedio de 0.60 m, con rumbo N 34° O y buzamiento de 73° N, alcanzando profundidades de 200 m en el nivel 4 y 500 m en el nivel 5; la roca encajonante es una andesita intensamente fracturada con alteración argílica en el contacto, mineralizada principalmente por esfalerita marrón acaramelada, galena y pirita diseminada, y sólo el 40 % del recorrido cuenta con sostenimiento.

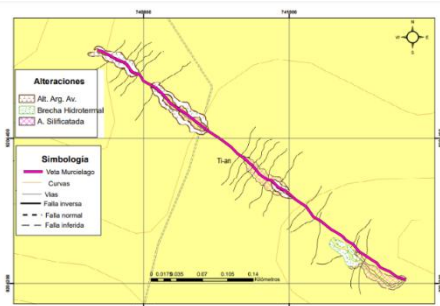


Fig. 10 Plano local de alteraciones de la Mina Paredones.

En el presente plano local se identifican zonas de alteración argílica avanzada (Alt. Arg. Av.), producto de fluidos hidrotermales ácidos; alteración silificada (A. Silificada), asociada al enriquecimiento en sílice; y brechas hidrotermales, vinculadas a fracturamiento intenso. La veta Murciélago y las fallas representadas permiten interpretar el control estructural de la mineralización.

C. CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA

La caracterización petrológica de la mina Paredones se realizó mediante análisis macroscópico, estereoscópico y microscópico de secciones delgadas, identificando las principales litologías y asociaciones de ganga y mena en el Volcánico de Paredones. Se recolectaron 12 muestras tipo *rock chip*, dominadas por cuarzo,

galena, pirita, calcopirita, minerales de cobre y goethita, con otros minerales en menor proporción. A continuación, se presentan las tablas con las rocas y minerales identificados durante el estudio.

TABLA 3
DESCRIPCIÓN Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS

Nombre	Color	Descripción
Tobas volcánicas	Gris y rojizas	Roca piroclástica
Areniscas cuarzosas	Grisáceas y amarillentas	Rocas sedimentarias
Andesitas	Rojizas y verde oscuro	Roca ígnea volcánica

En la Tabla N°3 se describen los tipos de rocas presentes en la zona de estudio, lo que permite identificar la litología local y comprender su relación con la mineralización, así como sustentar el análisis petrológico y petrográfico del área.

TABLA 4
DESCRIPCIÓN DE LOS MINERALES DE GANGA

Nombre	Abreviatura	Fórmula	Descripción
Cuarzo	Qz	SiO ₂	Ganga silícea.
Yeso	Ís	CaSO ₄ · 2H ₂ O	Sulfato de calcio hidratado
Ferromagnesianos	Femg	-	Silicatos de Fe y Mg
Limonita	Lim	FeO(OH) · nH ₂ O	Hidróxido de hierro
Hematita	Hm	Fe ₂ O ₃	Oxido de hierro

La Tabla N°4 presenta la caracterización de los minerales de ganga identificados en la zona de estudio. Esta información permite reconocer sus asociaciones mineralógicas y comprender el contexto geológico y metalogenético de la mina Paredones.

TABLA 5
DESCRIPCIÓN DE LOS MINERLES DE MENA

Nombre	Abreviatura	Fórmula	Descripción
Bornita	Bn	Cu ₅ FeS ₄	Sulfuro de cobre
Azurita	Az	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	Carbonato secundario de cobre
Galena	Gn	PbS	Sulfuro de plomo
Esfalerita	Sf	ZnS	Sulfuro de zinc
Calcopirita	Cp	CuFeS ₂	Sulfuro de cobre y hierro
Pirita	Py	FeS ₂	Sulfuro de hierro

La Tabla N.º5 presenta la caracterización de los minerales de mena identificados en la zona de estudio, permitiendo reconocer los minerales económicamente relevantes y sus asociaciones en la mina Paredones.

MM-PAR-01

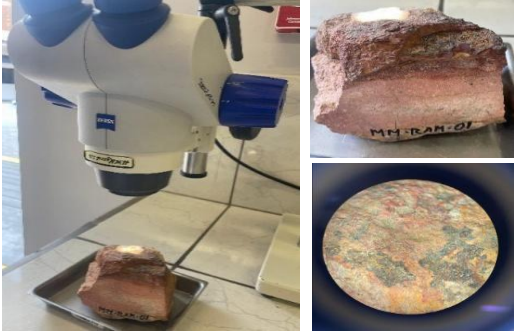


Fig. 11 Muestra 01 de mano observada (mm-par-01) a través del Microscopio Estereoscópico Universal ZEISS.



Fig. 12 Imagen De La Muestra En Vista Petrográfica

CLASIFICACIÓN DE LA ROCA MM – PAR – 01

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Roca de tonalidades rojizas, marrones, azuladas y verdosas, con presencia de bornita y óxidos de hierro, evidenciando oxidación. Presenta textura piroclástica y alteración filica, sin respuesta magnética ni reacción frente al ácido clorhídrico.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

La muestra está dominada por galena, asociada a abundante bornita de tonalidades azuladas a púrpura. El cuarzo aparece en cristales pequeños y subredondeados, acompañado por sericita relacionada con alteración filica y por óxidos de hierro que evidencian oxidación.

Se identifica una textura piroclástica, caracterizada por la presencia de fragmentos volcánicos consolidados, originados por procesos eruptivos explosivos.

TABLA 6
MINERALOGÍA DE LA MUESTRA 01

Minerales Esenciales	Contenido (%)	Minerales Secundarios	Contenido (%)
Galena	30	Bornita	10
Cuarzo	25	Sericita	> 5
-	-	Óxidos	25

La muestra indica un conjunto de alteraciones hidrotermales potásica, filica y propilítica, indicando la interacción progresiva entre fluidos hidrotermales y la roca encajante.

FOTOMICROGRAFÍA

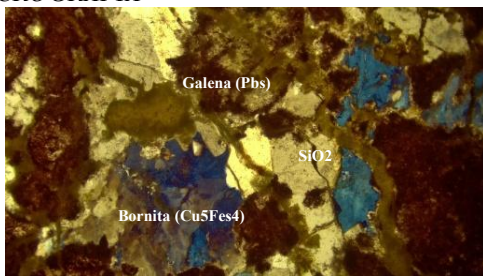


Fig. 13 Microfotografía de la sección delgada de la muestra 01

Cristales subredondeados de cuarzo (SiO_2) se intercalan con galena (PbS) de morfología similar, mientras que tonalidades azuladas a púrpuras indican la presencia de bornita en cristales de hábito pseudocúbico.

La muestra MM-PAR-01 presenta una textura piroclástica afectada por un sistema hidrotermal. La asociación de galena y bornita indica mineralización polimetálica y procesos de

oxidación [12], mientras que el cuarzo subredondeado y la sericita evidencian alteración filica, confirmando la afectación hidrotermal de la roca [13].

MM-PAR-02



Fig. 14 Muestra 02 de mano observada (mm-par-02) a través del Microscopio Estereoscopio Universal ZEISS



Fig. 15 Imagen De La Muestra En Vista Petrográfica

CLASIFICACIÓN DE LA ROCA MM – PAR – 02

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Se caracteriza por la presencia de tonos plumizos, rojizos y blancos, compuesta por cuarzo, plagioclasa, calcita y bornita. Exhibe textura porfídica y alteraciones filica y carbonatada. No es magnética, pero reacciona al HCl por la presencia de calcita.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

La muestra está dominada por cuarzo de hábito trigonal-hexagonal, asociado a calcita identificable por su reacción al HCl. En menor proporción se presenta epidota prismática, junto con galena de brillo plumizo y bornita con tonalidades azuladas a púrpuras.

La roca presenta una textura piroclástica, constituida por fragmentos volcánicos como cenizas, lapilli y bloques, posteriormente consolidados.

TABLA 7
MINERALOGÍA DE LA MUESTRA 02

Minerales Esenciales	Contenido (%)	Minerales Secundarios	Contenido (%)
Galena	15	Bornita	> 5
Cuarzo	35		
Calcita	20		
Epidota	15		

La muestra presenta alteración potásica, filica, propilítica y carbonatización, evidenciando la interacción de fluidos hidrotermales con la roca.

FOTOMICROGRAFÍA

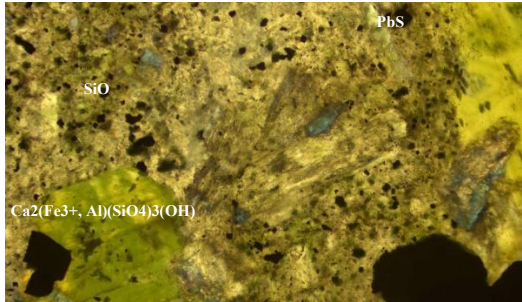


Fig. 16 Microfotografía de la sección delgada de la muestra 02

Se observan cristales finos de cuarzo (SiO₂) con hábito trigonal a hexagonal, asociados a galena (PbS) de tamaño similar, junto con cristales mejor desarrollados de epidota [Ca₂(Fe³⁺, Al)(SiO₄)₃(OH)] y la presencia de bornita (Cu₅FeS₄) con tonalidades azuladas a púrpuras.

La muestra MM-PAR-02 corresponde a una roca volcánica piroclástica con textura porfídica y alteración hidrotermal polimetálica. En este estudio se identificó una asociación de cuarzo, galena y bornita, característica de sistemas hidrotermales en ambientes volcánicos, coincidiendo con lo descrito por Pirajno (2009) [14]. Asimismo, las tonalidades azuladas a púrpuras de la bornita se interpretan como resultado de procesos de oxidación superficial de sulfuros de cobre, en concordancia con Craig y Vaughan (1994) [15], sugiriendo condiciones favorables para la concentración local de minerales de mena.

MM-PAR-03

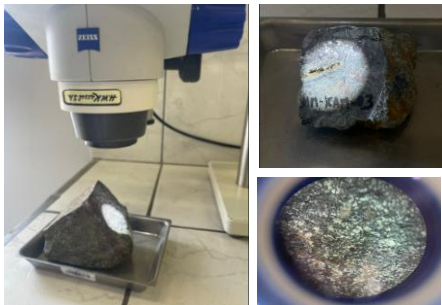


Fig.17 Muestra 03 de mano observada (mm-par-03) a través del Microscopio Estereoscopio Universal ZEISS

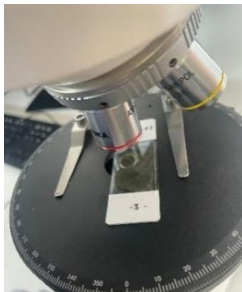


Fig. 18 Imagen De La Muestra En Vista Petrográfica

CLASIFICACIÓN DE LA ROCA MM – PAR – 03

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Roca con tonalidad ploma y marrón rojizo, por la clara oxidación que presenta. Está compuesta por cuarzo y calcopirita. Presenta una textura de relleno y evidencia alteración filica. No

presenta magnetismo ni reacción al HCl.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

La muestra presenta cuarzo en venillas con hábito trigonal a irregular, epidota de tonalidad verde clara, galena dominante de color gris plomizo y hábito cuadrado a rómbico, y calcopirita de color dorado con hábito pseudotetraédrico.

Presenta textura piroclástica, caracterizada por la acumulación y consolidación de fragmentos volcánicos expulsados durante erupciones explosivas, como cenizas, lapilli y bloques.

TABLA 8
MINERALOGÍA DE LA MUESTRA 03

Minerales Esenciales	Contenido (%)
Cuarzo	25
Epidota	20
Galena	30
Calcopirita	20

La muestra presenta alteración potásica, filica y propilítica, evidenciando la interacción de fluidos hidrotermales con la roca y una evolución progresiva del sistema de alteración.

FOTOMICROGRAFÍA

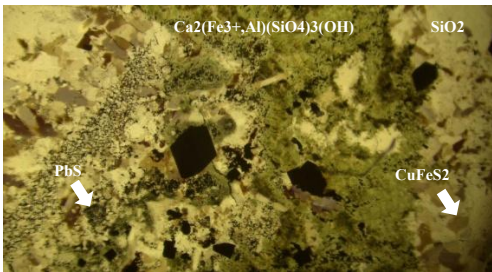


Fig. 19 Microfotografía de la sección delgada de la muestra 03

La muestra presenta principalmente fenocristales de cuarzo (SiO₂), seguidos por epidota (Ca₂(Fe³⁺, Al)(SiO₄)₃(OH)) de forma irregular, además de pequeños cristales cúbicos de galena (PbS) y cristales irregulares de calcopirita (CuFeS₂).

La muestra MM-PAR-03 es una roca piroclástica afectada por alteración hidrotermal polimetálica. La asociación de cuarzo con galena y calcopirita concuerda con lo descrito por Dilles (2021) [16] en sistemas hidrotermales volcánicos, mientras que la presencia de epidota y la alteración filica reflejan la zonación de alteraciones propilítica e interna como lo señala Desoky (2021) [17], evidenciando una evolución hidrotermal compleja.

MM-PAR-04

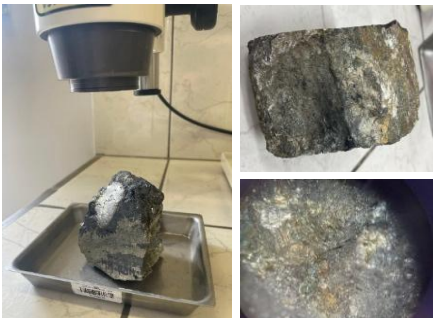


Fig. 20 Muestra 04 de mano observada (mm-par-04) a través del Microscopio Estereoscopio Universal ZEISS

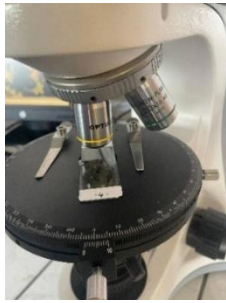


Fig. 21 Imagen De La Muestra En Vista Petrográfica

CLASIFICACIÓN DE LA ROCA MM – PAR – 04

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Roca de tonalidad ploma y dorada, con sectores brillantes y opacos, compuesta por pirita, calcopirita, cuarzo y galena, de textura de relleno, afectada por alteración filica y sin magnetismo ni reacción al HCl.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

El espécimen presenta alta concentración de pirita y calcopirita en venillas de 3–4 cm, con cuarzo subordinado en venillas milimétricas, y galena como componente importante del ensamblaje metálico, reconocible por su color gris plomizo y cristales cúbicos a rómbicos.

La muestra presenta textura de relleno, con minerales que ocupan fracturas y cavidades formando venillas cristalinas.

TABLA 9
MINERALOGÍA DE LA MUESTRA 04

Minerales Esenciales	Contenido (%)
Pirita	30
Calcopirita	27
Cuarzo	> 10
Galena	28

Evidencia una alteración potásica, filica y de sulfuros, reflejando la acción de fluidos hidrotermales y la concentración de minerales metálicos.

FOTOMICROGRAFÍA

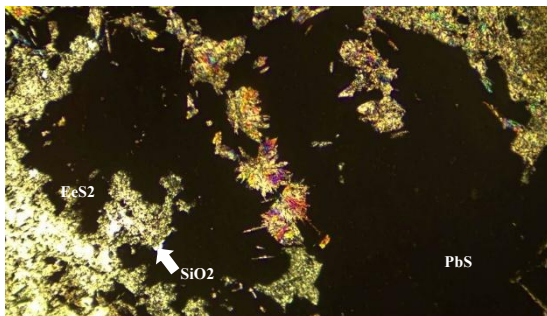


Fig. 22 Microfotografía de la sección delgada de la muestra 04

Se observan fenocristales de pirita (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2), diferenciables por su tonalidad, además de cuarzo (SiO_2) incrustado con la pirita y galena (PbS) presente en cristales muy pequeños.

La muestra MM-PAR-04 corresponde a una roca de textura de relleno con venillas ricas en sulfuros (pirita, calcopirita y galena), cuya morfología concuerda con lo descrito para depósitos

hidrotermales epitermales por Yang y Li (2017) [18], mientras que la alteración filica y potásica refleja la acción de fluidos hidrotermales y una zonación mineralizada controlada, según Hedenquist y Lowenstern (2015) [19].

MM-PAR-05

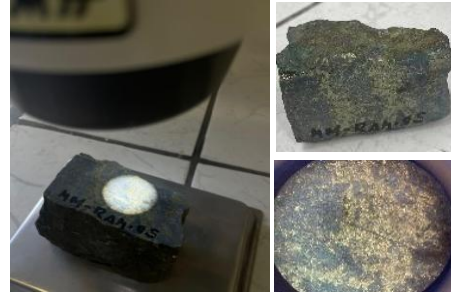


Fig. 23 Muestra 05 de mano observada (mm-par-04) a través del Microscopio Estereoscopio Universal ZEISS



Fig. 24 Imagen De La Muestra En Vista Petrográfica

CLASIFICACIÓN DE LA ROCA MM – PAR – 03

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Presenta tonalidades amarillentas y grisáceas, compuesta por cuarzo, bornita y pirita, con textura de relleno y evidencia de alteración filica, sin magnetismo ni reacción al HCl.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

El material analizado está dominado por calcopirita de brillo metálico y color dorado, acompañada de bornita con tonalidades azuladas a púrpuras y epidota de color verde amarillento. En conjunto, indica un ambiente de mineralización sulfurada con alteración asociada.

Presenta textura de relleno, caracterizada por minerales que ocupan fracturas y cavidades, formando venillas.

TABLA 10
MINERALOGÍA DE LA MUESTRA 05

Minerales Esenciales	Contenido (%)
Calcopirita	40
Epidota	> 25
Bornita	30

Presenta alteraciones potásicas, filica y propilítica, reflejando la interacción de fluidos hidrotermales con la roca y la zonación típica de sistemas mineralizados volcánicos.

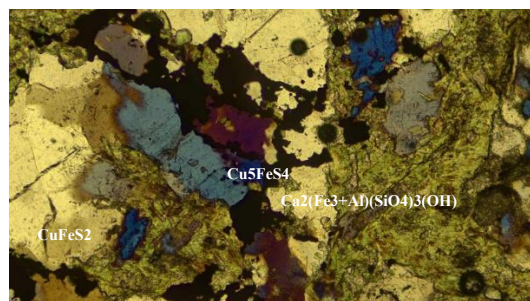


Fig. 25 Microfotografía de la sección delgada de la muestra 05

Presenta fenocristales dominantes de calcopirita (CuFeS_2), seguidos por bornita en cristales subredondeados e irregulares, los cuales se encuentran parcialmente rodeados por calcopirita y en contacto con epidota [$\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$]. La epidota se distingue por su coloración verde y por cristales de hábito muy irregular de tamaño medio.

El espécimen MM-PAR-05 presenta mineralización sulfurada dominada por calcopirita y bornita con textura de relleno, lo que indica precipitación a partir de fluidos hidrotermales. Esta asociación es característica de sistemas hidrotermales polimetálicos (Groat y Li, 2015) [20]. Asimismo, la presencia de epidota asociada a alteraciones potásica, fílica y propilítica refleja una zonación hidrotermal progresiva típica de sistemas volcánicos mineralizados (Sillitoe, 2021) [21].

Finalmente se presenta el porcentaje de minerales presentes en las cinco muestras de Paredones en la figura 19.



Fig. 26 Imagen De La Muestra En Vista Petrográfica

La mineralogía de la mina Paredones es heterogénea, con cuarzo (25–35 %) y altas concentraciones de galena, bornita y calcopirita (30–40 %), indicando zonas de alto potencial económico. La presencia de calcita y epidota refleja alteración hidrotermal secundaria y distintas etapas de mineralización, coincidiendo con Cooke y Gray (2017) [22] sobre la influencia de la zonación hidrotermal en la precipitación de sulfuros.

D. GEOQUÍMICA

La exploración geoquímica permite identificar elementos de mena y asociados para delimitar zonas mineralizadas. En este estudio se analizaron Au, Ag, Cu, Zn y Pb, evaluando su concentración y distribución para apoyar la planificación del proyecto. Los resultados, expresados como ley de mineral, permiten correlacionar la geoquímica con la mineralogía y la alteración hidrotermal, y se resumen en la tabla con las leyes y elementos principales de cada muestra.

TABLA 11
DESCRIPCIÓN GEOQUÍMICA

Muestra	Au (ppb) FAA 313	Ag (g/t) AAS 41B	As (%) AAS4 1B	Cu (%) AAS 41B	Pb (%) AAS 41B	Zn (%) AAS 41B	S (%) CSA 24V
02-C-M-01	165	213	0.12	0.021	4.87	0.07	1.37
02-C-M-02	56	47	0.02	0.011	3.52	0.20	1.71
02-C-M-03	83	441	0.23	0.141	6.74	4.28	6.51
02-C-M-04	68	369	0.07	0.187	8.87	10.29	9.3
02-C-M-05	120	259	0.18	0.048	7.97	0.35	3.8
02-C-M-06	298	143	0.42	0.458	2.64	14.05	15.4
02-C-M-07	400	126	0.30	0.555	2.81	21.1	22.16

NOTA: Límites de detección analítica: Au = 1 ppb; Ag = 0.1 g/t; As = 0.01 %; Cu = 0.001 %; Pb = 0.001 %; Zn = 0.001 %; S = 0.01 %. Métodos: FAA 313, AAS 41B y CSA 24V.

Se presentan los mapas de distribución de los principales minerales, junto con su interpretación y conclusiones.

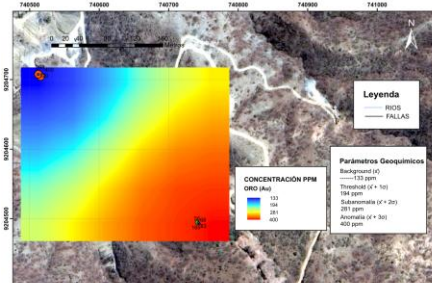


Fig. 27 Mapa de Anomalías Geoquímicas de Oro (Au)

El área muestra una anomalía de oro (Au) de alta prioridad. Los datos indican una concentración de mineral alcanzando un máximo de 400 ppm.

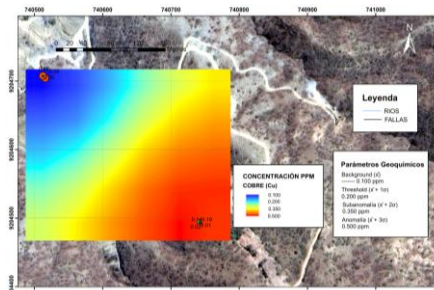


Fig. 28 Mapa de Anomalías Geoquímicas de Cobre (Cu)

El mapa de cobre muestra una anomalía en el sector sur-sur este, con valores de hasta 0.500 ppm. Su coincidencia con las anomalías de oro sugiere un control geológico común y potencial de mineralización económica.

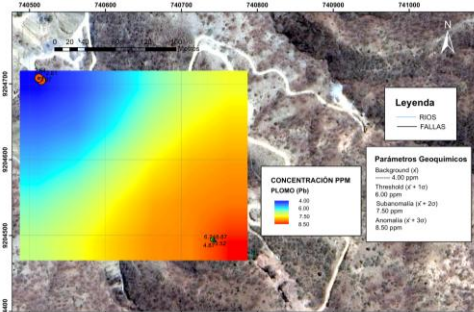


Fig. 29 Mapa de Anomalías Geoquímicas de Plomo (Pb)

El mapa de plomo (Pb) detecta una anomalía máxima de 8.50 ppm en el sureste, valor que duplica el nivel base de 4.00

ppm. Esta zona roja indica la proximidad de una veta o cuerpo mineralizado, convirtiéndose en el punto clave para iniciar perforaciones.

El mapa de Zn identifica una anomalía de alta prioridad en el sector sureste con valores de hasta 15.00 ppm, equivalentes al máximo estadístico ($\bar{x} + \sigma$). Esta zona (rojo) alcanza concentraciones 15 veces superiores al fondo de 1.00 ppm (azul), sugiriendo una fuente mineralizada primaria. La distribución define un vector hacia el sureste, estableciendo el principal objetivo de perforación.

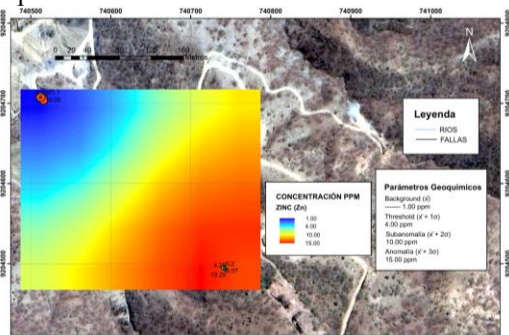


Fig.30 Mapa de Anomalías Geoquímicas de Zinc (Zn)

LEY PROMEDIO.

La ley promedio corresponde a la concentración del elemento químico de interés minero presente en el yacimiento. Se expresa en porcentaje (%), gramos por tonelada (g/t), partes por millón (ppm) u onzas por tonelada (oz/t). A continuación, se presenta el gráfico que resume los resultados de la ley promedio obtenida para cada muestra analiza.

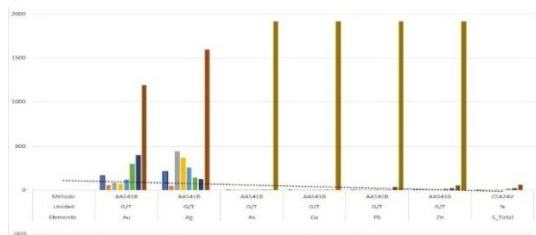


Fig. 31 Gráfico de la ley promedio de las muestras.

El análisis de las leyes promedio muestra diferencias en la variabilidad de los elementos, donde Zn y Pb presentan mayor dispersión que Cu, mientras que Au registra valores puntuales elevados respecto al fondo geoquímico. Estos resultados evidencian contrastes en la concentración de metales en dicha área.

IV. CONCLUSIONES

La caracterización petro-minerográfica permitió identificar una mineralización explotable en la mina Paredones, dominada por galena (38.9 %), calcopirita (33.3 %) y bornita (27.8 %), asociadas a ganga de cuarzo, epidota, piritita y sericitita.

Los análisis petrográficos identificaron texturas, asociaciones mineralógicas y alteraciones hidrotermales filica, propilitica y argílica, evidenciando una mineralización heterogénea.

El análisis geoquímico detectó anomalías de Zn, Pb, Cu, Ag y Au, con máximos de 21.1 % Zn, 8.87 % Pb, 0.55 % Cu y 400 ppb Au, concentradas en el sector sureste; su coincidencia con asociaciones mineralógicas define zonas de alto potencial

económico y vectores para futuras perforaciones.

Los resultados confirman el potencial polimetálico del yacimiento y respaldan la caracterización petro-minerográfica como base para su reactivación y futuras exploraciones.

V. AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Universidad Privada del Norte por el apoyo brindado en el desarrollo y presentación del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Ixer, A. (1991) Microscopía en Luz Reflejada para el desarrollo del Estudio Minerográfico.
- [2] Ministerio De Energía Y Minas Del Perú. Anuario Minero. (2015). Estadística Minera, Producción Y Exportaciones. Lima. Dirección De Producción Minera.
- [3] Jenkins, H. (2016). Mining And Sustainable Development: The Role Of Industry In Promoting Social And Economic Change. Journal Of Resource Economics, 222-238.
- [4] Schroeder, J. (2020) Caracterización Mineralógica En Minería: Importancia Y Métodos.
- [5] Macdonald, E. "Handbook Of Gold Exploration And Evaluation". Woodhead Publishing. Cambridge. 2007. Pp 285.
- [6] Agencia Peruana de Noticias Andina (ANDINA). (2025) Peru: Mining exports up 16.6% in 1H 2025.
- [7] González, L. (2024). Caracterización Mineralógica En La Mina Paredones, Cajamarca. Editorial Minera.
- [8] Ineson, J. (1989) Caracterización Mineralógica, Importancia de la Microscopia Óptica.
- [9] Ixer, A. (1991) Microscopía en Luz Reflejada para el desarrollo del Estudio Minerográfico.
- [10] Ministerio De Energía Y Minas Del Perú. Anuario Minero. (2015). Estadística Minera, Producción Y Exportaciones. Lima. Dirección De Producción Minera.
- [11] Jenkins, H. (2016). Mining And Sustainable Development: The Role Of Industry In Promoting Social And Economic Change. Journal Of Resource Economics, 222-238.
- [12] Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41.
- [13] Hedenquist, J. W., Arribas, A., & González-Urrien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13, 245–277.
- [14] Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, Dordrecht.
- [15] Craig, J. R., & Vaughan, D. J. (1994). *Ore microscopy and ore petrography* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- [16] Dilles, J. H. (2021). Hydrothermal alteration and mineralization in volcanic-hosted ore systems. Society of Economic Geologists Special Publication.
- [17] El-Desoky, H. M., Soliman, N., Heikal, M. A., & Abdel-Rahman, A. M. (2021). Mapping hydrothermal alteration zones using ASTER data. *Science of the Total Environment*, 781, 146641.
- [18] Yang, J., & Li, X. (2017). Hydrothermal ore deposition and alteration zoning in epithermal systems. *Ore Geology Reviews*, 86, 1–15.
- [19] Hedenquist, J. W., & Lowenstern, J. B. (2015). The role of hydrothermal systems in the formation of volcanic-hosted ore deposits. *Economic Geology*, 110(8), 1807–1832.
- [20] Groat, L. A., & Li, C. (2015). Hydrothermal processes and mineral assemblages in volcanic-hosted polymetallic deposits. *Minerals*, 5(2), 123.
- [21] Sillitoe, R. H. (2021). Porphyry copper systems: Characteristics and evolution. *Economic Geology*, Society of Economic Geologists.
- [22] Cooke, D. R., & Gray, C. M. (2017). Hydrothermal alteration and mineralization in magmatic-hydrothermal ore deposits: advances in understanding ore-forming systems. *Ore Geology Reviews*, 87, 455–498.