



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i2.4420>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

Characterization of hydrothermal alteration minerals: La Bonita mining project, Ecuador

Caracterização de minerais de alteração hidrotermal: Projeto mineiro de La Bonita, Equador

Katherine Michelle Diaz-Medina ^I
michelle.diaz@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0006-4846-157X>

Correspondencia: michelle.diaz@epoch.edu.ec

***Recibido:** 28 de abril de 2025 ***Aceptado:** 21 de mayo de 2025 * **Publicado:** 11 de junio de 2025

- I. Magíster en Minas mención en Mineralurgia y Metalurgia Extractiva, Ingeniera en Geología, Docente de la Facultad de Recursos Naturales de la Carrera de Minas de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo Sede Morona Santiago, Macas, Ecuador.

Resumen

La caracterización de minerales de alteración hidrotermal es una herramienta clave en la exploración geológica, especialmente en contextos donde se presume la existencia de sistemas tipo pórfido. El presente estudio se desarrolló en el sector comprendido entre las quebradas Chorrera Chico y El Bicundo, en el cantón González Suárez, provincia de Sucumbíos (Ecuador), una zona con antecedentes de mineralización polimetálica reconocida desde la década de 1990. El objetivo principal fue caracterizar los minerales de alteración hidrotermal presentes en rocas aflorantes mediante análisis macroscópico y petrográfico, para delimitar zonas de interés hidrotermal y vincularlas con modelos reconocidos de depósitos tipo pórfido. La metodología se estructuró en cuatro fases: revisión bibliográfica, trabajo de campo con mapeo geológico a escala 1:5.000, análisis de laboratorio incluyendo láminas delgadas y descripción petrográfica, y la elaboración de mapas de distribución mineralógica. Los resultados permitieron identificar tres litologías principales (granodiorita, cuarzo monzodiorita y una litofacie brechada) con ensambles de alteración hidrotermal como clorita, sericita, epidota, illita y piritita, dispuestos en patrones compatibles con alteración clorítico-sericítica y fílica. Se concluye que el área de estudio evidencia un sistema hidrotermal activo y zonado, con alto potencial metalogénico, lo que proporciona una base técnica relevante para orientar futuras campañas de perforación y exploración minera en el Proyecto La Bonita.

Palabras clave: Alteración hidrotermal; minerales guía; pórfido de cobre; caracterización petrográfica; potencial metalogénico.

Abstract

The characterization of hydrothermal alteration minerals is a key tool in geological exploration, especially in contexts where the existence of porphyry-type systems is suspected. This study was carried out in the sector between the Chorrera Chico and El Bicundo ravines, in the González Suárez canton, Sucumbíos province (Ecuador), an area with a history of polymetallic mineralization recognized since the 1990s. The main objective was to characterize hydrothermal alteration minerals present in outcropping rocks through macroscopic and petrographic analysis, to delineate zones of hydrothermal interest and link them to recognized models of porphyry-type deposits. The methodology was structured in four phases: bibliographic review, fieldwork with geological mapping at a scale of 1:5,000, laboratory analysis including thin sections and petrographic description, and the preparation of mineralogical distribution maps. The results identified three main lithologies

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

(granodiorite, quartz monzodiorite, and a brecciated lithofacies) with hydrothermal alteration assemblages such as chlorite, sericite, epidote, illite, and pyrite, arranged in patterns compatible with chloritic-sericite and phyllic alteration. It is concluded that the study area exhibits an active, zoned hydrothermal system with high metallogenic potential, providing a relevant technical basis for guiding future drilling and mineral exploration campaigns at the La Bonita Project.

Keywords: Hydrothermal alteration; anchor minerals; copper porphyry; petrographic characterization; metallogenic potential.

Resumo

A caracterização dos minerais de alteração hidrotermal é uma ferramenta fundamental na exploração geológica, sobretudo em contextos onde se suspeita da existência de sistemas do tipo porfirítico. Este estudo foi realizado no setor entre as ravinas Chorrera Chico e El Bicundo, no cantão González Suárez, província de Sucumbíos (Equador), uma área com histórico de mineralização polimetálica reconhecida desde a década de 1990. O principal objetivo foi caracterizar os minerais de alteração hidrotermal presentes nas rochas aflorantes através de análises macroscópicas e petrográficas, para delinear zonas de interesse hidrotermal e ligá-las a modelos reconhecidos de depósitos do tipo porfirítico. A metodologia foi estruturada em quatro fases: revisão bibliográfica, trabalho de campo com mapeamento geológico à escala 1:5.000, análise laboratorial incluindo lâminas delgadas e descrição petrográfica, e elaboração de mapas de distribuição mineralógica. Os resultados identificaram três litologias principais (granodiorito, quartzo monzodiorito e uma litofácies brechada) com associações de alteração hidrotermal, como clorite, sericita, epidoto, illita e pirita, dispostas em padrões compatíveis com alteração clorítica-sericita e fílica. Conclui-se que a área de estudo apresenta um sistema hidrotermal ativo e zonado com elevado potencial metalogénico, fornecendo uma base técnica relevante para orientar futuras campanhas de perfuração e exploração mineral no Projeto La Bonita.

Palavras-chave: Alteração hidrotermal; minerais âncora; pórfiro de cobre; caracterização petrográfica; potencial metalogénico.

Introducción

La caracterización de minerales de alteración hidrotermal representa una herramienta fundamental en la exploración geológica, ya que permite delimitar zonas de interés metalogénico asociadas a sistemas

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

epitermales o pórfidos. En este contexto, la región ubicada entre las quebradas Chorrera Chico y El Bicundo, en el cantón González Suárez, provincia de Sucumbíos, ha sido objeto de diversos estudios que evidencian su potencial geológico.

Desde inicios de la década de los noventa, el Estado ecuatoriano mostró interés en esta área, específicamente mediante los trabajos ejecutados por INEMIN/CODIGEM en cooperación con el British Geological Survey (BGS), en 1994. Estos estudios preliminares permitieron identificar un prospecto con mineralización polimetálica, principalmente de Cu-Pb-Zn, dentro de las formaciones que integran actualmente el Proyecto de Exploración La Bonita.

Posteriormente, entre 1996 y 1998, una empresa australiana desarrolló campañas de perforación en sectores aledaños, como la mina El Encanto y La Chispa, revelando evidencias de mineralización de Au en zonas de cizalla y de Cu con características similares a pórfidos conocidos como el Billiton. Estas campañas fueron ampliadas por Saxón Gold S.A. entre 1998 y 2000, quienes lograron distinguir dos tipos de eventos mineralizantes: el primero relacionado con vetas auríferas en rocas metamórficas, y el segundo con mineralización disseminada de cobre. Más adelante, en 2001, All Metals Minerals S.A. asumió las concesiones e impulsó estudios de impacto ambiental y de exploración básica, mediante los cuales se constató que el oro se encuentra acompañado de sulfuros disseminados, vetas de cuarzo y estructuras brechadas (Mata et al., 2024).

En el año 2013, la Empresa Nacional Minera (ENAMI EP) inició su participación en la zona mediante campañas sistemáticas de prospección y exploración, fundamentadas en mapeos geológicos y análisis geoquímicos (ENAMI EP, 2016). Estos avances sentaron las bases para un enfoque científico más detallado sobre los procesos de alteración hidrotermal que afectan a las rocas aflorantes, no obstante, hasta la fecha no se han identificado ni clasificado de forma precisa los minerales de alteración presentes, ni su relación con modelos hidrotermales específicos, como los de pórfido de cobre (Carmelo et al., 2019).

Geológicamente, el área de estudio se encuentra en la Cordillera Real, una de las dos cadenas montañosas paralelas que configuran la región andina del Ecuador, junto con la Cordillera Occidental. Esta zona constituye el límite occidental de la cuenca de tras arco del Oriente ecuatoriano, la cual se comporta como un sinclinal de gran magnitud deformado en el Terciario Superior (Santamaría-Galvis et al., 2023). En términos estratigráficos, esta región presenta una secuencia de rocas paleozoicas y mesozoicas, cubiertas por formaciones sedimentarias marinas y continentales pre eocénicas, que descansan sobre el escudo de Guyana (Wilson et al., 2003). Estas condiciones geológicas complejas

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

favorecen la presencia de eventos hidrotermales que generan zonas de alteración con asociaciones minerales características (García et al., 2022).

Desde el punto de vista conceptual, los sistemas de alteración hidrotermal se rigen por un conjunto de procesos que implican la circulación de fluidos calientes a través de las rocas hospedantes, los cuales generan cambios mineralógicos y químicos en función de factores como la temperatura, el pH, la litología y la permeabilidad (Satián & Alonso, 2019). La clasificación de estas alteraciones se basa en la identificación de minerales guía, que permiten delimitar zonas propicias para la concentración de metales económicos. En los modelos de pórfido de cobre, por ejemplo, se reconocen zonas de alteración potásica, fílica, propilítica y argílica, cada una con un conjunto diagnóstico de minerales (Camus, 1975). La interpretación de estos ensambles minerales, tanto macroscópica como microscópicamente, permite inferir el grado de evolución térmica del sistema y su proximidad a centros mineralizantes (Carmelo et al., 2019).

A pesar de los antecedentes exploratorios existentes, el área comprendida entre las quebradas Chorrera Chico y El Bicundo carece de una caracterización sistemática y detallada de sus minerales de alteración hidrotermal. Este vacío científico limita la interpretación de los procesos metalogénicos que podrían estar actuando en la zona, así como la identificación de blancos de perforación con potencial económico. Por ello, se plantea la necesidad de realizar un estudio enfocado en la identificación macroscópica y petrográfica de los minerales presentes en las muestras recolectadas en afloramientos, con el fin de clasificarlos en asociaciones o ensambles mineralógicos coherentes con modelos hidrotermales reconocidos (Corrales & Rejas, 2010; Valencia et al., 2018).

La novedad de esta investigación radica en la integración de observaciones de campo con análisis microscópicos, lo que permitirá validar la presencia de zonas de alteración hidrotermal y proponer su distribución espacial dentro del área de estudio. Esta aproximación metodológica no solo contribuirá al conocimiento geológico del Proyecto La Bonita, sino que también optimizará futuras campañas de exploración, al reducir la incertidumbre en la toma de decisiones relacionadas con la perforación y la inversión minera (Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri, 2018).

Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo general caracterizar los minerales de alteración hidrotermal presentes en las rocas aflorantes de la zona comprendida entre las quebradas Chorrera Chico y El Bicundo, mediante análisis microscópico y macroscópico de las muestras recolectadas. Esto permitirá delimitar zonas de interés hidrotermal, establecer su relación con modelos de pórfido de cobre y generar cartografía interpretativa que contribuya a la comprensión metalogénica del área.

Desarrollo

Revisión de Literatura

Depósitos tipo pórfido de cobre

Los depósitos tipo pórfido de cobre constituyen uno de los sistemas mineralógicos más importantes a nivel mundial debido a su alta concentración de metales como Cu, Mo, Au y Ag, asociados a procesos magmático-hidrotermales. La distribución espacial de estos depósitos presenta una zonación característica de alteraciones, desde zonas profundas sódico-cálcicas, pasando por zonas potásicas, clorítico-sericíticas, sericíticas, hasta zonas superficiales con alteración argílica avanzada (Meyer y Hemley, 1967). Esta distribución está asociada al enfriamiento progresivo de los fluidos hidrotermales y su interacción con la roca huésped, permitiendo reconstruir la evolución del sistema desde la base hacia la superficie.

Cada zona de alteración tiene una mineralogía diagnóstica. La alteración sódico-cálcica se manifiesta principalmente por la presencia de plagioclasas cálcicas y minerales como actinolita, epidota y magnetita, con baja presencia de metales excepto Fe. En depósitos como Nugget Hill en Filipinas o Cotabambas en Perú, esta zona puede contener oro asociado a ensamblajes híbridos (Sillitoe, 2002; Wilson et al., 2003). En contraste, la zona potásica, típica de depósitos profundos como El Abra (Chile), se caracteriza por biotita, feldespato potásico y plagioclasas sódicas, asociadas a mineralización con calcopirita y bornita (Ambrus, 1977)

Las zonas superiores exhiben alteración clorítica-sericítica y sericítica, con predominio de minerales como clorita, sericita, illita y abundante pirita. Estas zonas pueden presentar disminución en la concentración de Cu y Au, siendo comunes en sistemas ricos en oro como Esperanza (Chile) (Perelló et al., 2004a). La alteración sericítica avanzada puede dividirse en una fase temprana verdosa y otra blanca tardía, caracterizadas por asociaciones minerales de alta sulfuración, incluyendo pirita, enargita y covellina (Delendatti, 2003)

Por último, la alteración argílica avanzada es menos común en depósitos pórfidos clásicos, pero se desarrolla sobre todo en rocas ígneas félsicas o sedimentarias porosas. Se distingue por la presencia de minerales como caolinita, alunita, cristobalita y pirofilita, en texturas parceladas o zonadas. Este tipo de alteración es evidente en sistemas como Escondida y Yanacocha (Dilles et al., 1992; Montenegro & Vattuone, 2008), donde puede representar zonas de sobreimpresión hidrotermal tardía que modifican las alteraciones previas del sistema.

Alteración hidrotermal

La alteración hidrotermal es un proceso fundamental en la evolución de los sistemas geológicos mineralizados, especialmente en entornos magmático-hidrotermales como los depósitos tipo pórfido. Este proceso ocurre cuando las rocas sufren modificaciones químicas, mineralógicas y texturales debido al flujo de fluidos calientes, ya sea en forma de agua, vapor o gases. Tales transformaciones responden a la interacción entre los minerales originales de la roca y los fluidos que circulan por ella, generando una respuesta que se traduce en el crecimiento, disolución o reemplazo de minerales (Maksaev, 2001).

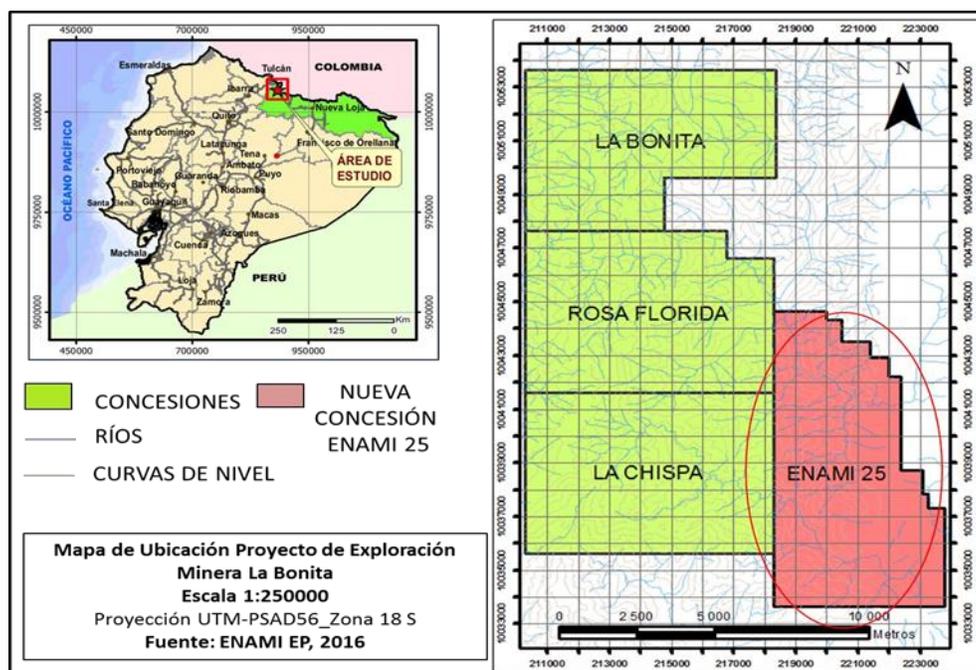
La intensidad y tipo de alteración dependen de varios factores, siendo la temperatura del fluido, su acidez (pH), la composición química, la permeabilidad de la roca, la duración del evento hidrotermal y la composición inicial de la roca, los principales controladores. Una roca con alta permeabilidad facilitará el ingreso de fluidos y, por ende, una alteración más efectiva. Asimismo, la interacción prolongada agua/roca y una elevada razón de flujo pueden provocar una transformación mineralógica profunda, permitiendo la formación de minerales guía que definen zonas específicas de alteración. Estudios como los de Camuti (2008) destacan la importancia de analizar la relación espacial de los minerales de alteración, lo cual permite interpretar las condiciones paleoambientales del sistema y predecir zonas favorables para mineralización económica. La clasificación de la alteración hidrotermal no debe limitarse a la identificación individual de minerales, sino a la observación de ensambles minerales que reflejan condiciones particulares de presión, temperatura y composición del sistema.

Una clasificación práctica adoptada por geólogos de campo considera la denominación de zonas de alteración según el mineral dominante: silicificación (cuarzo), sericitización (sericita), argilización (arcillas), cloritización (clorita), epidotización (epidota) y actinolización (actinolita). Esta nomenclatura facilita la interpretación geológica en campo y permite establecer asociaciones térmico-estructurales que orientan la delimitación de zonas metalogénicas. Por tanto, el análisis petrográfico detallado de estas zonas se vuelve crucial para inferir el potencial económico de un área determinada. El Proyecto de Exploración Minera La Bonita se encuentra ubicado en la provincia de Sucumbíos, específicamente en el cantón homónimo, abarcando las parroquias La Bonita, Rosa Florida y La Sofía. Esta área se sitúa en las estribaciones orientales de la Cordillera Real, en la región andina del Ecuador, cercana a la frontera con Colombia, la cual está demarcada en este sector por el curso del río Chingual, particularmente hasta el límite con Rosa Florida.

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

El proyecto comprende cuatro concesiones mineras denominadas La Bonita, Rosa Florida y La Chispa, con una superficie total de 13.590 hectáreas. Adicionalmente, se encuentra en trámite una quinta concesión, ENAMI 25, que cubre un área de 4.824 hectáreas. El terreno sobre el que se desarrolla el proyecto presenta una topografía abrupta, con altitudes que oscilan entre los 1.200 y 3.500 metros sobre el nivel del mar, y pendientes superiores al 40% ver Gráfico N°1.

Gráfico N°1 Mapa de ubicación del proyecto de exploración minera



Elaborado: Autora

Metodología

La metodología aplicada para el desarrollo de esta investigación se estructuró en cuatro fases secuenciales e interrelacionadas, orientadas a cumplir el objetivo de caracterizar los minerales de alteración hidrotermal en la zona comprendida entre las quebradas Chorrera Chico y El Bicundo, dentro del Proyecto La Bonita. Estas fases incluyen actividades de gabinete, trabajo de campo, análisis de laboratorio y una síntesis interpretativa final que permite integrar la información obtenida en un modelo de alteración hidrotermal.

La primera fase consistió en un trabajo de gabinete que implicó la revisión bibliográfica y documental. Se analizaron antecedentes históricos, informes técnicos, publicaciones geológicas previas y cartografía base a distintas escalas. Esta revisión permitió contextualizar la problemática geológica

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

del área, identificar los antecedentes exploratorios más relevantes y consolidar el conocimiento sobre la geodinámica de la región. Con base en esta información, se diseñó una campaña geológica de reconocimiento, en la que se definieron los sectores prioritarios de exploración, se determinaron sus coordenadas geográficas, se seleccionaron los mapas geológicos y topográficos adecuados, y se organizó el equipo instrumental y logístico requerido. La campaña se ejecutó entre el 15 y el 29 de mayo de 2017.

En la segunda fase, se desarrollaron los trabajos de campo, cuyo eje principal fue el levantamiento de un mapeo geológico a escala 1:5.000. Esta labor se centró en la observación directa de afloramientos, identificación preliminar de litologías, estructuras geológicas y evidencias superficiales de alteración hidrotermal. Durante esta etapa se recopilaron datos estructurales y se recolectaron muestras representativas de las zonas mineralizadas y de alteración. La información fue sistemáticamente georreferenciada y registrada en bitácoras de campo, lo que permitió una interpretación preliminar de los contactos litológicos y la distribución de zonas alteradas.

La tercera fase se llevó a cabo en laboratorio, donde se procedió a la descripción petrográfica macroscópica de cada una de las muestras obtenidas. Esta descripción incluyó aspectos como color, textura, presencia de venillas, minerales visibles y grado de alteración. Posteriormente, se seleccionaron muestras representativas para la elaboración de láminas delgadas con el propósito de realizar un análisis microscópico en luz polarizada, lo cual permitió la identificación de fases minerales primarias y secundarias, así como los minerales de alteración hidrotermal presentes. Este análisis resultó fundamental para reconocer las transformaciones mineralógicas asociadas a los procesos hidrotermales y establecer relaciones paragenéticas.

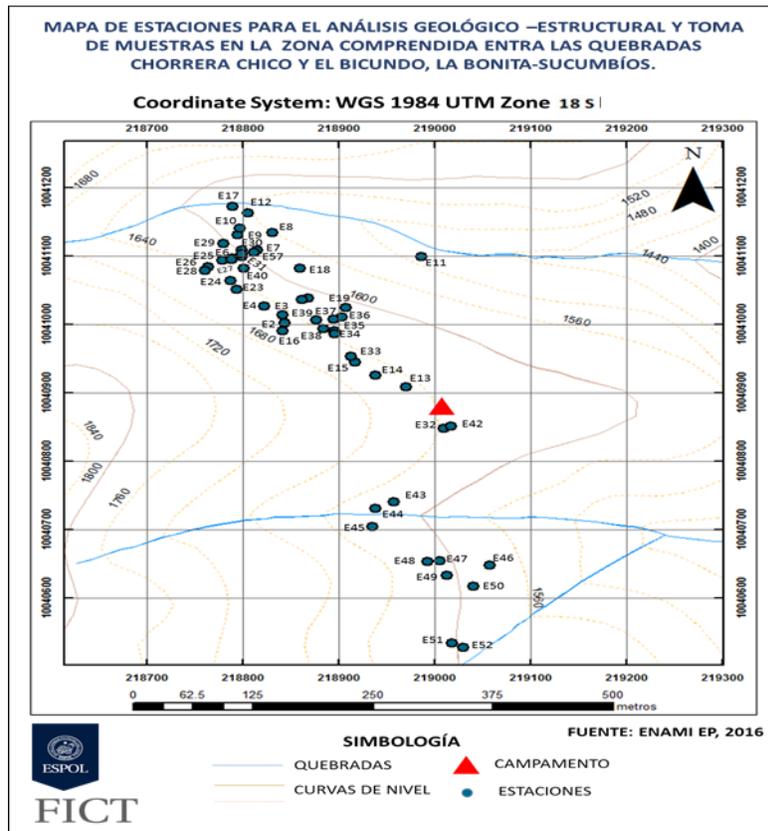
Finalmente, en la cuarta fase, se integró la información recolectada en campo y laboratorio mediante un nuevo trabajo de gabinete. En esta etapa se armaron los ensambles de alteración hidrotermal con base en la asociación sistemática de minerales identificados y su relación espacial. Con esta información, se elaboraron mapas temáticos que muestran la distribución de minerales de alteración, los ensambles mineralógicos y las principales estructuras geológicas asociadas. Estos mapas constituyen una herramienta clave para la interpretación del sistema hidrotermal presente en el área y su potencial mineralizador.

La combinación de técnicas cualitativas y descriptivas, tanto en gabinete como en campo y laboratorio, aseguró una caracterización integral de las zonas de alteración, permitiendo relacionarlas con modelos clásicos de depósitos tipo pórfido. De este modo, la metodología adoptada garantizó la

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

trazabilidad y validez de los datos obtenidos, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y decisiones exploratorias en el Proyecto La Bonita.

Gráfico N° 2 Mapa de estaciones para el análisis geológico-estructural y toma de muestras.



Elaborado: Autora

Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio constituyó una etapa clave en la caracterización de los minerales de alteración hidrotermal, permitiendo validar las observaciones macroscópicas realizadas en campo mediante análisis más detallados bajo condiciones controladas. Esta fase se dividió en tres actividades principales: la descripción física de las muestras, la determinación litológica con base en criterios petrográficos y la elaboración y análisis de láminas delgadas.

Descripción física de las muestras

Se realizó la descripción macroscópica de 40 muestras recolectadas durante la campaña de campo, con el objetivo de caracterizar sus propiedades físicas y mineralógicas básicas. Para ello, se emplearon herramientas específicas como la lupa de geólogo para la observación de minerales no

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

visibles a simple vista, lápices de dureza para comprobar la resistencia mineral según la escala de Mohs, ácido clorhídrico para detectar carbonatos por efervescencia, y un imán para identificar posibles propiedades magnéticas. Asimismo, se utilizó la tabla de colores Munsell, lo que permitió asignar con precisión el color dominante de las rocas y establecer patrones comparativos.

Cada muestra fue descrita atendiendo a parámetros como tipo de roca, color, textura, contenido mineral visible, presencia de estructuras como vetillas o clústeres, así como evidencias preliminares de alteración. Esta caracterización inicial sirvió de base para seleccionar las muestras más representativas destinadas al análisis petrográfico, garantizando la diversidad litológica y el grado de alteración presentes en la zona de estudio.

Determinación de las distintas litologías

Una vez completada la descripción física, se procedió a clasificar litológicamente las muestras, especialmente aquellas de origen ígneo, empleando el diagrama de Streckeisen (Streckeisen Rock Classification). Este método consistió en cuantificar los porcentajes relativos de los minerales principales cuarzo, feldespatos potásicos y plagioclasas

en cada muestra. Cuando la suma de estos minerales superó el 10% del volumen total, se recalculó su proporción respecto al 100% para su correcta proyección triangular en el diagrama. La ubicación del punto resultante dentro del triángulo permitió asignar el nombre litológico correspondiente según su composición modal.

Este procedimiento facilitó la clasificación precisa de las rocas ígneas presentes en el área, lo cual resultó fundamental para interpretar los procesos magmáticos previos a la alteración hidrotermal, así como para distinguir entre eventos geológicos superpuestos.

Preparación y descripción de las láminas petrográficas

A partir del conjunto de 40 muestras, se seleccionaron aquellas con mayor representatividad litológica y mineralógica para la elaboración de láminas delgadas. Se priorizaron muestras que presentaran vetillas, clústeres minerales, signos evidentes de alteración hidrotermal, o variaciones marcadas entre minerales primarios y secundarios. La preparación de las láminas siguió un protocolo técnico estandarizado: primero se cortaron bloques de roca de 8 x 20 x 30 mm utilizando un disco diamantado; posteriormente, se realizó el esmerilado del portaobjeto, seguido por el lapidado de una cara de la muestra con polvo de carburo de silicio en tamaños de 220 μm , mezclado con glicerol y agua. Una vez adherida la muestra al portaobjeto con resina, se procedió a su corte fino hasta alcanzar un espesor

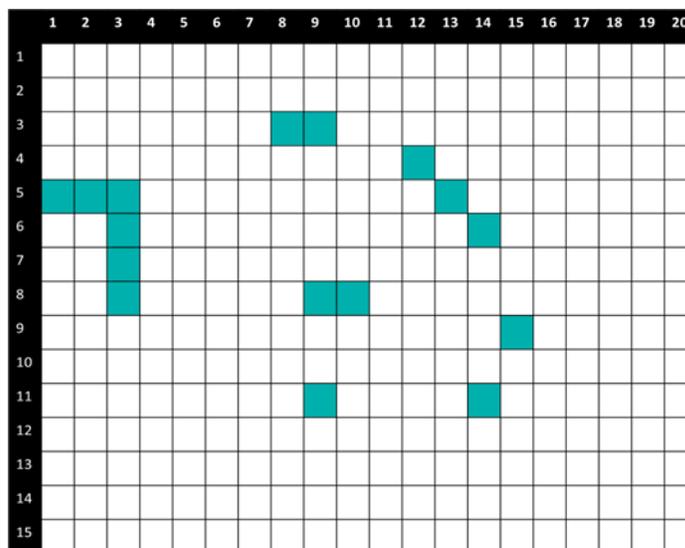
Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

de entre 0.5 y 1 mm, y finalmente se pulió hasta lograr una superficie óptima para la observación microscópica.

Las láminas obtenidas fueron examinadas bajo el microscopio petrográfico en luz polarizada, lo que permitió identificar minerales primarios, secundarios y de alteración hidrotermal. Se determinaron sus porcentajes relativos, tamaño de grano, orientación y relaciones texturales. Este análisis permitió establecer la textura de la roca (granoblástica, porfídica, intergranular, entre otras), y deducir las secuencias paragenéticas correspondientes a cada tipo de alteración observada.

Para cuantificar con precisión la composición mineralógica, se fotografiaron las zonas más representativas de cada lámina a escala conocida. Sobre cada imagen se superpuso una malla digital de 20 columnas por 15 filas (300 cuadrículas), lo que cubrió un área de 2.00 cm x 1.50 cm. Cada cuadrícula, equivalente a 1.00 mm², fue coloreada según el mineral identificado en esa área. Mediante una regla de tres simple, se determinó el porcentaje de cada mineral con base en el número de cuadrículas ocupadas, lo que proporcionó una estimación visual confiable de su proporción en la muestra total.

Gráfico N°3 Representación de la malla digital para determinar el porcentaje de composición mineral



Elaborado: Autora

Resultados

El estudio macroscópico y mesoscópico de las muestras permitió identificar tres litologías principales y una litofacie significativa en el área de estudio. Estas unidades se diferencian por su textura, mineralogía dominante, grado de alteración y evidencias de mineralización hidrotermal.

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

Litología 1: corresponde a una roca de grano medio, con textura fanerítica y notable oxidación. Presenta cuarzo y plagioclasas como minerales principales, junto con piroxenos y anfíboles alterados. Se observan vetillas de cuarzo, parches de pirita y epidota, así como zonas periféricas con alta alteración, lo que sugiere actividad hidrotermal intensa.

Litología 2: se caracteriza por su color gris oscuro verdoso, grano fino y abundante epidota y clorita como productos de alteración. Contiene plagioclasas, cuarzo y trazas de calcopirita y pirita, con vetillas y parches bien definidos. Muestra un grado moderado de alteración y baja magnetización.

Litología 3: presenta tonos gris rosáceos, con feldespato potásico dominante, cuarzo, clorita, epidota y parches de covelina. Posee menor oxidación y un magnetismo bajo, evidenciando una alteración hidrotermal más leve.

Litofacie 1: representa el contacto entre Litología 1 y diques de Litología 2, con una textura brechosa por la presencia de cuarzo lechoso en fisuras. Esta zona concentra mayor mineralización, especialmente en los pequeños cuerpos intrusivos. La clasificación litológica, apoyada en el diagrama de Streckeisen, confirmó la naturaleza ígnea de las rocas y permitió establecer una base para la interpretación de los procesos hidrotermales asociados.

Por otro lado, se ha identificado una textura brechada característica en la Litofacie 1, la cual evidencia el contacto entre granodioritas y cuerpos intrusivos de cuarzo monzodiorita. Este rasgo textural sugiere una fuerte interacción tectono-magmática en la zona, posiblemente asociada a pulsos intrusivos tardíos en un entorno hidrotermal activo.

Al analizar la distribución espacial de las litologías, se observó que hacia el norte del área de estudio, tomando como referencia el campamento (E219008, N10040847), predominan granodioritas con un grado moderado de alteración, intruidas por diques de cuarzo monzodiorita de dimensiones variables (15–30 cm de ancho). Estas intrusiones presentan un contacto neto con halos menores de oxidación, y un grado leve a moderado de alteración, acompañado de bajo a medio magnetismo.

Los afloramientos en esta zona exhiben vetas de cuarzo de entre 10 y 20 cm de espesor, sin orientación preferencial, lo que aporta a la roca una textura brechada distintiva. Esta disposición caótica refuerza la hipótesis de eventos de fracturamiento y relleno hidrotermal posterior a la consolidación de los cuerpos ígneos.

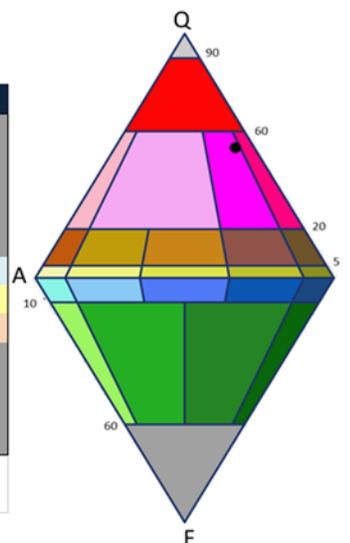
Hacia el sur, específicamente en la quebrada Chorrera Chico, se reconocen nuevamente texturas brechadas asociadas a la Litofacie 1, en alternancia con cuerpos de cuarzo monzonita. En este sector, destaca una veta de cuarzo con rumbo 66° y buzamiento de 40° (E218938, N10040721), de

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

aproximadamente 40 cm de potencia, la cual marca con claridad el contacto entre granodioritas y cuarzo monzonitas, reforzando la presencia de una zona de debilidad estructural aprovechada por la circulación hidrotermal.

Gráfico N°4 Determinación del nombre de la roca para litología 1 (Roca Granodiorita)

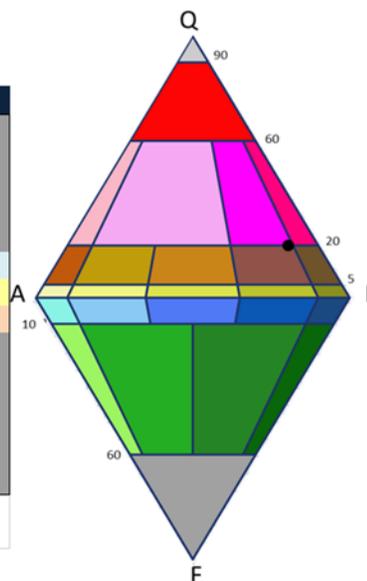
DETERMINACIÓN DE LITOLÓGÍA 1			
Contenido total de la muestra		Contenido en % al respecto de los 3 componentes minerales usados	
Minerales	%		
Cuarzo	40%	40%	$x 1.33 = 53\%$
Plagioclasa	30%	30%	$x 1.33 = 40\%$
Feldespato	5%	5%	$x 1.33 = 7\%$
Ferromagnesianos	15%		
Pirita	5%		
Epidota	5%		
TOTAL	100%	75%	$x 1.33 = 100\%$
Fuente: Díaz, M., 2017		Factor de Multiplicación $75x ? = 100 \rightarrow ? = 1.33$	



Elaborado: Autora

Gráfico N° 5 Determinación del nombre de la roca para litología 2 (Roca Cuarzo-Monzodiorita)

DETERMINACIÓN DE LITOLÓGÍA 2			
Contenido total de la muestra		Contenido en % al respecto de los 3 componentes minerales usados	
Minerales	%		
Cuarzo	10%	10%	$x 2 = 20\%$
Plagioclasa	35%	35%	$x 2 = 70\%$
Feldespato	5%	5%	$x 2 = 10\%$
Ferromagnesianos	10%		
Clorita	10%		
Pirita	10%		
Epidota	15%		
Calcopirita	5%		
TOTAL	100%	50%	$x 2 = 100\%$
Fuente: Díaz, M., 2017.		Factor de Multiplicación $50x ? = 100 \rightarrow ? = 2$	

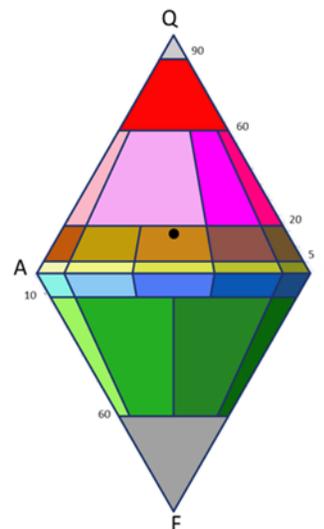


Elaborado: Autora

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

Gráfico N° 6 Determinación del nombre de la roca para litología 3 (Roca Cuarzo Monzonita)

DETERMINACIÓN DE LITOLOGÍA 3			
Contenido total de la muestra		Contenido en % al respecto de los 3 componentes minerales usados	
Minerales	%		
Cuarzo	10%	10%	$\times 1.82 = 18.2\%$
Plagioclasa	20%	20%	$\times 1.82 = 36.4\%$
Feldespato	25%	25%	$\times 1.82 = 45.4\%$
Ferromagnesianos	10%		
Clorita	10%		
Pirita	10%		
Epidota	10%		
Covelina	5%		
TOTAL	100%	55%	$\times 2 = 100\%$
Fuente: Díaz, M., 2017.		Factor de Multiplicación $55x ? = 100 \rightarrow ? = 1.82$	



Elaborado: Autora

Las alteraciones hidrotermales identificadas en las litologías del área de estudio responden principalmente a procesos de hidrólisis, los cuales generan reacciones de neutralización en los fluidos circulantes. Este fenómeno da lugar a una zonación mineralógica bien definida, observable tanto en la mezcla los cristales de mayor tamaño, especialmente en minerales susceptibles como las plagioclasas. En ambientes de baja a media temperatura, la zonación afecta preferentemente a las fracciones cálcicas de estos minerales particularmente a las anortitas, según el análisis petrográfico realizado, promoviendo su alteración hacia fases secundarias como cuarzo, clorita, illita, montmorillonita y epidota. Estos productos de reemplazo constituyen indicadores clave de procesos hidrotermales y permiten definir asociaciones minerales características.

A partir de estas transformaciones, se ha podido delimitar un ensamble mineral típico de ambientes hidrotermales moderados, compuesto por sericita, illita, clorita ± epidota, pirita y montmorillonita, cuya distribución está ligada tanto a la estructura de la roca como al flujo de fluidos mineralizantes. Este ensamble sugiere condiciones hidrotermales compatibles con zonas fílicas o clorítico-sericíticas, de relevancia en modelos tipo pórfido.

Asimismo, los minerales ferromagnesianos presentes en las litologías evaluadas principalmente anfíboles y piroxenos, que representan aproximadamente el 10% de los componentes primarios también evidencian una alteración significativa. Estos son reemplazados por clorita, illita, cuarzo y

pirita, conformando un ensamble clorita–epidota \pm pirita–sericita, comúnmente asociado a zonas de transición entre alteración propilítica y sericítica.

Discusión

La caracterización de los minerales de alteración hidrotermal realizada en el presente estudio confirma la existencia de procesos geoquímicos activos que han modificado las litologías originales del área comprendida entre las quebradas Chorrera Chico y El Bicundo. Esta zona, situada en el flanco oriental de la Cordillera Real del Ecuador, presenta un marco geológico favorable para la formación de sistemas mineralizados tipo pórfido, como lo sugieren tanto las alteraciones identificadas como la distribución de las litologías y estructuras (Pons et al., 2023; Ríos-Guerrero & Ballesteros-Camaro, 2021)

Los resultados obtenidos permiten observar una zonación de alteración compatible con modelos clásicos de depósitos tipo pórfido de cobre, como los propuestos por Meyer y Hemley (1967) y validados posteriormente en contextos andinos (Camus, 1975; Sillitoe, 2002). En particular, la presencia de minerales como clorita, sericita, epidota e illita, tanto en las plagioclasas como en los minerales ferromagnesianos, sugiere la superposición de al menos dos zonas principales: una clorítico-sericítica y otra fílica, evidenciadas por la transición entre alteración moderada en las granodioritas y un mayor desarrollo de vetillas de cuarzo y parches minerales en las monzodioritas (Fulignati, 2020).

La zonación observada en las plagioclasas, especialmente las ricas en calcio (anortita), corrobora lo planteado por MaksaeV (2001), en cuanto a que las condiciones de baja a media temperatura favorecen la formación de minerales de reemplazo como montmorillonita, illita y cuarzo. Esta transformación es indicativa de un proceso de hidrólisis progresivo, el cual tiende a neutralizar los fluidos hidrotermales y facilita la formación de minerales guía (Satián & Alonso, 2019). En consecuencia, la presencia de estos minerales permite inferir que el sistema hidrotermal ha evolucionado en condiciones estables de temperatura y composición química del fluido, tal como también ha sido observado en sistemas similares en Cotabambas y El Abra (Wilson et al., 2003; Ambrus, 1977).

Asimismo, el reconocimiento de estructuras como diques de cuarzo monzodiorita, fisuras rellenas con cuarzo lechoso y zonas brechadas, refuerza la idea de que los fluidos ascendieron a través de zonas de debilidad preexistentes, lo que concuerda con lo señalado por Camuti (2008) sobre la relevancia de las estructuras en la canalización de soluciones mineralizantes. Las texturas brechosas,

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

sumadas a la presencia de vetas de cuarzo con dirección variable, apuntan a un sistema de fracturamiento tardío que habría facilitado la precipitación de minerales como piritita, epidota y covelina, en fases sucesivas de alteración (Aguirre-Murillo et al., 2024).

La interpretación de ensambles minerales como sericita–illita–clorita \pm epidota–pirita no solo sustenta la existencia de un sistema hidrotermal activo en la zona, sino que también aporta evidencia para delimitar zonas de interés económico dentro del Proyecto La Bonita. La presencia de epidota tanto como producto de reemplazo como por precipitación directa sugiere fases hidrotermales superpuestas y, posiblemente, múltiples pulsos magmáticos con condiciones fisicoquímicas diferenciadas (Perelló et al., 2004a; Delendatti, 2003).

A pesar de los diversos antecedentes exploratorios llevados a cabo desde la década de 1990 por instituciones como INEMIN/CODIGEM y empresas como All Metals Minerals S.A. o ENAMI EP (ENAMI EP, 2016; Mata et al., 2024), no se había realizado hasta ahora una clasificación sistemática de los minerales de alteración presentes en la zona, lo cual había limitado la interpretación integral del potencial metalogénico. Esta investigación, por tanto, llena un vacío crítico en el conocimiento geológico del área, aportando una primera aproximación estructurada de los ensambles hidrotermales y sus relaciones litológicas (Carmelo et al., 2019; Corrales & Rejas, 2010).

Desde el punto de vista metalogénico, los hallazgos apuntan a un sistema que ha evolucionado bajo condiciones propicias para la concentración de metales como cobre, oro y posiblemente plata, en concordancia con modelos de depósitos tipo pórfido. En particular, la asociación de alteración fílica y clorítico-sericítica, junto con estructuras canalizadoras, constituye un indicador clave de zonas de enriquecimiento potencial (Barrera-Cortes et al., 2017; Camus, 1975).

En síntesis, los resultados del presente estudio confirman el valor de aplicar metodologías integradas —que combinan análisis macroscópico, petrográfico y espacial— para interpretar sistemas hidrotermales en regiones con potencial geológico subexplorado. Esta aproximación no solo contribuye al conocimiento científico del Proyecto La Bonita, sino que también proporciona una base técnica sólida para futuras campañas de exploración, optimizando la identificación de blancos de perforación y reduciendo la incertidumbre geológica (Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri, 2018; Valencia et al., 2018).

Conclusiones

- La caracterización de los minerales de alteración hidrotermal en la zona comprendida entre las quebradas Chorrera Chico y El Bicundo permitió identificar un sistema hidrotermal activo con una clara zonación mineralógica, coherente con modelos tipo pórfido de cobre. La presencia de minerales como sericita, clorita, epidota, illita y pirita, tanto en formas diseminadas como en vetillas y parches, evidencia procesos de hidrólisis progresiva sobre plagioclasas y minerales ferromagnesianos, bajo condiciones de baja a media temperatura. Estos hallazgos confirman la existencia de un sistema de alteración complejo, cuya evolución ha estado condicionada por factores estructurales y litológicos.
- Asimismo, el análisis de campo y laboratorio permitió establecer la existencia de ensamblajes minerales que responden a zonas de alteración clorítico-sericíticas y fílicas, las cuales se superponen parcialmente, sugiriendo múltiples pulsos hidrotermales. Las litologías dominantes, compuestas por granodioritas y cuarzo monzodioritas, muestran un grado variable de alteración, mientras que las texturas brechosas y los contactos netos observados entre unidades litológicas indican una dinámica estructural activa que facilitó la circulación de fluidos mineralizantes.
- Finalmente, este estudio llena un vacío importante en la comprensión geológica del Proyecto La Bonita, al ofrecer una primera aproximación sistemática a la identificación y distribución de minerales de alteración hidrotermal en el área. Los resultados no solo aportan al conocimiento académico sobre los procesos mineralizantes en la región andina ecuatoriana, sino que también ofrecen una base técnica clave para la planificación de futuras campañas de exploración, permitiendo una identificación más precisa de zonas con potencial metalogénico.

Referencias

1. Aguirre-Murillo, I., Franco-Hernández, E., & Naranjo-Sierra, E. (2024). Metallographic and microthermometric characterization of the Estrella-Diamantina project, Remedios-Segovia-Zaragoza Mining District, Antioquia-Colombia. *Boletín de Geología*, 46(2), 83–104. <https://doi.org/10.18273/revbol.v46n2-2024005>
2. Ambrus, J. (1977). Geology of the El Abra Porphyry Copper Deposit, Chil. *Economic Geology*, 72, 1062–1085. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.72.6.1062>

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

3. Barrera-Cortes, M., Frantz, J. C., Charão-Marques, J., & Sánchez-Celis, D. (2017). Yarumalito porphyritic system, Antioquia: Petrography and characterization of hydrothermal alterations. *Boletín de Geología*, 39(1), 127–136. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n1-2017006>
4. Camus, F. (1975). Geology of the El Teniente Orebody with Emphasis on Wall-Rock Alteration. *Economic Geology*, 70(8). <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.8.1341>
5. Camuti, K. (2008). Lantana Exploration Lantana Exploration--TLS. <https://smedg.org.au/wp-content/uploads/2020/07/TLS%20Kaylene%20Camuti.pdf>
6. Carmelo, D., Jaraba, M., Rafael, K., Díaz, A., & Rojas Martínez, E. E. (2019). Prospección y caracterización del yacimiento de cobre, en la vereda Los Cueros, Villanueva, departamento de La Guajira-Colombia. *Prospection and characterization of copper deposit in Los Cueros village, Villanueva, La Guajira's department-Colombia*. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 27, Issue 2).
7. Corrales, R. A., & Rejas, J. (2010). Caracterización de alteración hidrotermal y dinámica de cobertura de suelos mediante métodos de teledetección, en el Valle de Choluteca, Honduras. *Revista Postgrados UNAH*, 4(2). https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/80029976/caracterizacion_alteracion-libre.pdf?1643670990=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCaracterizacion_de_alteracion_hidroterma.pdf&Expires=1747895930&Signature=OO5LhjZoiwPSqbkb8VO2GITidj8IweWbeZLCCC1-GK9QaA2Ek5vP0q3BWXQIBlar3ghXyoKezA7FYr6VfAjlW-i5NFi3ev3cTa9fpoy5gqbeB15nJxrI18PPNNoa7oeJPSFTQ3bgGkKFcTExT~s8BoDeA1asbyriRnHI-10flU1QAtT6t~mTYNpFJfMDxdu3ijwTmWHR7qGHBJoOyWirk-tdrx7zDjG90C5WbaRIWYsjYXqmZf~t0~QIANtlu9zYIP~LwweanxYbjQk36aqmUSJJIUJhAv2EJ9D96sjme9hgCuXHgBgaUIuaRn3tN5AVFvvr1o-Huqh4O7mMWEBzpA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
8. Delendatti, G. (2003). Caracterización de zonas de alteración hidrotermal en las márgenes del río Castaño, provincia de San Juan, mediante procesamiento digital de imágenes TM. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 58(1), 97–108. <https://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v58n1/v58n1a08.pdf>

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

9. Dilles, J. H., Cleve Solomon, G., Taylor, H. P., & Einaudi, M. T. (1992). Oxygen and Hydrogen Isotope Characteristics of Hydrothermal Alteration at the Ann-Mason Porphyry Copper Deposit, Yerington, Nevada*. In *Economic Geology* (Vol. 87).
10. Enami EP. (2016). Presentación de la geología y exploración del Proyecto La Bonita, ubicado en la provincia de Sucumbíos, en las estribaciones de la Cordillera Real. Quito.
11. Fulignati, P. (2020). Clay minerals in hydrothermal systems. In *Minerals* (Vol. 10, Issue 10, pp. 1–17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/min10100919>
12. García, A. V., Sánchez, J. J., Torio, E., Bonilla, G. E., & Rodríguez, A. I. (2022). Characterization of the alteration minerals in domes and pyroclastic deposits of Paipa Geothermal Area, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 219–233. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022010>
13. Mata, L., Gómez, M., Gómez, E., Alvarado, S., Lira, M., & Pérez, E. (2024). Mapeo de alteraciones hidrotermales mediante el uso de combinaciones de banda de imágenes satelitales con fines de prospección geotérmica en la zona norte del estado de Chihuahua, México. *Revista Multidisciplinaria de Ciencia Básica, Humanidades, Arte y Educación*, 2(9), 111–120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14478737>
14. Montenegro, T., & Vattuone, M. (2008). Asociaciones minerales de muy bajo grado metamórfico vinculadas a alteración hidrotermal, sudoeste de Trevelin, Chubut, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(2), 302–313. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v25n2/v25n2a8.pdf>
15. Naranjo-Sierra, E., & Alvarán-Echeverri, M. (2018). Características geológicas, isotópicas y estructurales del depósito vetiforme Los Mangos, Antioquia-Colombia. *Boletín de Geología*, 40(1), 93–108. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018006>
16. Pons, M. J., Mendiberri, J., Arce, M., Greco, G. A., Musso, T. B., Fernández, M. L., Hauser, N., & González, P. A. (2023). Geology, hydrothermal alteration and mineralogy of the Sofía-Julia-Valencia Veins, Andacollo, Neuquén, Argentina. *Andean Geology*, 50(1), 93–126. <https://doi.org/10.5027/andgeoV50n1-3403>
17. Ríos-Guerrero, J., & Ballesteros-Camaro, C. A. (2021). Chemical classification and geothermometric of sulfides from the Pilar Mine gold deposit (Greenstone Belt, Cuadrilátero Ferrífero, Brazil). *Boletín de Geología*, 43(1), 147–161. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n1-2021007>

Caracterización de minerales de alteración hidrotermal: Proyecto minero la Bonita, Ecuador

18. Santamaría-Galvis, C., Ríos-Reyes, A., & Pardave-Livia, W. (2023). Caracterización mineralógica y geoquímica de la mineralización vetiforme de Au-Ag de la Quebrada Aserradero, municipio de California, Santander (Colombia): implicaciones geometalúrgicas. *BISTUA*, 31(1).
<https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/bistua/article/view/2328/2918>
19. Satián, L., & Alonso, J. (2019). Caracterización geológica y mineralógica de las vetas “San José” y “La Arenosa”, en la mina Santa Marianita de la parroquia Malvas, cantón Zaruma provincia de El Oro. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 13(2), 118. <https://doi.org/10.53591/cna.v13i2.1195>
20. Sillitoe, R. H. (2002). Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration. *Mineralium Deposita*, 37(1), 4–13. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0227-6>
21. Valencia, M., Marchena, A., Lozada, V., & Martínez, W. (2018). CARACTERÍSTICAS METALOGENÉTICAS DE UN YACIMIENTO MINERAL IOGG. Resúmenes Ampliados Del XIX Congreso Peruano de Geología, 14. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG19-896.pdf>
22. Wilson, A., Cooke, D., & Harper, B. (2003). The Ridgeway Gold-Copper Deposit: A High-Grade Alkalic Porphyry Deposit in the Lachlan Fold Belt, New South Wales, Australia. *Economic Geology*, 98, 16–37. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.8.1637>