

# Clasificación y evolución de venillas hidrotermales en depósitos tipo pórfido de cobre

Geología y Exploraciones - Geología económica de yacimientos minerales metálicos y no metálicos. Investigaciones geológicas, petro-mineralógicas, geofísicas y geoquímicas.

Elí Cerna <sup>1</sup>, Williams Mata <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Volcan Compañía Minera S.A.A., Av. Manuel Olguín 373, Santiago de Surco, Lima, Perú, [ecerna@volcan.com.pe](mailto:ecerna@volcan.com.pe)

<sup>2</sup> GEOFORZA S.A.C., Av. Arequipa 3383, San Isidro, Lima. [wmatar@uni.pe](mailto:wmatar@uni.pe)

## RESUMEN

Las venillas hidrotermales en depósitos tipo pórfido de cobre constituyen un registro esencial de la evolución magmático-hidrotermal asociada a la mineralización. Este trabajo presenta una sistematización técnica de su clasificación y secuencia evolutiva (DQ → A → BMQ → B → C → D), basada en una revisión crítica de la literatura especializada y en la observación macroscópica de veinte muestras representativas de la colección del Centro de Investigación de Depósitos Minerales (CIDM) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Se integran datos analíticos publicados (mineralogía, condiciones fisicoquímicas, geoquímica y técnicas instrumentales), procedentes de la bibliografía, con las evidencias texturales y las relaciones de corte registradas por observación macroscópica en las mencionadas muestras. Se describen los principales tipos de venillas, desde las venillas de cuarzo profundas (DQ), pobres en sulfuros, hasta las sericíticas tardías con pirita, identificando variaciones y solapamientos locales en la secuencia propuesta (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010; Reed et al., 2013; Cernuschi et al., 2023). Asimismo, se caracterizan los halos tempranos EDM (Early Dark Micaceous), PGS (Pale-Green Sericite) y GRS (Green Sericite) en términos de minerales diagnósticos, distribución espacial y potencial como indicadores de vectorización temprana. Para ilustrar la variabilidad regional se contrastaron trabajos publicados que documentan depósitos tipo pórfido en Perú, Chile, Estados Unidos (EE. UU.), Indonesia, Argentina, Ecuador y Canadá, los cuales se encuentran detallados en la bibliografía. Los resultados muestran que la integración de la zonación de venillas y halos con la evidencia bibliográfica constituye una herramienta útil para orientar campañas de exploración hacia dominios de mayor potencial Cu–Mo y para fortalecer los modelos geometalúrgicos. En este sentido, se discuten criterios operativos preliminares para la vectorización y el modelado de dominios Cu–Mo, orientados a optimizar la identificación de objetivos y el diseño de muestreo y perforación. Finalmente, se reconocen limitaciones interpretativas derivadas de telescopamiento, remobilización y exhumación,

y se plantean prioridades para la validación analítica y cronológica en futuras investigaciones.

**Palabras clave:** Pórfido, venillas hidrotermales, halos de alteración, vectorización.

## 1. Introducción

Los sistemas tipo pórfido de cobre constituyen la principal fuente mundial de Cu y Mo, caracterizándose por su gran volumen, zonación hidrotermal concéntrica y abundancia de venillas mineralizadas. Estas venillas registran la evolución físico-química del sistema, desde la liberación inicial de fluidos magmáticos hasta estadios hidrotermales tardíos, por lo que su identificación, clasificación y relaciones de corte permiten reconstruir la historia paragenética del yacimiento.

La clasificación de venillas ha progresado con aportes de campo y laboratorio que han definido asociaciones mineralógicas, secuencias de alteración y cronologías relativas. Los trabajos pioneros de Gustafson y Hunt (1975) establecieron tipologías iniciales, mientras que estudios posteriores (e.g., Corbett & Leach, 1998; Sillitoe, 2010) incorporaron criterios texturales y paragenéticos. Revisiones integradoras (Seedorff et al., 2005; Proffett, 2009; Cooke et al., 2014) consolidaron un marco interpretativo en el que las venillas actúan como indicadores clave de evolución hidrotermal y metalogénesis. De manera complementaria, la caracterización de halos tempranos (EDM, PGS, GRS) ha demostrado utilidad como herramienta de vectorización hacia zonas de mayor potencial metalífero (Rivera Cornejo & Cernuschi, 2019; Sillitoe, 2010).

En este contexto, el presente estudio sistematiza los principales tipos de venillas en sistemas pórfido de cobre, integrando una revisión bibliográfica crítica con la caracterización mineralógica, textural y de alteración, incluida la paragenesis, de veinte muestras representativas de la colección del Centro de Investigación de Depósitos Minerales de la Universidad Nacional de Ingeniería. Asimismo, se contrastan ejemplos de depósitos en Perú, Chile, Estados Unidos, Indonesia, Argentina, Ecuador y Canadá, con el fin de reconocer patrones recurrentes y variaciones locales en la evolución de las venillas hidrotermales en pórfidos cupríferos.

## 2. Objetivos

Analizar la evolución y clasificación de las venillas hidrotermales en depósitos tipo pórfito de cobre, evaluando su potencial como herramienta de vectorización y de delimitación de dominios geometalúrgicos, a partir de la caracterización de veinte muestras del CIDM (UNI) complementada con la síntesis de datos bibliográficos y casos regionales.

## 3. Compilación de Datos y Desarrollo del Trabajo

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque integrador que combina una revisión exhaustiva de información bibliográfica, la descripción directa de muestras y la síntesis comparativa de casos, con el objetivo de profundizar en la caracterización de venillas hidrotermales tipo pórfito y de sus halos de alteración.

En una primera etapa se revisaron trabajos clave sobre la geología de pórfitos cupríferos, incluyendo aportes clásicos (Gustafson & Hunt, 1975; Sillitoe, 2010) y estudios que han refinado la clasificación de venillas, la secuencia paragenética y las condiciones de formación (Dilles & Einaudi, 1992; Arancibia & Clark, 1996; Seedorff et al., 2005; Cernuschi et al., 2023). Para ilustrar la variabilidad regional se contrastaron trabajos publicados que documentan depósitos tipo pórfito en Perú, Chile, EE. UU., Indonesia, Argentina, Ecuador y Canadá, los cuales se encuentran detallados en la bibliografía. Durante esta revisión se evaluaron prototipos y casos de estudio a escala regional y global, entre ellos El Salvador, Chuquicamata, El Teniente, Los Pelambres y Escondida (Chile); Butte y Bingham Canyon (EE. UU.); Batu Hijau (Indonesia); y casos andinos como Haquira, Cuajone y Antamina (Perú) y Taca Taca (Argentina), además de estudios sobre Junín (Ecuador), con el propósito de contrastar patrones comunes y variaciones locales.

La segunda fase consistió en la descripción detallada de veinte muestras de mano pertenecientes a la colección del CIDM (UNI). Estas muestras, procedentes de depósitos tipo pórfito Antapaccay (2), Ferrobamba (1), Chancas (1), Cerro Verde (1), Cuajone (2), El Galeno (1), Atalaya (1), Michiquillay (1), Pukaqaqa (1), Toquepala (1), Toromocho (3), Zafranal (1), Chuquicamata (3) y El Salvador (1), fueron analizadas con énfasis en la caracterización textural y morfológica de las venillas (véase Tabla 1 en Anexos). Cada muestra contaba con un código de referencia y fue documentada mediante fotografías con escala y datos de procedencia. La descripción se realizó empleando lupa 20X y un lápiz imán rayador, siguiendo un

esquema sistemático que consideró el tipo de venilla, la mineralogía de relleno, relaciones de corte y la alteración asociada.

Finalmente, se integraron dos fuentes principales de información: (i) datos bibliográficos previamente publicados (condiciones T-P, geoquímica, SEM-CL, Ti-in-quartz, entre otros) y (ii) la descripción de las veinte muestras del CIDM. Esta integración permitió identificar patrones recurrentes en la sucesión de venillas (DQ, A, BMQ, B, C, D) y en los estilos de alteración, reconociendo al mismo tiempo variaciones y solapamientos locales según el contexto geotectónico (Seedorff et al., 2005; Mercer & Reed, 2013). Con base en esta compilación se plantea un modelo conceptual preliminar con aplicación en la exploración de sistemas pórfitos.

## 4. Presentación y discusión de resultados

### 4.1. Secuencia evolutiva de venillas hidrotermales y su significado en sistemas pórfito de cobre

La evolución de las venillas hidrotermales en depósitos tipo pórfito de cobre refleja la dinámica de los fluidos magmático-hidrotermales, condicionada por el enfriamiento progresivo, la descompresión y la mezcla con aguas meteóricas (Sillitoe, 2010; Osorio et al., 2024). Estos cambios físico-químicos quedan registrados en las rocas y pueden emplearse como herramienta de vectorización, por ejemplo mediante firmas geoquímicas asociadas a la alteración potásica (Cooke et al., 2014).

El esquema conceptual DQ → A → BMQ → B → C → D, junto con los halos tempranos EDM, PGS y GRS, constituye un marco operativo ampliamente utilizado para describir la secuencia de venillas y estilos de alteración en pórfitos cupríferos (Seedorff et al., 2005). Investigaciones recientes demuestran que cada generación de venillas puede registrar condiciones fisicoquímicas diferenciadas en cuanto a temperatura, presión, composición y fugacidad de azufre, lo que las convierte en marcadores temporales y vectores geoquímicos útiles para exploración (Cernuschi et al., 2023; Osorio et al., 2024).

En la fase temprana, las venillas Deep Quartz (DQ) representan la exsolución de fluidos magmáticos a altas temperaturas. Estudios en Butte, Montana, reportan inclusiones fluidas con temperaturas de homogeneización entre 575 y 650 °C (Rusk et al., 2008). Trabajos más recientes confirman valores incluso mayores en pulsos específicos, hasta ~650 °C (Cernuschi et al., 2023). Estas venillas suelen estar compuestas por cuarzo masivo, con escasa mineralización metálica. A continuación aparecen las venillas tipo A, constituidas por cuarzo con

calcopirita  $\pm$  bornita y asociadas a alteración potásica. Representan la transición hacia el pulso principal de mineralización y con frecuencia se relacionan con halos EDM en los márgenes de las venillas (Brimhall, 1977; Seedorff et al., 2005).

Durante la fase intermedia, los fluidos residuales enriquecidos en molibdeno originan venillas bandeadas de cuarzo–molibdenita (BMQ). Estas son características de sistemas Cu–Mo en niveles intermedios a profundos, como Yerington (Dilles & Einaudi, 1992) y Chuquicamata (Gustafson & Hunt, 1975). Suelen formarse en pulsos hidrotermales relativamente calientes, de 400 a 500 °C, con reportes puntuales a temperaturas mayores, en asociación con aportes magmáticos profundos (Mercer & Reed, 2013; Cernuschi et al., 2018; Osorio et al., 2024).

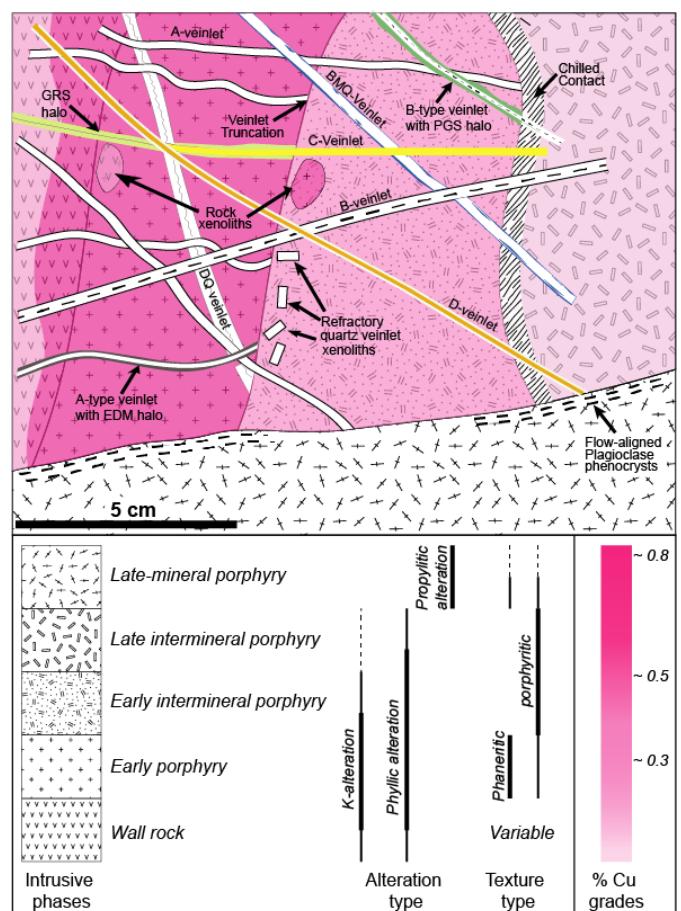
La fase tardía está dominada por las venillas C y D. Las primeras se desarrollan a temperaturas más bajas, generalmente  $< 400$  °C, y contienen sulfuros simples, principalmente pirita  $\pm$  calcopirita, con menor volumen en el sistema (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010; Cooke et al., 2014). Se han interpretado como el resultado de la disminución de la solubilidad del cuarzo durante el enfriamiento retrógrado (Candela, 1992; Monecke et al., 2018). Por su parte, las venillas tipo D se caracterizan por cuarzo con pirita y halos sericíticos bien desarrollados, reflejando condiciones más ácidas y la mayor participación de fluidos de baja salinidad y la influencia creciente de fluidos hidrotermales tardíos y/o aguas meteóricas, lo que marca el tránsito hacia un ambiente epitermal y el cierre del potencial mineralizante (Seedorff et al., 2005; Corbett, 2009; Sillitoe, 2010).

En años recientes ha cobrado relevancia la caracterización de los early halos: EDM, PGS y GRS. Estas manifestaciones frecuentemente preceden o coexisten con las venillas tipo A y representan pulsos hidrotermales iniciales (Brimhall, 1977; Rieder et al., 1998; Cernuschi et al., 2018, 2023). Los halos EDM contienen biotita secundaria y feldespato potásico, mientras que PGS y GRS se caracterizan por la presencia de micas blancas, principalmente muscovita y fengita, comúnmente descritas en conjunto bajo el término sericita (Rieder et al., 1998; Reed et al., 2013). Estas variaciones mineralógicas y texturales se reconocen tanto en campo como en estudios petrográficos. Los early halos suelen manifestarse como zonas de alteración pervasiva difusa, con espesores de centímetros a decímetros, y tienden a concentrar las primeras trazas de sulfuros de cobre (Rusk et al., 2008; Reed et al., 2013). En varios depósitos se ha documentado que los early halos definen arreglos subverticales con alta

densidad de mineralización diseminada. En Haquira East (Perú) se reportan halos EDM–PGS asociados a venillas A y mineralización temprana de Cu–Mo (Cernuschi et al., 2018). En Copper Creek (Arizona), la presencia de halos tempranos se interpreta como vector exploratorio clave en la búsqueda de pórfidos ocultos (Rivera & Cernuschi, 2019; Proffett, 2009). En Taca Taca (Argentina), la alteración sericítica temprana tipo GRS concentra mineralización cuprífera significativa, con sectores puntuales que alcanzan leyes cercanas a 1 % Cu (Benavides, 2017).

En síntesis, la secuencia de venillas, integrada con el reconocimiento de halos tempranos EDM, PGS y GRS (Figura 1), constituye una herramienta eficaz para reconstruir la evolución hidrotermal de los pórfidos cupríferos. Además, la identificación de estas venillas y halos ofrece criterios de vectorización exploratoria hacia dominios de mayor potencial Cu–Mo, especialmente útil en etapas iniciales de perforación donde los stockworks extensos son aún incipientes.

Figura 1



Nota. Esquema de un sistema pórfido de cobre que muestra la secuencia de venillas (DQ  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  BMQ  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  C  $\rightarrow$  D), los early halos, sus relaciones de corte, las fases intrusivas y texturas asociadas, así como las zonas de alteración y la distribución de la ley de Cu (%). (Modificado de Cerna et al., 2024).

## 5. Caracterización Sistemática de los Tipos de Venillas Hidrotermales

### 5.1. Venillas Deep Quartz (DQ)

#### 5.1.1. Definición y contexto genético

Las venillas tipo DQ, también llamadas *barren quartz veins*, son venillas de cuarzo masivo, de color blanquecino y de grano medio a relativamente grueso, con *textura blocky* y habitualmente pobres en sulfuros de cobre; en casos puntuales contienen molibdenita de grano grueso. (Cernuschi et al., 2012; Rusk et al., 2008). Con frecuencia incorporan parches o cristales flotantes de feldespato y cantidades variables de anhidrita; pueden asociarse a magnetita (Figura 3), brechas biotíticas y texturas magmático-hidrotermales (UST). (Seedorff et al., 2005; Cernuschi, 2018). Espacialmente, predominan en los núcleos profundos y de baja ley (subeconómicos) de muchos pórpidos y son más abundantes por debajo de los niveles controlados por venillas A. (Cernuschi et al., 2012; Clode et al., 1999). Suelen coexistir o relacionarse temporalmente con diques aplíticos formando cuerpos *vein-dike*; su edad relativa frente a las venillas A varía por depósito (coetáneas, ligeramente anteriores o posteriores), de modo que su reconocimiento en testigo es útil para la vectorización vertical. (Reed & Rusk, 2013; Proffett, 2003).

#### 5.1.2. Mineralogía típica

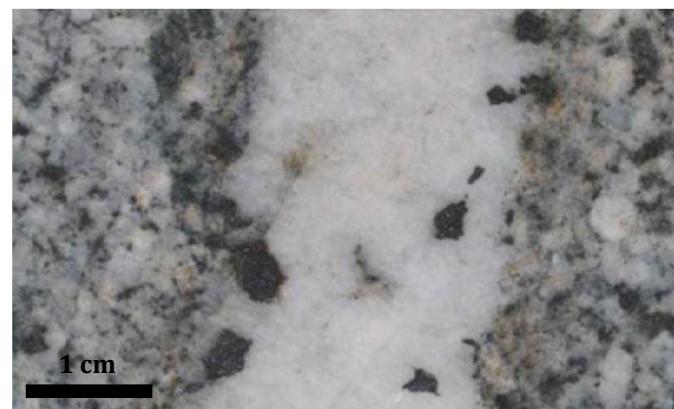
- Cuarzo de grano fino a medio, con textura *blocky* en profundidad y color blanquecino o lechoso (*milky quartz*) (Figuras 2 y 3).
- Ausencia o escasez de sulfuros de cobre; el Cu puede aparecer como parches dispersos entre bloques de cuarzo.
- Presencia ocasional de molibdenita grueso.

Figura 2



Venilla tipo DQ, compuesta por cuarzo lechoso, cortada por una venilla tipo B (pirita, calcopirita y parches de molibdenita). Muestra Ptm-13, colección CIDM. Toromocho. Perú.

Figura 3



Nota. Venilla tipo DQ, de aproximadamente 1 cm de grosor, compuesta por cuarzo lechoso acompañado de magnetita. Muestra de Batu Hijau a 942 m de profundidad (Setyandhaka et al., 2008).

#### 5.1.3. Texturas y estructuras

- Venillas rectilíneas o irregulares compuestas casi exclusivamente por cuarzo.
- Reemplazo parcial de feldespatos en la roca encajonante asociado a alteración potásica profunda (Meyer & Hemley, 1967; Seedorff et al., 2005).
- Ausencia de bandas metálicas u oxidadas.
- A menudo rellenas por cuarzo claro (*milky quartz*) que puede mostrar baja o nula catodoluminiscencia en SEM-CL; este comportamiento ha sido documentado en estudios de cuarzo temprano (Rusk & Reed, 2002).

#### 5.1.4. Alteración hidrotermal asociada

- Alteración potásica incipiente (alteración biotítica y K-feldespato en halos difusos).
- En la etapa DQ predominan alteraciones potásicas y por lo general no se observan halos serícicos o cloríticos extensos, si bien éstos pueden desarrollarse y sobreimponerse en etapas posteriores.
- En algunas localidades, se observan halos EDM desarrollándose a lo largo de bordes de microfracturas tempranas; esta observación ha sido documentada en trabajos regionales y estudios de caso (Brimhall, 1977; Rusk et al., 2008; Cernuschi et al., 2019).

#### 5.1.5. Condiciones de formación

- Temperatura: condiciones de alta temperatura, típicamente  $>500$  °C, con registros puntuales que en ejemplos excepcionales alcanzan  $\sim 600$ – $650$  °C (Rusk et al., 2008; Cernuschi et al., 2023; Seedorff et al., 2005).

- Presión: >1.5–2.5 kbar (~6–8 km de profundidad), típica de venillas DQ en sistemas porfiríticos (Rivera Cornejo & Cernuschi, 2022).
- Fluidos magmáticos: predominan fluidos ricos en  $H_2O$  y  $Cl^-$  con metales remanentes (Mo, Cu) en solución; los procesos físico-químicos que gobiernan su evolución están descritos por Meyer & Hemley (1967) y revisiones termodinámicas recientes (Heinrich, 2007).

#### 5.1.6. Relaciones de corte y cronología relativa

- Son anteriores a todas las venillas mineralizadas.
- Actúan como precursoras de los sistemas de *stockwork* mineralizados.
- Pueden ser parcialmente retrabajadas por venillas tipo A y B (Figura 9).

#### 5.1.7. Ejemplos de campo / depósitos representativos

- Haquira Este (Perú): venillas DQ profundas asociadas a halos *early* incipientes (EDM/PGS/GRS); ver estudios de campo y termometría publicados por Cernuschi et al. (2018, 2019).
- Butte (Montana, EE. UU.): cuarzo profundo de tipo “barren” con escasa asociación cuprífera en la base del sistema; evidencias microtermométricas e inclusiones fluidas se encuentran en Rusk et al. (2008).
- El Teniente (Chile): sectores profundos con cuarzo de tipo DQ y baja mineralización metálica visible, descritos en los estudios clásicos de Francisco Camus y en síntesis posteriores (Camus, 1975; Cannell et al., 2005).

#### 5.1.8. Implicancias en exploración y modelamiento

- Su presencia indica la raíz del sistema porfirítico y las zonas de alta temperatura.
- Permiten ubicar el centro del sistema hidrotermal vinculado al emplazamiento del pórfito.
- Su ausencia en superficie puede indicar dos escenarios contrastantes: (i) erosión significativa del sistema hidrotermal, o (ii) que el pórfito aún permanece enterrado bajo rocas suprayacentes.

### 5.2. Halos Tempranos (EDM, PGS, GRS)

#### 5.2.1. Definición y contexto genético

Los halos tempranos (early halos) constituyen las primeras manifestaciones de circulación hidrotermal en depósitos tipo pórfito Cu–Mo

(Seedorff et al., 2005; Rusk et al., 2008). Representan zonas de alteración incipiente que marcan el inicio de la interacción entre fluidos magmáticos y la roca de caja, y son fundamentales para la evolución estructural y geoquímica del sistema. Se forman durante la fase temprana de exsolución magmática, bajo condiciones de alta temperatura (~575–650 °C) y presiones litostáticas equivalentes a 6–9 km de profundidad (Rusk et al., 2008; Cernuschi et al., 2023), en presencia de fluidos hipersalinos derivados del magma (Heinrich, 2007; Audétat et al., 2008). Se presentan como halos centimétricos de alteración alrededor de fracturas o microfracturas, generados por reemplazo de minerales de la roca huésped por biotita secundaria, feldespato potásico y micas blancas (muscovita–fengita), comúnmente descritas en conjunto como sericitas (Rivera & Cernuschi, 2022). Inicialmente no constituyen venillas en sentido estricto debido a sus espacios abiertos incipientes (Brimhall, 1977; Rivera & Cernuschi, 2022), aunque pueden sellarse posteriormente por cuarzo y sulfuros, evolucionando hacia venillas plenamente desarrolladas (Brimhall, 1977; Rusk et al., 2008).

Las Figs. 4–9 ilustran ejemplos representativos de los subtipos EDM, PGS y GRS. Se reconocen tres subtipos principales según su mineralogía dominante:

- i. **EDM (Early Dark Micaceous):** Halos oscuros caracterizados por la presencia predominante de biotita secundaria (Figuras 4 y 7).
- ii. **PGS (Pale Green Sericite):** Halos verde pálido donde domina la muscovita tipo fengita, con textura parcialmente destructiva (Figura 5).
- iii. **GRS (Green Sericite):** Halos verdegrisáceos con muscovita verde y mayor contenido de cuarzo, textura tipo *shreddy* y escasa biotita (Figuras 6 y 8).

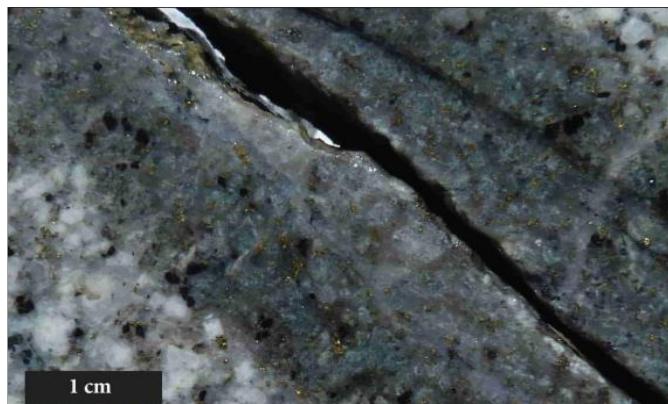
Estos halos anteceden a las venillas tipo A, B, C y D, y actúan como precursores estructurales y geoquímicos del sistema mineralizante (Cernuschi et al., 2023).

#### 5.2.2. Mineralogía típica

- Biotita secundaria (dominante en EDM, escasa en PGS, ausente en GRS).
- Feldespato potásico (abundante en EDM y PGS; residual en GRS).
- Muscovita (fengita) verde-clara o verdosa-grisácea (PGS y GRS).
- Cuarzo microcristalino (muy subordinado en EDM y PGS; más común en GRS).

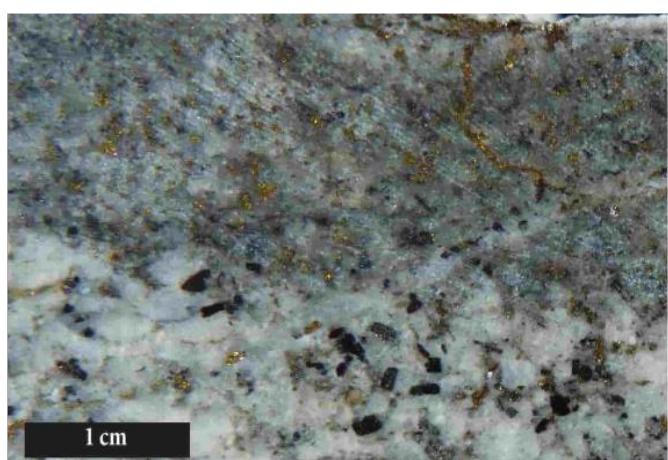
- Andalusita y corindón (ocasionales en EDM).
- Clorita como reemplazo de máficos (presente en EDM).
- Albita y sericita blanca (en bordes de GRS).
- Apatita y minerales accesorios (en EDM y GRS).

Figura 4. Early halos - Early Dark Micaceous (EDM)



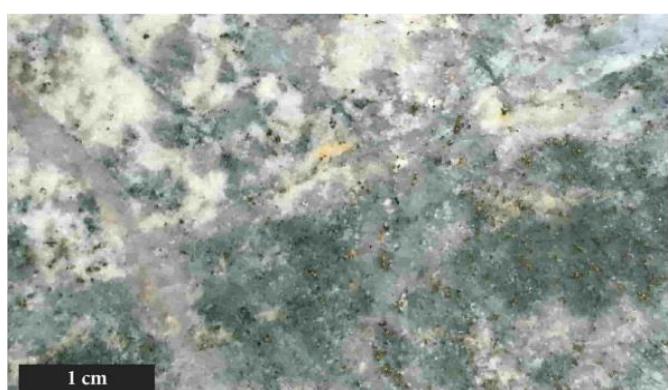
Nota. Imagen reproducida de Rivera Cornejo y Cernuschi (2019). © First Quantum Minerals.

Figura 5. Pale Green Sericite (PGS)



Nota. Imagen reproducida de Rivera Cornejo y Cernuschi (2019). © First Quantum Minerals.

Figura 6. Green Sericite (GRS)



Nota. Imagen reproducida de Rivera Cornejo y Cernuschi (2019). © First Quantum Minerals.

Figura 7. Venilla EDM con halo oscuro de biotita secundaria,

asociada a alteración potásica temprana (biotita + feldespato K), con leyes de 1.1% Cu y 18 ppm Mo.



Nota. Fotografía del autor tomada en el stand de First Quantum Minerals durante ProExplor 2025. Información técnica obtenida de etiquetas visibles en la muestra. © First Quantum Minerals, 2025.

### 5.2.3. Texturas y estructuras

- Venillas discontinuas, sin relleno o con muy escaso cuarzo (Rivera & Cernuschi, 2022; Meyer, 1965; Proffett, 2009).
- Halos centimétricos, simétricos a ambos lados de microfracturas (Rivera & Cernuschi, 2022).
- Bordes graduales, con transiciones texturales suaves entre halo y roca huésped (Rivera & Cernuschi, 2022).
- Estructura anastomosada, común en halos tipo EDM y PGS (Rivera & Cernuschi, 2022).
- Textura pergaminosa (*papery sericite*) en PGS y fragmentada (*shreddy*) en GRS (Uribe-Mogollón & Maher, 2018).

### 5.2.4. Alteración hidrotermal asociada

- EDM: Alteración potásica temprana (biotita + feldespato K), desarrollada bajo pH neutro y fluidos magmáticos ricos en K–Cl–H<sub>2</sub>O (Heinrich, 2007).
- PGS: Transición potásico-sericítica, caracterizada por muscovita tipo fengita de grano fino, asociada a fluidos más diluidos y ligeramente más ácidos (Reed et al., 2013).
- GRS: Sericitización incipiente con muscovita verde-grisácea y trazas de clorita (por reemplazo de biotita), vinculada a una mayor relación Na/K en los fluidos (Rivera & Cernuschi, 2022; Reed et al., 2013).
- En todos los casos, la alteración está dominada por fases micáceas. La magnetita es escasa o ausente, y no se observa alteración filica típica (sin asociación sistemática de sericitita + cuarzo + pirita).

### 5.2.5. Condiciones de formación

- EDM (*Early Dark Micaceous*): Temperatura de 575–650 °C en equilibrio con K-feldespato y biotita, sustentada por inclusiones fluidas homogenizadas entre 575 y 650 °C y la presencia de andalucita como geotermómetro de  $\geq 600$  °C (Rusk et al., 2008; Rivera & Cernuschi, 2022); formación entre 5 y 8 km de profundidad bajo presiones litostáticas de  $\approx 1.2$ – $2.4$  kbar (Rusk et al., 2008; Seedorff et al., 2005); fluidos magmáticos de alta salinidad (40–60 wt % NaCl eq.), ricos en K y Cl, con pH neutro a ligeramente ácido y ausencia de  $\text{SO}_4$  libre.
- PGS (*Pale-Green Sericitic*): Temperatura de 450–550 °C controlada por la estabilidad de la muscovita en la transición potásico-serícítica (Rusk et al., 2008; Seedorff et al., 2005; Rivera & Cernuschi, 2022); desarrollo a 3–5 km de profundidad con presiones de  $\approx 0.8$ – $1.6$  kbar (Seedorff et al., 2005; Rivera & Cernuschi, 2022); comparte fluidos magmáticos de alta salinidad con el EDM, pero muestra una reducción progresiva de Fe.
- GRS (*Green Sericite*): Temperatura típica de 450–520 °C caracterizada por muscovita gris-verdosa y aumento relativo de cuarzo libre, reflejando fluidos de pH más ácido (Rusk et al., 2008; Rivera & Cernuschi, 2022); formación a 2–4 km de profundidad bajo presiones de  $\approx 0.6$ – $1.0$  kbar (Seedorff et al., 2005; Rivera & Cernuschi, 2022); los fluidos son magmáticos hipersalinos con mayor reducción de Fe y enriquecimiento relativo en sílice.

### 5.2.6. Relaciones de corte y cronología relativa

- EDM → PGS → GRS representan una secuencia continua y vertical de evolución hidrotermal (Cernuschi et al., 2023).
- Todas preceden a las venillas tipo A, B, C y D (Sillitoe, 2010).
- Los centros de fractura de EDM suelen ser reutilizados por venillas tipo A o B (Dilles & Einaudi, 1992).
- PGS puede superponerse a EDM en niveles intermedios, sin necesariamente cortarlas (Mercer & Reed, 2013).
- GRS no corta a EDM o PGS, pero se desarrolla sobre ellas en zonas más someras (Seedorff et al., 2005).

Figura 8



Venilla tipo C (pirita-calcopirita) con halo centimétrico de sericita verde-grisácea (GRS). Foto: E. Cerna Mallqui, 2024 (com. pers.).

### 5.2.7. Ejemplos de campo / depósitos representativos

- Butte (Montana, EE. UU.): halos EDM de biotita y bornita-calcopirita (Meyer, 1965; Mercer & Reed, 2013).
- Haquira East (Perú): zonación EDM en profundidad, PGS en niveles intermedios y GRS en márgenes (Cernuschi et al., 2012; Rivera & Cernuschi, 2022).
- Copper Creek (Arizona, EE. UU.): márgenes tempranos con halos PGS (Lambotte et al., 2016).
- Los Pelambres (Chile): halos EDM con transición vertical a GRS (Atkinson et al., 1996; Perelló et al., 2012; Sillitoe, 2010).
- Pecoy (Perú): múltiples etapas de halos tempranos (EDM, PGS, GRS) en basamento de gneis, con biotita y muscovita (Rivera & Cernuschi, 2022).

Figura 9. Venilla EDM con halo oscuro de biotita secundaria, asociada a alteración potásica temprana (biotita + feldespato K), reabierta por venillas tipo A. Leyes: 1.26% Cu y 196 ppm Mo. Sondaje de línea HQ, Haquira, Perú.



Nota. Fotografía del autor tomada en el stand de First Quantum Minerals durante ProExplor 2025. Información técnica obtenida de etiquetas visibles en la muestra. © First Quantum Minerals, 2025.

## 5.2.8. Implicancias en exploración y modelamiento

- EDM indica exhumación en superficie o proximidad al intrusivo en sondajes (Sillitoe, 2010; Rivera & Cernuschi, 2022).
- Altas proporciones de EDM se correlacionan con leyes de Cu > 1 % en profundidad (Rivera & Cernuschi, 2022).
- PGS y GRS suelen ser someros/distales; su abundancia no predice por sí sola bajo tenor en Cu (Reed et al., 2013; Sillitoe, 2010; Rivera & Cernuschi, 2022).
- Ayudan a diferenciar dominios litológicos: máficos → EDM; félsicos → GRS (Sillitoe, 2010; Rivera & Cernuschi, 2022).
- Su identificación en sondajes orienta perforaciones profundas y evita sobreestimaciones de zonas tardías (Reed et al., 2013).
- Junto con venillas DQ, forman las estructuras precursoras de las fases hidrotermales y mineralizantes posteriores (Rivera & Cernuschi, 2022).

## 5.3. Venillas Tipo A

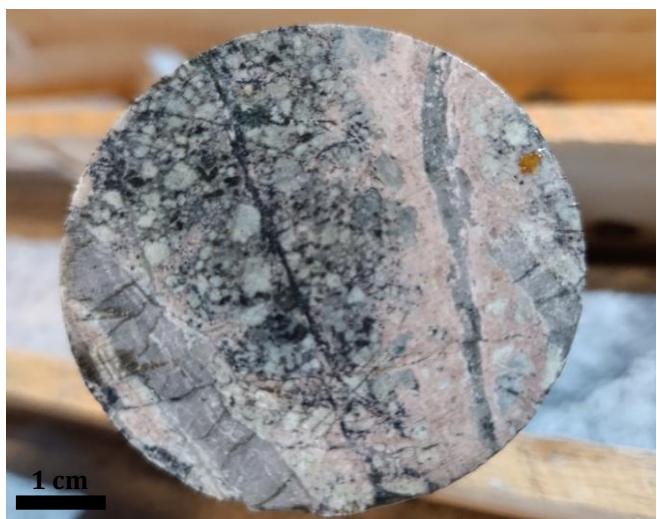
### 5.3.1. Definición y contexto genético

Las venillas tipo A son delgadas, sinuosas y a menudo discontinuas, compuestas por cuarzo de grano aplítico (0.02–0.1 mm) con textura azucarada y sulfuros de Cu-Fe (calcopirita  $\pm$  bornita), formadas durante la alteración potásica temprana (Gustafson & Hunt, 1975; Rees et al., 2015). Su morfología sinuosa refleja condiciones dúctiles iniciales, tornándose más planas en estadios frágiles posteriores (Gustafson & Hunt, 1975). Pueden incluir magnetita, biotita, feldespatos y anhidrita, con halos locales de feldespato potásico (Figura 10). La densidad de estas venillas se correlaciona directamente con las leyes de cobre (Clode et al., 1999; Osorio & Dilles, 2019).

### 5.3.2. Mineralogía típica

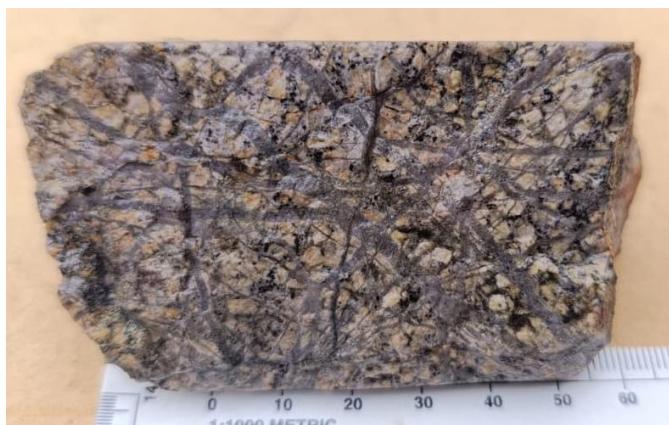
- Cuarzo translúcido, de grano aplítico, con textura azucarada.
- Calcopirita  $\pm$  bornita como sulfuros principales, íntimamente intercrescidos con el cuarzo (Cernuschi et al., 2023).
- Magnetita presente en algunos casos, como indicador de condiciones oxidantes (Seedorff et al., 2005).
- Biotita y feldespato potásico en halos de alteración potásica temprana (Proffett, 2009).
- Anhidrita o turmalina subordinadas, según el sistema y profundidad (Camus, 1975).

Figura 10. Venilla tipo A compuesta por cuarzo y pirita discontinua, asociada a alteración potásica. Sondaje de línea HQ, Antamina, Perú.



Nota. Fotografía del autor tomada en el stand de Antamina durante el Congreso Peruano de Geología (CPG) 2024. © Compañía Minera Antamina, 2024.

Figura 11



Venillas irregulares de cuarzo tipo A. Muestra P-ANT-S de colección CIDM, Antapacay, Perú.

Figura 12



Venilla tipo A (cuarzo con pirita puntual y discontinua), asociada a alteración potásica, cortando un pórfito temprano de textura porfirítica. Muestra P-CO-07 de colección CIDM, Conga, Perú.

### 5.3.3. Texturas y estructuras

- Venillas delgadas (<5 mm), sinuosas, irregulares y discontinuas, a menudo interconectadas en stockwork (Figura 11).
- Textura de “sugary quartz” (cuarzo aplítico, 0.02–0.1 mm) con inclusiones fluidas frecuentes (Gustafson & Hunt, 1975; Rees et al., 2015).

### 5.3.4. Alteración hidrotermal asociada

- Alteración potásica intensa: biotita + feldespato K secundarias (Figura 10).
- Con magnetita ± apatita en sistemas bien oxidados.
- Ausencia de sericita y clorita.

### 5.3.5. Condiciones de formación

- Temperatura: ~350–600 °C (Reed et al., 2013; Cernuschi et al., 2023).
- Presión y profundidad: 0.5–1.0 kbar, equivalentes a ~1–4 km de la corteza superior (Dilles & Einaudi, 1992; John et al., 2010).
- Fluidos: Magmáticos oxi-halogenados, ricos en Cl y metales (particularmente Cu), con carácter oxidante (Sillitoe, 2010).

### 5.3.6. Relaciones de corte y cronología relativa

- Cortan a halos EDM y venillas DQ.
- Son cortadas por venillas tipo B, C y D.
- Se sobreponen a la alteración potásica inicial, intensificándola localmente en torno a las venillas.
- En varios casos, aprovechan estructuras preexistentes como planos de foliación o fracturas tempranas generadas durante la fase DQ.

### 5.3.7. Ejemplos de campo / depósitos representativos

- Chuquicamata: *stockwork* de venillas tipo A en núcleo potásico con cuarzo y calcopirita (Camus, 2003).
- Haquira (Perú): venillas A asociadas a Cu >1% con halos de biotita.
- Bingham Canyon (EE. UU.): *stockwork* de venillas A de cuarzo-calcopirita.

### 5.3.8. Implicancias en exploración y modelamiento

- Alta densidad de venillas A indica zonas de alta ley de Cu.
- Útiles para ubicar el centro del sistema (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010).
- Su presencia guía perforaciones y modelamiento geometalúrgico.

### 5.4. Venillas BMQ

#### 5.4.1. Definición y contexto genético

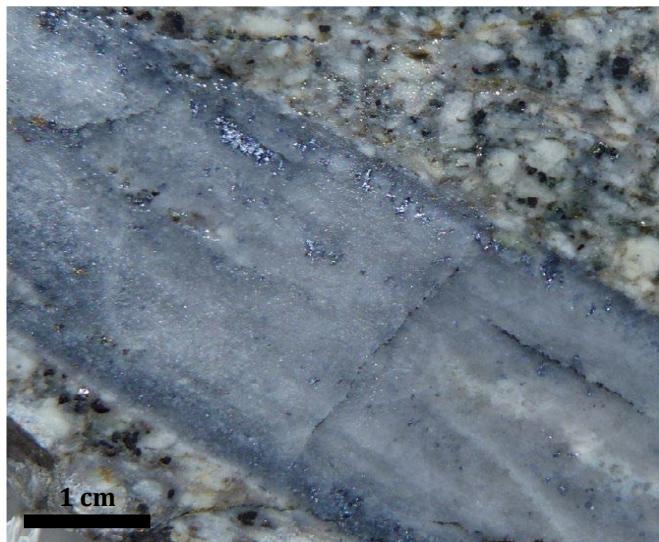
Las venillas BMQ (*Banded Molybdenite–Quartz*) constituyen una generación intermedia en la evolución hidrotermal de sistemas tipo pórfito Cu-Mo, situada entre las venillas tempranas (A) y las fases de transición hacia la alteración sericítica (Seedorff et al., 2005; Gustafson & Quiroga, 1995). Se asocian a pulsos de fluidos magmáticos enriquecidos en molibdeno y se forman en niveles profundos a intermedios del sistema, donde la precipitación de molibdeno puede predominar mientras gran parte del cobre se depositó en pulsos previos (Candela, 1992; Seedorff et al., 2005; Cernuschi et al., 2023).

Morfológicamente son bandas rítmicas de cuarzo alternadas con delgadas láminas de molibdenita (Figuras 13, 14 y 15), de continuidad milimétrica a centimétrica (Seedorff et al., 2005; Cernuschi et al., 2018). El cuarzo asociado suele ser de grano fino y mostrar respuestas claras en catodoluminiscencia; técnicas como SEM-CL y el geotermómetro titanium-in-quartz (TitaniQ) pueden indicar temperaturas elevadas en muchos casos (frecuentemente  $\geq 500$  °C; ocasionalmente superiores según método y depósito) (Wark & Watson, 2006; Rusk et al., 2008; Cernuschi et al., 2023). Mineralógicamente son dominadas por molibdenita y pobres en cobre, con trazas locales de calcopirita o bornita en algunos sectores (Candela, 1992; Seedorff et al., 2005). Se precipitan bajo alta fugacidad de azufre y condiciones redox/pH que favorecen la estabilidad de  $\text{MoS}_2$ ; la mezcla parcial con aguas meteóricas en profundidad puede modificar la firma metalogenética local (Candela, 1992; Audéat et al., 2008; Rusk et al., 2008).

#### 5.4.2. Mineralogía típica

- Cuarzo en bandas, de grano medio a fino. (Seedorff et al., 2005; Cernuschi et al., 2018).
- Molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) en láminas paralelas o discontinuas; Mo dominante. (Seedorff et al., 2005; Candela, 1992).
- Feldespato potásico relicto ocasional en dominios K-silicatizados. (Seedorff et al., 2005; Camus, 2003).
- Escasa asociación con sulfuros de cobre en muchas localidades; trazas de calcopirita o bornita pueden existir localmente. (Seedorff et al., 2005; Ossandón et al., 2001).

**Figura 13.** Venilla tipo BMQ compuesta por molibdenita y cuarzo, que presenta bandas de molibdenita distribuidas de manera semicontinua a lo largo de los bordes de la estructura (Haquira Este)



Nota. Imagen reproducida de Cernuschi et al. (2023). © Society of Economic Geologists.

#### 5.4.3. Texturas y estructuras

- Textura bandeadada rítmica: alternancia cuarzo–molibdenita (mm–cm). (Seedorff et al., 2005; Cernuschi et al., 2018).
- Venillas rectas y continuas a milimétricas–centimétricas en apertura; continuidad milimétrica–centimétrica. (Seedorff et al., 2005).
- Molibdenita como láminas/escamas alineadas dentro de las bandas; concentración variable según el pulso. (Seedorff et al., 2005).
- En algunos depósitos (p. ej. Chuquicamata) las BMQ pueden formar redes extensas de venillas; la continuidad es depositodependiente. (Ossandón et al., 2001).

**Figura 14**



Venilla tipo BMQ, compuesta por cuarzo de grano medio a fino y delgadas láminas de molibdenita dispuestas en forma bandeadada, cortando filita del Grupo Excelsior. Domo de Yauli, Mina San Cristóbal, Perú.

**Figura 15**



Venilla tipo BMQ con bandas alternas de cuarzo y molibdenita; sin sulfuros de cobre. Muestra PtM-12 de colección CIDM, Toromocho, Perú.

#### 5.4.4. Alteración hidrotermal asociada

- Asociadas a dominios potásicos tardíos / K-silicificados (biotita ± K-feldespato relict). (Seedorff et al., 2005; Camus, 2003).
- Transición hacia sericitización en el frente apical; intensidad dependiente del contexto. (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010).

#### 5.4.5. Condiciones de formación

- Temperatura: frecuentemente altas; TitanIQ suele entregar  $\geq 500$  °C en muchos estudios (matizar con inclusiones). (Wark & Watson, 2006; Rusk et al., 2008; Cernuschi et al., 2023).
- Profundidad: niveles profundos–intermedios (escala kilométrica; depende de telescoping/exhumación). (Dilles & Einaudi, 1992; Ossandón et al., 2001).
- Fluidos: magmáticos residuales enriquecidos en Mo y con alta fugacidad de S; mezcla meteórica puede modificar salinidad, pH y  $f\text{O}_2/f\text{S}_2$ . (Candela, 1992; Audétat et al., 2008; Rusk et al., 2008).
- Salinidad/pH: variable entre depósitos; no aplicar un valor único sin análisis local. (Rusk et al., 2008).

#### 5.4.6. Relaciones de corte y cronología relativa

- Paragenéticamente intermedias: generalmente posteriores a generaciones muy tempranas (A) y pueden ser contemporáneas o preceder a algunas venillas tipo B; la relación exacta depende del depósito. (Seedorff et al., 2005; Cernuschi et al., 2023).
- En muchos casos las BMQ son cortadas por venillas más tardías de la secuencia apical/fílica. (Seedorff et al., 2005).

#### 5.4.7. Ejemplos de campo / depósitos representativos

- Chuquicamata (Chile): redes de cuarzo-molibdenita controlando Mo en sectores. (Ossandón et al., 2001).
- Haquira East (Perú): BMQ documentadas por *Ti-zoning* y difusión en cuarzo. (Cernuschi et al., 2018).
- Bingham Canyon (EE. UU.) y otros distritos: facies BMQ en raíces de sistemas Cu–Mo. (Seedorff et al., 2005).
- El Teniente / Andes: registros de bandas Mo–quartz en contextos andinos. (Camus, 2003; Ossandón et al., 2001).

#### 5.4.8. Implicancias en exploración y modelamiento

- Principales portadoras de Mo; su mapeo define dominios Mo-dominantes y zonado vertical. (Seedorff et al., 2005; Cernuschi et al., 2023).
- Indican niveles profundos/raíces de sistema; priorizar targets profundos y ensayos metalúrgicos. (Dilles & Einaudi, 1992; Ossandón et al., 2001).
- Integración con TitaniQ, inclusiones fluidas y estudios de alteración aporta restricciones térmicas y temporales clave para modelos 3D. (Wark & Watson, 2006; Rusk et al., 2008; Cernuschi et al., 2018).

### 5.5. Venillas tipo B

#### 5.5.1. Definición y contexto genético

Las venillas tipo B se forman en la etapa intermedia–tardía del sistema tipo pórido, en pulsos tardíos de fracturación y enfriamiento ( $\approx 400$ – $500$  °C). Se emplazan preferentemente en niveles próximos al cuerpo intrusivo (usualmente  $<3$ – $4$  km), aunque pueden extenderse a mayores distancias cuando la permeabilidad estructural favorece la migración de fluidos. Se originan por la mezcla de fluidos magmáticos residuales parcialmente desgasificados con aguas externas, facilitada por brechificación y descompresión. Mineralógicamente, están constituidas por cuarzo con sulfuros de Cu (calcopirita  $\pm$  bornita) y molibdenita (Figura 16).

En algunos depósitos presentan venillas BMQ, caracterizadas por bandas alternantes de cuarzo y molibdenita, que reflejan pulsos ricos en Mo. La razón Cu:Mo varía entre sistemas. Texturalmente, muestran recristalización de sulfuros (granolástico, suturado) y contactos con halos sericíticos incipientes, lo que indica su posición transicional entre la alteración potásica temprana y las fases fílicas posteriores. Su identificación

(mineralogía, texturas, relaciones de corte y geoquímica) es clave para interpretar la evolución térmica y vectorizar hacia la raíz del sistema (Cernuschi et al., 2023; Dilles & Einaudi, 1992; John et al., 2010; Reed et al., 2013; Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010).

Figura 16

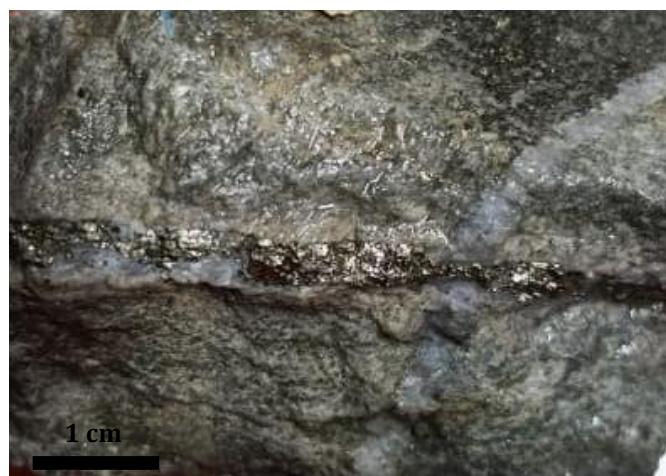


Venilla tipo B (calcopirita–bornita  $\pm$  pirita), que corta y abre venilla tipo A, muestra P-ANT-10 de la colección CIDM, Antapacay.

#### 5.5.2. Mineralogía típica

- Cuarzo de grano medio a grueso, con textura drusiforme y contactos suturados.
- Calcopirita  $\pm$  bornita, en bandas o venillas centrales.
- Molibdenita subordinada (en venas reutilizadas de BMQ).
- Pirita común, particularmente en márgenes más ácidos del sistema.
- Feldespato potásico relíctico.
- Halos sericíticos periféricos incipientes (muscovita, clorita).

Figura 17



Venilla tipo B, compuesta por cuarzo, pirita y calcopirita, cortando una venilla tipo A. Indica superposición de eventos mineralizantes. Muestra P-PU-007, colección CIDM. Pórido Pukaqaqa, Perú.

#### 5.5.3. Texturas y estructuras

- Venillas rectilíneas milimétricas a centimétricas.
- Relleno central de sulfuros (calcopirita + pirita  $\pm$  molibdenita).
- Cuarzo recristalizado en mosaico, con crecimiento centrípeto (crustiforme).

- Relleno parcial de fracturas previas tipo A o BMQ.

#### 5.5.4. Alteración hidrotermal asociada

- Alteración potásica remanente (biotita, ortosa).
- Halo serícítico tenue (sericita verde o fengita).
- Presencia de clorita como indicio de pH decreciente.

#### 5.5.5. Condiciones de formación

- Temperatura:  $\approx 400\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Sillitoe, 2010; Dilles et al., 1992).
- Condiciones de presión intermedia, equivalentes a  $\sim 3\text{--}4$  km de profundidad (0,8–1,1 kbar) (Sillitoe, 2010; Dilles & Einaudi, 1992).
- Mezcla de fluidos magmáticos residuales con aguas meteóricas, moderadamente salinos y parcialmente oxidantes (Sillitoe, 2010).
- Estado de sulfidación intermedio.

#### 5.5.6. Relaciones de corte y cronología relativa

- Cortan a las venillas A y, en ocasiones, reutilizan estructuras de BMQ.
- Se formaron antes de las venillas D, pero pueden ser retrabajadas por estas venillas.
- Coincidir con la etapa transicional Cu–Mo del sistema.

#### 5.5.7. Ejemplos de campo / depósitos representativos

- Chuquicamata (Chile): venillas tipo B con Mo en stockwork (Camus, 2003).
- Yerington (Nevada): secuencias tipo B sobre-impuestas a stockwork tipo A (Dilles & Einaudi, 1992).
- Haquira East (Perú): venillas tipo B con halos clorita–sericita (Cernuschi, 2015).
- Los Pelambres (Chile): venillas tipo B que sobreimponen a venillas tipo A (Atkinson et al., 1996).

#### 5.5.8. Implicancias en exploración y modelamiento

- Permiten delimitar dominios mixtos Cu–Mo en modelos de bloques.
- Su reconocimiento es útil en sistemas telescopados o retrabajados, donde la superposición de eventos altera la zonación original (Seedorff et al., 2005).
- Son indicadores de sericitización temprana y de fracturación tardía con aumento de permeabilidad (descompresión parcial o colapso local) que favorece la entrada de fluidos externos.

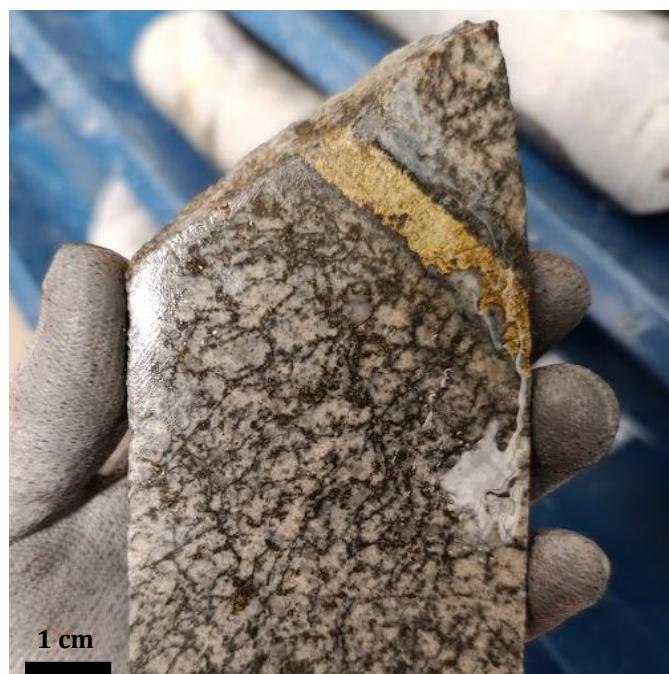
#### 5.6. Venillas tipo C

##### 5.6.1. Definición y contexto genético

Las venillas tipo C constituyen una generación transicional en sistemas pórfito de cobre, marcando el paso desde la alteración potásica hacia condiciones más ácidas y serícíticas de la zona fílica. Se caracterizan por estar llenas de sulfuros Cu–Fe (calcopirita  $\pm$  bornita  $\pm$  pirita), con poco o nada de cuarzo, y presentar halos estrechos de clorita  $\pm$  sericita donde el K-feldespato puede persistir pero la biotita suele estar ausente (Dilles & Einaudi, 1982; Monecke et al., 2018).

Paragenéticamente, cortan venillas tipo B y son a su vez cortadas por venillas tipo D, lo que las ubica en los estadios finales de la alteración potásica y el inicio de la fílica (Seedorff et al., 2005). Genéticamente se asocian al enfriamiento y descompresión de los fluidos magmáticos residuales ( $\approx 250\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , típicamente 300–350  $^{\circ}\text{C}$ ), condiciones en las que la solubilidad retrógrada del cuarzo favorece la precipitación de sulfuros simples con escasa sílice (Candela, 1992; Monecke et al., 2018). Su abundancia suele ser volumétricamente reducida y de menor aporte metalífero global, aunque en algunos depósitos específicos (e.g., El Teniente, Bajo de la Alumbra) pueden constituir contribuyentes locales significativos al contenido de Cu (Proffett, 2003; Vry et al., 2010; Schirra et al., 2022).

**Figura 18.** Venilla tipo C, compuesta por calcopirita + pirita, con halo de clorita  $\pm$  sericita. Sondaje de línea HQ. Quellaveco, Perú.



*Nota.* Fotografía y descripción del autor durante visita técnica al coresack de Quellaveco en 2024.

### 5.6.2. Mineralogía típica

- Pирита  $\pm$  calcopirita, minerales dominantes en esta etapa (Gustafson & Quiroga, 1995; Seedorff et al., 2005).
- Bornita subordinada, con ocurrencia más frecuente en zonas cercanas al núcleo potásico (Gustafson & Quiroga, 1995).
- Disminución relativa de Mo y magnetita respecto a las etapas potásicas (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010).
- Halos sericitita-clorita (mica “verde”) comunes (Figura 18; Dilles & Einaudi, 1992; Gustafson & Quiroga, 1995).

### 5.6.3. Texturas y estructuras

- Venillas delgadas, irregulares, con geometría recta a ligeramente caótica, de milímetros a centímetros (Seedorff et al., 2005).
- Rellenos de sulfuros (pirita  $\pm$  calcopirita), concentrados en el eje o diseminados en la matriz (Gustafson & Quiroga, 1995).
- Cuarzo escaso o ausente; no forma parte del relleno dominante ni presenta texturas bandeadas (confirmado por ausencia en Rusk et al., 2008; Seedorff et al., 2005).

### 5.6.4. Alteración hidrotermal asociada

- Alteración sericitita-clorítica inmediata (sericitita + clorita  $\pm$  cuarzo). (Seedorff et al., 2005).
- Transición clara de potásico  $\rightarrow$  fílico en el frente de alteración. (Sillitoe, 2010).

### 5.6.5. Condiciones de formación

- Temperatura:  $\approx 250$ – $400$  °C (típ.  $\approx 300$ – $350$  °C); favorece sericitita-clorita y sulfuros (Seedorff et al., 2005; Rusk et al., 2008).
- Presión: somera a intermedia; transición litostática  $\rightarrow$  hidrostática (Mercer & Reed, 2013).
- Estado de sulfidación intermedio — favorece Cpy y Py sobre Brn. (Sillitoe, 2010).
- Fluidos: magmáticos residuales con mezcla meteórica ocasional (Audéat & Pettke, 2006; Rusk et al., 2008).

### 5.6.6. Relaciones de corte y cronología relativa

- Cortan A/B y son cortadas por generaciones más tardías. (Seedorff et al., 2005; Gustafson & Quiroga, 1995).

### 5.6.7. Ejemplos de campo / depósitos representativos

- El Salvador (Chile) — Venillas tipo C con sericitita-clorita y sulfuros (Py-Cpy); cuarzo subordinado (Gustafson & Quiroga, 1995).
- Butte (EE. UU.) — Venillas intermedias de cuarzo-sericitita con pirita-calcopirita; transición entre tipo B y C (Rusk et al., 2008; Reed et al., 2013).
- Yerington (Nevada) — venillas C descritas cortando A/B; predominio de Cpy en sectores. (Seedorff et al., 2005).

### 5.6.8. Implicancias en exploración y modelamiento

- Marca el frente de transición potásico-fílico; útil para zonificación y vectorización. (Seedorff et al., 2005).
- Indica permeabilidad profunda y posible aporte meteórico; afecta firmas geoquímicas. (Audéat & Pettke, 2006).
- Relevantes para geometalurgia: pueden aportar Cu remobilizado y condicionan recuperación. (Reed et al., 2013).

## 5.7. Venillas tipo D

### 5.7.1. Definición y contexto genético

Las venillas tipo D corresponden a estadios tardíos de la evolución hidrotermal en sistemas pórfito cupríferos, formadas durante el tránsito del campo de estabilidad de K-feldespato-biotita hacia el de sericitita (muscovita), a temperaturas moderadamente bajas ( $\approx 250$ – $350$  °C) y presiones litostáticas de decenas a pocos cientos de bares ( $\approx 0.02$ – $0.4$  kbar) (Rusk et al., 2008; Mercer & Reed, 2013; Dilles & John, 2021). Se caracterizan por venas de pirita  $\pm$  cuarzo  $\pm$  trazas de muscovita con halos sericitíticos milimétricos a centimétricos que reemplazan feldespatos, biotita y minerales máficos (Seedorff et al., 2005; Rusk et al., 2008a).

Genéticamente, reflejan el enfriamiento progresivo y acidificación de los fluidos magmático-hidrotermales, en muchos casos con participación de aguas meteóricas, lo que genera condiciones más oxidantes y de alta sulfidación (Corbett, 2009; Reed et al., 2013). Suelen concentrarse en bordes o niveles apicales del sistema y, aunque marcan el fin del ciclo porfírico clásico, pueden enlazar con estadios epitermales en sistemas telescopados (Sillitoe, 2010; Cernuschi et al., 2013).

**Figura 19.** Venilla tipo D compuesta por pirita y halo de sericitina, que corta una brecha magmático-hidrotermal. Sondaje HQ, Quellaveco, Perú.



Nota. Fotografía y descripción del autor durante visita técnica al coreshack de Quellaveco en 2024.

**Figura 20.**



Venilla tipo D, compuesta por pirita oxidada a Limonita, con halo periférico de sericitina. Muestra EGC-001, colección CIDM. Localidad: Apurímac, Perú.

**Figura 21**



Venillas tipo D, compuestas por pirita, con halo periférico de sericitina. Sondaje HQ, localidad: Domo de Yauli, Mina San Cristóbal, Perú.

**Figura 22**



Venilla tipo D, expuesta en cara de rotura, compuesta por cuarzo, turmalina, pirita y sericitina. Alteración fílica. Muestra PCHUQI-12, colección CIDM. Chuquicamata, Chile.

### 5.7.2. Mineralogía típica

- Pirita como sulfuro dominante (Figuras 19 y 21).
- Proporción subordinada de anhidrita y cuarzo residual/fino (Rusk et al., 2008; Reed et al., 2013).
- Sericitina como mineral de alteración dominante en halos y márgenes de venillas (Figuras 19, 20 y 21) (Meyer & Hemley, 1967; Sillitoe, 2010).
- Turmalina puede aparecer (Figura 22) y halos externos pueden mostrar caolín o clorita según el grado de alteración (Corbett, 2009; Sillitoe, 2010).

### 5.7.3. Texturas y estructuras

- Venillas rectas o irregulares (mm-cm), controladas por microfracturas y fracturación secundaria en el cuerpo porfírico (Sillitoe, 2010; Seedorff et al., 2005).
- Pirita diseminada o en fracturas, rellenando microfisuras en etapas tardías (Rusk, Reed & Dilles, 2008).
- Halos de sericitina bien desarrollados en los márgenes, asociados a condiciones

ácidas locales (Meyer & Hemley, 1967; Sillitoe, 2010).

#### 5.7.4. Alteración hidrotermal asociada

- Alteración fílica: sericitita + pirita + cuarzo alrededor de venillas (Figuras 19 y 20) (Meyer & Hemley, 1967; Sillitoe, 2010).
- Destrucción/reemplazo de feldespatos y biotita primarias en márgenes de alteración intensa (Reed et al., 2013).
- Zonas de reemplazo masivo con porosidad secundaria elevada (Reed et al., 2013).
- Transición de halos internos de sericitita a halos externos de caolín/clorita según el gradiente de pH/oxidación (Corbett, 2009; Sillitoe, 2010).

#### 5.7.5. Condiciones de formación

- $T^\circ: \approx 250\text{--}350^\circ\text{C}$  (promedio  $\approx 300^\circ\text{C}$ ) (Rusk, Reed & Dilles, 2008; Mercer & Reed, 2013).
- $P: \approx 0.8\text{--}1.1\text{ kbar}$  ( $\sim 3\text{--}4\text{ km}$ ) (Sillitoe, 2010; Dilles & Einaudi, 1992).
- pH/redox: más ácido y oxidado por mezcla meteórica (Reed et al., 2013; Corbett, 2009).
- Sulfidación: redistribución tardía de sulfuros; mayor oxidación en zonas apicales/periféricas (Corbett, 2009; Sillitoe, 2010).

#### 5.7.6. Relaciones de corte y cronología relativa

- Cortan generaciones previas de venillas (A, BMQ, B, C), indicando su posición como fase final.
- Pueden reutilizar fracturas o abrir nuevas microfracturas por contracción/descompresión (Corbett, 2009; Mercer & Reed, 2013).
- En algunos casos seguidas por eventos post-porfíricos (brechas, cementación por anhidrita/turmalina) (Sillitoe, 2010; Ossandón et al., 2001).

#### 5.7.7. Ejemplos de campo / depósitos representativos

- Butte (EE. UU.): venillas tardías, inclusiones fluidas y evidencia de mezcla magmático-meteórica (Rusk, Reed & Dilles, 2008; Reed et al., 2013).
- Chuquicamata (Chile): stockworks periféricos y venillas tardías con pirita en halo exterior (Ossandón et al., 2001).
- Haquira (Perú): halos fílicos intensos y venillas tardías descritas en estudios sobre Haquira East (Cernuschi et al., 2015; 2018).
- Batu Hijau (Indonesia): transición a venillas pobres en Cu y fuerte sericitización en porciones distales (Corbett, 2009).

#### 5.7.8. Implicancias en exploración y modelamiento

- Delimitan halo externo (Sillitoe, 2010; Corbett, 2009).
- No deben confundirse con los halos tempranos, ya que su sericitita es tardía, de grano fino y típicamente destruye minerales máficos.
- Su naturaleza frágil y la alteración fílica avanzada tienen implicancias geomecánicas en estabilidad de taludes y diseño minero (Reed et al., 2013).

### 5.8. Aplicación en Exploración

En la exploración de sistemas pórfito de cobre, la caracterización sistemática de venillas y halos de alteración constituye una herramienta esencial para vectorizar hacia las zonas de mayor prospectividad. La presencia dominante de venillas tipo A suele indicar proximidad al núcleo potásico y leyes elevadas de Cu (Sillitoe, 2010), mientras que el predominio de venillas tipo D junto con alteración sericitica avanzada señala posiciones apicales o distales, típicamente empobrecidas en cobre (Rivera & Cernuschi, 2022).

Esta estrategia ha sido validada en múltiples depósitos. En Butte, el mapeo de zonación de venillas redefinió vectores hacia stockworks mineralizados ocultos (Brimhall, 1977); en Chuquicamata, el análisis de venillas tardías y halos periféricos permitió delimitar cuerpos de menor ley (Ossandón et al., 2001). En los contextos peruanos de Haquira Este, Pecoy y Los Calatos, la secuencia DQ-A-BMQ-B-C-D optimizó la definición de dominios geoquímicos y geometalúrgicos (Cernuschi et al., 2023).

Un aspecto crítico en la aplicación de este enfoque es diferenciar los early halos sericiticos (EH), que corresponden a fengita estable en condiciones potásicas, de las verdaderas venillas D asociadas a la alteración fílica tardía. La confusión es frecuente en superficie, donde la meteorización puede enmascarar la mineralogía, induciendo interpretaciones erróneas sobre el nivel de erosión del sistema (Lowell & Gilbert, 1970; Rivera & Cernuschi, 2022). Reconocer si la sericitita coexiste con biotita secundaria y calcopirita en un contexto potásico (EH) o si, por el contrario, destruye feldespatos y máficos en halos sericiticos (D), resulta esencial para vectorizar correctamente.

La eficacia de esta metodología se potencia al integrar mapeo estructural y litológico con técnicas de litogegeoquímica de elementos traza ("pathfinders"), espectroscopía SWIR/hiperespectral, SEM-CL, análisis de inclusiones fluidas y modelamiento 3D. La

sistematización de la evolución de venillas y el reconocimiento temprano de halos reducen la incertidumbre geológica, mejoran la priorización de blancos de perforación y elevan la probabilidad de éxito en proyectos cupríferos.

## 6. Conclusiones

La clasificación evolutiva de venillas hidrotermales en depósitos tipo pórfido de cobre constituye una herramienta crucial para interpretar la dinámica magmático-hidrotermal y optimizar la exploración, el modelado y la evaluación de recursos. La secuencia DQ → A → BMQ → B → C → D, junto con la identificación de halos tempranos (EDM, PGS, GRS), permite reconstruir las condiciones físico-químicas del sistema, desde estadios profundos (DQ y halos iniciales) hasta apicales (C-D), y discriminar dominios con distinto potencial metalogenético y metalúrgico (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010; Cooke et al., 2014). Cabe destacar que las venillas DQ y los halos tempranos se asocian a sistemas de mayor raíz (pórfidos profundos) y suelen estar ausentes en pórfidos someros; su presencia indica profundidad, aunque no debe asumirse como universal.

La caracterización espacial y secuencial de venillas y fluidos asociados permite definir la arquitectura del sistema, estimar su grado de preservación y establecer criterios de vectorización. En exploración, una alta densidad de venillas A-B vinculadas a alteración potásica o transicional constituye un indicador de proximidad al núcleo y mayor probabilidad de enriquecimiento en Cu; por el contrario, el predominio de venillas C-D y la sericitización intensa diagnostican posiciones apicales o distales y etapas tardías de menor potencial cuprífero (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010). La integración de mapeo estructural, análisis litogeoquímico (pathfinders), SEM-CL, inclusiones fluidas, datos hiperespectrales y modelado 3D fortalece la priorización de blancos y reduce incertidumbre en perforación (Cooke et al., 2014; Osorio et al., 2024).

Asimismo, la caracterización detallada de venillas y halos, incluyendo la distinción entre sericitina vinculada a halos tempranos y la sericitina fina de venillas D, aporta información esencial para modelos geometalúrgicos. Cada generación de venillas se relaciona con condiciones geoquímicas y comportamientos metalúrgicos específicos que afectan la recuperabilidad y el diseño de procesos (Uribe-Mogollón & Maher, 2018). La integración de datos petrográficos, microanalíticos y geoquímicos en modelos de recurso y ensayos metalúrgicos refuerza la robustez de las estimaciones y optimiza la toma de decisiones operativas.

La clasificación de venillas no debe aplicarse de manera mecánica ni universal. Es imprescindible describir con detalle textura, mineralogía y relaciones de corte, y ajustar los códigos al contexto geológico y a la evolución paragenética de cada depósito. Venillas que en un esquema estándar se interpretan como distales pueden corresponder a estadios avanzados en el núcleo, lo que refuerza la necesidad de calibración local antes de emplearlas como criterio de zonificación y vectorización (Corbett, 2009).

En síntesis, la sistematización de la evolución de venillas y halos, aplicada con integración multidisciplinaria y calibración local, constituye un instrumento predictivo de alto valor para la exploración porfírica: optimiza la selección de blancos, reduce la incertidumbre geológica y aumenta la probabilidad de éxito en proyectos cupríferos.

## 7. Limitaciones del estudio

Este estudio combina revisión bibliográfica con la descripción de 20 muestras representativas del Centro de Investigación de Depósitos Minerales - UNI; sin embargo, las estimaciones de condiciones físico-químicas se basan principalmente en datos publicados, no en mediciones directas.

## 8. Anexo

**Tabla 1. Muestras representativas de depósitos tipo pórfido (colección CIDM, UNI)**

| Muestra | Código    | Depósito tipo pórfido |
|---------|-----------|-----------------------|
| 1       | P-ANT-10  | Antapaccay            |
| 2       | P-ANT-S   | Antapaccay            |
| 3       | P-MI-026  | Ferrobamba            |
| 4       | pch-17    | Chancas               |
| 5       | P-CV-020  | Cerro Verde           |
| 6       | Pcu-20    | Cuajone               |
| 7       | Pcu-13    | Cuajone               |
| 8       | GI-04     | El Galeno             |
| 9       | Atl-02    | Atalaya               |
| 10      | P-mi-34   | Michiquillay          |
| 11      | P-PU-007  | Pukaqqa               |
| 12      | Ptq-12    | Toquepala             |
| 13      | Ptm-16    | Toromocho             |
| 14      | Ptm-12    | Toromocho             |
| 15      | Ptm-13    | Toromocho             |
| 16      | Pz-8      | Zafranal              |
| 17      | Pchuqi-8  | Chuquicamata          |
| 18      | Pchuqi-12 | Chuquicamata          |
| 19      | Pchuqi-5  | Chuquicamata          |
| 20      | Pes-6     | El Salvador           |

## 9. Referencias bibliográficas

- Arancibia, O. N., & Clark, A. H. (1996). Early magnetite–amphibole–plagioclase alteration–mineralization in the Island Copper porphyry Cu–Au–Mo deposit, British Columbia. *Economic Geology*, 91(2), 402–438.
- Atkinson, W. W., Jr., Souviron, A., Vehrs, T. I., & Faúndez, G. A. (1996). Geology and mineral zoning of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile. In F. Camus, R. H. Sillitoe, & R. Petersen (Eds.), *Andean copper deposits: New discoveries, mineralization, styles and metallogeny* (SEG Special Publication No. 5, pp. 131–156). Society of Economic Geologists.
- Audétat, A., & Pettke, T. (2006). Evolution of a porphyry-Cu mineralized magma system at Santa Rita, New Mexico (USA). *Journal of Petrology*, 47(10), 2021–2046.
- Audétat, A., Pettke, T., Heinrich, C. A., & Bodnar, R. J. (2008). The composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions. *Economic Geology*, 103(5), 877–908.
- Ballard, J. R., Palin, J. M., Williams, I. S., Campbell, I. H., & Faunes, A. (2001). Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ICP-MS and SHRIMP. *Geology*, 29(5), 383–386.
- Benavides, S. (2017). *Characterisation of sericitic alteration at the Taca Taca Bajo porphyry Cu deposit, Argentina* (Unpublished master's thesis). CODES, University of Tasmania.
- Brimhall, G. H. (1977). Early fracture-controlled disseminated mineralization at Butte, Montana. *Economic Geology*, 72(1), 37–59.
- Camus, F. (1975). Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wall-rock alteration. *Economic Geology*, 70(8), 1341–1372.
- Camus, F. (2003). *Geología de los sistemas porfídicos en los Andes de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Candela, P. A. (1992). Controls on ore metal ratios in granite-related ore systems: An experimental and computational approach. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83, 317–326.
- Cannell, J., Cooke, D. R., Walshe, J. L., & Stein, H. (2005). Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu–Mo deposit. *Economic Geology*, 100(5), 979–1003.
- Cerna, E., Sayas, M., & Mata, W. (2024). Variación modal de minerales máficos en las fases intrusivas de depósitos tipo porfido de cobre. En *XXII Congreso Peruano de Geología* (p. 3). Sociedad Geológica del Perú.
- Cernuschi, F. (2015). *The geology and geochemistry of the Haquira East porphyry deposit of southern Peru: Insights on the timing, temperature, and lifespan of the magmatic–hydrothermal alteration and mineralization* (Doctoral dissertation). Oregon State University, Corvallis, OR.
- Cernuschi, F., Dilles, J. H., Grocke, S. B., Valley, J. W., Kitajima, K., & Tepley, F. J., III. (2018). Rapid formation of porphyry copper deposits evidenced by diffusion of oxygen and titanium in quartz. *Geology*, 46(7), 611–614.
- Cernuschi, F., Dilles, J. H., Osorio, J., Proffett, J. M., & Kouzmanov, K. (2023). A reevaluation of the timing and temperature of copper and molybdenum precipitation in porphyry deposits. *Economic Geology*, 118(5), 931–965.
- Cernuschi, F., Einaudi, M., Dilles, J. H., Heather, K., & Barr, N. (2012). Hydrothermal veins, porphyry geochemistry and mineralization zonation of the Haquira-East porphyry Cu–Mo deposit, Peru [Poster presentation]. Society of Economic Geologists Annual Meeting, Lima, Peru.
- Clode, C., Clode, M., & Creaser, R. (1999). Geology and mineralization of the Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa, Indonesia. In *Proceedings of the PACRIM '99 Congress* (pp. 485–498). Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Cooke, D. R., Hollings, P., Wilkinson, J. J., & Tosdal, R. M. (2014). Geochemistry of porphyry deposits. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., Vol. 13, pp. 357–381). Elsevier.
- Corbett, G. J. (2009, June). Anatomy of porphyry-related Au–Cu–Ag–Mo mineralised systems: Some exploration implications. In *Proceedings of the North Queensland Exploration Conference* (AIG Bulletin No. 49). Australian Institute of Geoscientists.
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). *Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization* (SEG Special Publication No. 6). Society of Economic Geologists.
- Dilles, J. H., & Einaudi, M. T. (1992). Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada: a 6-km vertical reconstruction. *Economic Geology*, 87(8), 1963–2001.
- Dilles, J. H., & John, D. A. (2021). Porphyry copper systems. In F. M. White & R. J. Goldfarb (Eds.), *Ore Deposits of the Western United States* (pp. 101–132). Society of Economic Geologists.
- Driesner, T., & Heinrich, C. A. (2019). Porphyry copper deposits: Hydrothermal concepts and models. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., Vol. 13, pp. 609–640). Elsevier.
- Gustafson, L. B., & Hunt, J. P. (1975). The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70(5), 857–912.
- Gustafson, L. B., & Quiroga, J. G. (1995). Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 90(1), 2–16.
- Hehnke, C., Barton, M. D., Reiners, P. W., et al. (2012). Geological evolution and metallogeny of the Resolution porphyry Cu–Mo deposit, Arizona. *Economic Geology*, 107(5), 995–1026.
- Heinrich, C. A. (2007). Fluid–fluid interactions in magmatic–hydrothermal ore formation. *Elements*, 3(5), 279–285.
- John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., Blakely, R. J., Bodnar, R. J., Dilles, J. H., Gray, F., Graybeal, F. T., Mars, J. C., McPhee, D. K., Seal, R. R., Taylor, R. D., & Vikre, P. G. (2010). *Porphyry copper deposit model* (U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–B). U.S. Geological Survey.
- Lambotte, J. J. (2016). *Early halo-type porphyry and breccia Cu–Mo mineralization at Copper Creek, Pinal County, Arizona* [Technical report]. Arizona Geological Survey.
- Lowell, J. D., & Gilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration–mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), 373–408.

Meyer, C. (1965). An early stage of wall rock alteration at Butte, Montana. *Economic Geology*, 60(8), 1501–1522.

Meyer, C., & Hemley, J. J. (1967). Wall-rock alteration. In H. L. Barnes (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (pp. 166–235). Holt, Rinehart and Winston.

Mercer, C. N., & Reed, M. H. (2013). Porphyry Cu–Mo stockwork formation by dynamic, transient hydrothermal pulses: Mineralogic insights from the deposit at Butte, Montana. *Economic Geology*, 108(6), 1347–1377.

Monecke, T., Dilles, J. H., & Proffett, J. M. (2018). Evolution of hydrothermal alteration in porphyry copper systems. *Ore Geology Reviews*, 95, 632–661.

Ossandón, L., Fréraut, R., Gustafson, L. B., Lindsay, D. D., & Zentilli, M. (2001). Geology of the Chuquicamata mine: A progress report. *Economic Geology*, 96(2), 249–270.

Osorio, J., & Dilles, J. H. (2019). The role of D veins in porphyry copper deposits: Evidence from the Chuquicamata district, Chile. In *Proceedings of the SEG 2019 Conference*. Society of Economic Geologists.

Osorio, J., Dilles, J. H., & Collao, S. (2024). Fluid and vein evolution, timing, and temperature of Cu–Au–Mo sulfide deposition at the Encuentro porphyry Cu–Au–Mo deposit, northern Chile. *Economic Geology*, 119(6), 1289–1328.

Osorio, J., Rivera, C., & Cernuschi, F. (2017). Zonation of D and C veins in porphyry copper deposits: Examples from northern Chile. In *Proceedings of the 14th SGA Biennial Meeting* (pp. 133–136). Society for Geology Applied to Mineral Deposits.

Padilla-Garza, R. A., Titley, S. R., & Pimentel, F. B. (2001). Geology of the Escondida porphyry copper deposit, Antofagasta Region, Chile. *Economic Geology*, 96(2), 307–324.

Perelló, J., Sillitoe, R. H., Mpodozis, C., Brockway, H. E., & Posso, H. (2012). Geologic setting and evolution of the porphyry copper–molybdenum and copper–gold deposits at Los Pelambres, central Chile. In J. W. Hedenquist, M. Harris, & F. Camus (Eds.), *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world* (SEG Special Publication No. 16, pp. 79–104). Society of Economic Geologists.

Proffett, J. M. (2003). Geology of the Bajo de la Alumbra porphyry copper–gold deposit, Argentina. *Economic Geology*, 98(8), 1535–1574.

Proffett, J. M. (2009). High Cu grades in porphyry Cu deposits and their relationship to emplacement depth of magmatic sources. *Geology*, 37(8), 675–678.

Rees, C., Tosdal, R., & Cooke, D. (2015). The role of deep crustal processes in porphyry copper formation. *Ore Geology Reviews*, 65, 151–168.

Reed, M. H., Rusk, B. G., & Palandri, J. L. (2013). The Butte magmatic-hydrothermal system: One fluid yields all alteration and veins. *Economic Geology*, 108(6), 1379–1396.

Rieder, M., Cavazzini, G., D'yakonov, Y. S., Frank-Kamenetskii, V. A., Gottardi, G., Guggenheim, S., Koval', P. W., Möller, G., Neiva, A. M. R., Radoslovich, E. W., Robert, J.-L., Sassi, F. P., Takeda, H., Weiss, Z., & Wones, D. R. (1998). Nomenclature of the micas. *Clays and Clay Minerals*, 46(5), 586–595.

Rivera Cornejo, R., & Cernuschi, F. (2019, November). Los early halos y su implicancia en la exploración de pórfidos en las

Américas [Conference presentation]. PERUMIN 35: Convención Minera, Arequipa, Perú.

Rivera Cornejo, R., & Cernuschi, F. (2022). Early halos and their implications for porphyry exploration in the Americas. In *Proceedings of the SEG 2022 Conference*. Society of Economic Geologists.

Rusk, B. G., & Reed, M. H. (2002). Scanning electron microscope–cathodoluminescence analysis of quartz reveals complex growth histories in veins from the Butte porphyry copper deposit, Montana. *Geology*, 30(8), 727–730.

Rusk, B. G., Reed, M. H., & Dilles, J. H. (2008). Fluid-inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper–molybdenum deposit at Butte, Montana. *Economic Geology*, 103(2), 307–334.

Salazar, P., & Beate, B. (2010). Geología, alteración y mineralización del pórfido de cobre-molibdeno Junín, provincia de Imbabura, Ecuador. *ZAMIN Resources & Escuela Politécnica Nacional*.

Schirra, M., Dilles, J. H., & Creaser, R. (2022). Re-evaluating the role of C veins in porphyry copper deposits. *Mineralium Deposita*, 57(6), 913–935.

Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A., & Barton, M. D. (2005). Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. In J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume* (pp. 251–298). Society of Economic Geologists.

Setyandhaka, D., & Arif, J. (2006, November 21–22). Characteristics of the root of Cu–Au porphyry system: Results of study from Batu Hijau Cu–Au porphyry deposit. In *Proceedings PIT IAGI Riau 2006: The 35th IAGI Annual Convention and Exhibition*, Pekanbaru, Riau, Indonesia.

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41.

Spencer, E., Vry, J., & Cooke, D. R. (2015). C veins and their role in porphyry copper deposits. *Ore Geology Reviews*, 67, 120–142.

Uribe-Mogollón, C., & Maher, K. C. (2018). White mica geochemistry of the Copper Cliff porphyry Cu deposit: Insights from a vectoring tool applied to exploration. *Economic Geology*, 113(6), 1269–1295.

Vry, J., Cooke, D. R., & Heinrich, C. A. (2010). Regional and local patterns of alteration in porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(2), 315–340.

Wark, D. A., & Watson, E. B. (2006). TitaniQ: A titanium-in-quartz geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(6), 743–754.

## Elí Cerna Mallqui

Geólogo explorador en Volcan Compañía Minera, con enfoque en geología económica, exploración mineral y evolución de sistemas hidrotermales en depósitos tipo pórfito. Ha sido parte de reconocidas compañías del sector y programas de formación de alto nivel como WAAIME, OSINERGMIN, IIMP y "Hombre Roca 2025" de OMA Perú. Se distingue por su visión integradora, liderazgo y alto compromiso con la excelencia operativa y la seguridad.

Bachiller en Ingeniería Geológica – Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Perú.



## AUTORIZACIÓN DE PARTICIPACIÓN

Yo, Elí Cerna Mallqui, Geólogo Junior de Exploraciones Brownfield, Volcan Compañía Minera S.A.A.; autorizo que el trabajo titulado "*Clasificación y evolución de venillas hidrotermales en depósitos tipo pórfito de cobre*" (Geología y Exploraciones - Geología económica de yacimientos minerales metálicos y no metálicos. Investigaciones geológicas, petro-mineralógicas, geofísicas y geoquímicas) presentado por el autor Elí Cerna Mallqui sea presentado en el concurso del Premio Nacional de Minería del evento PERUMIN 37 Convención Minera, en las fechas del 22 al 26 de setiembre del 2025 en la ciudad de Arequipa.

---



Firma  
76335325