



Caracterización mineralógica y geoquímica de la mineralización vetiforme de Au-Ag de la Quebrada Aserradero, municipio de California, Santander (Colombia): implicaciones geometalúrgicas

Mineralogical and geochemical characterization of the Au-Ag vetiform mineralization of the Aserradero Stream, municipality of California, Santander (Colombia): geometalurgic implications

Carolina Santamaría-Galvis ^a; Carlos Alberto Ríos-Reyes ^a; Walter Pardave-Livia ^b

^a Universidad Industrial de Santander, Colombia; carolina.sg.uis@gmail.com

^a Universidad Industrial de Santander, Colombia; carios@uis.edu.co

^b Universidad de Santander, Colombia; wal.pardave@mail.udes.edu.co

Correspondencia: carios@uis.edu.co

Recibido: Marzo 24, 2023. Aceptado: Abril 29, 2023. Publicado: Junio 10, 2023

Resumen

El distrito minero de Vetás-California forma parte del Macizo de Santander, el cual está localizado en el sector nororiental de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos. Allí, se presentan mineralizaciones de tipo hidrotermal y pórfidos. Cerca de la Quebrada La Baja se desarrolla una serie de mineralizaciones vetiformes y brechoideas en un dominio estructural relacionado con estructuras tectónicas locales, como las fallas La Baja, Móngora y Angosturas, y fallas menores asociadas. En la zona de estudio, se identificaron 22 vetas paralelas entre sí con rumbo NE y buzando 75-80° al norte. La mineralización de Au-Ag y los minerales de alteración hidrotermal asociados revelan que este depósito es de tipo hidrotermal de media a alta sulfidación. La caracterización mineralógica se llevó a cabo mediante microscopía de luz transmitida, microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X. Los minerales de alteración hidrotermal incluyen cuarzo, arcillas (illita y caolinita), pirita, sericita, moscovita y alunita, generando zonas de alteración argílica, argílica avanzada, silicificación y filicificación. La mineralización de Au-Ag está asociada con las alteraciones argílica y filicítica. El grado de liberación óptimo para la pirita se obtuvo en una malla de 100 a partir de la molienda del mineral cabeza y análisis microscópico. Las arcillas del grupo de la caolinita, predominantemente dickita, representan un inconveniente durante la molienda y flotación debido a la disminución del flujo del procesamiento mineral, disminución de la recuperación de minerales de interés y aumento de viscosidad. Igualmente, implican mayores costos de operación debido a la necesidad de usar reactivos en la flotación y el espesamiento de relaves. El sistema hidrotermal se derivó de un magma calco alcalino y el depósito se define como un depósito de Au hidrotermal de media a alta sulfuración hospedado en roca calcoalcalina.

Palabras clave: Macizo de Santander; mineralización hidrotermal; zonas de alteración; grado de liberación; procesamiento mineral.

Abstract

The mining district of Vetás-California forms part of the Santander massif, which is located in the northeastern sector of the Eastern Range of the Colombian Andes. There are hydrothermal and porphyry type mineralizations presented there. A series of vetiform and brechoid mineralizations develop near the La Baja brook under a structural domain related to local tectonic structures as La Baja, Móngora and Angosturas faults and associated minor faults. In the study area there are 22 veins parallel to each other with a NE heading and dipping 75-80° to the north. The Au-Ag mineralization and associated hydrothermal alteration minerals reveal that this deposit is of medium to high sulfidation hydrothermal type. Mineralogical characterization was carried out using transmitted light microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray diffraction. Hydrothermal alteration minerals include quartz, clays (illite and kaolinite), pyrite, sericite, muscovite, and alunite, generating zones of argillic, advanced argillic, silicification, and phyllic alteration. Au-Ag mineralization is associated with argillic and phyllic alterations. The optimal liberation grade for pyrite was obtained on a 100 mesh size from the head ore **milling** and **microscopic** analysis. Clay minerals of the kaolinite group, predominantly dickite, represent an inconvenience during milling and flotation due to decreased mineral processing flow, reduced recovery of minerals of interest, and increased viscosity. Similarly, they imply higher operating costs due to the need to use reagents in flotation and tailings thickening. The hydrothermal system was derived from an alkaline tracing magma and the deposit is defined as an alkaline rock-hosted medium to high sulfur hydrothermal gold deposit.

Keywords: Santander Massif; hydrothermal mineralization; alteration zones; degree of release; mineral processing.

1. Introducción

Los depósitos epitermales se pueden encontrar en una variedad de entornos geológicos, que reflejan diferentes combinaciones de configuraciones ígneas, tectónicas y estructurales [1]. El estilo de mineralización más característico en entornos post-subducción extensional es el epitermal de Au de tipo alcalino, asociado con complejos intrusivos alcalinos máficos [2]. Estos depósitos se forman a profundidades someras, generalmente a menos de 1.5 km y a temperaturas entre 150 y 300 °C [6-7]. Los depósitos epitermales son acumulaciones de metales base y preciosos formados por aguas hidrotermales ascendentes a profundidades relativamente someras (≤ 900 m) y baja temperatura (50-200 °C), típicamente alojados en rocas volcánicas y adyacentes, como definió Lindgren [4-5]. La generación de depósitos minerales de clase mundial depende de muchos factores, incluyendo la concentración de metales en el fluido mineral, la duración del sistema mineralizante y la eficiencia del proceso deposicional [8-10]. Además, se han definido dos estilos de mineralización para los depósitos epitermales: alta y baja sulfidación, formados a partir de fluidos de química contrastante [11]. El término sulfidación fue usado por primera vez en la clasificación epitermal, la cual se refiere a depósitos de alta sulfidación caracterizados por una valencia de azufre oxidado (SO_4^{2-} , $n = +6$) y depósitos de baja sulfidación caracterizados por azufre reducido (H_2S , $n = -2$) [12]. En el ambiente de baja sulfuración, los fluidos mineralizantes son aquellos que generalmente se extraen mediante la perforación en sistemas geotérmicos activos [13]. El pH casi neutro y los fluidos reducidos forman minerales de sulfuro en estado de baja sulfuración [14]. Por el contrario, los sistemas de alta sulfuración y sus minerales en estado de sulfuración relativamente alta están asociados con fluidos ácidos y oxidados formados en el entorno hidrotermal magmático adyacente a volcanes jóvenes [15-16]. Estos dos estilos de mineralización epitermal también se conocen como los tipos adularia-sericita y ácido-sulfato, respectivamente [18]. Los depósitos epitermales son responsables del 8% del Au y el 17% de Ag a nivel mundial, y son una importante fuente de metales preciosos para países como México, Estados Unidos, Canadá, Chile, Perú, Papua Nueva Guinea y Japón [19]. El distrito minero de Vetas-California (DMVC) muestra una compleja historia geológica. La mineralización allí ocurre en rocas que se originaron en varias fases de sedimentación seguidas de subducción y actividades orogénicas que ocurrieron desde el Precámbrico hasta el Mesozoico. El núcleo del Macizo de Santander consiste en anfibolitas, paraneises y ortoneises graníticos fuertemente tectonizados, metamorfoseados y localmente migmatizados [20]. La mineralización en el DMVC ocurre durante un hiato relativo de un magmatismo de arco en la Cordillera Central [21]. Puede haber una correspondencia entre el ángulo de la losa de subducción y los tipos de mineralización presentes en la superficie [22]. La mineralización vetiforme de oro-plata (Au-Ag), representa un valioso geo-recurso de gran

importancia económica debido al alto valor de los metales preciosos que contienen y su demanda en la industria. Este tipo de mineralización es importante para las empresas mineras, como quiera que este tipo de mineralización se encuentra en yacimientos hidrotermales, que pueden ser geológicamente complejos y requerir técnicas avanzadas de exploración y minería, lo cual constituye un desafío para las empresas mineras, pero también puede llevar a importantes descubrimientos de depósitos minerales. El presente estudio tiene como objetivo llevar a cabo una caracterización mineralógica y geoquímica de la mineralización vetiforme de Au-Ag de la Quebrada Aserradero, municipio de California, Santander (Colombia), a fin de establecer implicaciones geometalúrgicas.

2. Marco Geológico Regional

El área de estudio se encuentra ubicada al noreste del municipio de California (Fig. 1) y está caracterizada por la ocurrencia de rocas metamórficas del Precámbrico a las que pertenece la Formación Neis de Bucaramanga, considerada como la unidad más antigua del Macizo de Santander, las cuales son cortadas por rocas ígneas de composición granítica del Triásico-Jurásico [23-24] y se evidencia un pulso magmático de edad Mioceno Tardío por la presencia de diques y cuerpos porfiríticos, además de brechas tectono-hidrotermales de edad Plioceno-Pleistoceno [25]. Se evidencia un fuerte control estructural en la presencia de las diferentes fallas en el área del depósito. A nivel regional, la falla principal es la falla Bucaramanga. Sin embargo, el control estructural sobre el depósito se debe a las fallas locales de San Juan, La Baja, Angosturas, Móngora, Paez y Romeral-Cucutilla, así como a otras fallas menores asociadas a estas, las cuales desempeñan un papel importante en la mineralización de la roca caja. En la parte central del macizo de Santander, entre el bloque de Vetas-California y Bucaramanga, el macizo muestra un patrón de falla particular con fallas de tendencia predominantemente NE-SW, como la Falla de Surata, de movimiento dextral [26]. Esta falla coincide con las vetas del depósito y es paralela o subparalela a ellas. El Gneis compone la unidad más antigua del basamento ígneo-metamórfico del macizo de Santander y es la unidad de mayor extensión y mayor interés, ya que en ella se llevará a cabo la explotación aurífera. Esta unidad se compone de gneises que varían composicionalmente, cuarcitas, anfibolitas y localmente migmatitas. También se presenta esporádicamente granulitas. El metamorfismo regional de esta unidad ha alcanzado las condiciones de facies anfibolita, zona de la silimanita superior [27]. Estudios geocronológicos han establecido una edad máxima de depositación del protolito para esta unidad como Meso-Proterozoico (edad de depositación entre ~1200-1300 Ma; según edades U-Pb en zircones detríticos) [28]. En la región, aflora un cuerpo intrusivo de edad Triásica a Jurásica, los cuales han aprovechado las zonas de fracturamiento a las que está sometido el Gneis de Bucaramanga, que hace las veces de roca caja. En general, se trata de cuerpos félsicos con

variaciones texturales y composicionales que dependen de las condiciones de emplazamiento. Se presenta igualmente alaskita, referido a rocas ígneas de afinidad granítica (SL), con contenidos muy bajos en minerales máficos (generalmente <5%). La mineralización en los distritos de California y Vetas ocurrió durante un hiato relativo de magmatismo de arco en la Cordillera Central [21]. Puede haber una correspondencia entre el ángulo de la losa de subducción y los tipos de mineralización presentes en la superficie [22]. Algunos autores [18, 23-24] han demostrado que el “aplanamiento” de la losa o el empujamiento inicial de una losa plana produce un entorno que favorece la génesis de depósitos minerales. La mineralización en el área ocurre en rocas que se originaron en varias fases de sedimentación seguidas de subducción y actividades orogénicas que ocurrieron desde el Precámbrico hasta el Mesozoico [20]. El área de estudio se caracteriza por la presencia de yacimientos auríferos de tipo epitermal, los cuales son sistemas de alta sulfidación para el sector de California y baja sulfidación para Vetas, según lo descrito por [18]. La caracterización del yacimiento la Tosca, un depósito hidrotermal de Au y Ag, ha permitido su clasificación como un depósito probablemente de baja sulfidación [29]. Existe un factor dominante en el DMVC: la morfología de los depósitos, generalmente relacionada con vetas, filones y brechas mineralizadas. El presente trabajo se desarrolla en esta región, más exactamente cerca de la vereda Angosturas, atravesando la quebrada Aserradero.

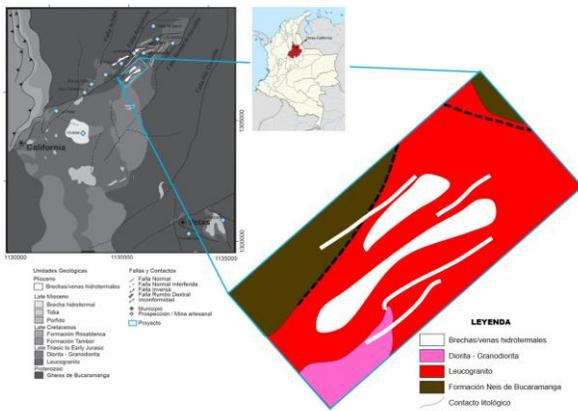


Figura 1. Geología y ubicación del área de estudio dentro del DMVC. Fuente: [27].

En esta zona, se han realizado perforaciones de sondeos con anterioridad, de las cuales se obtuvieron 50 muestras para analizar. Igualmente, se obtuvo información del modelo geológico para el yacimiento, que consiste en bloques tabulares o vetas. En este modelo, se observan las 22 vetas que lo conforman. Este depósito de metales preciosos (Au-Ag) presenta como característica principal una mineralización asociada con brechas magmático-hidrotermales que tienen un fuerte control estructural,

evidenciado por la presencia de varias fallas alrededor del área de estudio.

3. Materiales y métodos

3.1 Muestreo

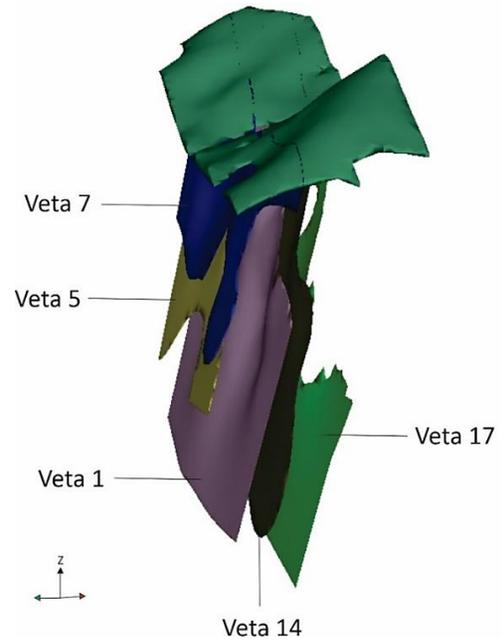


Figura 2. Disposición de las vetas mineralizadas de las cuales se obtuvieron las muestras para caracterización mineralógica. Fuente: Autores.

La exploración se realizó mediante un modelo geometalúrgico del depósito, el cual fue realizado en la estructura mineralizada de la zona a partir de lo cual se modelaron 22 vetas. La ley de corte para el Au se estableció en 3,85 ppm. En las 22 vetas consideradas por su ley de Au se hicieron perforaciones para obtener muestras con las cuales se realizaron las pruebas, para identificar las zonas, áreas y profundidades posibles con el software RECMIN. Se obtuvieron núcleos de perforación de la mineralización vetiforme de Au-Ag, a partir de los cuales se seleccionaron las muestras más representativas según su composición mineralógica y el tipo de alteración presente. El objetivo era obtener información preliminar sobre el porcentaje y distribución de minerales mena y ganga, el patrón textural y el tipo de alteraciones. Además, se realizó el cálculo de liberación mineral y la caracterización a escala macroscópica de 50 muestras. Se seleccionaron aquellas de mayor interés para realizar análisis por petrografía convencional, microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX). Las vetas modeladas son sub-paralelas entre sí con rumbo NE, y buzamiento 75-85° NW, son vetas con un espesor muy variable desde metros a centímetros, pero con una buena continuidad tanto lateral como en profundidad, fueron elegidas 5 vetas principales para la petrografía (1,5,7,14,17) como se ilustra en la Fig. 2.

De cada una de estas vetas se obtuvieron dos o tres muestras provenientes de núcleos de perforación. De estas, se seleccionaron aquellas que eran más representativas (Fig. 3), de acuerdo con su composición mineralógica y el tipo de alteración presente. El objetivo era obtener información preliminar sobre el porcentaje de minerales mena y ganga presentes, además de definir las texturas y alteraciones presentes en la muestra de mano. Para obtener la información petrográfica necesaria y realizar los análisis geoquímicos correspondientes, se prepararon secciones delgadas.

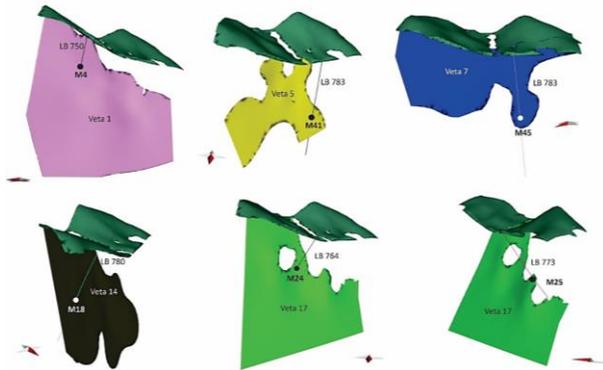


Figura 3. Ubicación de las muestras de interés en cada una de las vetas seleccionadas. Fuente: Autores.

3.2 Cálculo del grado de liberación mineral

La molienda de las muestras para el cálculo del grado de liberación mineral se llevó a cabo en el laboratorio de beneficio mineral de la Escuela de Metalurgia de la Universidad Industrial de Santander, mientras que el análisis microscópico se realizó en el laboratorio de microscopía de la Escuela de Geología. En primer lugar, se fragmentó cada muestra y se seleccionaron diferentes tamaños de partículas definidos por el número de malla utilizado para el análisis. A continuación, se determinó cuantitativamente el grado de liberación alcanzado por cada especie mineral, estableciendo dos porcentajes: el área ocupada por cada uno de los componentes y el área de superficie expuesta o su periferia. Para realizar este procedimiento de manera adecuada, se utilizó un microscopio o una lupa con el aumento necesario para distinguir las diferentes partículas y los componentes que las conforman. Para cada mineral se calculó el producto entre las dos áreas mencionadas anteriormente y se sumaron todos los porcentajes resultantes. Finalmente, para obtener el grado de liberación, se calculó el cociente entre la sumatoria de estos porcentajes y la cantidad de partículas analizadas.

3.3 Caracterización

El análisis petrográfico se llevó a cabo por microscopía de luz transmitida, utilizando un equipo trinocular marca Nikon, modelo Labophot2-POL con el fin de observar los rasgos texturales y microestructurales, tomando fotomicrografías con el objetivo 5x. El análisis mineralógico y composicional se llevó a cabo por microscopía electrónica de barrido (SEM)

usando un equipo QUANTA FEG 650 marca FEI, bajo las siguientes condiciones analíticas: aumento = 120-1000x, HFW = 2.49 mm - 298.0 μm , HV = 25 kV, WD = 10.1-10.9, signal = SE y Z Cont, detector = ETD y BSED, detector EDS EDAX APOLO X con resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$). Para el análisis por difracción de rayos-X (XRD) de muestras policristalinas, se empleó un equipo marca BRUKER, modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci, bajo las siguientes condiciones: voltaje (kV) 40, corriente (mA) 40, rendija de divergencia (mm), rendijas Soller primario 2.5, rendijas soller secundario 2.5, tamaño de paso ($^{\circ}2\theta$), tiempo por paso (0.6 s), paso de 0.02035° ($^{\circ}2\theta$), rango de registro ($^{\circ}2\theta$) de 2 a 70° , radiación $\text{CuK}\alpha 1$, filtro de níquel, uso de antidispersor de aire, detector lineal LynxEye, barrido a pasos. El espécimen seleccionado de la muestra fue molido en un mortero de ágata y posteriormente tamizado hasta un tamaño de partícula menor a $38 \mu\text{m}$ (400 mesh); para su respectiva medición la muestra fue montada en un portamuestras de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. El análisis cualitativo de las fases cristalinas presentes se realizó mediante la comparación gráfica (Boolean Search) utilizando el programa especializado Crystallographica SEARCH/MATCH.

4. Resultados

4.1 Grado de liberación mineral

El grado de liberación es una expresión cuantitativa de la magnitud en que la molienda es capaz de obtener partículas minerales libres. La determinación del grado de liberación de un determinado mineral solo es posible mediante la utilización de estudios microscópicos, y dado que es un parámetro de importancia decisiva tal determinación debe basarse en una metodología técnica y científicamente bien fundamentada. El grado de liberación mineral es de considerable interés para la optimización de procesos en la industria de los minerales. La molienda excesiva puede resultar en partículas minerales (monofásicas) demasiado pequeñas para ser separadas de manera eficiente de la ganga por métodos convencionales, especialmente la flotación [30]. El grado de liberación mineral (Fig. 4) corresponde al promedio calculado a partir de las variadas magnitudes de liberación alcanzadas por cada mineral. El grado de liberación es una expresión cuantitativa de la magnitud en que la molienda es capaz de obtener granos minerales “libres”, y su determinación solo es posible mediante el análisis microscópico. La textura de una mena es de gran importancia para el metalurgista, ya que el grado de liberación de los minerales durante la etapa de molienda depende de la forma en que los diferentes minerales se encuentran asociados en la mena, el tamaño de cada grano mineral, las características de sus bordes, su clivaje, fracturas y grado de alteración [31].

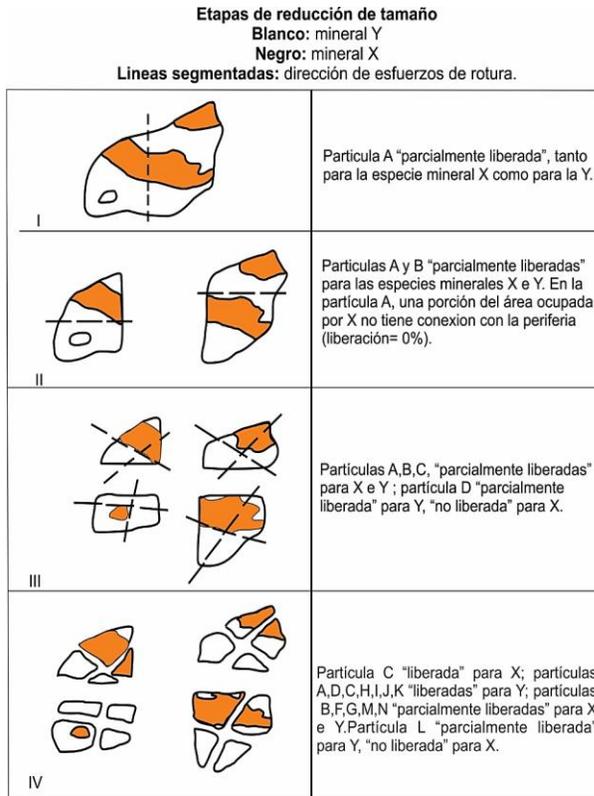


Figura 1. Etapas de reducción de tamaño para el cálculo del grado de liberación mineral. Fuente: Autores.

El material utilizado para la molienda y el cálculo del grado de liberación fue un compuesto de las muestras obtenidas de los núcleos de perforación. El grado de liberación óptimo para la pirita se obtuvo utilizando una malla de 100-120, con porcentajes de recuperación mayores al 97%. Sin embargo, la molienda excesiva genera sobrecostos, por lo que se seleccionó la malla 100 como la opción más viable para llevar a cabo el proceso inicial de aprovechamiento mineral. Los diferentes tamaños obtenidos después de la molienda y el tamizado se pueden observar en la Fig. 5.

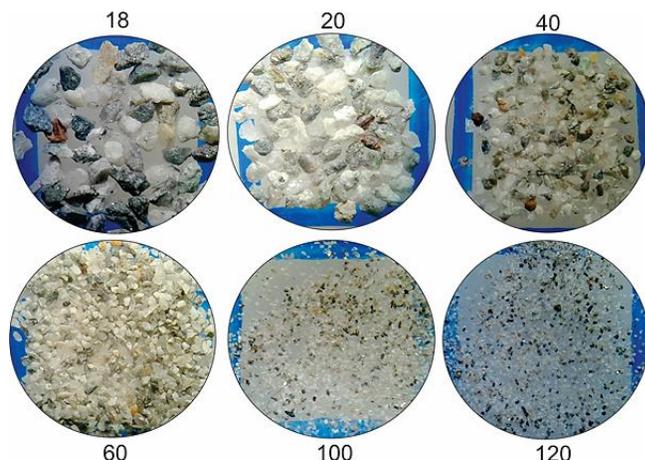


Figura 2. Microfotografías representativas del grado de liberación mineral para diferentes tamaños de malla. Fuente: Autores.

4.2 Caracterización mineralógica

Durante el proceso de beneficio de minerales, es importante llevar a cabo una evaluación integral para obtener grandes beneficios. Esto puede lograrse mediante diferentes técnicas, dentro de las cuales el análisis mineralógico es fundamental [31-33]. El análisis petrográfico revela características propias de un ambiente hidrotermal, con texturas en su mayoría de tipo brechoide. Se seleccionaron las muestras que presentaban mayores contenidos de Au-Ag-Cu, de acuerdo con la información proporcionada por la empresa minera encargada de las perforaciones y el logueo geológico. Por lo tanto, las asociaciones minerales y el tipo de alteraciones presentes representan un indicio sobre la distribución de la mineralización vetiforme. En la Fig. 6 se ilustran los principales rasgos observados a escala macroscópica de dicha mineralización. La Fig. 6A ilustra la presencia de vetillas de pirita y hematita entrecruzadas en una matriz silíceá. La Fig. 6B muestra vetillas de pirita y la presencia de calcantita. Se observa una brecha hidrotermal con presencia de cuarzo, pirita, magnetita y feldespato en la Fig. 6C. Las Figs. 6D-6E ilustran la ocurrencia de pirita diseminada con evidencias de oxidación y diseminada en una masa silíceá, respectivamente. La Fig. 6F muestra una vetilla hidrotermal compuesta por arcillas, cuarzo y algunos cristales de pirita diseminados, y presenta una estructura masiva con formación de vetillas de cuarzo o arcillas.

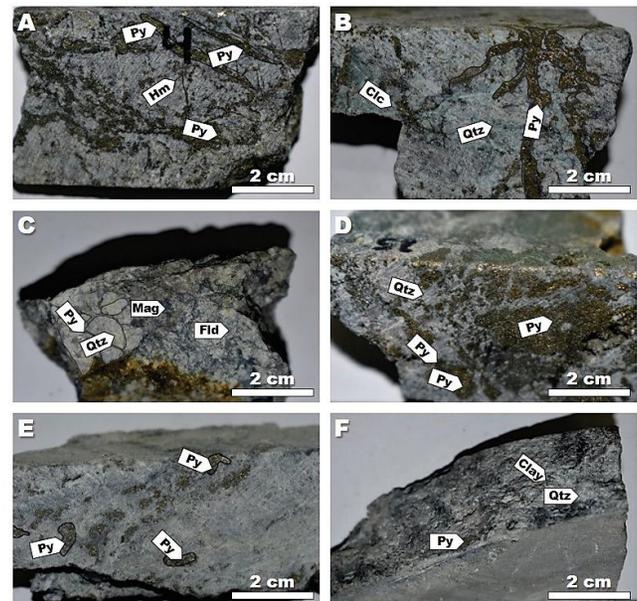


Figura 3. Fotografías de muestras de mano representativas de la mineralización vetiforme de Au-Ag. Qtz, cuarzo; Fld, feldespato; Clay, arcillas; Py, pirita; Hm, hematita; Mag, magnetita; Clc, calcantita. Fuente: Autores.

Las microfotografías de la Fig. 7 exhiben los principales rasgos texturales y composicionales observados en sección delgada. La Fig. 7A ilustra la presencia de cuarzo anhedral, pequeños cristales de pirita subhedral e illita en paragénesis conformando una alteración filica con presencia de Au-Ag.

En la Fig. 7B se observan cristales euhedrales a subhedrales de pirita en una matriz de sericita, cristales diminutos de moscovita y posiblemente minerales arcillosos que aparecen como manchas de color marrón, y cristales de calcopirita, definiendo una asociación mineral típica de una alteración filica. La Fig. 7C muestra una textura brechoide-cataclástica con presencia de feldespato alcalino, pirita, magnetita y posiblemente arcillas, con fuerte alteración del feldespato, definiendo una alteración argílica intermedia. El feldespato está completamente alterado a arcillas. En la Fig. 7D se observa una textura brechoide y asociación mineral cuarzo-pirita-sericita, característica de una alteración filica o cuarzo sericita. La muestra contiene fragmentos de cuarzo-pirita-feldespato alterando a sericita, la cual conforma la matriz, así como una microfRACTURA que atraviesa el área en la cual se encontró, mediante análisis SEM, un relleno composicionalmente variado constituido de cuarzo, telurio de Pb y minerales de Ca, definiendo una asociación cuarzo-pirita-sericita típica de una alteración filica.

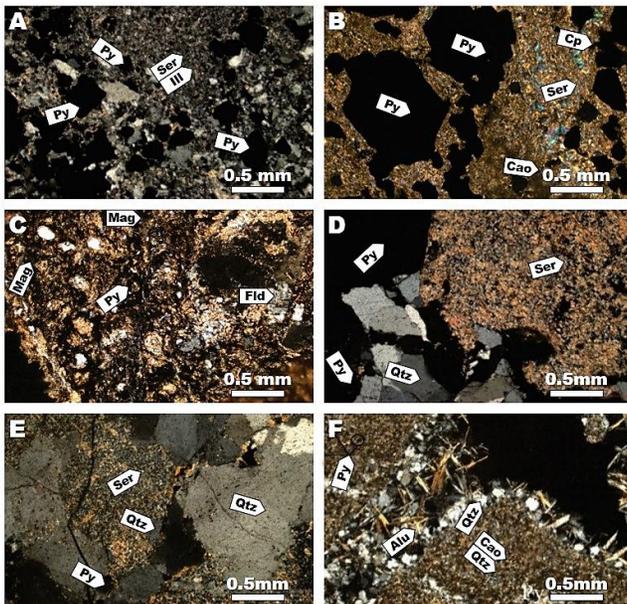


Figura 4. Microfotografías representativas de las alteraciones minerales que acompañan la mineralización vetiforme de Au-Ag. Qtz, cuarzo; Fld, feldespato; Py, pirita; Cp, calcopirita; Mag, magnetita; Ser, sericita; Cao, caolinita; Ill, illita; Alu, alunita. Fuente: Autores.

En la Fig. 7E se observan fragmentos de cuarzo-pirita-feldespato que alteran a sericita, conformando la matriz, así como una microfRACTURA que contiene un relleno composicionalmente variado. Este hallazgo sugiere tres pulsos hidrotermales sucesivos, en el primero se produce la alteración total de feldespatos a sericita, lo que da como resultado una matriz cuarzo-sericita. En el segundo pulso, la reacción fluido-roca lleva a la caolinitización de la sericita y la formación de pirita diseminada en la muestra. En el tercer pulso hidrotermal se forman las vetillas, y dicho fluido hidrotermal contiene sulfatos y promueve la alunitización de la caolinita, lo que sugiere que este fluido presenta un pH ligeramente mayor a 2. La cristalización en estas vetillas se

produce del núcleo hacia los bordes, donde cristaliza el cuarzo de menor temperatura. Con base en estas características y en la asociación mineral cuarzo-alunita-caolinita, se infiere una alteración argílica avanzada caracterizada por la destrucción total de los feldespatos en condiciones de hidrólisis muy fuerte, lo que conlleva a la formación de caolinita y alunita (Fig. 7F).

4.3 Caracterización geoquímica

Los análisis realizados mediante microscopía electrónica de barrido permitieron distinguir el modo de ocurrencia del Au y Ag en el depósito vetiforme. De las 6 muestras seleccionadas, se presentan a continuación 3 de ellas en las que se evidenció la presencia de Au.

La Fig. 8 muestra el resultado obtenido mediante MEB para la muestra 4 de la veta 1. La Fig. 8A muestra pirita masiva cuya composición fue confirmada mediante su porcentaje elemental. Dentro de esta pirita, se observaron unas diminutas partículas con un brillo superior sobre las cuales se realizó el análisis puntual para confirmar la presencia de Au y su modo de ocurrencia. La Fig. 8B revela partículas de Au de 6.516 μm y 14.760 μm , respectivamente, las cuales presentan formas esféricas con bordes irregulares y una asociación mineralógica compuesta por cuarzo + pirita + sericita + illita. En la Fig. 8C se muestra el porcentaje elemental para la partícula (1), en donde el contenido de Au corresponde al 82.5% (Au nativo) y un 4% de Ag. El C es resultado del recubrimiento de carbono aplicado a la muestra para hacerla conductora y poder observarla mediante MEB. En la Fig. 8D se muestra el porcentaje elemental para la partícula (2), en donde el contenido de Au, Ag y Te corresponde al 9.47%, 22.24% y 13%, respectivamente. De acuerdo con esta composición, el Au en esta partícula está asociado a telurios, específicamente a petzita. El C, igualmente, es resultado del recubrimiento.

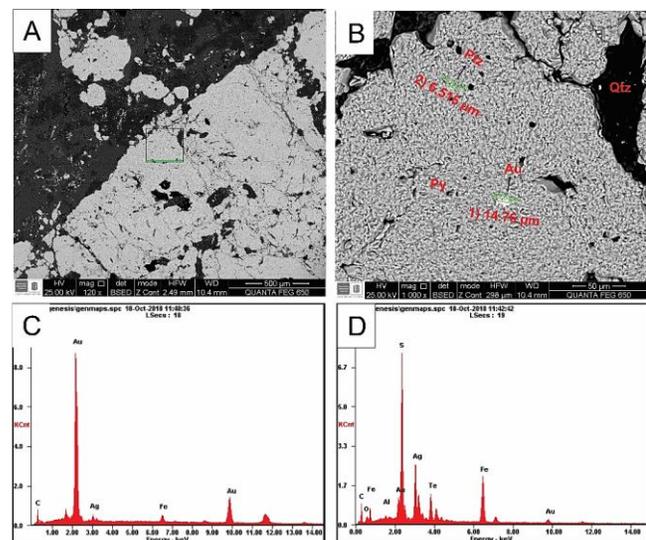


Figura 5. Microfotografías obtenidas mediante MEB para la muestra 4. Qtz, cuarzo; Ptz, petzita; Py, pirita; Au, oro. Fuente: Autores.

En la Fig. 9 se muestra el resultado obtenido mediante MEB para la muestra 18 de la veta 14. La Fig. 9A presenta un agregado granular de pirita masiva fracturada, cuya composición fue confirmada mediante su porcentaje elemental. Dentro de esta pirita se evidencian unas diminutas partículas con un brillo superior, sobre las cuales se realizará un análisis puntual para confirmar la presencia de Au y su modo de ocurrencia. La Fig. 9B ilustra partículas de Au y calcopirita (Cp) incluidas en el agregado granular de pirita. El Au en esta región presenta tamaños de 7.627 μm y forma esférica con bordes redondeados. La Fig. 9C muestra el espectro de dispersión de energía para la partícula de Au encontrada, en la cual se confirma la presencia de Au y Ag. Por último, la Fig. 9D muestra la tabla de porcentaje elemental para la partícula de Au encontrada, donde se confirma la presencia de Au nativo de acuerdo con el porcentaje de Au presente (75.36%). El contenido de carbono (C) corresponde probablemente al recubrimiento utilizado para hacer la muestra conductora.

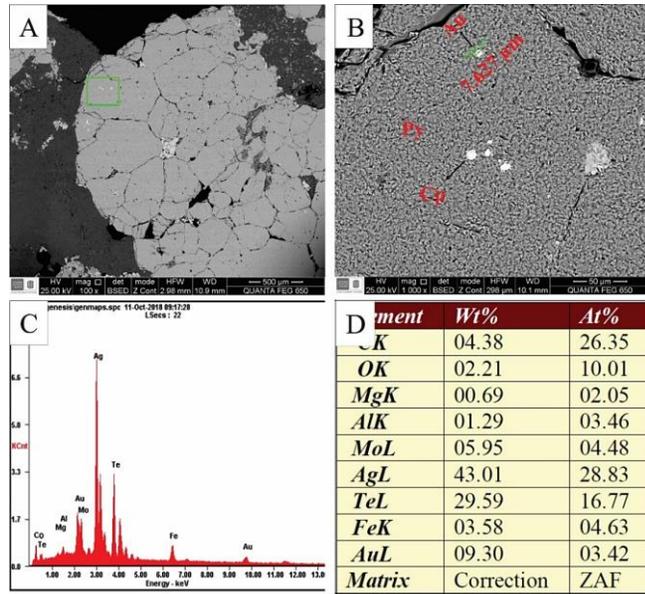


Figura 6. Microfotografías obtenidas mediante MEB para la muestra 18. Py, pirita; Cp, calcopirita; Au, oro. Fuente: Autores.

En la Fig. 10 se muestra el resultado obtenido mediante MEB para la muestra 24 de la veta 17. La Fig. 10A muestra un agregado granular de pirita en asociación mineral con sericita-illita. Dentro de esta pirita, se evidencia una partícula con un brillo superior, sobre la cual se realizará el análisis puntual para confirmar la presencia de Au y su modo de ocurrencia. La Fig. 10B revela una partícula seleccionada para análisis puntual incrustada en un fragmento de pirita masiva. La Fig. 10C muestra una partícula de Au anhedral de 21.90 μm encapsulada en un cristal de pirita. La Fig. 10D muestra el espectro de dispersión de energía y la tabla de porcentaje elemental para la partícula de Au encontrada, donde se confirma la presencia de Au nativo de acuerdo con el porcentaje de Au presente (75.36%). El contenido de

carbono (C) corresponde probablemente al recubrimiento utilizado para hacer la muestra conductora.

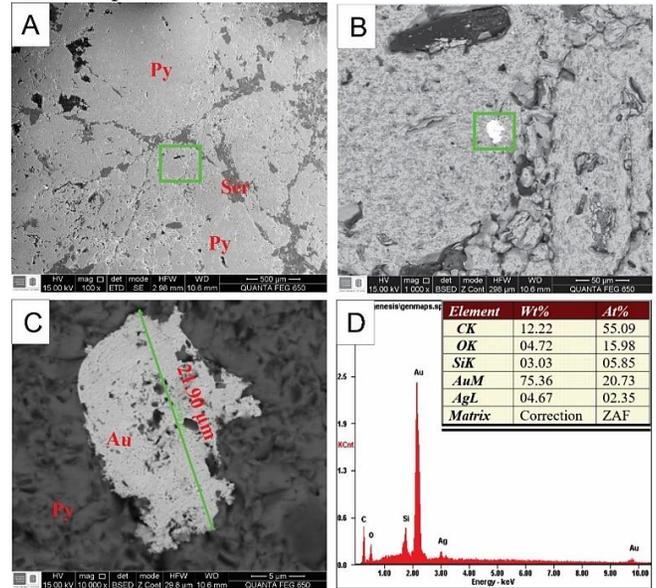


Figura 7. Microfotografías obtenidas mediante MEB para la muestra 24. Py, pirita; Ser, sericita; Au, oro. Fuente: Autores.

El análisis de difracción de rayos X, el cual es una herramienta esencial en la caracterización mineralógica, ya que permite obtener información valiosa sobre la identidad, estructura y propiedades de los minerales presentes en una muestra, permitió determinar la mineralogía de las muestras seleccionadas (16), con base en la identificación de fases cristalinas con ayuda de la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

La Fig. 11 muestra un patrón de difracción de rayos X de la muestra 19065003 (M24), el cual revela que las fases cristalinas identificadas corresponden principalmente a cuarzo - SiO_2 (PDF No. 46-1045) y trazas de sanidina - KAlSi_3O_8 (PDF No. 10-0353) y moscovita - $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ (PDF No. 07-0032).

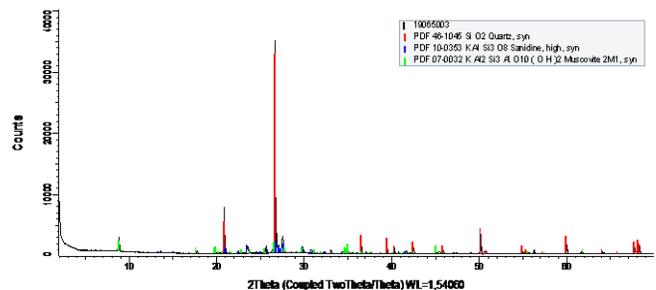


Figura 8. Patrón de difracción de rayos - X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065003 (M24). Fuente: Autores.

El patrón de difracción de rayos X de la Fig. 12 revela los tipos de arcillas presentes en la muestra 19065003 (M24), el cual muestra la ocurrencia de dos minerales arcillosos que corresponden a dickita - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{HCONH}_2)$ (PDF No.74-1758) e illita - $(\text{K},\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ (PDF No. 26-0911).

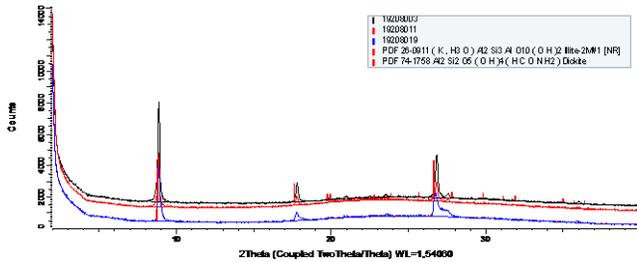


Figura 9. Patrón de difracción de rayos – X de las fases identificadas en la fracción arcillosa de la muestra 19065003 (M24). Fuente: Autores.

4.4 Alteración hidrotermal

La mineralogía de la ganga está compuesta principalmente por cuarzo de grano muy fino. En la mayoría de las muestras obtenidas, la textura original ha desaparecido y se ha dado una mineralización del cuarzo por reemplazo. Se pueden observar texturas primarias en el cuarzo a nivel microscópico, además de evidencias de deformación y fracturas evidenciadas por la presencia de cuarzo ondulado y notorias fracturas. De acuerdo con las asociaciones minerales encontradas, se definen dos tipos de alteración hidrotermal presentes en el área del proyecto. La alteración fílica o sericítica se caracteriza en este depósito por la paragénesis cuarzo + pirita + sericita (illita) y está distribuida extensamente en el depósito. Los feldespatos han sido completamente transformados a illita como resultado de un fuerte proceso de hidrólisis. Con base en la paragénesis encontrada, se definen una temperatura de 200-250°C y un pH de 4-6. En las rocas con este tipo de alteración, se identificó gran parte de la mineralización presente. Finalmente, se presenta una alteración argílica intermedia-argílica avanzada, caracterizada por las paragénesis cuarzo + dickita + illita y cuarzo + dickita + illita + alunita. En este tipo de alteración, se encuentra alojada igualmente parte de la mineralización de Au-Ag.

4.5 Mineralización

La mineralización en este depósito se presenta asociada al sulfuro principal (pirita). Con la ayuda de los análisis de difracción de rayos X, se logra identificar el modo de ocurrencia del Au, encontrándose encapsulado en la pirita en paragénesis con cuarzo + pirita + illita + dickita. Consiste en partículas microscópicas principalmente de telururos de Au-Ag y contenido mínimo de Au nativo. El tamaño de las partículas oscila desde 2 hasta 22 µm. Se definen dos etapas mineralizantes principales con cuarzo, moscovita, sericita, arcillas como minerales no metálicos (ganga) y pirita, calcopirita, magnetita, hematita, rutilo y Au y Ag, como constituyentes metálicos (mena). De acuerdo con las descripciones petrográficas y los resultados obtenidos mediante DRX, se propone una secuencia paragenética para el depósito (Fig. 13).

Mineral	Fase hidrotermal		
	Pre-mineralización	Mineralización	
	I	II	III
Cuarzo	Present	Present	Present
Feldespato	Present	Absent	Absent
Biotita	Present	Absent	Absent
Sericita	Absent	Present	Absent
Arcillas	Absent	Absent	Present
Moscovita	Present	Absent	Absent
Pirita	Absent	Present	Present
Magnetita	Absent	Present	Absent
Hematita	Absent	Present	Absent
Calcopirita	Absent	Present	Absent
Au nativo	Absent	Present	Absent
Silvanita	Absent	Present	Absent
Petzita	Absent	Present	Absent
Calcantita	Absent	Present	Absent
Covelita	Absent	Present	Absent
Bornita	Absent	Present	Absent
Talco	Absent	Absent	Present

Figura 10. Secuencia paragenética propuesta para el depósito. Fuente: Autores.

5. Conclusiones

La mineralización vetiforme que es objeto del presente estudio está constituida principalmente por cuarzo (55%), arcillas (illita-dickita) (25%), pirita (15%) y feldespatos (5%). Los minerales de mena incluyen Au (nativo, electrum, silvanita, petzita), pirita, calcopirita, enargita, bornita, calcosina, hematita, magnetita y rutilo. La ganga está compuesta principalmente por cuarzo, sericita, arcillas (illita, dickita y montmorillonita en menor proporción) y, en cantidades menores, moscovita, ortoclasa, flogopita y biotita. También se pueden observar alteraciones fílicas y argílicas de intermedia a avanzada. El oro se encuentra en forma nativa o encapsulado en silvanita (Te-Au-Ag), petzita (Ag-Te-Au) o pirita (Fe₂S), con un tamaño de 2 a 22 µm. La caracterización mineralógica de un yacimiento permite su tratamiento efectivo para obtener el mayor porcentaje de recuperación mineral. Sin embargo, cada yacimiento posee características geológicas y mineralógicas diferentes, por lo que es necesario realizar una completa caracterización de los minerales presentes con el fin de elegir los procesos metalúrgicos más eficientes para una correcta separación de los metales de interés. El grado de liberación óptimo del mineral se obtuvo para la malla 100-120, y no se evidencia ninguna fase mineral que intervenga de manera negativa durante el proceso de beneficio mineral. Se definió realizar un proceso de concentración por flotación selectiva, por medio del cual se obtendrá un concentrado de cobre y otro de pirita aurífera, alcanzando recuperaciones globales de 99% de Cu, 97% de Au y 80% de Ag. La mineralogía aplicada es de gran importancia para brindar soluciones a diferentes problemas de beneficio mineral, y la aplicación de modelos geo-metalúrgicos en la planificación minera permite integrar las tres disciplinas básicas de una operación minera: geología, metalurgia y minería. Esto permite optimizar el uso de los recursos minerales y los procesos de rendimiento a lo largo de la vida útil de la mina. El presente estudio es esencial antes de la selección del método de beneficio, para garantizar que los procesos seleccionados conduzcan a la mayor

recuperación mineral y a la reducción de costos en el procesamiento.

Reconocimientos

Este trabajo forma parte del trabajo de grado de C. Santamaría. Los autores estamos agradecidos con los laboratorios de Preparación de Muestras de la Escuela de Geología, de Petrografía del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada, y de difracción de rayos X y microscopía del Laboratorio Central de la Universidad Industrial de Santander y su personal profesional, por sus útiles comentarios y discusiones, así como por su asistencia en la adquisición de datos analíticos. El manuscrito se benefició de los comentarios constructivos de los revisores anónimos. Estamos muy agradecidos con estas personas e instituciones por su apoyo.

Referencias

- [1] White N.C., Hedenquist J.W., Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration, *Journal of Geochemical Exploration* 36(1-3) (1990) 445-474. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G).
- [2] Richards, J.P., Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere, *Geology* 37(3) (2009) 247-250. <https://doi.org/10.1130/G25451A.1>.
- [3] White N.C., Hedenquist J.W., Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics and Exploration. Society of Economic Geologists Newsletter 1(23) (1995) 9-13.
- [4] Waldemar L., A suggestion for the terminology of certain mineral deposits, *Economic Geology* 17(4) (1922) 292-294. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.17.4.292>.
- [5] Waldemar L., Mineral deposits. McGraw-Hill Book Company, Inc. Fourth edition, Vol. 3 (1933), Nueva York, Estados Unidos de America. ISBN: 0548807906.
- [6] Hedenquist J.W., Arribas A., Gonzalez-Urien E., 2000, Exploration for epithermal gold deposits, *Reviews in Economic Geology*, 13, 245-278.
- [7] Simmons S.F., White N.C., John D.A., Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits, *Economic Geology* 17 (2005) 485-522. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.17.4.292>.
- [8] Simmons S.F., Brown K.L., Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a giant ore deposit, *Science*, 314(5797) (2006) 288-291. October 2006. ISSN: 1095-9203. <https://doi.org/10.1126/science.1132866>.
- [9] Richards J.P., Mumin A.H., Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron oxide-copper-gold and porphyry Cu \pm Mo \pm Au deposits, *Geology* 41(7) (2013) 767-770. <https://doi.org/10.1130/G34275.1>.
- [10] Banks O., Bozkaya, D.A., Bozkaya O., Direct observation and measurement of Au and Ag in epithermal mineralizing fluids, *Ore Geology Reviews* 111 (2019) 102955. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102955>
- [11] Hedenquist J.W., Mineralization Associated with Volcanic-Related Hydrothermal Systems in Circum-Pacific Basin, AAPG Bulletin 70 (1986) Abstract. <https://doi.org/10.1306/9488648e-1704-11d7-8645000102c1865d>.
- [12] Henley R.W., Ellis A.J., Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review, *Earth-Science Reviews* 19 (1983) 4-10. January 1983. ISSN: 0012-8252. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(83\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(83)90075-2).
- [13] Barton P.B., Skinner B.J., 1979, Sulfide mineral stabilities. In: H.L. Barnes, ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley Interscience. Second edition. New York, Estados Unidos de America (1979) 278-403. ISBN: 0471050563.
- [14] Ransome F.L., The association of alunite with gold in the Goldfield district, Nevada. *Economic Geology* 2 (1907) 667-692. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.2.7.667>.
- [15] Hedenquist J.W., Lowenstern J.B., The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits, *Nature* 370 (1994) 519-527. <https://doi.org/10.1038/370519a0>.
- [16] Heald P., Foley N.K., Hayba D.O., Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: Acid sulfate and adularia-sericite types, *Economic Geology* 82(1) (1987) 1-26. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.1.1>.
- [17] Wang L., Qin K.Z., Song G.X., Li G.M., A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification, *Ore Geology Reviews* 107(19) (2019) 434-456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>.
- [18] Mathur R., Ruiz J., Herb P., Hahn L., Burgath K.P., Re-Os isotopes applied to the epithermal gold deposits near Bucaramanga, northeastern Colombia, *Journal of South American Earth Sciences* 15(7) (2003) 815-821. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00126-8).
- [19] Pindell J.L., Barret S.F., 1990, Geological evolution of the Caribbean region: A plate-tectonic perspective. In: Dengo, G., Case, J.E., (Eds.), *The Caribbean Region*. Boulder, Colorado, Geological Society of America vol. H (1990), 339-374. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-H.405>.
- [20] Sillitoe R.H., A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits, *Economic Geology* 67(2) (1972) 184-197. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.2.145>.
- [21] Skewes M.A., Stern C.R., Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu-rich breccia pipes in the Andes of central Chile, *Geology* 22(6) (1994) 551-554. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0551:TFTFO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0551:TFTFO>2.3.CO;2).
- [22] Kay S.M., Mpodozis C., Central Andean Ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust, *GSA Today* 11(3) (2001) 4-9. [https://doi.org/10.1130/1052-5173\(2001\)011<0004:CAODLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2001)011<0004:CAODLT>2.0.CO;2).
- [23] Mantilla L.C., Bissig T., Cottle J.M., Hart C., Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera), *Journal of South American Earth Sciences* 38 (2012) 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.03.001>.
- [24] Mantilla L.C., Bissig T., Valencia V., Hart C., The magmatic history of the Vetás-California mining district, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia, *Journal of South American Earth Sciences* 45 (2013) 235-249. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.03.006>.
- [25] Rodríguez A.L., Geology, Alteration, Mineralization and Hydrothermal Evolution of the La Bodega-La Mascota deposits, California-Vetas Mining District, Eastern Cordillera of Colombia, Northern Andes. The University of British Columbia, 2014.
- [26] Amaya S., Zuluaga C.A., New fission-track age constraints on the exhumation of the central Santander Massif: Implications for the tectonic evolution of the Northern Andes, Colombia, *Lithos* 282-283 (2017) 388-402. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.03.019>.
- [27] García C.A., Ríos C.A., Occurrence and significance of the polymorphs of Al₂SiO₅ in metamorphic rocks of the Santander Massif, Eastern Cordillera (Colombian Andes), *Boletín de Geología* 26(43) (2004) 23-38.
- [28] Mantilla L.C., García C.A., Valencia V.A., Nuevas evidencias que soportan la escisión de la formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia), *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 40 (2016) 320-336. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.303>.
- [29] García C.A., Uribe E., Caracterización Geológica Y Mineralógica Del Yacimiento La Tosca (Vetas, Santander, Colombia): Implicaciones Para El Procesamiento Mineral De Las Menas Auroargentíferas, *Boletín de Geología* 28(2) (2006) 63-76.
- [30] Spencer S., Sutherland D., Stereological correction of mineral liberation grade distributions estimated by single sectioning of particles, *Image Analysis & Stereology* 19 (2000) 175-182. <https://doi.org/10.5566/ias.v19.p175-182>.
- [31] Maizé V.Q., Estudio minerográfico y determinación microscópica del grado de liberación de los minerales sulfurados de cobre, Tesis de

Pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú, 2005.

- [32] Petruk W., Chemical and metallurgical analysis for performance assessment. Evaluation and optimization of metallurgical performance. Eds. Malhotra D., Klimpel R.R. and Mular A.L.. AIME (1981)181-191.
- [33] Ojeda-Escamilla C., Romo-Rojas E., Medina-Castilleja J.F., Reyes-Bahena J.L., Caracterización mineralógica aplicada al proceso de beneficio de minerales. XXVI Convención Internacional de Minería, Veracruz, México, 2005.