

Mineralogía y microtermometría de inclusiones fluidas de la veta con mineralización Au-Ag de la mina La Aurora en la parte norte del Distrito Minero Zaragoza–Segovia–Remedios (DMZSR), Colombia

Diana Lorena Castaño-Dávila¹, Juan Sebastián Hernández-González*²,
Juan Carlos Molano-Mendoza³, Andrés Ignacio Rodríguez-Vargas⁴

doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019005> 

Forma de citar: Castaño-Dávila, D.L., Hernández-González, J.S., Molano-Mendoza, J.C., y Rodríguez-Vargas, A.I. (2019). Mineralogía y microtermometría de inclusiones fluidas de la veta con mineralización Au-Ag de la mina La Aurora en la parte norte del Distrito Minero Zaragoza–Segovia–Remedios (DMZSR), Colombia. *Boletín de Geología*, 41(3), 107-125. doi: 10.18273/revbol.v41n3-2019005.

RESUMEN

La veta de la mina La Aurora con mineralización aurífera asociada, hace parte del Distrito Minero Zaragoza–Segovia–Remedios (DMZSR), localizado en el flanco oriental de la Cordillera Central de los Andes colombianos. Dicha mineralización está emplazada en rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, y corresponde a una veta de cuarzo con una secuencia paragenética que define tres eventos mineralizantes: i) Etapa I con asociación mineral Qz+Py+Ccp+Po, ii) Etapa II con paragénesis entre Qz+Chl+Ser+Cal+Py+Ccp+Gn+Au+Sp+Ant y iii) Etapa III con asociación entre Qz+Ser+Cal+Py+Ccp+Gn+Au+Rt+Sp+Gth+Mrc. Los fluidos mineralizantes con formación de oro (etapas II y III) son de baja salinidad y temperaturas que varían entre 165,8°C y 262,9°C. La veta contiene dos tipos de inclusiones fluidas primarias bifásicas (LV) en cuarzo de Etapa II y un tipo de inclusiones fluidas secundarias: Tipo IL con temperatura de homogenización (T_h) que varía entre 165,8°C y 195°C y salinidad entre 4,3 y 5,9 wt % NaCl eq.; Tipo IIL con temperatura de homogenización (T_h) que varía entre 200°C y 262,9°C y salinidad entre 5,9 y 11,6 wt % NaCl eq.; Tipo V son inclusiones monofásicas con tamaños menores a 5 μ . Las relaciones de oro y plata con otros metales son variables, presentando valores promedio de Au/Ag=1,24, Au/Bi=1,02, Au/Pb=0,01, Au/Zn=0,02, Ag/Bi=0,75, Ag/Pb=0,01 y Ag/Zn=0,03. Las propiedades físicas y químicas calculadas con los datos medidos de las inclusiones fluidas relacionadas con la secuencia paragenética y los análisis geoquímicos, permiten plantear que las condiciones de formación de las mineralizaciones de oro se dieron en niveles corticales someros, posiblemente en un sistema epitermal. El Sistema de Fallas Otú–Pericos controló el emplazamiento y la distribución espacial de la veta mineralizada.

Palabras clave: Mineralización aurífera; Distrito Minero Zaragoza–Segovia–Remedios (DMZSR); inclusiones fluidas; mina La Aurora.

Mineralogy and fluid-inclusion microthermometry of the vein with Au-Ag ore of La Aurora mine in the northern part of the Zaragoza–Segovia–Remedios mining district (ZSRMD), Colombia

ABSTRACT

The gold mineralization related to the vein of La Aurora mine is part of the Zaragoza–Segovia–Remedios Mining District (ZSRMD), located in the eastern flank of Central Cordillera of Colombia. This mineralization is emplaced in metamorphic rocks from Cajamarca Complex and corresponds to a quartz vein with a paragenetic sequence that defines three mineralizing events: i) Stage I with mineral associations Qz+Py+Ccp+Po, ii) Stage II with paragenesis among minerals such as Qz+Chl+Ser+Cal+Py+Ccp+Gn+Au+Sp+Ant and iii) Stage III with associations among minerals Qz+Ser+Cal+Py+Ccp+Gn+Au+Rt+Sp+Gth+Mrc. Mineralizing fluids with the gold formation (stages II and III) are of low salinity and the temperatures between 165.8°C and 262.9°C. The vein contains two types of biphasic primary fluid inclusions (LV) in quartz of the stage II and one type of secondary fluid inclusions: Type IL with a homogenization temperature (T_h) between 165.8°C to 195°C and salinity between 4.3 to 5.9 wt % NaCl eq.; Type IIL with homogenization temperature (T_h) between 200°C to 262.9°C and salinity between 5.9 to 11.6 wt % NaCl eq.; Type V are monophasic inclusions with sizes smaller than 5 μ . The ratios between gold/silver and other metals are variable, with average values of Au/Ag=1.24, Au/Bi=1.02, Au/Pb=0.01, Au/Zn=0.02, Ag/Bi=0.75, Ag/Pb=0.01 and Ag/Zn=0.03. Physical and chemical properties calculated with the measured data from fluid inclusions and related to the paragenetic sequence, and geochemical analysis suggest that the formation conditions of gold mineralization occurred in shallow crustal levels, possibly in an epithermal system. The Otú–Pericos Fault System possibly controlled the emplacement and spatial distribution of the mineralized vein.

Keywords: Gold mineralization; Zaragoza–Segovia–Remedios Mining District (ZSRMD); fluid inclusions; La Aurora mine.

¹ Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. diana_lorena61@hotmail.com

² Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. (*) juan.hernandez@usp.br

³ Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. jcmolanom@unal.edu.co

⁴ Minerlab Ltda., Bogotá, Colombia. arodriguez@minerlablimitada.com

INTRODUCCIÓN

La Cordillera Central de los Andes colombianos está conformada por un basamento metamórfico con una cobertera sedimentaria mesozoica y cenozoica, sucesión que es intruida por plutones que dieron origen y albergan yacimientos importantes de minerales metálicos (Feininger *et al.*, 1972).

En el sector norte de la Cordillera Central, en el departamento de Antioquia, existen depósitos de metales preciosos importantes en estructuras vetiformes, emplazadas tanto en las rocas del basamento como en los plutones (Feininger *et al.*, 1972). Con el fin de definir los distritos mineros más relevantes presentes en este sector de la Cordillera Central, los principales depósitos de minerales metálicos han sido agrupados en tres zonas por Rodríguez y Pernet (1983), divididas en cinco distritos. Uno de ellos es el Distrito Minero Zaragoza–Segovia–Remedios (DMZSR), que dichos autores lo dividieron en dos áreas: 1) Área Segovia–Remedios que corresponde a la parte sur del distrito y 2) Área Zaragoza–Segovia la cual representa la parte norte.

La mayoría de los estudios sobre el origen de las mineralizaciones presentes en esta zona de la Cordillera Central, han sido desarrollados en la parte sur del DMZSR entre Segovia y Remedios. Oquendo *et al.* (1970) argumenta que las mineralizaciones son controladas por fracturamiento debido a esfuerzos tectónicos originados por la Falla Otú y esfuerzos de tensión generados por el enfriamiento del Plutón Cuarzodiorítico de Segovia. Feininger *et al.* (1972) describen un conjunto de dioritas y cuarzodioritas del Jurásico tardío (160 ± 7 Ma: K-Ar en hornblenda), que son la roca encajante de los filones de cuarzo aurífero en el área de Segovia–Remedios. Ordóñez-Carmona *et al.* (2005) sugieren un origen orogénico de las mineralizaciones con fuerte control tectónico durante los procesos mineralizantes. Echeverri (2006) atribuye a la actividad volcánica del Cretácico tardío–Paleógeno temprano, el origen fluidos responsables de las mineralizaciones auríferas en el área. Finalmente, Manco *et al.* (2012) sugieren una fuente magmática para la formación de los depósitos vetiformes de la parte sur del DMZSR bajo condiciones mesotermiales.

En la zona de influencia de la Falla Otú (parte sur del DMZSR), Álvarez *et al.* (2007) concluyeron que el ambiente de formación de las mineralizaciones vetiformes estuvo controlado por la combinación de los mecanismos cizalla-extensional y extensional, en ambientes orogénicos o relacionados con intrusiones

(*intrusion-related gold-deposits*). González *et al.* (2010) determinaron que las vetas encajadas en rocas ígneas y metamórficas presentes en esta parte del distrito se encuentran controladas por las estructuras formadas por la dinámica de la Falla Otú.

La mina La Aurora, objeto del presente estudio, se encuentra ubicada en el flanco oriental de la Cordillera Central en el área Zaragoza–Segovia (parte norte del DMZSR) (FIGURA 1) y corresponde a una estructura vetiforme enriquecida en oro. A pesar de que existen modelos genéticos de formación de las estructuras vetiformes en el distrito, estos son limitados y de carácter regional, encaminados hacia el control estructural durante su emplazamiento, sin realizar análisis detallado directamente en dichas vetas.

Este artículo contiene la caracterización mineralógica y textural de la veta con mineralizaciones auríferas de la mina La Aurora, y la caracterización del fluido mineralizante a partir del estudio de inclusiones fluidas. Con el análisis de los datos obtenidos, se propone un modelo conceptual para determinar el ambiente de formación en el cual se originaron las mineralizaciones vetiformes de Au-Ag.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La mina La Aurora se localiza en el flanco oriental de la Cordillera Central de los Andes colombianos, a unos 200 km al NE de Medellín, en el corregimiento de Machuca, entre los municipios de Segovia y Zaragoza, al W del Sistema de Fallas Otú–Pericos (FIGURA 1). Dicho sistema, limita dos de los terrenos acrecionados al Escudo de Guyana: el Terreno Chibcha al E y el Terreno Tahamí al W (*cf.* Etayo-Serna *et al.*, 1983; Restrepo y Toussaint, 1988; Toussaint, 1993). Además, pone en contacto las rocas metamórficas pertenecientes al Complejo Cajamarca (Maya y González, 1995), que encajan la mineralización aurífera de la mina La Aurora, con las rocas plutónicas del Batolito de Segovia (Feininger *et al.*, 1972) (FIGURA 1).

En el Terreno Chibcha, al E del Sistema de Fallas Otú–Pericos, la sucesión de rocas metamórficas está representada por neises cuarzo-feldespáticos con lentes de anfibolita (alto a medio grado de metamorfismo), con edades que varían entre 1300 ± 100 y 752 ± 70 Ma (K/Ar en hornblenda) asignadas por correlación con granulitas de la Sierra Nevada de Santa Marta, (Tschanz *et al.*, 1974).

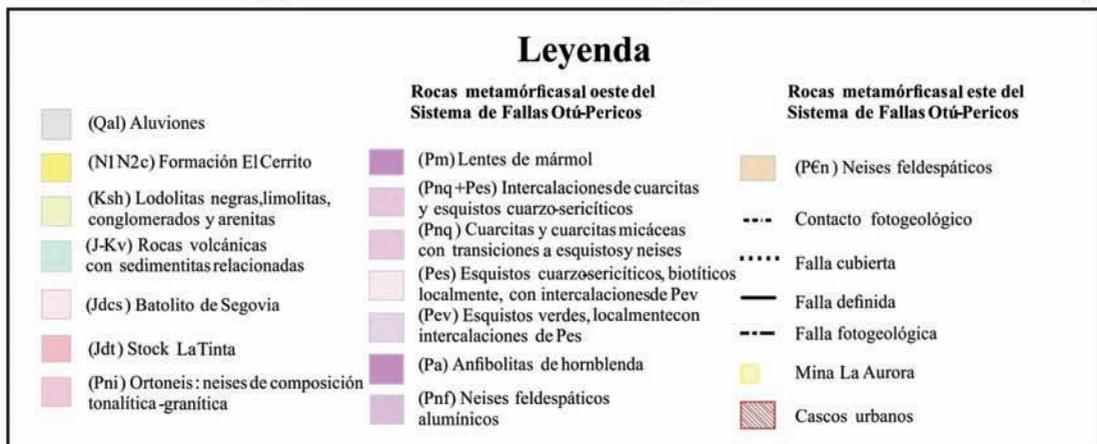
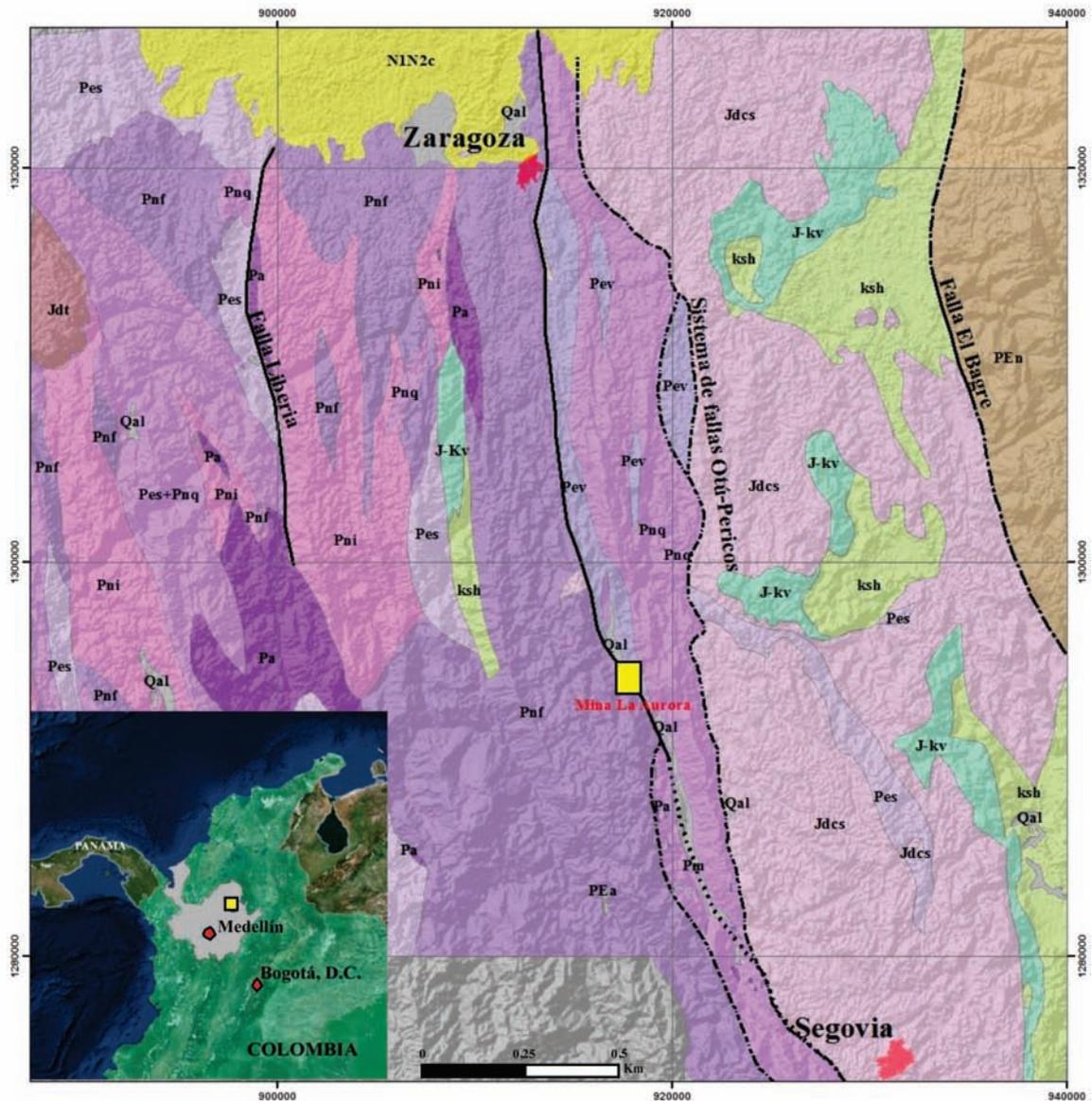


FIGURA 1. Mapa de localización y geología regional del área Zaragoza-Segovia. Compilado y modificado de las planchas 117 Amalfi (Feininger *et al.*, 1975), 106 Liberia (González, 1988a) y 94 El Bagre (González *et al.*, 2015).

Por otra parte, las rocas metamórficas al oeste de este sistema de fallas (Terreno Tahamí), corresponden a un complejo polimetamórfico conformado por neises feldespáticos aluminicos con lentes de anfibolita, interestratificaciones entre esquistos cuarzo-sericiticos con cuarcita, y esquistos de actinolita, clorita y epidota con intercalaciones de mármol. Dicho complejo es de bajo a medio grado de metamorfismo, en las series de alta temperatura y baja presión (tipo Abukuma) (cf. González, 1988b). La edad de esta unidad está basada en la correlación con las rocas metamórficas de la Cordillera Central descritas por Feininger *et al.* (1972), con el Grupo Ayurá–Montebello descrito por Botero (1963), con parte del Grupo Valdivia (Hall *et al.*, 1972) y con parte del Grupo Cajamarca (Nelson, 1957). Sin embargo, no se precisa la edad del metamorfismo para estas rocas.

Al E del Sistema de Fallas Otú–Pericos afloran dioritas y cuarzodioritas del Batolito de Segovia con edades que están entre 160 ± 7 Ma datadas por el método K/Ar en hornblenda (Feininger *et al.*, 1972) y $158,7 \pm 2,0$ Ma por el método U/Pb en circón (Leal-Mejía, 2011) en el área de Segovia–Remedios (FIGURA 1).

METODOLOGÍA

Para este trabajo, se realizó cartografía geológica local en un área de 9 km² a escala 1:10.000 (FIGURA 2), y en la mina La Aurora se llevó a cabo el levantamiento topográfico a cinta y brújula y cartografía geológica a escala 1:200.

Teniendo en cuenta las asociaciones mineralógicas relacionadas con la mineralización aurífera, observadas en la veta en muestra de mano durante la descripción geológica de la mina, se seleccionaron nueve muestras representativas para la elaboración de secciones delgadas pulidas (SDP). Estas fueron analizadas con un microscopio Nikon 50i POL equipado con luz reflejada y luz transmitida en el Laboratorio de Yacimientos Minerales de la Universidad de Caldas. En la descripción de cada sección delgada se realizó el conteo sistemático de 300 puntos. Posteriormente, se seleccionaron cuatro muestras de cuarzo con oro y sulfuros, para la elaboración de secciones doblemente pulidas (SDDP). Tanto las SDP como las SDDP fueron elaboradas en el laboratorio MINERLAB Ltda. en Bogotá. Para la descripción de los minerales se utilizaron las abreviaturas propuestas por Whitney y Evans (2010).

Los análisis de petrografía de inclusiones fluidas y microtermometría se realizaron en el laboratorio de Microscopía, Microtermometría y Geotermia de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá con una platina Linkan THMS 600. Esta platina alcanza temperaturas de calentamiento de 600°C y temperaturas de enfriamiento de -196°C. De cada muestra fueron extraídos fragmentos (*chips*) de 10 mm de diámetro para seleccionar las inclusiones fluidas más representativas. Posteriormente se establecieron intervalos de tiempo y temperatura adecuados para detectar los cambios de fase en las inclusiones de cada muestra. Una vez seleccionada la inclusión a medir, se procedió a enfriar la muestra con nitrógeno hasta -70°C para luego calentarla gradualmente hasta detectar la temperatura en la cual se dan los cambios de fase. Por último, para cada inclusión fluida seleccionada se determinó la temperatura eutéctica (T_e), la temperatura de fusión final del hielo ($T_m(\text{Ice})$), la temperatura de homogenización (T_h) y se calculó la salinidad y la densidad. Fueron utilizadas las abreviaturas propuestas por Bakker (2011).

Finalmente, se realizó un muestreo geoquímico del sector sur de la veta donde se colectaron 15 muestras. Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio ALS Colombia Ltda mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* – ICP-MS) para As, Bi, Cd, Cu, Ga, Ge, Hg, In, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, Tl y Zn, así como ensayos al fuego y espectroscopía de absorción atómica (*Atomic Absorption Spectroscopy* – AAS) para Au y Ag.

RESULTADOS

Cartografía

Geología local en los alrededores de la mina La Aurora

En el área de estudio afloran rocas metamórficas del Complejo Cajamarca intruidas por un plutón de composición diorítica. Suprayaciendo estas unidades, se presentan depósitos aluviales recientes producto de la erosión generada por el río Pocuné y sus afluentes. Tectónicamente estas rocas se encuentran en la zona de influencia del Sistema de Fallas Otú–Pericos, observándose además dos lineamientos NW-SE y NNE-SSW (FIGURA 2).

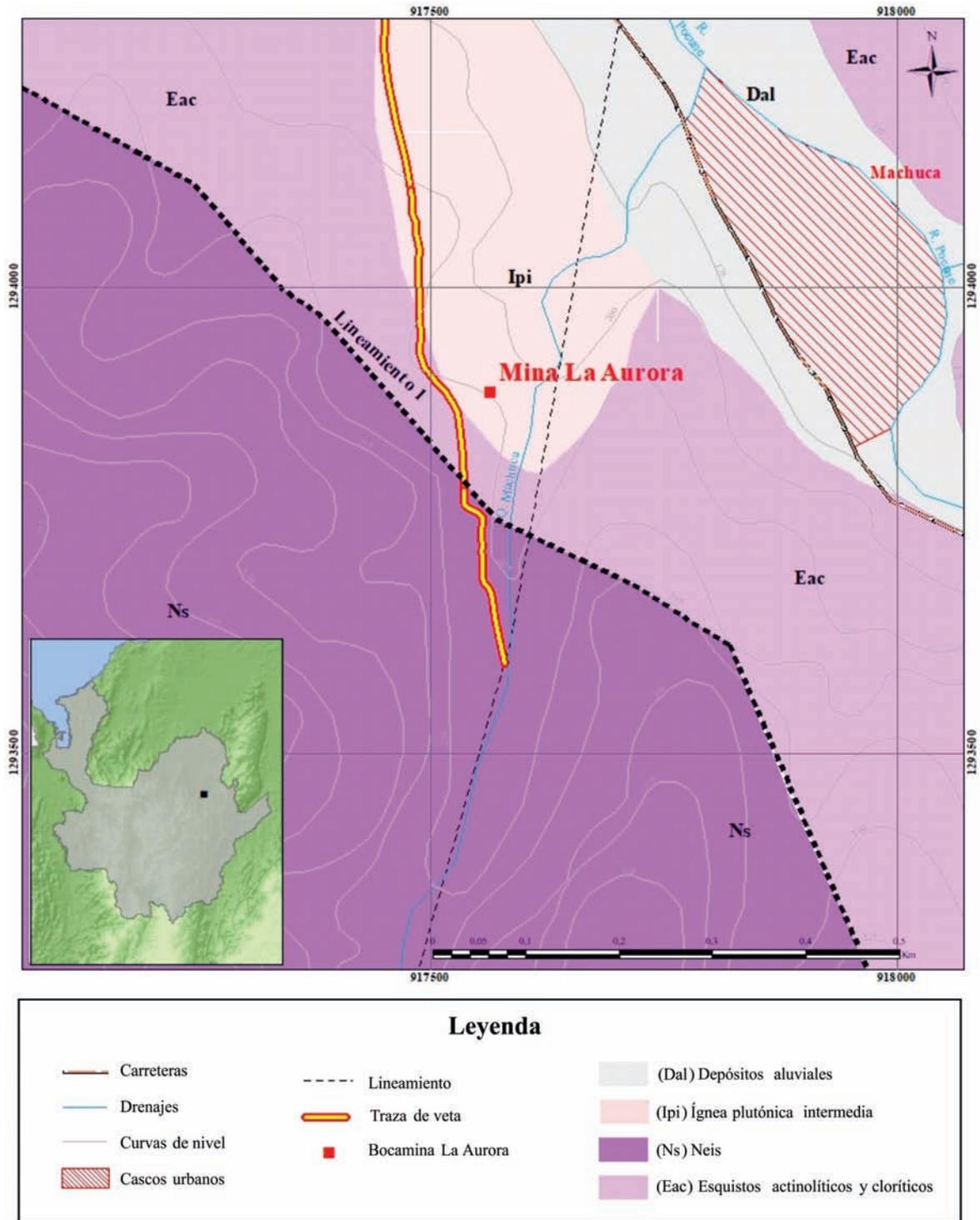


FIGURA 2. Mapa geológico local a escala 1:10.000 en de los alrededores de la mina La Aurora.

La estructura vetiforme (N-S/30°-55°W), se encuentra encajada principalmente en esquistos verdes con actinolita y clorita (FIGURA 3A y 3B) que se encuentran en contacto fallado con neises cuarzo-feldespáticos con foliación penetrativa N15°E/80°SE (FIGURA 3C). En la parte oriental de la zona afloran esquistos cuarzo-sericíticos (FIGURA 3D) en contacto por falla (Sistema de Falla Otú–Pericos) con el Batolito de Segovia (FIGURA 1).

En los alrededores del casco urbano del corregimiento de Machuca fueron descritas dioritas con biotita y anfíboles localmente orientados (FIGURA 3E). Cubriendo parcialmente las unidades litológicas descritas, se presentan depósitos aluviales (FIGURA 3F) en los alrededores del casco urbano del corregimiento de Machuca (Fraguas), en las márgenes del río Pocuné y están limitados por las vertientes de las rocas circundantes, formando valles amplios.

Mina La Aurora

La mina La Aurora está conformada por dos vetas (principal y secundaria) (FIGURAS 4 y 5) y una zona de

brecha. La veta principal tiene disposición estructural general N-S/30°-55°W, espesores entre 0,30 y 0,80 m con un promedio de 0,50 m, y está compuesta por cuarzo lechoso de textura masiva. En algunos tramos se divide en dos y hasta en tres vetas siguiendo planos de fractura paralelos a la estructura vetiforme principal.

La mineralización aurífera de esta veta se encuentra asociada con pirita, galena, calcopirita y esfalerita. Estos sulfuros se presentan como acumulaciones en bandas paralelas a la disposición estructural de la veta, y menos común como acumulaciones puntuales no continuas, con una concentración menor al 5%. Como respaldo superior e inferior de la veta principal se presenta la veta secundaria, con disposición estructural subparalela a dicha veta, y espesores que varían entre 0,05 m y 1,3 m, siendo 0,40 m el espesor promedio. Es cortada por la veta principal, sugiriendo que la veta secundaria es más antigua y está compuesta por cuarzo recristalizado, con pirita en bandas y acumulaciones puntuales no continuas, sin manifestaciones de oro. Ambas vetas están acompañadas por una zona de brecha color gris oscuro sin mineralización.



FIGURA 3. Litologías aflorantes en los alrededores del corregimiento de Machuca. **A.** Esquisto actinolítico-clorítico (Eac) con crenulación. **B.** Afloramiento de esquisto actinolítico-clorítico (Eac). **C.** Afloramiento de neises (Ns). **D.** Esquisto cuarzo-sericítico (Ecs). **E.** Diorita con orientación de minerales oscuros (Ipi). **F.** Depósitos aluviales (Dal) del río Pocuné.

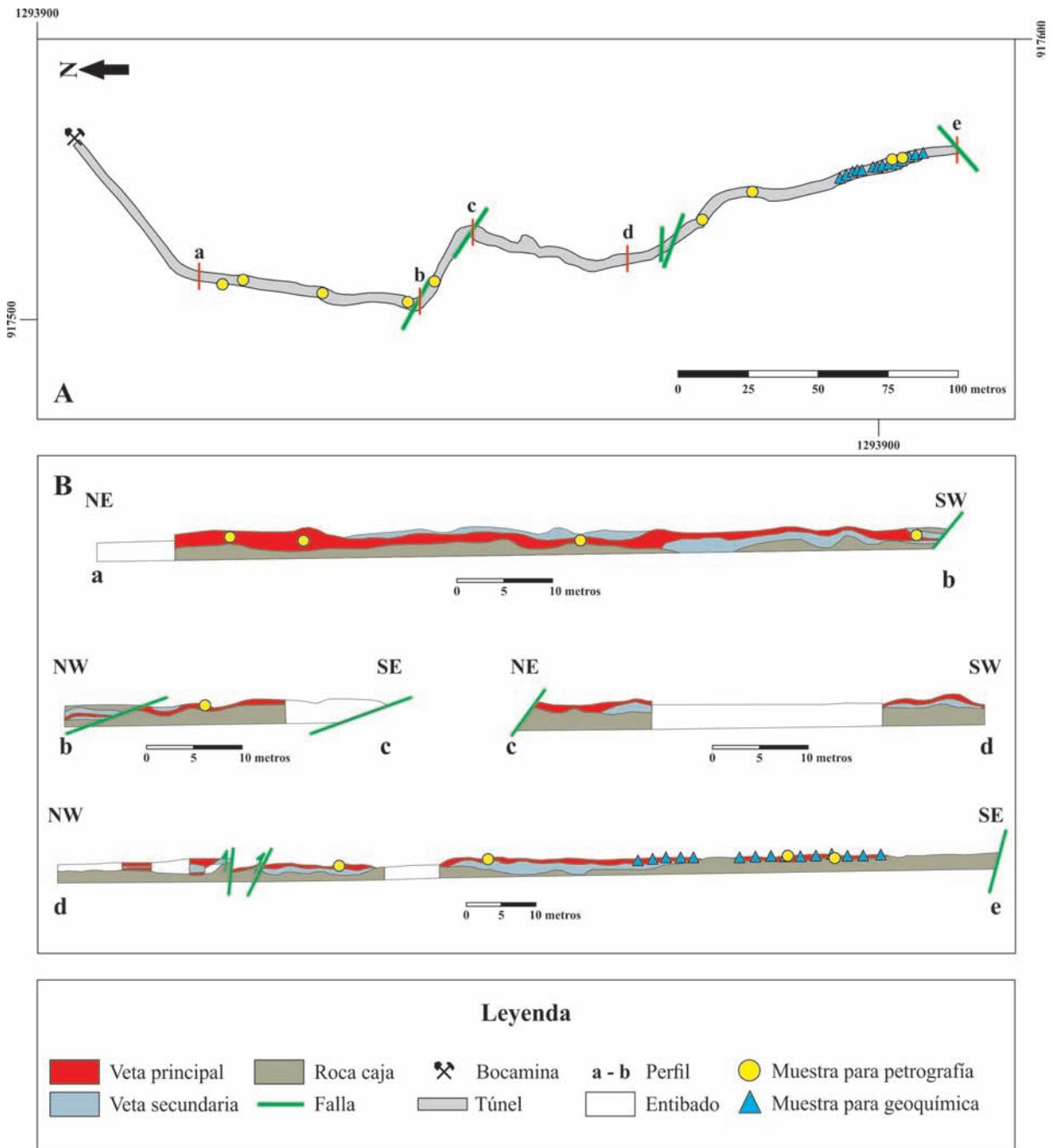


FIGURA 4. Cartografía geológica subterránea de la mina La Aurora. **A.** Mapa de ubicación a escala 1:200 del muestreo realizado en la veta. **B.** Perfiles geológicos de la mina, donde se observa la disposición de la veta principal (en rojo) y las relaciones de corte con la veta secundaria y la roca caja.

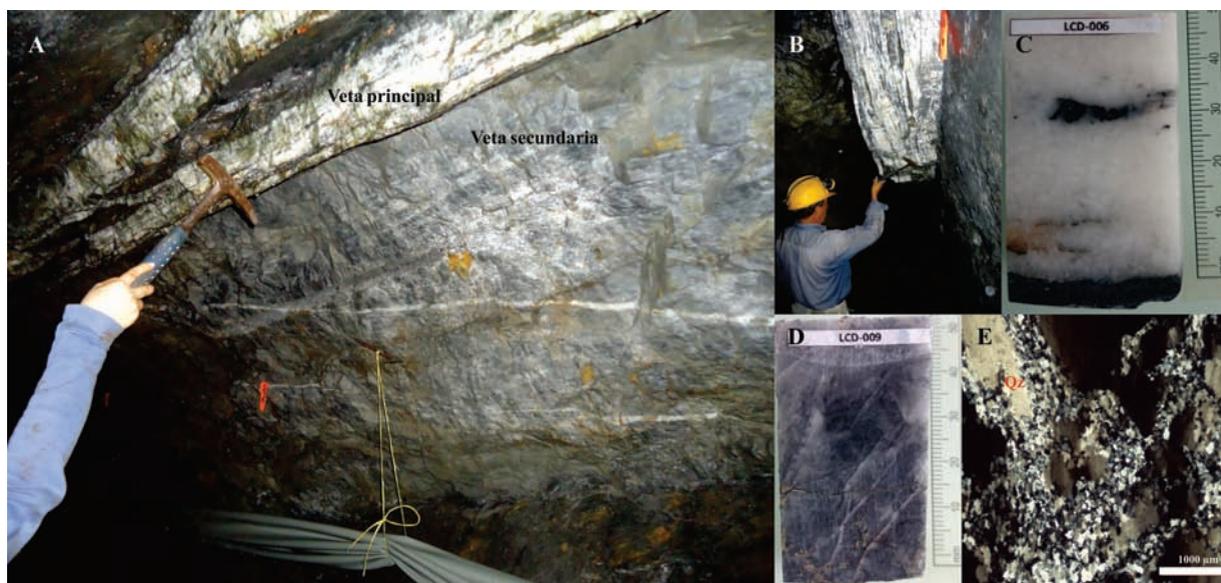


FIGURA 5. Sistema vetiforme de la mina La Aurora. **A.** Relación entre la veta principal y la veta secundaria. **B.** Estructura vetiforme principal de la mina. **C.** Fragmento seleccionado para sección delgada pulida de la veta principal (muestra LCD-006). **D.** Sección delgada pulida de la veta secundaria (muestra LCD-009). **E.** Microfotografía con luz transmitida de la veta secundaria: cuarzo (Qz) recrystalizado (muestra LCD-009).

Petrografía

Fueron definidas tres etapas o eventos mineralizantes (Etapas I, II y III) con cuarzo, sericita, calcita y clorita como minerales no metálicos (de ganga), y pirita, galena, calcopirita, oro, rutilo, esfalerita, goethita, anatasa, pirrotina y marcasita como minerales metálicos en ese orden de abundancia (FIGURA 6).

Se caracterizaron 11 partículas de oro en las SDP, estableciendo que el oro varía en su forma entre subangular, alargada, subredondeada y redondeada, con tamaños entre 2,5 y 380 μm y solamente se observa en las etapas II y III de mineralización. Así mismo, este se encuentra asociado con calcopirita, galena y esfalerita en la Etapa II e incluido en la esfalerita y rellanando fracturas en pirita en la Etapa III (TABLA 1).

Secuencia paragenética

Las descripciones petrográficas y metalográficas, donde se identificaron varias asociaciones minerales y sus relaciones texturales, permitieron establecer que las etapas II y III están enriquecidas en oro (FIGURA 6).

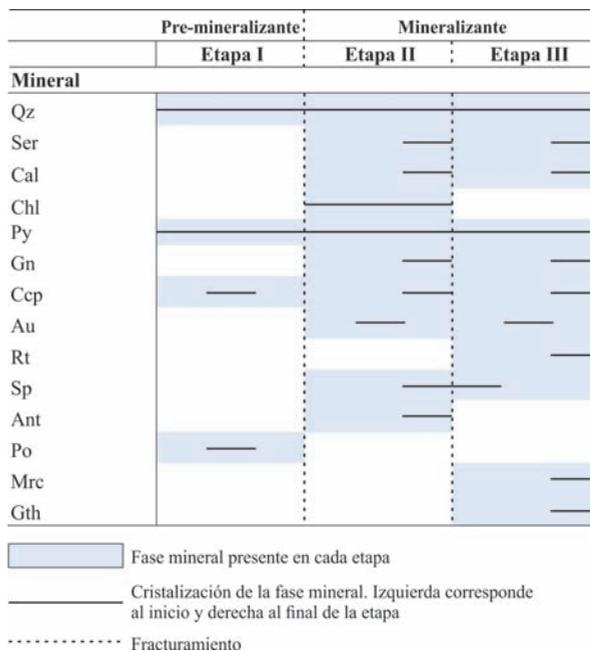


FIGURA 6. Secuencia paragenética propuesta para la veta de la mina La Aurora. Abreviaturas de los minerales tomadas de Whitney y Evans (2010).

TABLA 1. Características de las partículas de oro observadas al microscopio en las muestras de la mineralización de Au de la mina La Aurora.

No.	Long max (µm)	Long min (µm)	Forma	Ocurrencia
1	75	50	Subangular	Asociado a piritita
2	50	12,5	Alargado	Asociado a piritita
3	12,5	12,5	Subredondeado	Asociado a piritita
4	10	7,5	Subredondeado	Asociado a piritita
5	25	20	Subredondeado	Asociado a piritita
6	25	5	Alargado	Asociado a piritita
7	25	12,5	Alargado	Asociado a piritita
8	2,5	2,5	Redondeado	Asociado a piritita
9	380	120	Subredondeado	Asociado a galena
10	5	2,5	Alargado	Asociado a cuarzo
11	42,5	30	Subredondeado	Asociado a Calcopiritita y esfalerita

Etapa I: Formada por cuarzo y piritita submilimétrica euhedral, deformado y fracturado respectivamente (FIGURA 7A-7B). Cristales anhedral de pirrotina (15 µm) y calcopiritita incluida en piritita de la Etapa II o en fracturas (FIGURA 8A, 8C y 8F). La Etapa I corresponde al evento pre-mineralización aurífera.

Etapa II: Se caracteriza por contener cuarzo euhedral no deformado, calcita euhedral que varía entre 500 µm y más de 1 mm rellenando fracturas en el cuarzo y marcando el final de esta etapa, sericita (<50 µm) y clorita (<100 µm) anhedral, definiendo una alteración clorítica (FIGURA 7C-7D y 7F). Corresponde al primer evento mineralizante de oro, el cual es subangular alargado, con tamaños que varían entre 2,5 y 380 µm, asociado con piritita euhedral de 50 µm y calcopiritita rellenando fracturas en piritita, esfalerita anhedral en exsoluciones con calcopiritita, galena de 600 µm deformada y anatasa de 100 µm (FIGURA 8A-8D y 8F).

Etapa III: Esta es la última etapa con formación de oro en la secuencia paragenética descrita. Corresponde a cuarzo en mosaico muy fino rellenando fracturas, asociado con calcita euhedral en vetillas que cortan el cuarzo y sericita (<50 µm) que se presenta como intercrecimientos dentro de piritita, representando una alteración sericitica (FIGURA 7E). Los minerales de mena son piritita rellenando fracturas, oro incluido en esfalerita y rellenando fracturas, marcasita de 60 µm rellenando fracturas que cortan la piritita de etapas I y II, calcopiritita en exsoluciones con esfalerita, galena de 200 µm sin deformación y rutilo (FIGURA 8A, 8C y 8E). Se observa goethita, esta última como producto de oxidación de la piritita, por alteración supergénica.

Inclusiones fluidas

Petrografía de las inclusiones fluidas

Se identificaron tres tipos de inclusiones fluidas y se clasificaron teniendo en cuenta las fases que conforman la inclusión (L: líquido + vapor o V: vapor): “Tipo IL y IIL” para las inclusiones primarias bifásicas y “Tipo V” a las inclusiones secundarias y pseudosecundarias monofásicas (Nash, 1976).

Inclusiones Tipo IL: Son inclusiones primarias, bifásicas (LV) con tamaños que varían entre 2,3 µ y 20 µ, siendo los más comunes los tamaños menores a 5 µ, con formas ovoides e irregulares, algunas con leve deformación (FIGURA 9A-9E).

Inclusiones Tipo IIL: De manera similar a las inclusiones Tipo IL, son primarias y bifásicas (LV), con tamaños entre 3,5 µ y 15 µ y formas irregulares (FIGURA 9F-9I).

Inclusiones Tipo V: Son inclusiones secundarias y pseudosecundarias, monofásicas, con tamaños menores a 5 µ, con formas irregulares y deformadas, razones por las cuales no fue posible realizar mediciones en ellas (FIGURA 10).

Microtermometría de las inclusiones fluidas

Para las inclusiones Tipo IL, la temperatura de homogenización (T_h) oscila entre 165,8°C y 195°C, siendo el promedio 177,7°C obtenido a partir de la medición de siete inclusiones, y la temperatura de fusión final del hielo (T_m (Ice)) varía entre -3,6°C y -2,6°C.

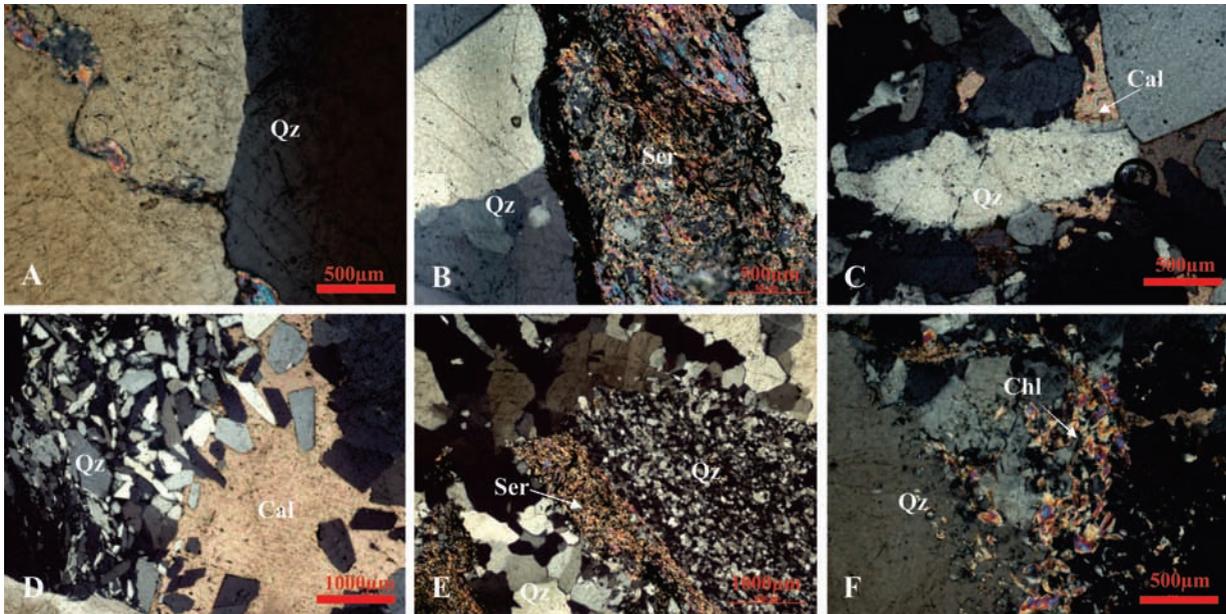


FIGURA 7. Microfotografías mostrando la ocurrencia de minerales de ganga (no metálicos) que acompañan la mineralización de Au en la mina La Aurora. **A.** Cuarzo Etapa I con colores de interferencia de primer orden (NX_10X_LT) (muestra LCD-002). **B.** Sericita (*Ser*) relleno de espacios entre los cristales del cuarzo Etapa I (NX_10X_LT) (muestra LCD-004). **C.** Calcita (*Cal*) relleno de espacios entre cristales de cuarzo (*Qz*) de Etapa II (NX_10X_LT) (muestra LCD-001). **D.** Cuarzo Etapa II con contornos definidos y calcita (NX_5X_LT) (muestra LCD-005). **E.** Cuarzo en mosaico Etapa III y sericita (NX_5X_LT) (muestra LCD-006). **F.** Cuarzo de Etapa I con clorita (*Chl*) de Etapa II relleno de espacios (NX_10X_LT) (muestra LCD-007).

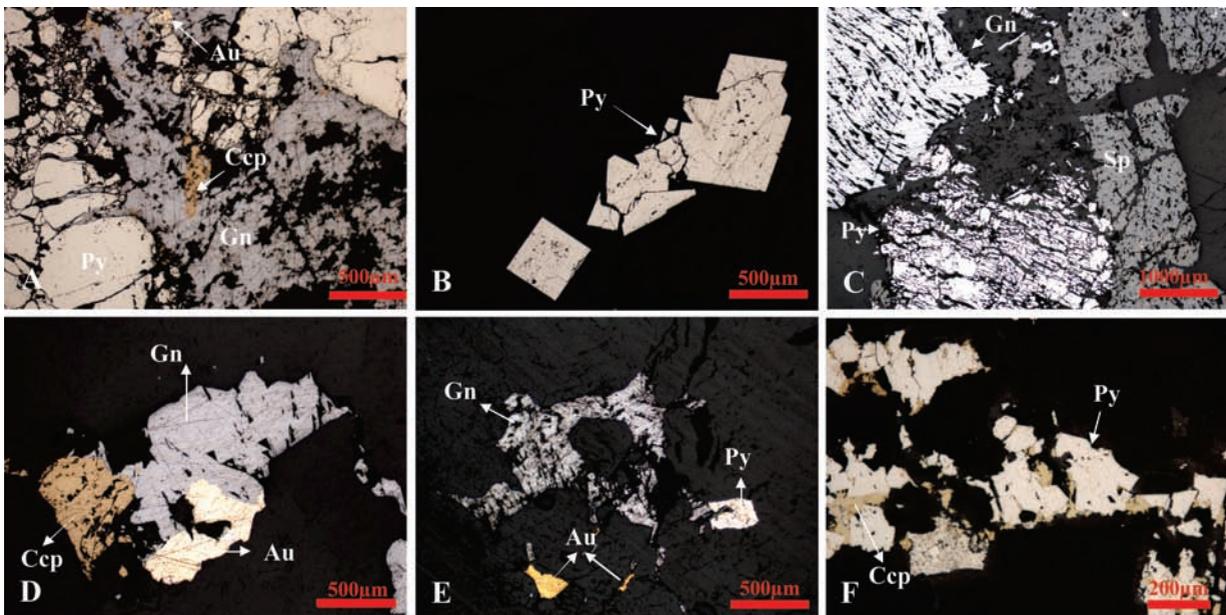


FIGURA 8. Microfotografías mostrando la ocurrencia de minerales de mena (metálicos) en las mineralizaciones de Au de la mina La Aurora. **A.** Pirita (*Py*) fracturada de Etapa I, galena (*Gn*) de Etapa III sin deformación, calcopirita (*Ccp*) de Etapa II relleno de fracturas y oro (*Au*) de Etapa III relleno de pequeñas fracturas de la pirita (*Py*) (NP_10X_LR) (muestra LCD-009). **B.** Pirita cúbica (*Py*) de Etapa II (NP_5X_LR) (muestra LCD-006). **C.** Pirita (*Py*) fracturada y deformada de Etapa I, galena con *pits* triangulares deformados de Etapa II, exsoluciones de calcopirita (*Ccp*) en esfalerita (*Sp*) de Etapa III (NP_5X_LR) (muestra LCD-008). **D.** Calcopirita (*Ccp*), galena (*Gn*) y oro (*Au*) de Etapa II (NP_10X_LR) (muestra LCD-006). **E.** Galena (*Gn*) de Etapa III, pirita (*Py*) y oro (*Au*) de Etapa III relleno de fracturas (NP_10X_LR) (muestra LCD-008). **F.** Calcopirita (*Ccp*) Etapa II relleno de fracturas de pirita (*Py*) de Etapa I (NP_20X_LR) (muestra LCD-009).

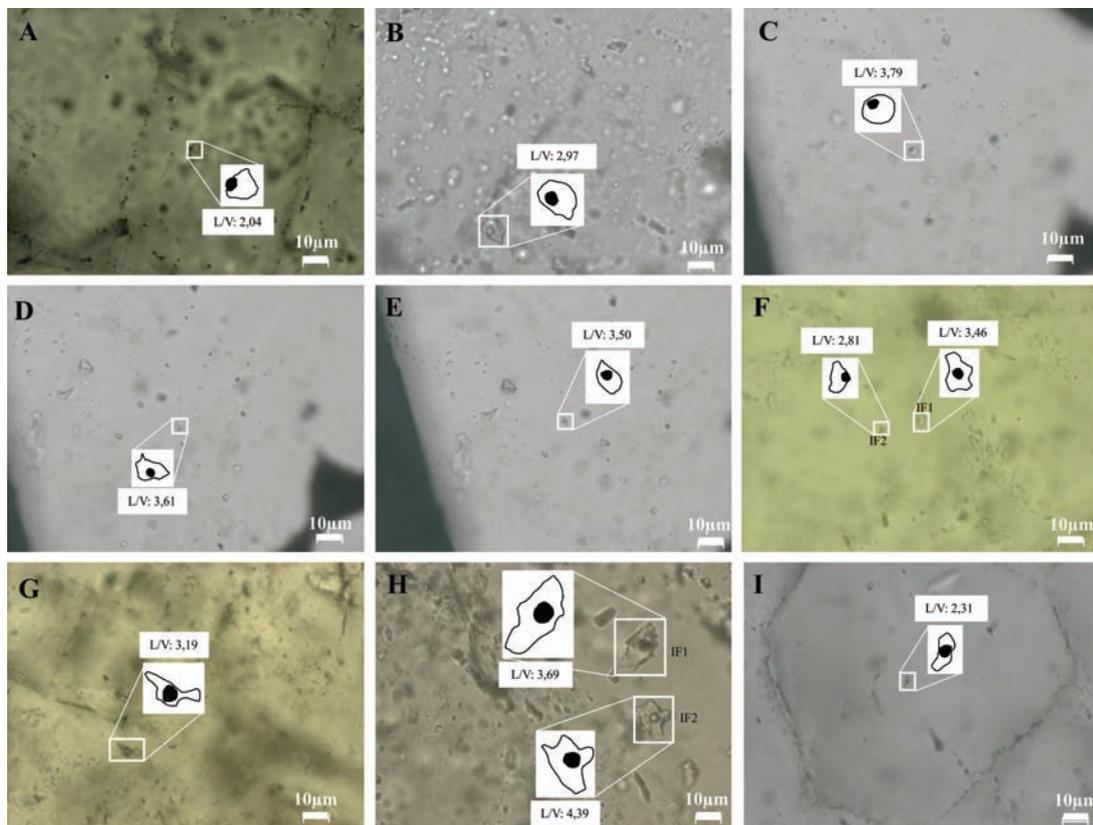


FIGURA 9. Inclusiones fluidas primarias (tipos II y III) observadas en muestras de cuarzo de la veta principal de la mina La Aurora. **A, B** (muestra LCD-001), **C, D** y **E** (muestra LCD-008) corresponden a las inclusiones Tipo II (temperaturas de homogenización (T_h) entre 165,8°C y 195°C); las figuras **F, G, H** (muestra LCD-001) e **I** (muestra LCD-008) corresponden a inclusiones Tipo III (temperaturas de homogenización (T_h) entre 200°C y 262,9°C) teniendo en cuenta que en **H** la IF1 es de Tipo II.

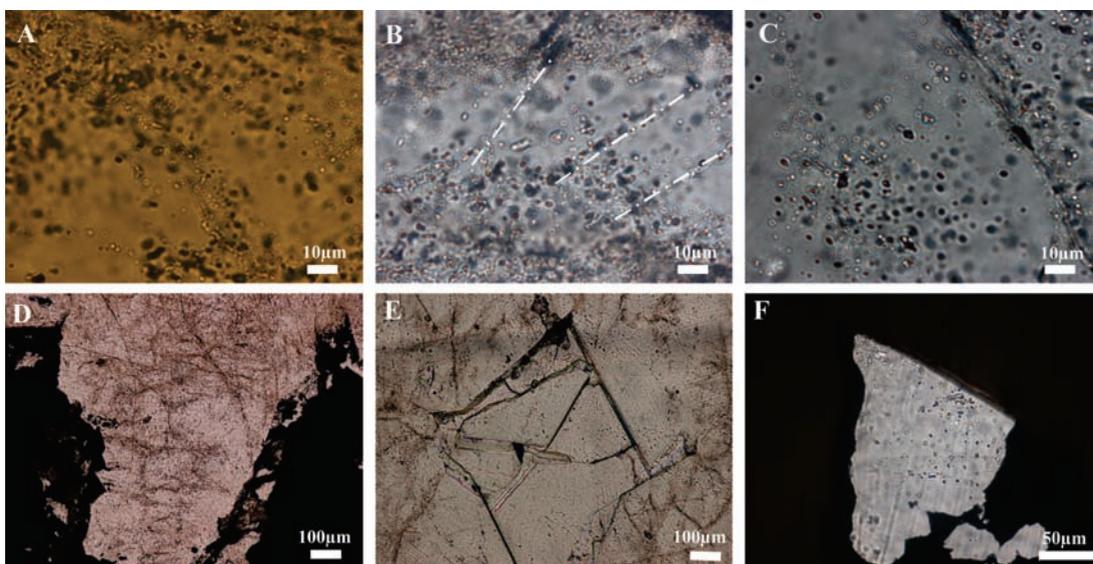


FIGURA 10. Inclusiones fluidas secundarias y pseudosecondarias (Tipo V) observadas en la muestra LCD-006 de la veta principal de la mina La Aurora. Las microfotografías **A, B** y **C** pertenecen a la muestra (LCD-006) en la cual no fueron observadas inclusiones fluidas medibles; las inclusiones son monofásicas (V), muy pequeñas (<3 μ). Las figuras **D, E** y **F** muestran las mismas inclusiones con el objetivo de menor aumento (5X_LT), donde se observan inclusiones fluidas monofásicas (V) con orientaciones preferenciales (pseudosecondarias y secundarias).

En las inclusiones Tipo III, se determinó que la temperatura de homogenización (T_h) se encuentra entre 200°C y 262,9°C, con una temperatura promedio de 232°C y la temperatura de fusión final del hielo ($T_m(\text{Ice})$) oscila entre -7,9°C y -3,6°C.

Salinidad y densidad

Con la temperatura de fusión final del hielo ($T_m(\text{Ice})$) se calculó la salinidad con la ecuación de Bodnar (1993): [Salinidad (wt % NaCl eq.) = 1,78 x ($T_m(\text{Ice})$) - 0,0442

x ($T_m(\text{Ice})$)² + 0,000557 x ($T_m(\text{Ice})$)³]. Estos cálculos fueron realizados también con el *software Package FLUIDS 1* (Bakker, 2003), tomando una temperatura de 25°C como temperatura ambiente. Así, la salinidad promedio calculada para las inclusiones fluidas Tipo IL es de 4,7 wt % NaCl eq. y para las inclusiones Tipo III la salinidad promedio calculada es de 7,6 wt % NaCl eq. Los resultados calculados oscilan entre 4,3 y 11,6 wt % NaCl eq. (TABLA 2), lo cual corresponde a salinidad baja a media.

TABLA 2. Resumen de la petrografía de las inclusiones fluidas y análisis microtermométricos en muestras de la veta principal de la mina La Aurora. Abreviaturas tomadas de Bakker (2011).

Muestra	Tamaño (μ)	Fases	L/V	T_e (°C)	$T_m(\text{Ice})$ (°C)	T_h (°C)	Homogenización	Salinidad (wt % NaCl eq.)	Densidad (g/cm ³)	Tipo	Etapla mineralización
LCD-001_Ch1_IF1	5	2	3,46	-27,8	-7,9	217,2	Líquido	11,6	1,09	III	Etapla II
LCD-001_Ch1_IF2	3,6	2	2,81	-28,3	-5,2	200	Líquido	8,1	1,07	III	Etapla II
LCD-001_Ch1_IF3	2,3	2	3,01			188,7	Líquido			IL	Etapla III
LCD-001_Ch2_IF1	10,1	2	3,19	-31,4	-4	227	Líquido	6,4	1,05	III	Etapla II
LCD-001_Ch3_IF1	4,7	2	2,04			181	Líquido			IL	Etapla III
LCD-001_Ch4_IF1	20,7	2	3,69	-27,5	-3,6	170,5	Líquido	5,9	1,05	IL	Etapla III
LCD-001_Ch4_IF2	15,1	2	4,39	-27,9	-3,6	237,7	Líquido	5,9	1,05	III	Etapla II
LCD-001_Ch4_IF3	11,7	2	2,97	-26,2	-2,6	195	Líquido	4,3	1,04	IL	Etapla III
LCD-008_Ch2_IF1	10,9	2	3,18								
LCD-008_Ch2_IF2	10,5	2	3,17								
LCD-008_Ch2_IF3	4,1	2	2,31	-21,5	-3,7	247,3	Líquido	6,0	1,05	III	Etapla II
LCD-008_Ch3_IF1	11,6	2	5,29								
LCD-008_Ch3_IF2	4,1	2	3,79	-25,4	-2,6	170,3	Líquido	4,3	1,04	IL	Etapla III
LCD-008_Ch3_IF3	4,5	2	3,61	-24,6	-2,7	165,8	Líquido	4,5	1,04	IL	Etapla III
LCD-008_Ch3_IF4	3,4	2	3,5	-24,5	-2,7	165,9	Líquido	4,5	1,04	IL	Etapla III
LCD-008_Ch4_IF1	4,5	2	2,81								
LCD-008_Ch4_IF2	5,9	2	3,12			262,9	Líquido			III	Etapla II

T_e : Temperatura primera fusión o eutéctica

$T_m(\text{Ice})$: Temperatura fusión final del hielo

T_h : Temperatura de homogenización

Para el cálculo de la densidad total, se utilizó la metodología propuesta por Shepherd *et al.* (1985), donde inicialmente se estimó de manera visual el grado de relleno (F) según la morfología de las inclusiones. Posteriormente se calculó la densidad relacionando el grado de relleno de la inclusión (F) y la densidad con distintas salinidades. Adicionalmente, los cálculos también fueron realizados con el *software Package FLUIDS 1* (Bakker, 2003) tomando una temperatura de 25°C como temperatura ambiente. Las densidades totales varían entre 1,04 y 1,09 g/cm³ (TABLA 2).

Velasco (2004), relaciona la temperatura (T_h) y la densidad realizando la corrección de presión con

isóbaras (FIGURA 11A). Al graficar los datos en el diagrama propuesto por dicho autor, la mayoría de las inclusiones son de alta presión (entre 600 y 1600 bar). Estas se proyectan en el campo L+V=L, indicando que las fases presentes en la inclusión se homogenizan en fase líquida, con mayor proporción de líquido que de vapor.

Al comparar la temperatura eutéctica (T_e) con la salinidad (wt % NaCl eq.) para calcular el punto de congelación del agua tomando como base los contenidos de sales (Linke, 1965) (FIGURA 11B), los datos graficados se encuentran por debajo del campo de MgCl₂. Esto muestra que ambos tipos de

inclusiones (Tipo IL y IIL) se encuentran en el sistema salino $H_2O-MgCl_2$, con temperaturas eutécticas (T_e) que varían entre $-31,4^\circ C$ y $-21,5^\circ C$, casi todas por debajo de $-22^\circ C$.

Geoquímica

Con base en los resultados de los análisis geoquímicos en las muestras de la veta de la mina La Aurora (TABLA 3) y tomando únicamente las muestras con

más de 0,5 ppm de Au y Ag, se calculó su relación con el Bi, Pb y Zn. Así, el valor promedio para Au/Bi es 1,02 y los valores para Au/Pb y Au/Zn son muy bajos (0,01 y 0,02 respectivamente), mostrando una leve afinidad del Au con el Bi, contrario a lo que sucede con el Pb y el Zn (FIGURA 12). Los valores de Ag/Bi, Ag/Pb y Ag/Zn son 0,75, 0,01 y 0,03 respectivamente presentando un comportamiento similar al Au, y la relación promedio Au/Ag es de 1,24, siendo la veta ligeramente más enriquecida en Au que en Ag.

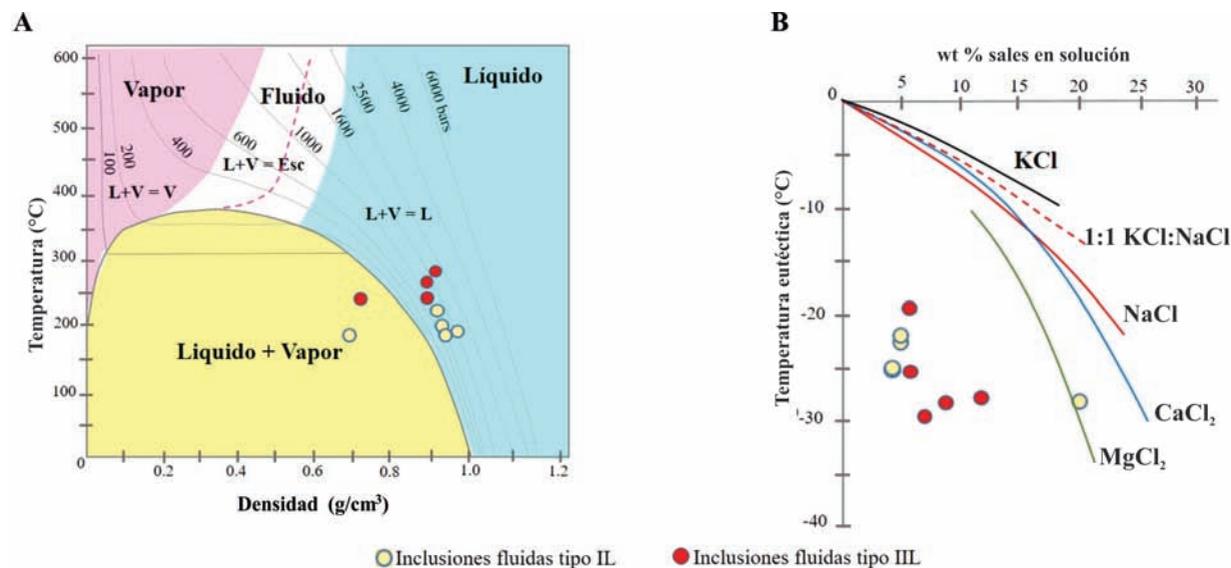


FIGURA 11. Propiedades físicas y químicas de las inclusiones fluidas en la veta de la mina La Aurora. **A.** Diagrama Temperatura vs. Densidad (Velasco, 2004). **B.** Descenso del punto de congelación del agua para diferentes contenidos de KCl, NaCl, CaCl₂ y MgCl₂ (Linke, 1965).

TABLA 3. Resultados de análisis químicos de multielementos en la veta de la mina La Aurora. Los resultados están reportados en ppm.

ID	E	N	Au	Ag	As	Bi	Cd	Cu	Ga	Ge	Hg	In	Pb	S	Sb	Se	Sn	Te	Tl	Zn
50835	917550	1293613	8,26	8,56	3,4	7,71	34,1	72,4	1,34	0,025	0,05	0,017	1945	0,4	0,58	1,8	0,3	0,58	0,1	530
50836	917551	1293612	2,25	3,75	8	5,64	62,3	55,2	0,66	0,025	0,05	0,037	932	0,92	0,44	1,1	0,2	0,21	0,04	829
50837	917551	1293610	9,44	16,15	2	22,9	27,6	34,7	0,55	0,025	0,04	0,011	3050	0,96	0,74	1,8	0,2	0,8	0,04	322
50838	917552	1293608	5,45	3,49	2,3	1,43	184,5	21,7	0,35	0,025	0,17	0,053	175	0,29	0,19	0,3	0,1	0,06	0,02	2250
50839	917552	1293606	15,1	4,7	14,5	2,97	70	22,7	0,5	0,025	0,07	0,039	495	0,61	0,58	0,5	0,2	0,15	0,06	990
50834	917553	1293603	3,66	2,3	13,8	2,36	19,55	22,2	0,52	0,025	0,02	0,009	667	0,56	0,51	0,5	0,2	0,27	0,04	256
50840	917553	1293601	1,135	3,72	15,7	4,57	6,64	39,5	0,33	0,025	0,02	0,009	316	0,82	0,26	0,4	0,1	0,28	0,03	118
50833	917554	1293599	0,802	1,4	2,8	0,61	13,65	12,7	0,57	0,025	0,03	0,007	501	0,26	0,28	0,3	0,2	0,08	0,05	194
50832	917554	1293597	2,96	2,44	67,1	1,45	44,7	115	0,6	0,025	0,05	0,02	1085	1,75	1,48	1,1	0,2	0,17	0,08	734
50831	917555	1293595	4,16	2,91	33,9	3,22	11,55	61,7	0,6	0,025	0,03	0,009	907	1,04	0,88	0,9	0,2	0,24	0,09	178
50830	917555	1293593	1,005	0,89	11,5	0,95	15,45	30,7	0,33	0,025	0,04	0,007	373	0,41	0,39	0,4	0,1	0,08	0,07	231
50829	917556	1293591	2,96	8,05	46,1	8,42	50,7	220	0,51	0,025	0,11	0,027	1635	1,74	0,84	1,7	0,2	0,67	0,05	916
50828	917557	1293589	0,799	1,68	22,7	1,76	24,5	47,4	0,32	0,025	0,06	0,022	857	0,97	0,67	0,7	0,1	0,19	0,06	384
50827	917558	1293587	2,11	1,48	20,7	1,57	9,73	28,2	0,5	0,025	0,02	0,008	249	0,68	0,52	0,4	0,2	0,09	0,06	174
50826	917558	1293586	1,035	1,02	7	1,4	3,18	26,9	0,73	0,025	0,01	0,005	600	0,21	0,27	0,8	0,2	0,14	0,05	62

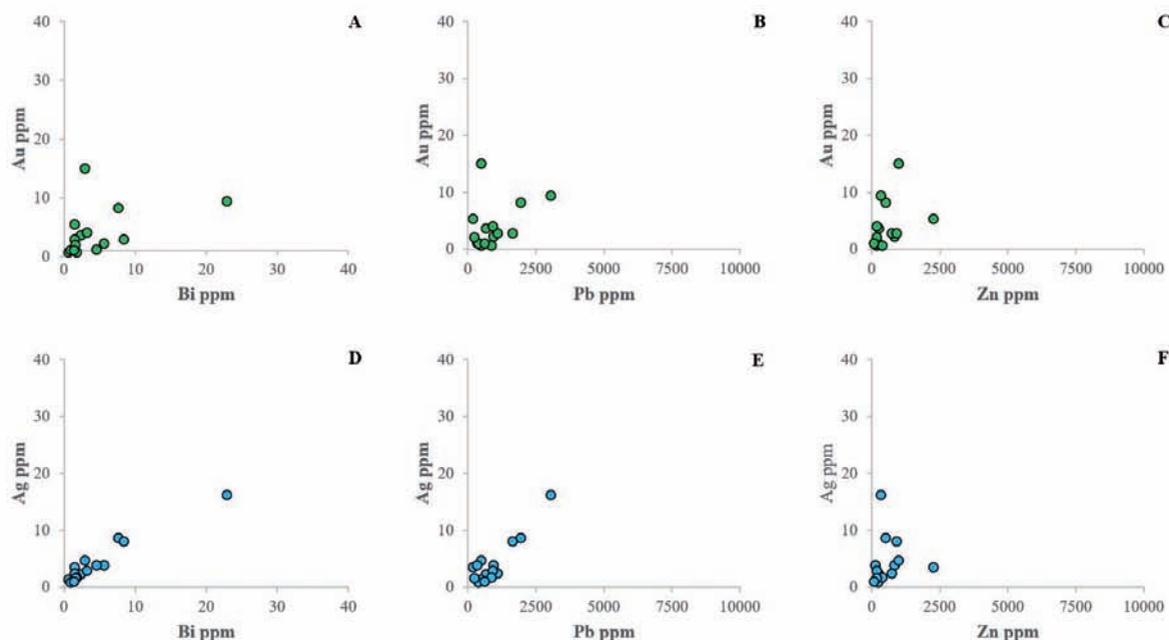


FIGURA 12. Diagramas de dispersión que muestran la relación de Au (en verde: A, B y C) y Ag (en azul: D, E y F) con Bi, Pb y Zn. Las muestras graficadas corresponden a muestras con concentraciones de Au y Ag mayores a 0,5 ppm.

DISCUSIÓN

Naturaleza del fluido mineralizante en la veta de la mina La Aurora, de acuerdo con sus propiedades mineralógicas y físico-químicas

La secuencia paragenética de la veta muestra que en la Etapa I (primer pulso de cuarzo), con cristalización de pirita, calcopirita y pirrotina como inclusión en pirita (de Etapa II), el pH del fluido mineralizante era ácido, permitiendo la flotabilidad de los sulfuros de Fe y Cu. De acuerdo con estudios experimentales (Reed y Palandri, 2006), la precipitación de pirita, calcopirita, pirrotina y galena se da cuando hay rápida descompresión y enfriamiento del fluido a partir de 200°C de temperatura con pH ácido, siendo la pirita el mineral diagnóstico de estas condiciones.

Dichas condiciones se mantuvieron al inicio de la Etapa II, debido a la presencia de pirita euhedral con contornos definidos, calcopirita rellenando fracturas de pirita de Etapa I, galena y esfalerita. Estos sulfuros se encuentran en equilibrio con clorita, sericita y anatasa en la Etapa II la cual corresponde al primer evento con mineralización aurífera, donde la presencia de clorita y sericita indica un cambio en la naturaleza del fluido hacia condiciones más alcalinas (Camprubí y Albinson, 2006). Durante este evento mineralizante se

formaron las inclusiones fluidas Tipo IIL con salinidad promedio de 7,6 wt % NaCl eq.

En la Etapa III se formó pirita rellenando fracturas, calcopirita y esfalerita formando texturas de exsolución, marcasita rellenando fracturas de pirita, galena, rutilo, calcita y sericita, y finalizó con la formación de goethita en el borde de la pirita como producto de oxidación por alteración supergénica. En esta última etapa se dio el segundo y último evento de mineralización aurífera, con la mayor concentración de oro. La presencia de calcita muestra condiciones de pH alcalino de la solución (Camprubí y Albinson, 2006), con abundancia de sericita y ausencia de clorita, mostrando baja temperatura de cristalización (<140°C para fluidos hidrotermales con salinidad de 20 wt % NaCl eq.) (De Caritat *et al.*, 1993). Esto es coherente con las condiciones de formación de las inclusiones fluidas Tipo IL con salinidad promedio de 4,7 wt % NaCl eq.

La relación entre la temperatura de homogenización (T_h) con la salinidad (Velasco, 2004) muestra la evolución del fluido de la veta de la mina La Aurora. Esta se formó en dos fases: fase 1 (F1) donde la T_h osciló entre 165,8°C y 195°C y fase 2 (F2) con T_h entre 200°C y 262,9°C (FIGURA 13A). Las salinidades varían entre 4,3 y 11,6 wt % NaCl eq., siendo las más comunes las salinidades bajas, menores a 6,4 wt % NaCl eq.

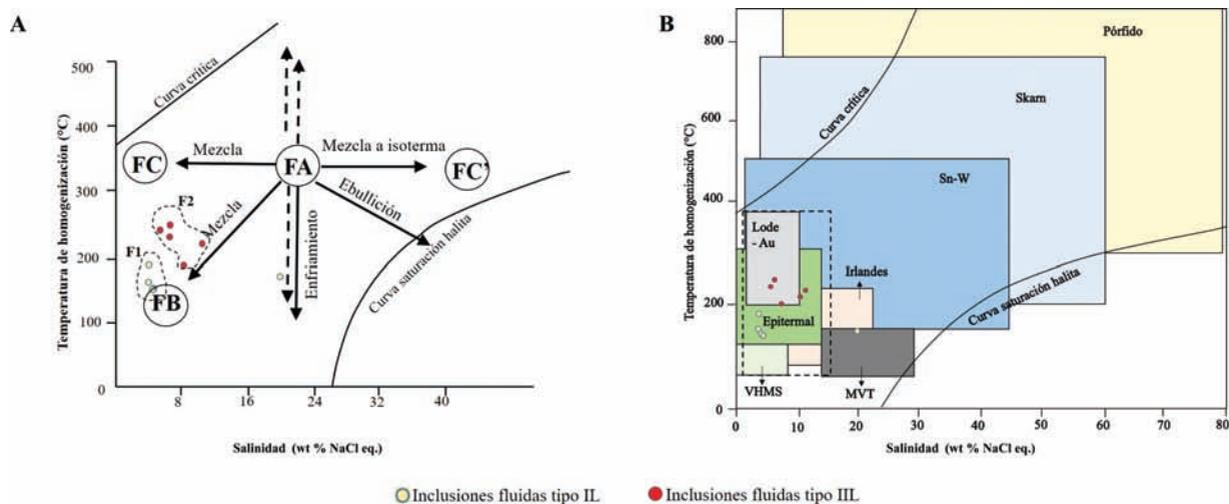


FIGURA 13. Propiedades físicas y químicas de las inclusiones fluidas en la veta de la mina La Aurora. **A.** Diagrama de T_h vs. Salinidad con las posibles trayectorias evolutivas de los fluidos (FA, FB, FC) dependiendo de fenómeno que formó las inclusiones fluidas en la veta estudiada (F1 y F2) (Velasco, 2004). **B.** Diagrama de T_h vs. Salinidad construido a partir de datos de inclusiones fluidas de varios tipos de depósitos en el mundo (Wilkinson, 2001).

En el sentido de Wilkinson (2001), la T_h para depósitos de origen epitermal es baja (<100°C hasta 300°C) y la baja salinidad está relacionada con la naturaleza básica de los fluidos involucrados. Teniendo en cuenta lo anterior, los valores de T_h obtenidos y la salinidad calculada fueron proyectados en el diagrama propuesto por dicho autor, el cual corresponde a una aproximación realizada a partir de la compilación estudios de inclusiones fluidas de diferentes depósitos en el mundo. Se observa que ambos tipos de inclusiones fluidas (IIL y IL) se proyectan en un campo donde los depósitos epitermales y *Lode-Au* se encuentran superpuestos (FIGURA 13B), permitiendo suponer que el depósito pudo haberse formado en ambientes metalogénicos diferentes (epitermales u orogénicos). Sin embargo, las bajas T_h y la baja salinidad calculada permiten argumentar que los fluidos no fueron formados a grandes profundidades, sino en niveles corticales someros.

Las descripciones metalográficas y la secuencia paragenética muestran que la presencia de sulfuros en la veta es menor al 10%, con alta concentración de plata reportada en los análisis químicos. Teniendo en cuenta la baja temperatura calculada para el fluido mineralizante, es posible establecer que las mineralizaciones auríferas de la mina La Aurora se formaron en un sistema alcalino en niveles corticales someros posiblemente en ambientes epitermales (Camprubí *et al.*, 2003; Camprubí y Albinson, 2006).

Área Zarazoga–Segovia del DMZSR: ¿Sistema orogénico, mesotermal o epitermal controlado por fallas?

El levantamiento cartográfico detallado de la veta de la mina La Aurora y sus alrededores, muestra que la estructura vetiforme corta la foliación principal de las rocas metamórficas encajantes y está relacionada con las fallas secundarias del sistema de Fallas Otú–Pericos (FIGURA 1 y 2). Las fallas secundarias condicionaron el emplazamiento de las vetas del DMZSR y controlan la actual geometría y disposición estructural de las mismas. Ordóñez-Carmona *et al.* (2005) proponen un modelo orogénico para la formación de las mineralizaciones en el DMZSR basado en el control estructural de las vetas relacionado con el sistema de fallas, por un mecanismo de cizalla–extensional. Por otra parte, Álvarez *et al.* (2007) argumentan que la combinación de los mecanismos cizalla-extensional y extensional no son exclusivos de ambientes orogénicos y plantean un modelo de depósito de oro relacionado con intrusiones (*intrusión-related gold-deposit*). Sin embargo, en dichos modelos de depósito propuestos por estos autores, la relación Au/Ag es muy alta (valores cercanos a 10) y las temperaturas de los fluidos mineralizantes son altas (>350°C: Camprubí y Albinson, 2006). En el caso de la veta de la mina La Aurora en la parte norte del distrito (área Zarazoga–Segovia), esta relación es cercana a 1 y la temperatura más alta calculada en el presente estudio para el fluido mineralizante es de 262,9°C.

Manco *et al.* (2012) calcularon un rango de temperatura entre 160°C y 400°C para las vetas en la parte sur del distrito (área Segovia–Remedios) y plantearon un sistema mesotermal para los depósitos vetiformes, el cual es coherente con los datos microtermométricos obtenidos por ellos.

Teniendo en cuenta lo anterior, los datos presentados en esta investigación y los datos de los autores mencionados, evidencian la diferencia que existe en la naturaleza de los fluidos mineralizantes entre el norte y el sur del DMZSR. Por lo tanto, son necesarios análisis adicionales para llegar a una caracterización más detallada de la veta de la mina La Aurora y así establecer un modelo de depósito preciso. Sin embargo, los análisis presentados en esta investigación permiten argumentar que dicho depósito no hace parte de un sistema orogénico generalizado para todo el distrito (*e.g.* Ordóñez-Carmona *et al.*, 2005; Álvarez *et al.*, 2007).

Los análisis geoquímicos muestran que la estructura vetiforme de la mina La Aurora está enriquecida en Au y Ag, ambos metales presentando afinidad química con el Bi, y menor asociación con el Pb y el Zn. Teniendo en cuenta los modelos de yacimientos propuestos para depósitos en sistemas porfiríticos de metales base (Sillitoe, 1995), los valores de Pb y Zn reportados en la veta de la mina La Aurora y los cálculos microtermométricos (FIGURA 13B), la mineralización posiblemente hace parte de un sistema epitermal (FIGURA 14), asociado a fracturas de niveles corticales someros (<800 m de profundidad: Albinson *et al.*, 2001).

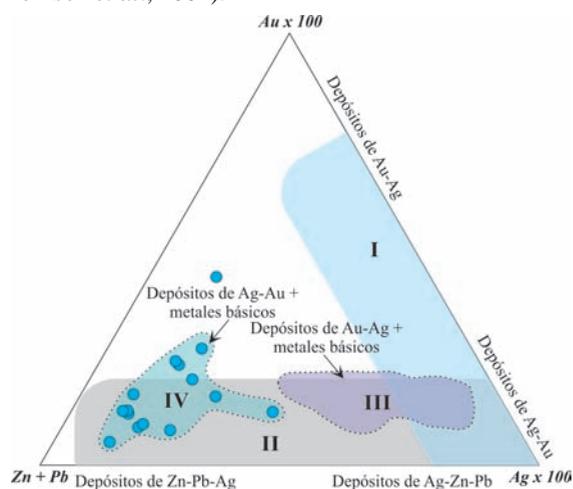


FIGURA 14. Clasificación de depósitos epitermales relacionando las concentraciones de Au y Ag con los metales básicos (Pb y Zn) (modificado de Albinson *et al.* (2001). I: Depósitos de baja sulfuración; II: Depósitos de intermedia a baja sulfuración; III: Depósitos de Au-Ag + metales básicos; IV: Depósitos de Ag-Au + metales básicos (presente estudio). Campos I y II tomados de Camprubí (2010), campo III tomado de Albinson *et al.* (2001). Los puntos azules corresponden a las muestras de la mina La Aurora.

CONCLUSIONES

El estudio sistemático de la mineralización aurífera de la mina La Aurora sugiere que la estructura vetiforme se formó en tres etapas: un evento pre-mineralización aurífera (Etapa I) con un fluido que a partir de condiciones de pH ácido, llevó a la cristalización de pirita, calcopirita, pirrotina y cuarzo; un primer evento mineralizante de oro (Etapa II), asociado con pirita euhedral, calcopirita, esfalerita, galena y anatasa, con cuarzo clorita y sericita, cristalizados a partir de la disminución del pH de la solución, y un segundo evento mineralizante (Etapa III) con formación de pirita y oro rellenando fracturas, marcasita, calcopirita, esfalerita, galena, rutilo y cuarzo rellenando fracturas con sericita y calcita, bajo condiciones alcalinas de la solución.

La veta de la mina La Aurora se encuentra controlada estructuralmente por el Sistema de Fallas Otú–Pericos, y las propiedades físicas y químicas calculadas a partir de los datos microtermométricos, relacionados con la secuencia paragenética descrita, muestran condiciones de baja temperatura de formación del fluido mineralizante (165,8°C y 262,9°C) coherente con niveles corticales someros.

La baja concentración de sulfuros, las asociaciones mineralógicas (pirita, esfalerita, marcasita, galena, oro y calcopirita con sericita y calcita), la baja salinidad de los fluidos mineralizantes (promedio de 4,7 y 7,6 wt % NaCl eq.), el rango de baja temperatura de formación de estos fluidos y el predominio de oro, plata zinc y plomo, permitieron hacer una aproximación a un modelo de depósito posiblemente epitermal. Son necesarios análisis de isótopos estables para conocer con precisión la fuente de los fluidos mineralizantes y estudios geocronológicos para establecer la temporalidad en el emplazamiento de los fluidos involucrados.

El estudio mineralógico y los análisis microtermométricos de las inclusiones fluidas en la veta de la mina La Aurora (parte norte del DMZSR), permitieron establecer que las condiciones de formación del depósito son cercanas a un sistema epitermal, diferente a un sistema orogénico generalizado para todo el distrito.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la empresa Minerales Otú S.A.S. a la cual expresamos nuestro más sincero agradecimiento. Al geólogo Carlos Andrés Serna por su acompañamiento en las labores de campo, a Milton

Julián Morales y Leonardo Santacruz (Universidad Nacional de Colombia) por su apoyo en las mediciones microtermométricas, a Jennifer Andrea Betancourt (Torex Gold Resources Inc.) y los profesores Mauricio Alvarán y Diego Loaiza (Universidad de Caldas) por sus comentarios críticos con respecto a la investigación. Finalmente, los autores agradecemos al Dr. Hildebrando Leal-Mejía y dos evaluadores anónimos por sus valiosos comentarios y sugerencias los cuales fueron fundamentales para mejorar y lograr la versión final del manuscrito.

REFERENCIAS

- Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D., and Chomiak, B.A. (2001). Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: constraints from fluid inclusion and stable isotope data. In: T. Albinson, C.E. Nelson (eds.). *New mines and discoveries in Mexico and Central America* (pp. 1-32). Acapulco: Society of Economic Geologists, Special Publication, vol. 8.
- Álvarez, M., Ordóñez-Carmona, O., Valencia, M., y Romero, A. (2007). Geología de la zona de influencia de la Falla Otú en el distrito Segovia-Remedios. *Dyna*, 74(153), 41-51.
- Bakker, R. (2003). Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194(1-3), 3-23. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00268-1.
- Bakker, R. (2011). The use of quantities, units and symbols in fluid inclusion research. *XXI European Current Research on Fluid Inclusions*, Leoben, Austria.
- Bodnar, R.J. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3), 683-684. doi: 10.1016/0016-7037(93)90378-A.
- Botero, G. (1963). Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales de la Facultad de Minas*, 57, 3-101.
- Camprubí, A. (2010). Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 25-42.
- Camprubí, A., y Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 27-81.
- Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., y Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 10-18.
- De Caritat, P., Hutcheon, I., and Walshe, J.L. (1993). Chlorite geothermometry: a review. *Clays and Clay Minerals*, 41(2), 219-239.
- Echeverri, B. (2006). Genesis and thermal history of gold mineralization in the Remedios-Segovia-Zaragoza Mining District of Northern Colombia. Master Thesis, University of Shimane, Japón.
- Etayo-Serna, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Ballesteros, I., Forero, H., Ramírez, C., Zambrano, F., Duque, H., Vargas, R., Núñez, A., Álvarez, J., Ropaín, C., Cardozo, E., Galvis, N., Sarmiento, L., Albers, J., Case, J., Singer, D., Bowen, R., Berger, B., Cox, D., y Hodges, C. (1983). Mapa de terrenos geológicos de Colombia. *Publicaciones Geológicas Especiales de INGEOMINAS*, 14(1), 1-135.
- Feininger, T., Barrero, D., y Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (subzona II-B). *Boletín Geológico*, 20(2), 1-160.
- Feininger, T., Barrero, D., Castro, N., Ramírez, O., Lozano, H., y Vesga, J. (1975). Mapa geológico de la plancha 117, Amalfi. Escala 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- González, H. (1988a). Mapa geológico de la plancha 106 Liberia Escala 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- González, H. (1988b). Mapa geológico de la plancha 106 Liberia Escala 1:100.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.

- González, H., Maya, M., Cardona, O.D., Arias, E.N., Castañeda, D.M., Ruiz, C.F., Montero, J.E., Camacho, J.A., Palacio, A.F., Gomez, J.P., Vélez, W., y Alzate, G.A. (2015). Mapa geológico de la plancha 94 El Bagre. Escala 1:100 000. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- González, J., Terá, B., y Ordóñez-Carmona, O. (2010). Geología de la parte oriental del Distrito Minero Segovia - Remedios. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 28, 61-76.
- Hall, R., Álvarez, J., y Rico, H. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Subzona IIA). *Boletín Geológico*, 20(1), 1-85.
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes - A tectono magmatic approach. Ph.D. Thesis, Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Linke, W.F. (1965). *Solubilities of inorganic and metal-organic compounds*. 4th ed. Washington: American Chemical Society.
- Manco, J.D., Molano, J.C., y Ordóñez-Carmona, O. (2012). Análisis paragenético y microtermométrico de las mineralizaciones oro-argentíferas del distrito minero Segovia-Remedios (DMSR): Implicaciones para la fuente y naturaleza de los fluidos mineralizantes. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 32, 47-60.
- Maya, M., y González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, 35(2-3), 43-57.
- Nash, J.T. (1976). Fluid inclusion petrology-data from porphyry copper deposits and applications to exploration. USGS Professional Paper 907D.
- Nelson, H.W. (1957). Contribution to the geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali. *Leidse Geologische Mededelingen*, 22, 1-75.
- Oquendo, Z.E., Guarán, C.G., y Ortiz, B.F. (1970). Ocurrencias minerales en el Noreste de Antioquia parte II: Ocurrencias minerales en los municipios de Zaragoza, Segovia y Remedios. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico - Mineras, Medellín, Colombia. Informe 1.
- Ordóñez-Carmona, O., Valencia, M., Álvarez, M., Sánchez, L.H., Castaño, L.C., y Echeverri, B. (2005). Metalogenia y evolución tectonomagmática del distrito minero Segovia-Remedios, primera aproximación. *X Congreso Colombiano de Geología*, Bogotá, Colombia.
- Reed, M.H., and Palandri, J. (2006). Sulfide mineral precipitation from hydrothermal fluids. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1), 609-631. doi: 10.2138/rmg.2006.61.11.
- Restrepo, J.J., and Toussaint, J.F. (1988). Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. *Episodes*, 11(3), 189-193.
- Rodríguez, C.J., y Pernet, A. (1983). Recursos minerales de Antioquia. *Boletín Geológico*, 26(3), 1-116.
- Shepherd, T., Rankin, A.H., and Alderton, D.H.M. (1985). *A practical guide to fluid inclusion studies*. Glasgow: Blackie.
- Sillitoe, R.H. (1995). Exploration and discovery of base and precious metal deposits in the circum-Pacific region during the last 25 years. Society of Resource Geology, Special Issue, vol. 19.
- Toussaint, J.F. (1993). *Evolución geológica de Colombia, Precámbrico y Paleozoico*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Tschanz, C., Marvin, R.F., Cruz, J., Mehnert, H., and Cebula, G. (1974). Geologic evolution of The Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 85(2), 273-284. doi: 10.1130/0016-7606(1974)85%3c273:GEOTSN%3e2.0.CO;2.
- Velasco, F. (2004). Introducción al estudio de las inclusiones fluidas. *XXIII Curso Latinoamericano de Metalogénia*, Mendoza, Argentina.
- Whitney, D.L., and Evans, B.W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185-187. doi: 10.2138/am.2010.3371.
- Wilkinson, J.J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4), 229-272. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00047-5.

Diana Lorena Castaño-Dávila
ORCID: 0000-0002-3273-0177

Juan Sebastián Hernández-González
ORCID: 0000-0002-9819-723X

Juan Carlos Molano-Mendoza
ORCID: 0000-0003-2765-9457

Andrés Ignacio Rodríguez-Vargas
ORCID: 0000-0002-1457-2726

Trabajo recibido: noviembre 15 de 2017
Trabajo aceptado: junio 07 de 2019