
SKARN DE COBRE EN LA MINA RÍO FRÍO, PAYANDÉ-TOLIMA: ASPECTOS MINERALÓGICOS, METALOGRÁFICOS Y MICROTERMOMÉTRICOS

CU SKARN IN RÍO FRÍO MINE: MINERALOGICAL, METALOGRAPHIC AND MICROTHERMOMETRIC CHARACTERISTICS

Mauricio Alvarán Echeverri¹, Edwin Naranjo Sierra² & Eliselder Zapata Cardona²

1. Geólogo M.Sc., Universidad de Caldas. Departamento de Ciencias Geológicas.

2. Geólogo, Semillero de Investigación en Metalografía y Petrografía. Universidad de Caldas.
mauricio_alvaran@ucaldas.edu.co, edwinnaranjo20@hotmail.com, redlesile@hotmail.com.

Recibido para evaluación: 16 de Noviembre de 2010 / Aceptación: 1 de Julio de 2011 / Recibida versión final: 12 de Julio de 2011

RESUMEN

La mineralización tipo skarn de Cu en la mina Río Frío está relacionada a rocas jurásicas-cretácicas del stock de Payandé que intruyen calizas triásicas de la Formación Payandé. La cartografía del cuerpo, permite evidenciar una serie de zonas, cuyos límites son graduales, con una coloración de los granates controlada por la distancia al contacto con el intrusivo: La primera zona corresponde a una cuarzdiorita-tonalita fresca, la segunda al endoskarn, la tercera al exoskarn: una zona progradada, conformada por granates y piroxenos en menor proporción y una zona retrogradada conformada por la mineralización (óxidos de hierro, sulfuros de hierro y cobre), actinolita-tremolita, cuarzo euhedral y calcita. Por último se tiene la zona de mármol, con wollastonita y granates. Las relaciones texturales entre los minerales de mena son: texturas de martitización, texturas de exsolución, texturas pseudo-eutécticas y texturas de reemplazamiento selectivo. Los datos de inclusiones fluidas albergadas en granates (en la etapa progradada) indican un fluido con salinidades de 25.76–26.12 %NaCl y temperatura de homogenización (Th) >580°C, las inclusiones primarias en cuarzo, de la etapa retrogradada, indican un fluido con salinidades de 14.15–16.52 %NaCl y temperaturas de homogenización entre 270°-320°C, lo que concuerda con el geotermómetro exsolución de cubanita en calcopirita que indica temperaturas de 250°-300°C (Ramdorh 1980). La presión mínima teórica varía entre 211-230 bares, que corresponden a profundidades mínimas de 800-1100 metros y temperaturas de formación mínimas de 300°-330°C para el skarn retrogradante.

Palabras clave: Skarn Cu, Stock de Payandé, inclusiones fluidas, cubanita, geotermómetros, Tolima, Colombia.

ABSTRACT

The Cu skarn-type mineralization in the Rio Frio mine seems to be related to Jurassic-Cretaceous rocks (Stock of Payandé) that intrude Triassic limestones belonging to Payandé Formation. Ore-body mapping, shows several zones, whose boundaries are gradual and the garnet color is controlled by the distance up to intrusive contact: the first zone corresponds to a fresh tonalite-cuarzdiorite, the second one corresponds to the endoskarn, the third one corresponds to the exoskarn: a prograde stage, characterized by garnet and pyroxene in lesser extent, and a retrograde stage, with the mineralization (iron oxides, iron and copper sulfides), actinolite-tremolite, euhedral quartz and calcite. Finally the marble zone with wollastonite and garnet. The most important textural relationships, between ore minerals are the martitization textures, exsolution textures, pseudo-eutectic textures and selective replacement textures. Fluid inclusions data from prograde garnet indicate a fluid with salinities of 25.76-26.12% NaCl and homogenization temperatures (Th) >580°C. Primary fluid inclusions in quartz, from the retrograde stage, indicate a fluid with salinities between 14.15-16.52% NaCl and homogenization temperatures between 270°-320°C. This is consistent with the presence of cubanite exsolved in chalcopyrite (geothermometer), indicating, according to Ramdorh (1980), temperatures between 250°-300°C. The minimal theoretical pressure is 211-230 bars, which correspond to minimal depths 800-1100m and minimal temperatures of formation of 300°-330°C for the retrograde skarn

Key Words: Cu Skarn, Stock of Payandé, fluid inclusions, cubanite, geothermometers, Tolima, Colombia

1. INTRODUCCIÓN

Numerosos depósitos de *Skarn* se desarrollan en proximidad de cinturones orogénicos relacionados con actividad magmática – hidrotermal, que favorece la formación de óxidos, sulfuros, calcosilicatos, elementos nativos y recristalización de carbonatos. En la mina Río Frío, al SW de Payandé–Tolima, se presenta una mineralización de tipo Skarn asociada a una cuarzodiorita-tonalita de edad Jurasica–Cretácica (Stock de Payandé) que intruye calizas fosilíferas de edad Triásica (Formación Payandé). La zona de estudio comprende un área de 2 km², se encuentra localizada en el flanco oriental de la Cordillera Central, Departamento de Tolima en inmediaciones del Corregimiento de Payandé, en el Municipio de San Luis, hacia el suroccidente de la cantera de la empresa CEMEX, en el sector conocido como mina Río Frío, ubicada en la plancha topográfica IGAC 245 III-C Rovira escala 1:25.000 con coordenadas X_1 : 966000 Y_1 : 882000, X_2 : 968000 Y_2 : 883000 origen Bogotá (Figura 1). El cuerpo mineralizado presenta una forma alargada en dirección N-S, con dos longitudes una larga (300m) y una corta (50m), incluyendo las zonas de endoskarn y exoskarn. La mineralización está conformada por óxidos de hierro (magnetita y hematita variedad especularita), sulfuros (calcopirita, bornita, covelina, cubanita y calcosina), carbonatos de origen secundario (malaquita y azurita) y minerales de ganga (granate, calcita, clorita, wollastonita, piroxenos, tremolita-actinolita y cuarzo).

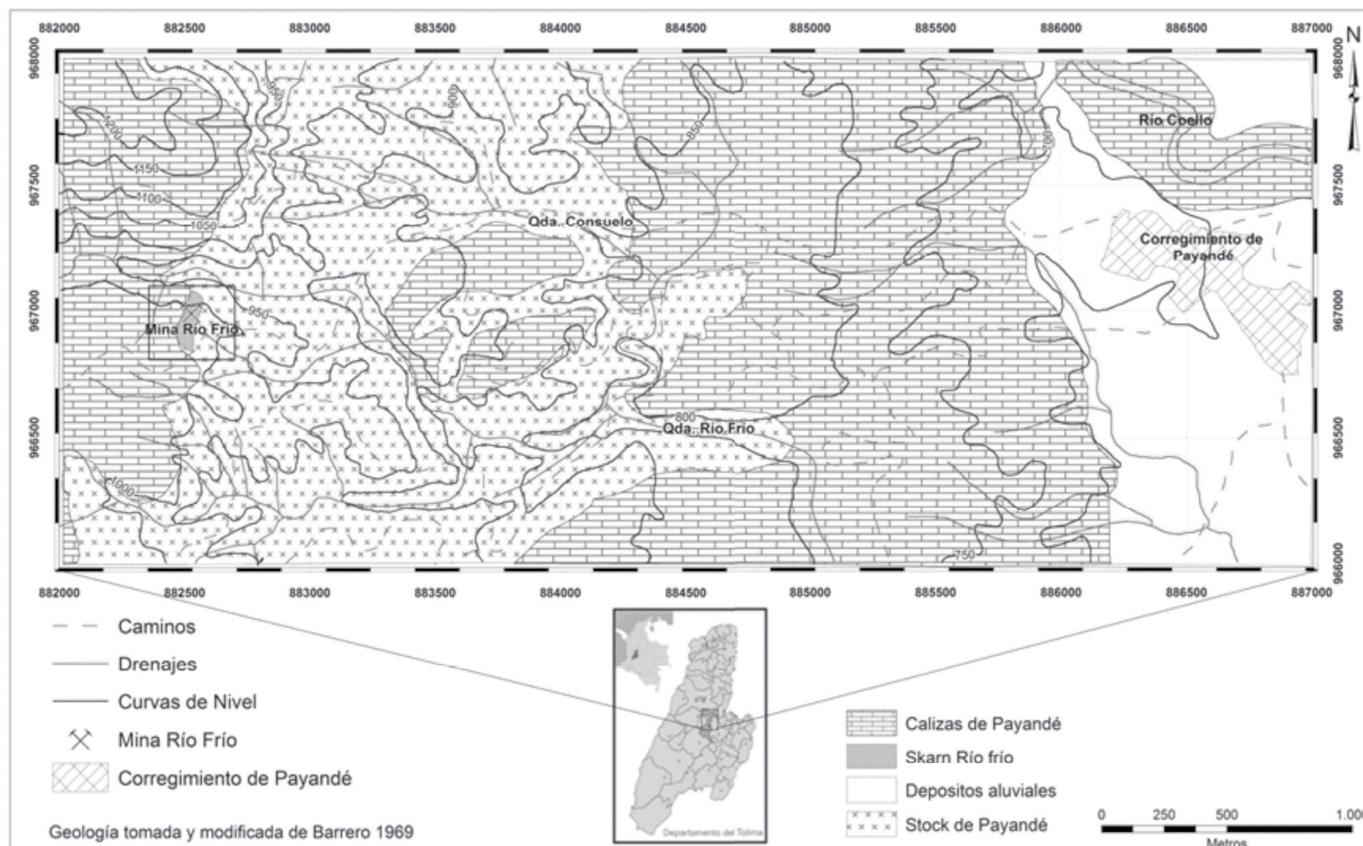


FIGURA 1. Mapa de localización. Recuadro se representa la zona de estudio.

2. METODOLOGÍA

Se delimitaron las zonas de endoskarn y exoskarn, se recolectaron 80 muestras, georeferenciadas con GPS Garmin Oregon 300, con el fin de realizar secciones pulidas y secciones delgadas pulidas para un análisis metalográfico, textural y determinar la secuencia paragenética en el laboratorio de Yacimientos Minerales de la Universidad de Caldas; así como la elaboración de secciones doblemente pulidas para el análisis microtermométrico.

El análisis metalográfico fue llevado a cabo en un microscopio de luz reflejada Nikon Labophot del laboratorio de Yacimientos Minerales, las secciones pulidas, doblemente pulidas y las secciones delgadas pulidas fueron cortadas utilizando una cortadora de disco diamantado y posteriormente fueron sometidas a un proceso de pulido con polvo de carburo de silicio, comenzando con un tamaño de grano pasante malla 120, luego 240, 400, 600 y finalmente malla 1000. Al final del proceso de elaboración de las láminas, éstas fueron pulidas con pasta diamantada de 6 μ m y 1 μ m.

El estudio microtermométrico se realizó en el laboratorio de Inclusiones Fluídas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, el cual cuenta con un microscopio petrográfico Olympus al cual se le ha adaptado una platina calentadora Linkam THMS 600 que permite el calentamiento de las muestras hasta los 600°C y un sistema de enfriamiento a base de Nitrógeno líquido que permite descensos hasta los -195°C. Este sistema permite determinar condiciones del fluido mineralizante como: salinidad, densidad, sistema salino-acuoso, presión y temperatura mínima de formación.

3. GEOLOGÍA REGIONAL

La mineralización tipo skarn presente en la mina Río Frío está relacionada a las intrusiones cretácicas del stock de Payandé en calizas de edad triásica correspondientes a la Formación Payandé.

3.1 Formación Payandé

Definida por Renz en la región de Payandé-Tolima (Núñez, 2001); aflora exclusivamente en la Cordillera Central, entre el río Coello, al norte y los límites con el Departamento del Huila, en la zona de Santa Rita. Consta casi exclusivamente de calizas grises y negras, con matices azulosos e intercalaciones menores de areniscas, limolitas, arcillolitas y margas. El contacto inferior es discordante sobre la Formación Luisa. La Formación Payandé es intruída por el Batolito de Ibagué y el Stock de Payandé, que producen marmorización y zonas de skarn. La edad está bien establecida, gracias al abundante contenido de fauna fósil, entre la que sobresalen amonitas y lamelibranquios, que le permitieron a Geyer (1973) en Núñez (2001), determinar edad Noriano y la posibilidad de Carniano en la parte inferior, y Retiano en la parte superior.

3.2 Stock de Payandé

Aflora al occidente de Payandé, en la zona central del departamento del Tolima. Las rocas más comunes son de grano medio, color gris, con textura granular hipidiomórfica, frecuentemente teñida de rosado por *óxidos de hierro*. De acuerdo con las investigaciones de Barrero (1969), está conformado por dos unidades petrográficamente diferentes, pero estrechamente relacionadas en el tiempo: un cuerpo cuarzodiorítico intruído por una facies granodiorítica. Investigaciones recientes (documento en preparación) por parte del Semillero de Investigación en Metalografía y Petrografía (S.I.M.P) del Programa de Geología de la Universidad de Caldas, permiten precisar que se trata de un solo cuerpo ígneo con variaciones composicionales desde cuarzodiorita-tonalita a granodiorita.

4. GEOLOGÍA DEL SKARN

Macroscópicamente está caracterizado por presentar una gran variedad de minerales metálicos como: magnetita, hematita variedad especularita, pirita, calcopirita, covelina, bornita, calcosina y una asociación de minerales de ganga como: granates, actinolita, calcita y cuarzo. Se puede observar, además, una zonación caracterizada por variación en el color de los granates; de pardo-rojizo cerca al cuerpo intrusivo y verdes-amarillos cerca al contacto con el mármol. Esta zonación claramente representa una variación composicional en los granates, esencialmente andradita en la zona proximal y grosularia en la distal (Meinert, 1992). La cartografía del cuerpo permite evidenciar una serie de zonas: la primera zona corresponde a una cuarzodiorita-tonalita fresca con textura holocristalina fanerítica e índice de color mesocrático, de grano medio a fino, conformado macroscópicamente por cuarzo, plagioclasas, biotitas y anfíboles en

menor proporción. La segunda zona corresponde a la zona de endoskarn, en la que el cuerpo intrusivo presenta venillas de magnetita, pirita, calcopirita y bornita, así como epidota, clorita y calcita.

En la tercera zona se encuentra el exoskarn desarrollado en el cuerpo de calizas (Formación Payandé) como producto del metasomatismo generado por la intrusión del cuerpo ígneo, ésta se puede dividir claramente en dos subzonas: la primera con predominio de minerales prógrados y segunda con predominio de minerales retrógrados. La primera subzona conformada por granates (90%), de color pardo rojizo (proximales) a verde-manzana (distales), de formas euhedrales y tamaños que varían entre 0.3 a 1 cm aproximadamente, en menor proporción piroxenos (8%), de color negro, con formas euhedrales y tamaños entre 0.3-0.5 cm, y un 2% correspondiente a magnetita. La segunda subzona es donde se presenta la mayor mineralización, acompañada por granates (45%), de color verde manzana, con cristales euhedrales a subhedrales y tamaños alrededor de 0.6cm, tremolita- actinolita (5%) de cristales aciculares, radiales, euhedrales y tamaños superiores a 1 cm, cuarzo (5%) por lo general de formas prismáticas y tamaños variados entre 0.3 a >1 cm, calcita (15%) de formas variadas y tamaños que van desde 0.5 mm hasta megacristales superiores a 5cm, clorita de color verde y tamaños de 0.2-0.5cm y arcilla de color verde. Por último se tiene la zona del mármol (90%), acompañado por venillas de wollastonita (3%) de formas tabulares alargados subhedrales y tamaños menores a 0.2 cm, granates de color verde-manzana (5%) y cuarzo euhedral (2%).

La presencia de tremolita-actinolita y epidota representa la actividad metasomática de Ca (Ahmed y Hariri 2006; Calagari y Hosseinzadeh 2006), como también la presencia de wollastonita corresponde a reacciones de metasomatismo de Si, así como el mayor porcentaje de granate que piroxenos en la etapa prógrada representa el transporte de Al (Meinert *et al.*, 2005).

En la etapa retrograda la mineralización está asociada a granates de color verde-manzana, cuarzo euhedral y megafenocristales de calcita. En las secciones delgadas pulidas, se observó que el granate es el mayor constituyente, se presenta en cristales euhedrales a subhedrales de 8 lados, de tamaño fino a medio y en algunos casos presentan zonación. Comúnmente se encuentran fracturas que atraviesan los granates, rellenas de calcita y minerales metalográficos como magnetita, hematite, calcopirita, bornita y pirita (Figura 2). El cuarzo no es muy abundante pero se presenta en cristales euhedrales de 6 lados en corte transversal (Figura 2a-2b). La presencia de vesuvianita no pudo ser confirmada en los análisis de secciones pulidas pero no se descarta su presencia en otros sectores.

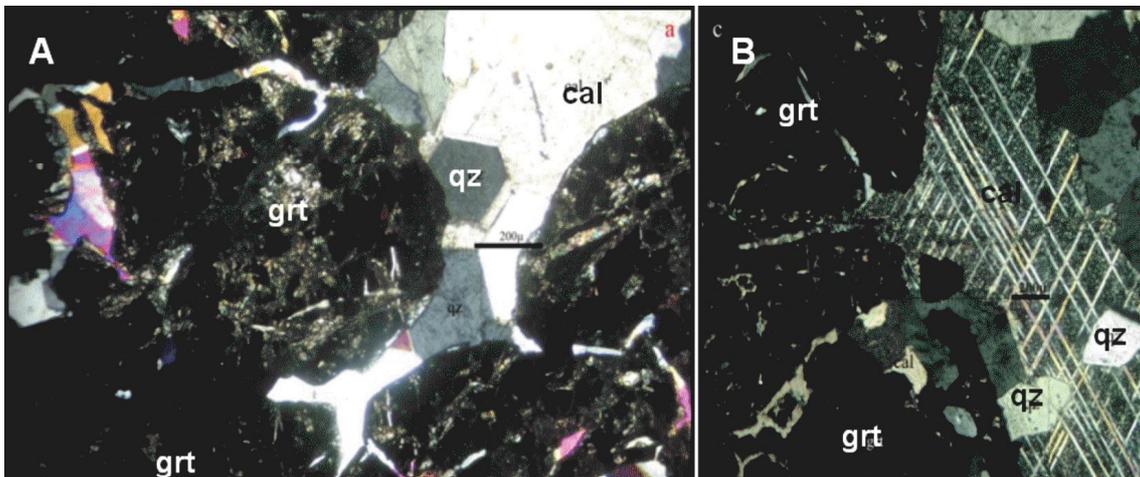


FIGURA 2. A. Granates (grt) zonado, se observan también varias microfracturas rellenas de calcita (cal) y cuarzo (qz) con hábito euhedral hexagonal (NX 5X). B. Calcita (cal) y cuarzo (qz) como relleno entre los granates (grt) (NX 5X).

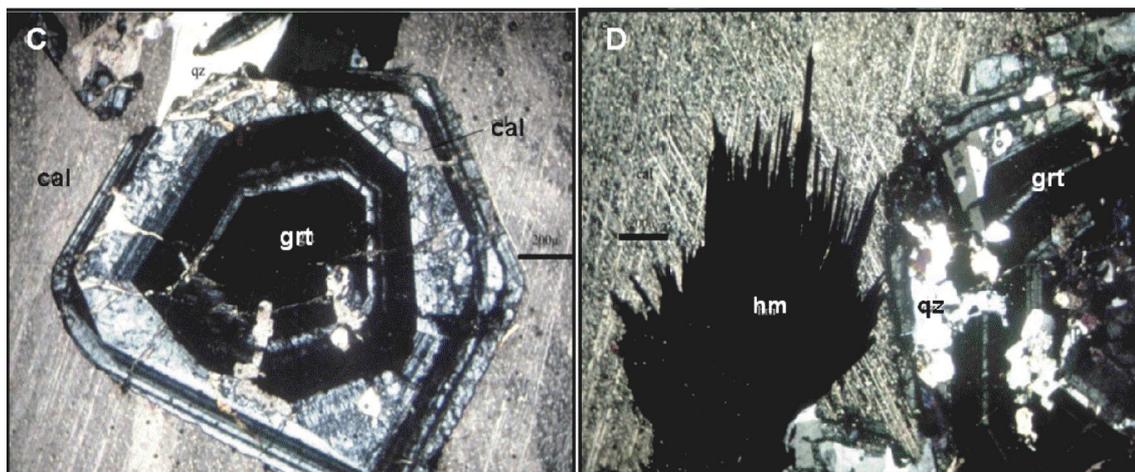


FIGURA 2. continuación: C. Granate zonado (grt) donde se puede apreciar que la alteración a calcita (cal) se concentra en un anillo en particular y se asume como un anillo cálcico (NX 5X). D. Granate zonado (grt) con microfracturas rellenas de cuarzo (qz) y hematite variedad especularita (hm) asociada a calcita (cal)(NX 5X).

5. METALOGRAFÍA Y TEXTURAS DE MENA

Microscópicamente se determinaron óxidos (magnetita y hematita variedad especularita), sulfuros (calcopirita, bornita, covelina, cubanita y calcosina) y carbonatos de origen secundario (malaquita y azurita). La magnetita se presenta de manera anhedral de color gris-pardo característico (Figura 3a) con débil anisotropía debido al contenido de titanio en su estructura, se puede reconocer levemente la presencia de pits triangulares. La hematite variedad especularita se observa con hábitos subhedrales y formas alargadas, presenta reflexiones internas de color rojo y pequeñas lamelas probablemente como resultado del algún contenido de titanio en su estructura. Los sulfuros no presentan una forma específica, excepto la pirita que presenta su típica forma euédrica cúbica y alta reflectancia; la calcopirita presenta una leve anisotropía definida por una serie de lamelas características de calcopiritas de alta temperatura (Ramdohr 1980)). La calcosina presenta un característico color blanco conocida como “calcosina blanca” (Figura 3c), asociada regularmente con bornita, la cual se presenta de color rosado a morado cuando se está oxidando, en texturas pseudo-eutécticas (Figura 3c). La covelina por lo general está asociada a microfracturas que atraviesan varios sulfuros, se caracteriza por su color azul, fuertemente pleocroica y anisotropía de color naranja (Figura 3c). La presencia de cubanita es exclusivamente asociada con calcopirita, reconocible por su pleocroísmo y su anisotropía (Figura 3d).

La magnetita es el mineral predominante y se encuentra asociado a hematita variedad especularita y a calcopirita la cual se presenta relleno de microfracturas a través de la magnetita. La hematita variedad especularita se genera debido a la martitización de la magnetita (Figura 3a) y se forma en los límites de los cristales de ésta última, en ocasiones es posible identificar magnetita remanente. Ramdohr (1980) define el proceso martitización como un reemplazamiento pseudomórfico producto de la oxidación supergénica de la magnetita.

La calcopirita y bornita desarrollan una textura de exsolución (Figura 3b) en donde la calcopirita se presenta a manera de “flames” o lamelas que se desarrollan a lo largo de los planos de la bornita. La cubanita se presenta como agregados irregulares o como cuerpos lamelares que están íntimamente relacionados a la calcopirita. De acuerdo a Ramdohr (1980), la relación entre estos dos sulfuros, producen una textura de exsolución (Figura 3c) que se desarrollan por la capacidad de formar una solución sólida a altas temperaturas; en donde mucho FeS es soluble en CuFeS₂ (calcopirita), la desmezcla ocurre con el enfriamiento a temperaturas de aproximadamente 250°–300°C, separando así calcopirita + cubanita como lamelas. La presencia de cubanita como desmezcla en calcopirita (Figura 3c) es considerada un geotermómetro, que delimita un rango de temperatura mínimo de 250°–300°C (Ramdohr 1980), temperatura que se corrobora con los datos de inclusiones fluidas en cuarzo en la etapa retrograda.

Otra relación textural importante es la que se presenta entre bornita y calcosina. Entre estos minerales se observan texturas de reemplazamiento pseudo-eutécticas o pseudo-desmezclas (Figura 3d). La presencia de covelina está asociada a texturas típicas de un reemplazamiento supergénico de los diferentes sulfuros de cobre, comúnmente desde los bordes o microfracturas del mineral hospedante hacia el centro (Figura 3e). Sin embargo, es importante mencionar que existe una clara selectividad de la covelina por bornita y calcopirita.

De acuerdo con las observaciones texturales realizadas se determinó la secuencia paragenética general para la mineralización tipo skarn en la mina Río Frío (Tabla 1)

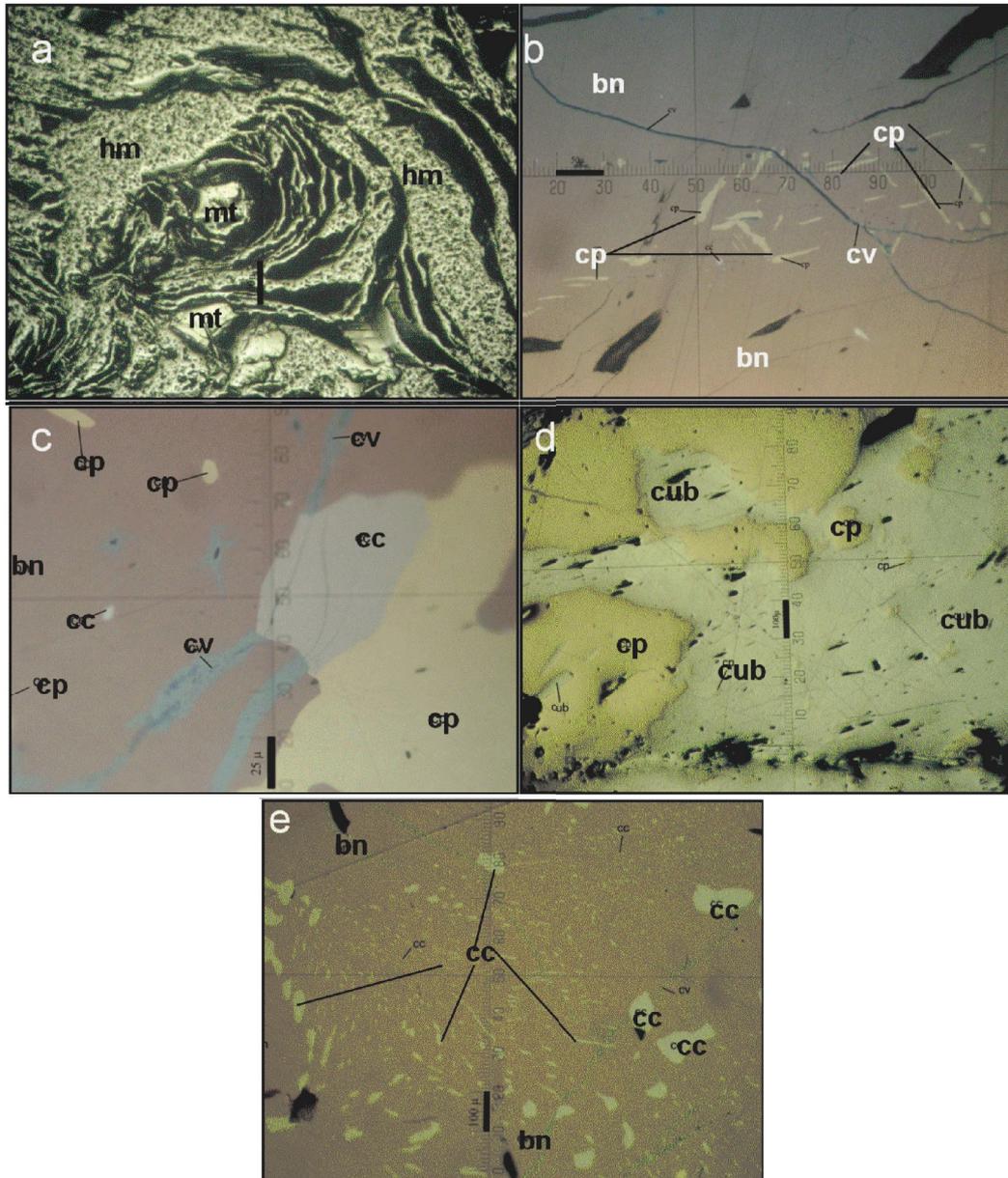


FIGURA 3. a. Textura de martitización, se observan remanentes de magnetita (mt) rodeados por hematita variedad especularita (hm) (N// 10X). b. Lamelas de exsolución de calcopirita (cp) a lo largo de los planos cristalográficos de la bornita (bn), como resultado del enfriamiento de la solución sólida rica en Cu_5FeS_4 (bornita) (N//20X). c. Lamelas de exsolución gruesas de cubanita (cub) en calcopirita (cp) (N// 10X). d. Textura pseudo-eutéctica de calcosina (cc) en bornita (bn), algunas microfracturas son rellenas por covelina, (N// 10X). e. Reemplazamiento selectivo de covelina (cv) en bornita (bn), se observa como la covelina se detiene abruptamente al contacto con la calcosina (cc), a pesar de que la microfractura es continua (N// 40X).

TABLA 1. Secuencia paragenética generalizada para la mineralización tipo skarn presente en la mina Río Frío, Payandé-Tolima. + Sin diferenciar.

EXOSKARN			
Mineral	Etapa Prógrada	Etapa Retrógrada	A. Supergénica
Granate	-----		
Piroxenos	-----		
Tremolita - Actinolita		-----	
Calcita		-----	
Magnetita		-----	
I lematita (Espeularita)			-----
Pirita		-----	
Bornita		-----	
Calcopirita		-----	
Cubanita		-----	
Calcosina		-----	
Covelina			-----
Clorita		-----	
Arcilla		-----	-----
Óxidos de Hierro ⁺			-----
Malaquita			-----
Azurita			-----

6. ANÁLISIS MICROTERMOMÉTRICO

El estudio se realizó en un microscopio petrográfico convencional marca Olympus al cual se le ha adaptado una platina Linkam THMS 600 que permite el calentamiento de las muestras hasta los 600°C y un sistema de enfriamiento a base de Nitrógeno líquido que permite descenso de temperatura hasta -195°C. Se realizó el análisis de 42 inclusiones fluídas, correspondientes a las secciones doblemente pulidas **IF-1, IF-2, IF-3, IF-4 y IF-5**, seleccionando 24 inclusiones fluídas para el análisis, de las cuales el 92% de las inclusiones analizadas en la mineralización tipo skarn corresponden principalmente a la zona con predominio de minerales retrógrados del exoskarn atrapadas en cuarzo y calcita, el 8% restante pertenecen a la zona con predominio de minerales prógrados del exoskarn albergadas en granates. Las inclusiones fluídas presentes en la mineralización tipo skarn en la mina Río Frío presentan formas variadas como: regulares, lobuladas e irregulares, por lo general son bifásicas de tipo I y tipo II (según Nash y Theodore 1971). Las inclusiones en granate y cuarzo estudiadas en las inclusiones fluídas de la mina Río Frío son primarias asociadas a las zonas de crecimiento del cristal y secundarias en cuarzo asociadas a microfracturas, en calcita asociadas al clivaje (Figura 4).

6.1 INCLUSIONES FLUÍDAS EN GRANATE.

Los cristales de granate analizados corresponden a las únicas muestras que contienen datos para analizar de la zona con predominio de minerales prógrados del exoskarn. Son Inclusiones fluídas bifásicas primarias (L+V) tipo I, de forma regulares asociadas a zonas de crecimiento del cristal, de tamaños entre 5-7 μ (Figura 4a), con temperaturas de fusión del hielo (Tfh) registradas entre -17.3°C a -16,9°C que corresponden a salinidades de entre 25.76 – 26.12 NaCl. Solo fue posible medir la temperatura de homogenización (Th) en una muestra dando un valor de 580°C (Figura 4), las demás inclusiones exceden la capacidad del equipo (>600°C) (Tabla 2).

6.2 INCLUSIONES FLUÍDAS EN CUARZO.

Inclusiones fluídas bifásicas primarias (L+V) tipo I, asociadas a las zonas de crecimiento del cristal, de formas irregulares con bordes lobulados, de tamaños entre 2-4 μ (Figura 4b y 4c). La temperaturas finales de fusión del hielo (Tfh) varían entre -12.6°C a -10.2°C que corresponden a salinidades, de entre 14.15–16.52 %NaCl. Las temperaturas de homogenización registradas presentan temperaturas entre 270-320°C (Figura 4). Se encontraron también inclusiones fluídas secundarias con valores similares en cuanto a la salinidad pero con temperaturas de homogenización entre 160°C-200°C (Tabla 2).

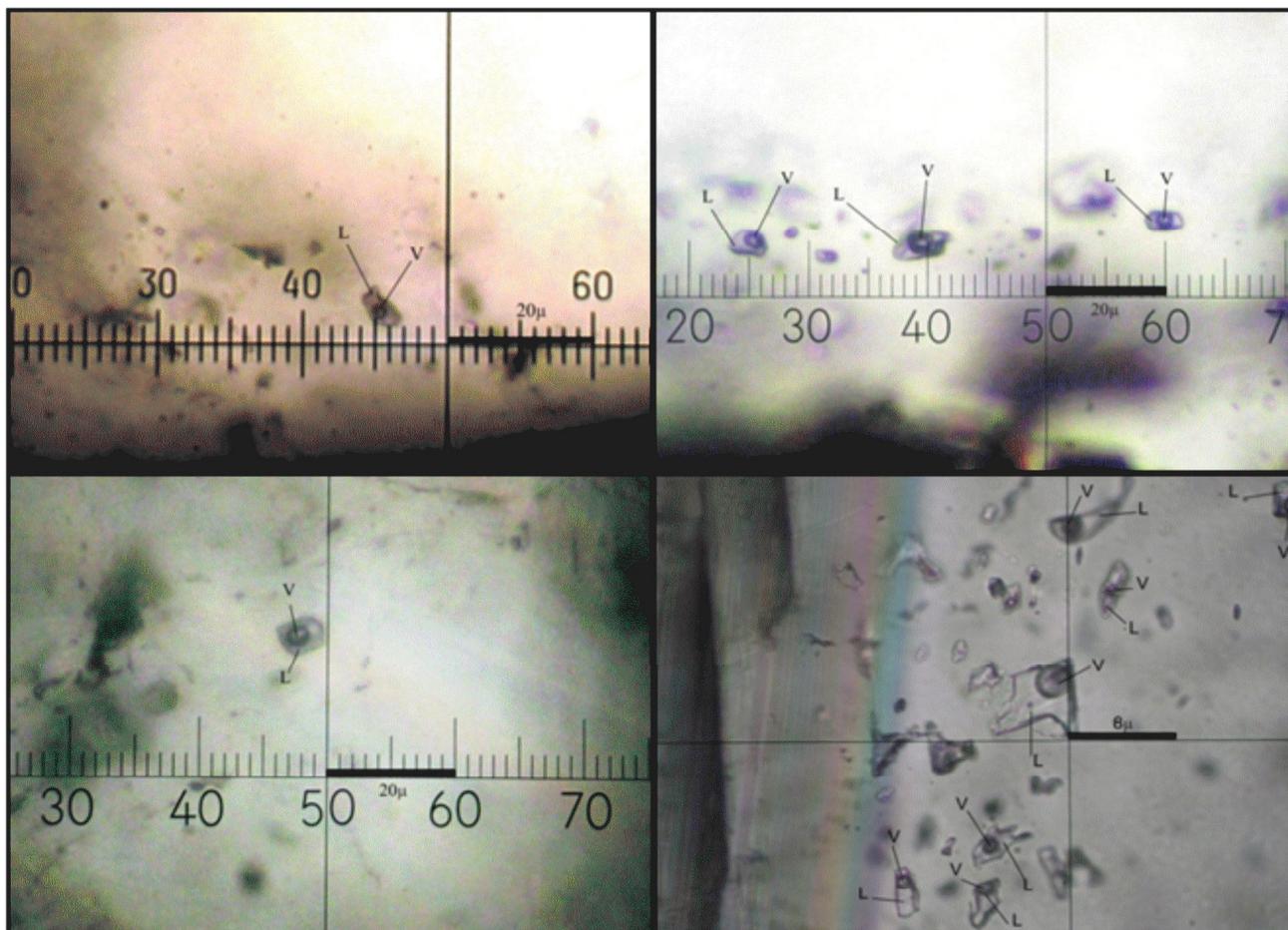


FIGURA 4. A. Inclusión fluída en granate primaria bifásica tipo I, asociada a zonas de crecimiento del cristal. (N// 50X). B. Familia de inclusiones fluídas primarias bifásicas en cuarzo tipo I. (N// 50X). C. Inclusión fluída primaria bifásica en cuarzo tipo II, con forma regular. (N// 50X). D. Inclusiones secundarias bifásicas en calcita tipo I y tipo II, de formas regulares, lobuladas e irregulares, asociadas a las direcciones del clivaje. (N// 50X).

6.3 INCLUSIONES FLUÍDAS EN CALCITA.

Las inclusiones estudiadas en este mineral son secundarias bifásicas (L+V) tipo I y tipo II, de formas regulares relacionadas con la estructura cristalina, de tamaños entre 3-7 μ (Figura 3d). La temperatura de fusión del hielo (Tfh) registradas varían entre -12°C a -9.3°C, lo cual equivale a salinidades, de 13.18 a 15.95% NaCl. Las temperaturas de homogenización (Th) de las inclusiones (Figura 5), presentan dos rangos notorios: el primero entre 110°C-130°C y el segundo entre 150°C-160°C (Tabla 2)

En la tabla 2 se observan la densidad, temperatura de homogenización, salinidad, temperatura eutéctica, temperatura de fusión de hielo, minerales hospedantes de la inclusión y minerales metálicos asociados, obtenidas para las 24 inclusiones estudiadas.

TABLA 2. Mediciones efectuadas para las inclusiones fluidas. Th: Temperatura de homogenización, Te: Temperatura eutéctica, Tfh: Temperatura de fusión del hielo, P: Primarias S: Secundarias, gt: Granate, calc: Calcita, qz: Cuarzo, hm: Hematita, mt: Magnetita, cp: Calcopirita, bn: Bornita, cc: Calcosina, cv: Covelina, cub: Cubanita, py: Pirita.

Muestra	Te (°C)	Tfh (°C)	Th (°C)	Densidad (g/cm ³)	Salinidad % NaCl	Tipo	Mineral hospedante	Minerales metálicos asociados
IF 1	-56,9	-12	129,3	1,133	15,95	S	calc	hm, cp, bn, cc, cv
	-55,5	-12,6	290,2	1,001	16,52	P	qz	
	-54	-10,7	118,5	1,123	14,67	S	calc	
	-55	-11,2	319	1,126	15,17	P	qz	
	-54,2	-12,4	313,2	1,136	16,34	P	qz	
IF 2	-55	-11,2	316	1,126	15,17	P	qz	cp, cc, bn
	-57,2	-11	308	1,125	14,97	P	qz	
	-57,2	-11,1	316	1,125	15,07	P	qz	
	-48,9	-11,5	198,3	1,129	15,47	P	qz	
	-58,2	-10,5	154,8	1,120	14,46	S	calc	
IF 3	-57,4	-9,5	158,8	1,111	13,4	S	calc	cub, cp, bn, cc, hm, py
	-55	-9,3	128	1,109	13,18	S	calc	
	-51,9	-10,4	297,2	1,119	14,36	P	qz	
	-52,2	-11,2	315,5	1,126	15,17	P	qz	
	-52,7	-10,2	306,4	1,118	14,15	P	qz	
	-53,4	-11,8	276,8	1,131	15,77	P	qz	
	-54,1	-11,3	291,4	1,127	15,27	P	qz	
	-53,5	-11,3	305,8	1,127	15,27	P	qz	
	-52,3	-12,3	164,3	1,135	16,24	S	qz	
IF 4	-52,6	-11,7	307,9	1,130	15,66	P	qz	+/- mt
	-52,5	-11	303,4	1,125	14,97	P	qz	
	-53,7	-12,6	276,8	1,138	16,52	P	qz	
IF 4	-54,7	-25,9	589	1,220	26,12	P	gt	
	-55,4	-25,3	>600	1,218	25,76	P	gt	

Einaudi y Burt (1982), Meinert (1992) y Meinert *et al* (2005) proponen temperaturas de formación para la etapa prógrada entre 500°C-700°C con salinidades no mayores a 50% NaCl, lo que concuerda con los datos registrados en las inclusiones primarias en granates, y para la etapa retrograda entre 450°C-300°C y salinidades <25% NaCl, que coinciden con los datos registrados en las inclusiones primarias en cuarzo, así como la presencia de cubanita que marca un rango de temperatura de 250°C-300°C (Ramdohr, 1980).

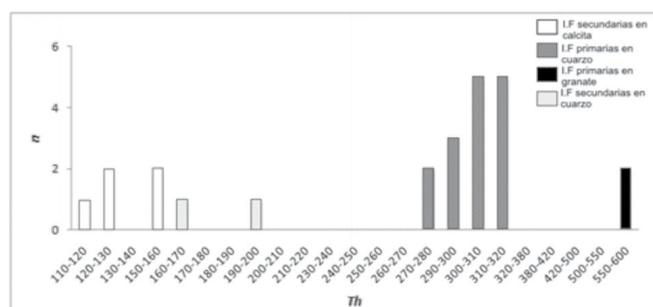


FIGURA 5. Temperaturas de homogenización para inclusiones secundarias en calcita, secundarias y primarias en cuarzo y primarias en granates. Se muestran los rangos de temperatura de las inclusiones de acuerdo al mineral hospedante, las inclusiones primarias en granates presentan las mayores temperaturas de homogenización, las inclusiones secundarias y primarias en qz no presentan variaciones amplias en cuanto al rango de temperatura de homogenización. Se observa como la temperatura de homogenización en las inclusiones albergadas en calcita es inferior a las de granate y cuarzo, debido a que el clivaje abre el sistema.

Las inclusiones fluidas analizadas registran temperaturas de homogenización variadas: en calcita: - 58,2°C hasta - 55°C, en cuarzo: - 54,1°C hasta - 51,9°C y en granate: -55,4°C hasta -54,7°C (Tabla 2). Basados en los estudios de Borisenko

(1977) en Shepherd et ál (1985) en el que relaciona los tipos de sales y sus puntos eutécticos de homogenización así como el diagrama de sistemas salinos-acuosos (Figura 6), se obtuvo como resultado un sistema salino de $H_2O+NaCl+CaCl_2$ con fases sólidas de *Hielo+NaCl.2H₂O+CaCl₂* (Tabla 3), normales en los skarn de acuerdo a Kwak (1986). Aunque no se descarta la presencia en la inclusiones de CO₂ debido a que este posee temperaturas eutécticas de más o menos cercanas a -56.6°C.

6.4 Presión

La determinación de la presión en el momento de atrapamiento de la inclusión es importante por dos aspectos: esta brinda información de las condiciones geológicas intrínsecas y arroja el significado de la temperatura de homogenización (Th) correcta para obtener la temperatura de atrapamiento verdadera.

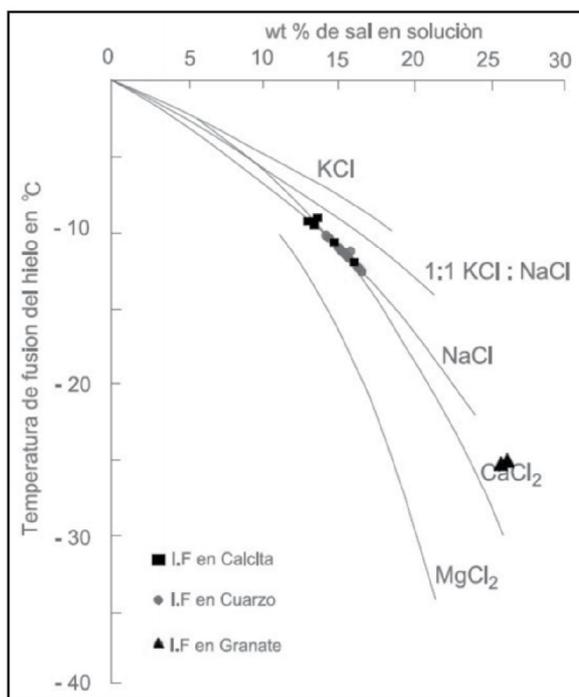


FIGURA 6. Sistemas acuosos-salinos, relacionando la temperatura de fusión del hielo (T_{fh}), el porcentaje y tipo de sal presente. Se observa que las inclusiones estudiadas se proyectan en la unión del sistema NaCl y CaCl₂, así como una tendencia hacia el sistema CaCl₂ para las inclusiones albergadas en granates. Tomado de Shepherd *et al.*, (1985).

TABLA 3. Temperaturas Eutécticas para sistemas Salino-Acuosos, tomadas de Borisenko (1977) en Shepherd *et al.*, (1985). Subrayado se presenta el sistema salino teórico para las inclusiones fluídas de la mineralización tipo skarn.

<u>Sistema Salino</u>	<u>Temperatura Eutéctica (T_e)</u>	<u>Fases Sólidas</u>
<u>H₂O+NaCl</u>	<u>-20.8° a -21.8°C</u>	<u>Hielo+NaCl.2H₂O</u>
H ₂ O+KCl	-10.6°C	Hielo+KCl.nH ₂ O
H ₂ O+CaCl ₂	-49.8°C	Hielo+CaCl ₂ .6H ₂ O
H ₂ O+MgCl ₂	-33.6°C	Hielo+MgCl ₂ .12H ₂ O
<u>H₂O+NaCl+CaCl₂</u>	<u>-55° a -52°</u>	<u>Hielo+NaCl.2H₂O+CaCl₂.6H₂O</u>

Para poder determinar la presión mínima de atrapamiento, se hace indispensable el conocer la profundidad de atrapamiento. Esta se obtiene a partir de diagramas que relacionan la temperatura de homogenización (Th) y salinidad de las inclusiones fluídas (Figura 7).

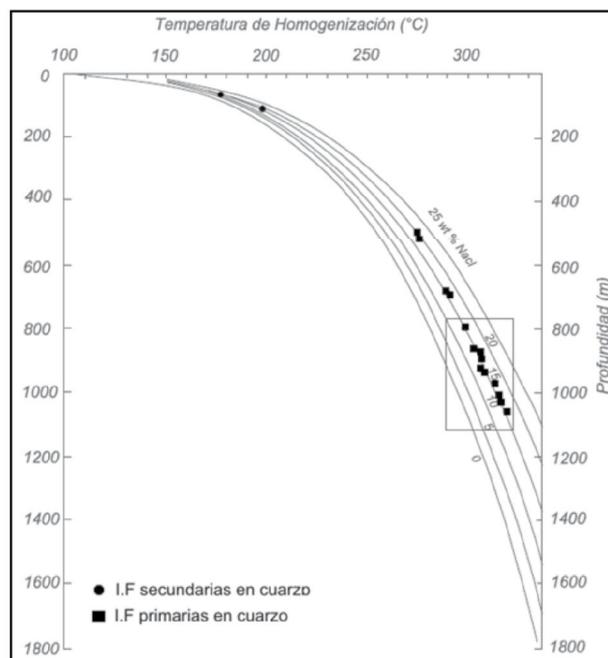


FIGURA 7. Curvas para soluciones con NaCl, mostrando la relación entre la temperatura de homogenización (T_h) y la profundidad. Las inclusiones fluidas proyectadas sobre el gráfico son albergadas en cuarzo, debido a que las de granate sobrepasan los rangos de temperatura de homogenización del gráfico. Tomado de Shepherd et al.,(1985).

La presión al momento del atrapamiento dependerá de las condiciones asumidas, sean hidrostáticas o litostáticas. Como se observa en la figura 7 el rango de profundidad varía entre 800 y 1100 metros. La presión mínima se podría calcular utilizando la fórmula (Shepherd *et al*, 1985): $P: H.\rho.g$

Donde: P : Presión, ρ : Densidad del material suprayacente, H : Profundidad, g : Aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2)

Considerando un sistema hidrostático, la densidad sería de 1 g/cm^3 , para un sistema litostático se asumiría la densidad promedio de la corteza terrestre de 2.7 g/cm^3 . Para simplificar las unidades y reducirlas a una forma manejable la profundidad (H) en metros y la presión (P) en bares: $P: H. (2.7 \text{ o } 1). (0.0981)$

Según Shepherd *et al* (1985), los sistemas de fluidos hidrotermales tienden a alternar entre estos dos modelos, por lo que en la literatura abundan tortuosos y controversiales argumentos geológicos para estimar una única presión. Es por esta razón, que las presiones obtenidas son mínimas en cada uno de los modelos. En la tabla 4 se resumen los datos de presión mínima obtenida.

TABLA 4. Rangos de presión mínima teórica obtenida para sistemas litostáticos e hidrostáticos

Rango Presión de profundidad	Litostática	Hidrostática
800 metros	211.896 bares	78.48 bares
1100 metros	291.357 bares	107,91 bares

7. TIPO DE SKARN

Geoquímicamente el estado de oxidación del plutón asociado ha sido utilizado para clasificar los depósitos tipo skarn (Kwak 1987 y Meinert et al., 2005), esto de alguna manera es análogo al uso del estado de sulfidación en la clasificación

de depósitos epitermales y tipo pórfido (Einaudi et al., 2003). Adicionalmente Meinert et al., (2005) han compilado los datos de óxidos mayores y elementos traza para diferentes plutones relacionados con siete tipos distintos de skarn: Fe, Cu, Zn, Sn, Au, W y Mo. El stock de Payandé presenta valores de $Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO)$ cercanos a 0.5 (Quiceno et al., manuscrito en revisión), que junto con el alto contenido de magnetita y hematita variedad especularita, granate en mayor proporción que piroxenos, así como la asociación mineralógica son características de un skarn de tipo Cu, los cuales son indicativos de un estado oxidado y emplazamiento somero para la mineralización (Meinert et al., 2005).

8. DISCUSIÓN

La zonación en los granates; de pardo-rojizo cerca al cuerpo intrusivo y verdes-amarillos cerca al contacto con el mármol demuestra claramente que el color de los granates, están controlados por la heterogeneidad, porosidad y permeabilidad del protolito carbonatado, así como por la distancia al contacto con el cuerpo intrusivo de acuerdo a Lu *et al.*, (2003), Meinert *et al.*, (2003), Meinert *et al.*, (2005), Calagari y Hosseinzadeh (2006), y Maher (2010). Aunque la presencia de vesubianita no se pudo comprobar en el análisis de secciones delgadas, su presencia no se descarta. La presencia de actinolita-tremolita refleja la superposición de la etapa retrograda sobre la prograda, dado que su formación está ligada a la alteración de piroxenos como lo propone Calagari y Hosseinzadeh (2006), así como la asociación de minerales metálicos con granates (progradados).

Meinert *et al.*, (2003) afirma que la asociación de minerales anhidros como granates y piroxenos reflejan la actividad de un fluido magmático-hidrotermal, mientras que las asociaciones de minerales hidratados como actinolita-tremolita, epidota, clorita, sulfuros de hierro y sulfuros de cobre reflejan la mezcla de fluidos magmáticos-hidrotermales y meteóricos.

La posición paragenética de la bornita a nivel mundial, ha sido ampliamente discutida, por largo tiempo se consideró de origen supergénico Sales (1914) en Ramdohr (1980) postula un origen exclusivamente hipógeno. Ramdohr (1980) sugiere que es incorrecto ubicarse en alguno de los dos extremos, ya que su origen estará íntimamente ligado al tipo de depósito en que se forma. La presencia de bornita en la mineralización tipo skarn en la mina Río Frío, se presenta a manera de desmezcla con calcopirita a temperaturas entre 250°-300°C (confirmadas con datos de inclusiones fluidas en cuarzo asociados registrando 270°- 320°C, característica de génesis hipogénica en depósitos de alta temperatura, en los que se incluye los de tipo skarn.

Generalmente las salinidades >20% NaCl son asociadas a un origen magmático-hidrotermal y están relacionadas con los minerales anhídricos (granates y piroxenos) de la etapa prograda, así como las salinidades <20% NaCl son asociadas a fluidos contaminados con aguas meteóricas y son relacionados con la precipitación de el contenido metálico (Meinert 1992).

9. CONCLUSIONES

- La cartografía a detalle del cuerpo mineralizado, permite evidenciar una serie de zonas, cuyos límites son graduales, con el color de los granates controlado por la distancia al contacto con el intrusivo: La primera zona corresponde a una cuarzodiorita-tonalita fresca, la segunda corresponde al endoskarn, la tercera zona corresponde al exoskarn, en donde se puede diferenciar la mineralogía característica de la etapa prógrada, conformada por granates pardo-rojizos y piroxenos en menor proporción y una etapa retrógrada conformada por la mayoría de la mineralización (óxidos de hierro, sulfuros de hierro y cobre), actinolita-tremolita, cuarzo, clorita, y calcita. Por último se observa la zona de mármol, caracterizada por la presencia de venillas de wollastonita y granates de color verde-manzana.
- Las relaciones texturales más relevantes son las texturas de martitización entre magnetita-hematite (Figura 3a), texturas de exsolución entre calcopirita-bornita (Figura 3b) y calcopirita-cubanita (Figura 3c), texturas pseudo-eutécticas entre bornita-calcosina (Figura 2d) y texturas de reemplazamiento selectivo (Figura 3e).

- La secuencia paragenética de los depósitos tipo skarn puede ser dividida en dos etapas discretas: prógrada y retrógrada (ver tabla 1). En la primera hay muy poco contenido metálico debido a la poca interacción de los fluidos magmáticos- hidrotermales con aguas meteóricas, aquí el contenido es principalmente de minerales anhidros. La etapa retrógrada se caracteriza por la mezcla de fluidos magmáticos- hidrotermales con aguas meteóricas que producen la precipitación de metales, en su orden: magnetita, hematite, pirita, bornita, calcopirita, cubanita, calcosina y covelina, así como de la alteración de los minerales prógrados por minerales hidratados como epidotas, tremolita -actinolita y cloritas. Por último la alteración supergénica se evidencia por la presencia de carbonatos de cobre como malaquita y azurita, así como óxidos e hidróxidos de hierro.
- Los datos de inclusiones fluídas albergadas en granates (en la etapa prograda) indican un fluido con salinidades de 25.76 – 26.12 % NaCl y temperatura de homogenización (Th) >580°C de origen magmático mientras que las inclusiones primarias en cuarzo, de la etapa retrograda, indican un fluido con salinidades de 14.15 – 16.52 % NaCl y temperaturas de homogenización entre 270°-320°C, lo que concuerda con la presencia de cubanita (geotermómetro) indicando, según Ramdorh (1980), temperaturas de 250°-300°C. Ver tabla 2 y figura 5.
- Considerando la mineralogía caracterizante, según Misra (2000), para los skarn de tipo Cu se presenta en la etapa prograda andradita y diópsido, en la etapa retrograda actinolita-tremolita y metálicos como calcopirita, bornita, magnetita, hematita, pirita y sulfuros de Cu. El stock de Payandé presenta valores de $Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO)$ cercanos a 0.5 (Quiceno et al., manuscrito en revisión), que junto con el alto contenido de magnetita y hematita variedad especularita, granate en mayor proporción que piroxenos, así como la asociación mineralógica permiten clasificar la mineralización, presente en la mina Río Frío, como skarn tipo Cu.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó con el apoyo de los geólogos Juan Carlos Molano, Cesar A. Ossa Mesa, Gustavo Hincapié, Andrés Naranjo Sierra; así como July Quiceno Colorado, Susana Osorio Ocampo, Leidy Giraldo Álzate, Larry Romero Arboleda, Diego Felipe Vallejo, Andrés Salazar Ríos, integrantes del Semillero de Investigación en Metalografía y Petrografía (S.I.M.P) de la Universidad de Caldas.

REFERENCIAS

- Ahmed Z., Hariri M. 2006. Formation and mineral chemistry of a calcic skarn from Al-Madhiq, SW Saudi Arabia. *Chemie der Erde Geochemistry*. Elsevier. pp 187-201.
- Barrero, D. 1969. Petrografía del stock de Payandé y metamorfitas asociadas. *Boletín Geológico* Vol. XVII, pp 113-144.
- Calagari, A.A., Hosseinzadeh, G. 2006. The mineralogy of copper bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaidjan, Iran. Elsevier. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol 28, pp 423–438.
- Edwards, A. 1960. Textures of the ore minerals and their significance. Printed in Australia by Brown, Prior, Anderson. PTY, LTD. 242p.
- Einaudi, M. T., Burt, D.M. 1982. Introduction-terminology, classification and composition of skarn deposits. A special issue devoted to skarn deposits. *Economic Geology*, vol 77, pp 745-754.
- Einaudi, M.T, Hedenquist, J.W., and Inan, E 2003. Sulfidation state of hydrothermal fluids: The porphyry-epithermal transition and beyond: *Society of Economic Geology Special Publication* 10, pp 285-313.
- Kwak, T.A.P. 1986. Fluid inclusion in skarns (carbonate replacement deposits): *Journal of Metamorphic Petrology*, 4, pp 363-384.
- Kwak, T.A.P., 1987. W-Sn skarns deposits and related metamorphic skarns and granitoids: *Developments in Economic*

- Geology, vol 24, pp 451.
- Lu, H.-Z., Liu, Y., Wang, C., Xu, Y., Li, H., 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China. *Economic Geology*, vol 98, pp 955-974.
- Maher, K.C. 2010. Skarn alteration and mineralization at Corocohuayco, Tintaya District, Peru. *Economic Geology*, vol 105, pp. 263–283.
- Meinert, L., 1992. Skarn and skarn deposits. *Geosciences Canada*, vol. 19, pp 145-162.
- Meinert, L., Hedenquist, J.W., Satoh, H., Matsuhisa, Y., 2003. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids, *Economic Geology* vol. 98. pp. 147–156.
- Meinert, L., Dipple, G., Nicolescu, S., 2005. World skarn deposits. *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume (1905-2005)*, pp 299-337.
- Misra, K.C., 2000. *Understanding minerals deposits*. Kluwer Academic Publishers. 758 P.
- Nash, J.T., Theodore, T.G. 1971. Ore fluids in the Porphyry Copper Deposit at Copper Canyon, Nevada. *Economic Geology* Vol. 66, pp. 385-399.
- Núñez, A . 2001. Memoria Explicativa del Departamento del Tolima. Ingeominas. 101 P.
- Quiceno, J.A., Osorio, S., Vallejo, F., Romero, L. y Ossa, C.A. 2010. Petrografía y Geoquímica del Stock de Payandé. Manuscrito en revisión. *Boletín de Geología*.
- Ramdohr, P., 1980. *The ore minerals and their intergrowths*. Berlin, Pergamon Press, 2. Vol. I-II. 1205 P.
- Shepherd, T., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985. *A practical guide to fluid inclusions studies*. 235 P.