



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización químico -
mineralógica de las estructuras
mineralizadas de la mina El Cristo
del Distrito Minero Pachuca – Real
del Monte.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Karina Martínez Bautista

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alfredo Victoria Morales



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

*Los ambientes revolucionarios siempre
han sido favorables al avance de las mujeres;
los momentos socialmente anómalos dejan
fisuras en el entramado convencional por donde
se escapan los espíritus más libres.
Rosa Montero*

Dedicatoria

A mi abue Maricarmen

Porque sé que nunca te fuiste y porque un día volveremos a abrazarnos

Agradecimientos

A la DGAPA por financiar el proyecto PAPIME PE105116, al que se suscribe este trabajo de tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme las herramientas para mi desarrollo profesional y por ser mi segundo hogar.

A mi mamá Clarita por ser el principal pilar en mi vida, y por apoyarme en el camino que elegí, porque sin ella yo no sería quien soy y porque es la mujer más fuerte que conozco. Por todos sus desvelos para que no me faltará nada, por los trajes que me hizo en cada festival escolar, por cada sacrificio que hizo para hacerme una mujer de bien.

A mi papá Bernabé, a mi hermana Paty, a mis tíos Pedro, Pancho y Lupe porque sin su apoyo nada de esto sería posible.

A mis sinodales por tomarse el tiempo de revisar mi trabajo y por sus acertadas observaciones que lo enriquecieron, agregándole valor al atender mis dudas, que no fueron pocas. Al Ing. Javier Medina Escutia porque gracias a él descubrí el maravilloso mundo de la petrografía. A la Mtra. Edith Fuentes Guzmán por su tiempo y disponibilidad cada que necesitaba material de consulta. A la Quím. Patricia Girón García por su tiempo y dedicación en enseñarme sobre la Difracción y Fluorescencia de Rayos X, y por las facilidades brindadas para el análisis de las muestras seleccionadas para este trabajo. Al Dr. Augusto Rodríguez Díaz quien es un gran ejemplo por seguir y que con cada charla me abrió la perspectiva sobre mi tema y por las facilidades que me dio para analizar algunas muestras de este trabajo mediante SWIR que se encuentra en el Laboratorio de Petrología y Microtermometría del Instituto de Geofísica de la UNAM.

A la Quím. Blanca Sonia Ángeles García por su tiempo y paciencia para enseñarme y ayudarme con el análisis de mis muestras mediante el uso del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), del laboratorio de Microscopía Electrónica del Instituto de Geología de la UNAM. A la Quím. Guadalupe por su valioso tiempo y conocimiento invertido en el ensaye por copelación.

A mis profesores de la carrera que me enseraron los fundamentos de la geología, y que me hicieron ver al mundo con otros ojos, en especial al Dr. Gilberto Silva Romo quien me dio las herramientas para interpretar mis observaciones en campo, al Ing. Javier Arellano Gil porque me enseñó las técnicas de campo fundamentales para mi vida como Ingeniera Geóloga, a la Dra. Laura Morí por enseñarme los fundamentos de la geología y hacerme entender la química en las ciencias de la tierra y a la Mtra. Isabel Domínguez Trejo por guiarme en los momentos en los que no sabía qué camino seguir.

A mis amigos del Colegio de Ciencias y Humanidades Selma, Cinthya, Laura, Luis, con quienes viví el paso de la pubertad a la juventud y con quienes puedo seguir siendo una niña. También a

Jessica, Yanine, Liliana y Valeria con quienes aprendí que tomar caminos diferentes no significa vivir en otra dimensión.

A mis amigos de la carrera Leslie, Teo, Leo, Vania, Javi, Arody, Ana, Iván, Josselyn y Victor porque de ellos aprendí a ser una profesionista, al mismo tiempo que aprendíamos juntos que en la geología no todo está escrito.

A mis amigos del 400, a Yoalli por todas sus acertadas observaciones y por compartir conmigo el gusto por actividades más allá de la geología, a Orestes por su tiempo cada que le consultaba sobre la elaboración de mis imágenes, a Clau y Alberto porque con ellos nunca faltaron las risas.

Al Ing. Teodoro Hernández Treviño y a la Dra. Mayumy Amparo Ramírez Cabrera, porque me han enseñado que la humildad y amistad no son ajenos a los grados académicos y porque siempre reconocen el valor de mi trabajo.

Al Ing. Jared Hernández de la Cía. Pachuca Real del Monte por su tiempo y dedicación en guiarme y enseñarme algo de lo que sabe durante el tiempo que estuve en El Cristo, al Ing. Miguel del Río y al Ing. Elfego Cruz por brindarme las facilidades para llevar a cabo el muestreo necesario para este trabajo. A Damaris que fue una agradable compañía durante la estancia en la mina El Cristo.

Y finalmente pero no menos importante al Ing. Alfredo Victoria Morales, quien además de ser mi asesor, ha sido un amigo y un compañero de viajes y aventuras. Me ha mostrado el maravilloso mundo de los minerales, me ha enamorado de las formas cristalinas más extraordinarias y me ha despertado la curiosidad de estudiarlas. Porque cada que me surge una duda por más extraña que sea tiene una respuesta, pero sobretodo porque me hace analizar las cosas y verlas desde una perspectiva mucho más amplia, me hace recordar detalles que dejo de lado y que siempre forman parte de un todo. Me ha dado la confianza de trabajar a su lado, me ha hecho crecer profesionalmente al incluirme en sus proyectos y le ha dado valor agregado a todo el conocimiento que poseo actualmente.

Contenido

Resumen	10
Abstract	11
1. Introducción	12
1.1 Generalidades de los yacimientos epitermales	12
1.2 Objetivo:	14
1.3 Objetivos específicos	14
1.4 Justificación	14
2. Marco Geológico	15
2.1 Localización.....	15
2.2 Estratigrafía	16
2.3 Edad	17
2.4 Estructuras	18
2.5 Mineralogía de las vetas de acuerdo con estudios anteriores	19
2.6 Reseña histórica del distrito minero de Pachuca – Real del Monte.....	20
3. Metodología	24
3.1 Niton	25
3.2 Mineragrafía	25
3.3 Petrografía	26
3.4 Microscopio Electrónico de Barrido (Scanning electron microscope, SEM)	26
3.5 Difracción de Rayos X	27
3.6 Fluorescencia de Rayos X	30
3.7 Copelación	32
4. Resultados	33
4.1 Grupos C y CA	33
4.2 Grupo H	36
4.3 Grupo CH	39
4.4 Grupo HW	40
4.5 Grupo P.....	41
4.6 Grupo NS.....	42
4.7 Rosario.....	43

4.8 Cuadros Paragenéticos.....	45
5. Discusión de los resultados.....	47
6. Conclusiones y Recomendaciones	51
6.1 Conclusiones.....	51
6.2 Recomendaciones	52
7. Referencias.....	53

Relación de tablas

Tabla 1. Relación de muestras tomadas por grupo y análisis realizados para cada estructura.	33
Tabla 2. Cuadro paragenético con las especies minerales encontradas en la Veta Hormigueras.	45
Tabla 3. Cuadro paragenético con las especies minerales encontradas en la Veta Calderona.	46
Tabla 4. Cuadro comparativo con los elementos característicos de los depósitos epitermales definidos por Hedenquist et al.,(2000), Camprubí et al., (2003), Heald et al., (1987) y los datos obtenidos con las muestras provenientes de la mina El Cristo.	48
Tabla 5. Cuadro comparativo entre los elementos propuestos por Hedenquist et al., (2000) para definir la profundidad de un sistema epitermal de baja a intermedia sulfuración y los elementos encontrados en las muestras tomadas de la mina El Cristo.	50

Relación de figuras

Figura 1. Mapa de la República Mexicana con la distribución de los yacimientos de tipo epitermal (franja gris). Se remarcan aquellos con edad promedio entre ~23 y ~18 Ma. 1) Pachuca-Real del Monte, 2) El Indio-Huajicori, 3) Bolaños, 4) San Martín de Bolaños, 5) Ixtacamaxtitlán., modificado de Camprubí et al., (2006).	12
Figura 2. Modelo esquemático de un depósito epitermal, modificado de Hollister (1985).	13
Figura 3. Mapa del estado de Hidalgo, resaltado en rojo está la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico, en la cual se encuentra el Distrito Minero Pachuca – Real del Monte. Modificado de INEGI, (2005).	15
Figura 4. Columna estratigráfica. Las vetas del Distrito minero Pachuca – Real del Monte se encuentran encajonadas en los derrames de lava que componen al grupo Pachuca, en orden de antigüedad las formaciones que lo componen son las siguientes: Santiago, Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaína, Cerezo, Tezuntla; definido por Geyne et al., (1963) pertenecientes al oligoceno. Modificado de SGM.....	17
Figura 5. Sección del mapa de la geología superficial del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte. Modificado de Geyne et al., 1963.	19

Figura 6. Mapa con la distribución espacial de las muestras en la mina El Cristo.	24
Figura 7. Toma de lectura con Niton a muestras de mano.	25
Figura 8. Microscopio Electrónico de Barrido Zeizz EVO MA10 con un detector/analizador Bruker SFlash6 10 y un detector NTS BSD, con un voltaje de 15.00 Kv. Instituto de Geología UNAM.	27
Figura 9. Molienda de la muestra con mortero de ágata.	28
Figura 10. Muestras para análisis de todas las fases presentes.	28
Figura 11. Difractómetro de Rayos X marca Siemens modelo D5000. Instituto de Geología UNAM.	29
Figura 12. Muestras para el análisis de arcillas en la parte fina.	29
Figura 13. Difractómetro marca Siemens modelo D5000. Instituto de Geología, UNAM.	30
Figura 14. Muestras para el análisis de XRF.	31
Figura 15. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) matriz microlítica de las andesitas. (c y d) Vetillas de cuarzo atravesando a la roca encajonante. (e y f) fenocristales de plagioclasa moderadamente alterados.	34
Figura 16. Fotos tomadas con microscopio minerográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) cristal de acantita relleno cavidades de cuarzo. (c y d) cristales de pirita intercrecidos con calcopirita, alterado a hematita. (e y f) Cristales de galena intercrecidos con esfalerita y calcopirita, con pequeños cristales de acantita y stromeyerita en los bordes de la esfalerita se encontraron microcristales de Ag nativa.	35
Figura 17. Cristales de calcita hojosa, imagen obtenida con SEM.	36
Figura 18. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) Fenocristales de plagioclasa fuertemente alterados a sericita y otros más de anfíboles cloritizados. (c y d) andesita de matriz microlítica con fenocristales alterados y atravesada por una vetilla rellena de cuarzo y calcita blade. (e y f) andesita atravesada por vetilla rellena de cuarzo y con cristales de minerales opacos (py).	37
Figura 19. Fotos tomadas con microscopio minerográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) cristal de pirita fracturado con relleno de covelita. (c y d) cristales de esfalerita relleno cavidades de calcita con pequeños cristales de acantita. (e y f) Cristales de Ag nativa relleno cavidades de cuarzo.	38
Figura 20. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. Andesita microlítica atravesada por vetillas de cuarzo y calcita con fenocristales de plagioclasa moderadamente alteradas, y fenocristal de ortopiroxeno fuertemente fracturado y con minerales opacos diseminados.	39
Figura 21. Fotos tomadas con microscopio minerográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. Cristal de pirita fuertemente fracturado y alterado a hematita.	39
Figura 22. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) enrejado de vetillas rellenas de	

cuarzo, calcita y adularia. (c y d) Vetilla rellena de cuarzo, calcita blade, rutilo y con algunos cristales de formas cuadradas opacos (py).	40
Figura 23. Muestras de veta de cuarzo con textura crustiforme (izq) y coloforme (der) con bandas de galena y acantita.	41
Figura 24. Fotos tomadas con microscopio mineragráfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. Cristales de acantita relleno de cavidades de cuarzo.	41
Figura 25. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) Corte transversal de vetilla rellena por cuarzo y calcita botroidal. (c, d, e y f) enrejado de vetillas rellenas cuarzo, y calcita, atravesando a la andesita moderadamente alterada.	42
Figura 26. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) cristales de esfalerita intercrecidos en cristales de calcita. (c y d) vetilla rellena de cuarzo atravesando a la veta de calcita.	43
Figura 27. Fotos tomadas con microscopio mineragráfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. Cristales de esfalerita intercrecidos con calcita y cristales de acantita relleno de cavidades de la esfalerita.	44
Figura 28. Sección esquemática de los patrones de alteración en sistemas de epitermales de baja sulfuración. Modificado de Hedenquist et al. (2000).....	49

Resumen

La economía de México está influenciada fuertemente por la producción de recursos naturales no renovables que se han extraído desde la fundación del México Tenochtitlan misma que atrajo a los conquistadores para quedarse en una tierra desconocida y fue justamente la ruta de la plata la que fue extendiendo a la Nueva España y que sirvió para financiar los gastos de la corona española durante su apogeo. Desde entonces la minería ha sido un eje importante en la economía nacional. En especial México se ha distinguido por su alta producción de plata a nivel mundial e históricamente sus yacimientos epitermales de clase mundial de los que se extrae, entre los más importantes están los depósitos de Taxco, Guanajuato, Fresnillo, Zacatecas y Pachuca - Real del Monte. Se trata de yacimientos que han sido explotados por muchos años y que por ende han sido caracterizados por diferentes autores e incluso han servido para definir a los depósitos epitermales a nivel mundial.

El distrito minero Pachuca Real del Monte ha sido explotado por más de 500 años y aún hoy en día sigue siendo de importancia económica. En esta etapa de explotación se han retomado obras antiguas explotando las áreas de mineral diseminado y ramales de vetas con leyes promedio entre 120-200 g/ton de Ag por 1g/ton de Au. Actualmente con la utilización de nuevas técnicas de exploración se siguen buscando nuevos cuerpos mineralizados. En este trabajo se realizó una caracterización química – mineralógica de las vetas Calderona y Hormigueras que se encuentran expuestas en las obras de la mina El Cristo que se encuentra al norte de la Ciudad de Pachuca en el Cerro San Cristóbal, y pertenece al distrito minero de Real del Monte – Pachuca. Este depósito se encuentra en la provincia fisiográfica conocida como Eje Neo Volcánico Transmexicano. Las vetas del Distrito Minero Pachuca – Real del Monte se encuentran encajonadas en andesitas pertenecientes a las formaciones Cerezo y Pachuca que forman parte del Grupo Pachuca con una composición variable entre andesitas, riolitas y tobas. La caracterización textural e identificación mineral fue realizada con técnicas convencionales, tales como microscopía óptica de minerales transparentes y opacos, análisis de alteraciones hidrotermales con SWIR, análisis de polvos por difracción de Rayos X, análisis cuantitativos por Fluorescencia de rayos X y semicuantitativos por microscopía electrónica de barrido acoplada a análisis EDS y ensaye por copelación. Los minerales de ganga encontrados son cuarzo, calcita, adularia, rodonita y clorita, mientras que los minerales de mena son plata nativa, acantita, esfalerita, galena, pirita y calcopirita y además se reconocieron minerales secundarios como covelita, stromeyerita y argentojarosita. Las alteraciones presentes en las vetas son argílica, fílica y subpropilítica. En conjunto y basado en las relaciones texturales observadas en las muestras analizadas se puede ubicar al nivel 2550 de la mina El Cristo a la profundidad de ebullición de un modelo de depósito epitermal de baja a intermedia sulfuración, lo que significa que a mayores profundidades se seguirán encontrando valores de Ag-Au y que posteriormente comenzará a haber un enriquecimiento de metales base.

Abstract

The economy of Mexico is strongly influenced by the production of non-renewable natural resources that have been extracted from the founding of Mexico Tenochtitlán Misma that attracted the conquerors to stay in an unknown land and it was precisely the silver route that extended to New Spain and that served to finance the expenses of the Spanish crown during its heyday. Since then mining has been an important axis in the national economy. Especially Mexico has distinguished itself for its high production of silver worldwide and historically its world class epithermal deposits from which it is extracted, among the most important are the deposits of Taxco, Guanajuato, Fresnillo, Zacatecas and Pachuca - Real del Monte . These are deposits that have been exploited for many years and therefore have been characterized by different authors and have even served to define epithermal deposits worldwide.

The Pachuca Real del Monte mining district has been exploited for more than 500 years and is still of economic importance today. In this stage of exploitation old works have been resumed exploiting the areas of disseminated ore and branches of veins with average grades between 120-200 g / ton of Ag for 1g / ton of Au. Currently, with the use of new exploration techniques, new mineralized bodies are still being sought. In this work a chemical - mineralogical characterization of the Calderona and Hormigueras veins that are exposed in the works of the El Cristo mine that is located north of the City of Pachuca on San Cristobal Hill, and belongs to the mining district of Real del Monte - Pachuca. This deposit is located in the physiographic province known as Transmexican Neo Volcanic Axis. The veins of the Pachuca - Real del Monte Mining District are encased in andesites belonging to the Cerezo and Pachuca formations that are part of the Pachuca Group with a variable composition between andesites, rhyolites and tuffs. Textural characterization and mineral identification was performed with conventional techniques, such as optical microscopy of transparent and opaque minerals, analysis of hydrothermal alterations with SWIR, analysis of X-ray diffraction powders, quantitative analysis by X-ray Fluorescence and semiquantitative by electron microscopy scanning coupled to EDS analysis and assay by copelation. The bargain minerals found are quartz, calcite, adularia, rhodonite and chlorite, while ore minerals are native silver, cliff, sphalerite, galena, pyrite and chalcopyrite and also secondary minerals such as covelite, stromeyerite and argentojarosite were recognized. The alterations present in the veins are argillic, philic and subpropylitic. Together and based on the textural relationships observed in the analyzed samples, it can be located at the 2550 level of the El Cristo mine at the boiling depth of a low to intermediate sulfur epithermal deposit model, which means that at greater depths they will follow finding values of Ag-Au and that later will begin to have an enrichment of base metals.

1. Introducción

1.1 Generalidades de los yacimientos epitermales

Un yacimiento epitermal, tal como lo indica la etimología, se halla a escasa profundidad en referencia a la superficie terrestre y define la parte superior de los sistemas hidrotermales naturales. Se considera que las condiciones de formación de la mayoría de los yacimientos epitermales comprenden temperaturas entre $<150^{\circ}$ y $\sim 300^{\circ}$ C, y ocurren a profundidades desde la superficie hasta 1 ó 2 km, con presiones de hasta varios centenares de bares. (Camprubí *et al.*, 2006). De acuerdo con Camprubí *et al.*, (2006) la gran mayoría de los depósitos incluidos dentro de esta tipología tienen como roca encajonante a rocas volcánicas de edad Paleógeno-Neógeno en México y por lo tanto son de edad Paleógeno-Neógeno o posterior. La mayoría de los depósitos epitermales conocidos hoy en día están situados alrededor del margen Circum-Pacífico, dado que están asociados a márgenes de subducción activos en diferentes épocas geológicas.

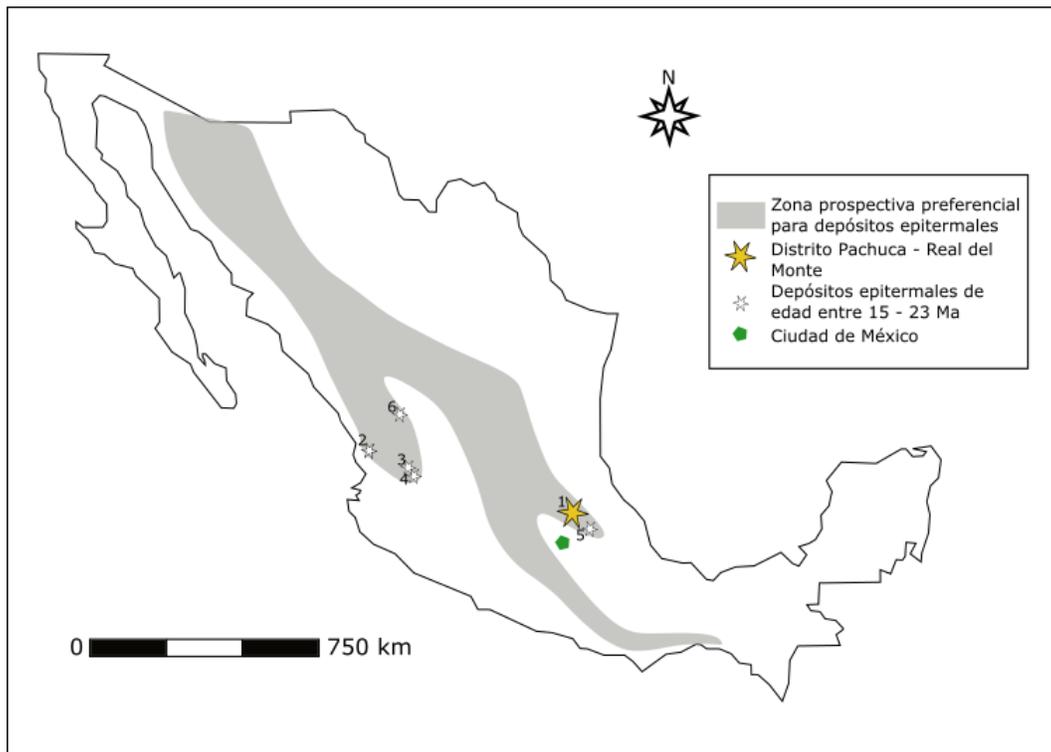


Figura 1. Mapa de la República Mexicana con la distribución de los yacimientos de tipo epitermal (franja gris). Se remarcan aquellos con edad promedio entre ~ 23 y ~ 18 Ma. 1) Pachuca-Real del Monte, 2) El Indio-Huajicori, 3) Bolaños, 4) San Martín de Bolaños, 5) Ixtacamaxitlán., modificado de Camprubí *et al.*, (2006).

En el caso de los depósitos epitermales en México hay de edad Paleógeno-Neógeno y se puede observar como la edad disminuye hacia el sur y hacia el este, en relación con la migración general del vulcanismo ácido de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur (Figura 1). Hay algunos más jóvenes del Plioceno-Pleistoceno que se encuentran asociados a los estadios iniciales del Eje Neo Volcánico Transmexicano.

En la mayoría de los casos, los depósitos epitermales están relacionados de forma espacial y temporal con vulcanismo subáereo, de composición ácido a intermedia. Asimismo, existe un importante control de este tipo de depósitos por parte de fallas de escala regional en zonas de intensa fracturación tensional. Estas fallas determinan la localización de los depósitos y actúan como guía para el emplazamiento de la fuente de calor magmática necesaria para la subsiguiente actividad hidrotermal, de acuerdo con Hedenquist, (1986) y Fournier (1987) citados por Camprubí (2006).

Aunque los modelos epitermales están definidos por características que los reúnen en esta tipología (figura 2), existen características químicas de los fluidos mineralizantes, responsables de la deposición mineral dentro del ambiente epitermal, que sirven como criterio en base al cual se establecen dos tipos principales de depósitos epitermales:

1. Epitermales ácidos
 - 1.1 Tipo alta sulfuración
2. Epitermales alcalinos neutros
 - 2.1 Tipo sulfuración intermedia
 - 2.2 Tipo baja sulfuración
 - 2.2.1 Relacionados con magmas subalcalinos
 - 2.2.2 Relacionados con magmas alcalinos

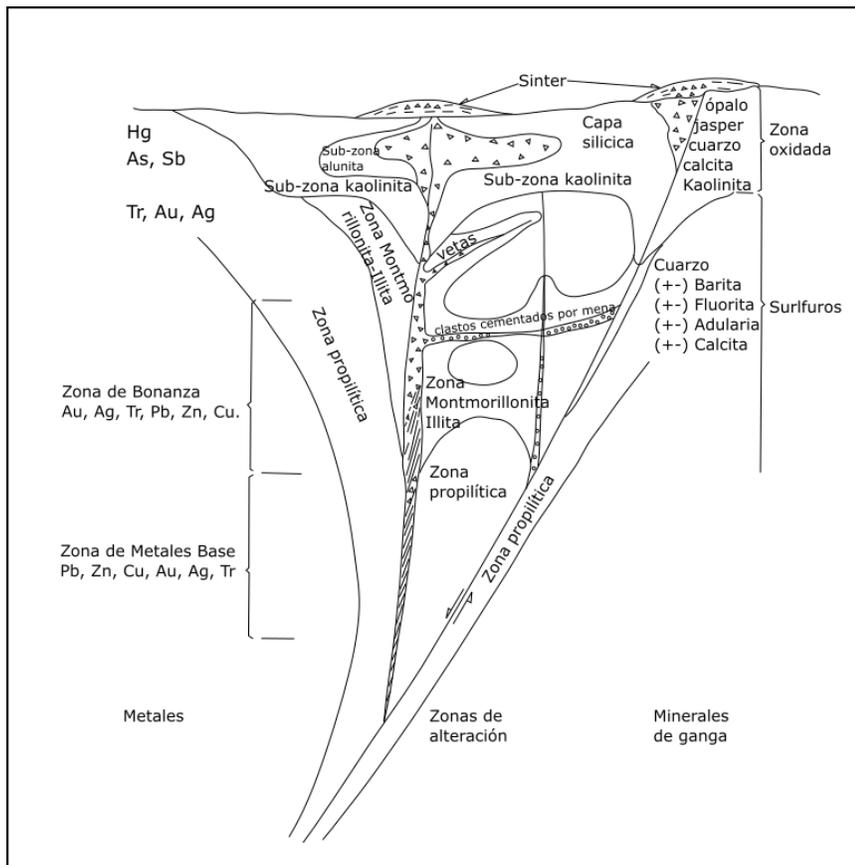


Figura 2. Modelo esquemático de un depósito epitermal, modificado de Hollister (1985).

Los depósitos epitermales de sulfuración intermedia y baja sulfuración en México que presentan una mineralogía de mena y unas asociaciones minerales más complejas son los depósitos de carácter polimetálico (figura 2). En depósitos como el de Pachuca – Real del Monte se ha observado una secuencia de precipitación característica en la gran mayoría de sus asociaciones de minerales metálicos: sulfuros de metales básicos y preciosos (pirita, esfalerita, galena, calcopirita, argentita-acantita), sulfosales de Cu+-Ag (tetraedrita-tennantita), sulfosales de Ag (proustita, pirargirita, pearceíta-polibasita, estefanita-arsenoestefanita, miargirita, billingsleyita) y sulfosales de Ag-Pb (diaforita, andorita, freislebenita, ramdohrita), es frecuente observar una íntima relación entre electrum, oro o plata nativos con Ag-Tetraedrita-Tennantita o pirita Camprubí *et al.*, (2006).

Como en la mayoría de los depósitos epitermales de sulfuración intermedia y baja sulfuración en México, los cuerpos mineralizados de Pachuca – Real del Monte están dispuestos en vetas y/o cuerpos brechificados de hasta varios kilómetros de extensión lateral, aunque en vertical los horizontes mineralizados con metales preciosos raramente superan los 700 m de profundidad.

1.2 Objetivo:

Realizar la caracterización químico – mineralógica de las vetas Calderona y Hormigueras mediante diferentes técnicas de identificación mineral, como microscopía óptica, DRX, FRX, SEM, para identificar las diferentes especies minerales presentes en la mina El Cristo.

1.3 Objetivos específicos

Realizar trabajo de campo en el cual se haga un muestreo puntual de muestras de interés y un mapeo dentro de las obras mineras para ubicar y describir las estructuras mineralizadas del distrito minero Pachuca – Real del Monte.

Caracterizar macroscópicamente las muestras colectadas en campo para su selección en estudios específicos mineralógicos. Describir por microscopía óptica aquellas muestras que presenten características de interés, para describir la textura y mineralogía de los minerales no reconocidos en la descripción megascópica.

Analizar mediante técnicas analíticas especializadas aquellas muestras de interés en las que sea imposible reconocer las especies minerales por los métodos anteriores.

1.4 Justificación

El Distrito minero de Pachuca – Real del Monte ha sido explotado por más de 500 años y representa uno de los yacimientos de tipo epitermal más importantes del mundo. Ha sido estudiado a detalle por numerosos geólogos a lo largo de su historia. Este trabajo tiene como fin aportar la mineralogía a detalle de una de las minas que están siendo explotadas en la actualidad, para continuar con la caracterización de asociaciones minerales, particularmente las alteraciones que serán útiles para ubicar paleoniveles dentro de este yacimiento histórico.

2.Marco Geológico

2.1 Localización

La mina el cristo se encuentra aproximadamente a 100 km al norte de la Ciudad de México, en el norte de la ciudad de Pachuca del estado de Hidalgo (figura 3). Está mina pertenece al distrito minero Pachuca – Real del Monte, el cual se encuentra en la Sierra de Pachuca, y tiene una orientación hacia el Oeste – Noroeste y se encuentra en el borde septentrional de la provincia fisiográfica del Eje Neo Volcánico Transmexicano. La provincia denominada Sierra Madre Oriental comienza al norte de la Sierra de Pachuca, pero se infiere que se encuentra subyaciendo a la Sierra de Pachuca.

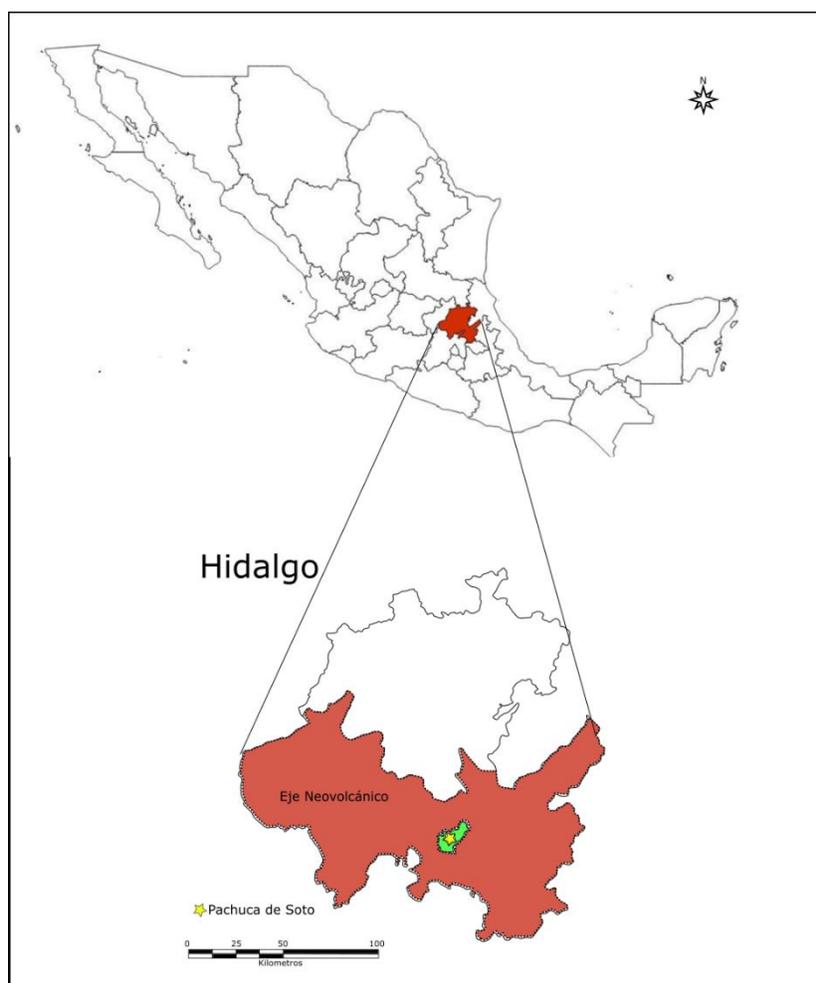


Figura 3. Mapa del estado de Hidalgo, resaltado en rojo está la provincia fisiográfica denominada Eje Neo Volcánico Transmexicano, en la cual se encuentra el Distrito Minero Pachuca – Real del Monte. Modificado de INEGI, (2005).

2.2 Estratigrafía

Las rocas volcánicas interestratificadas de edad Paleógeno-Neógeno que se conocen dentro del distrito de Pachuca – Real del Monte han sido divididas en 10 formaciones por (Geyne *et al.*, 1963), de las cuales ocho inferiores constituyen el Grupo Pachuca, las cuales fueron separadas de acuerdo con la relación de campo que los autores realizaron.

Dado que un ejemplar de mano, una lámina delgada o un afloramiento pequeño de roca, por lo general no puede identificarse con seguridad, solo a base de su petrografía, como perteneciente a una formación en particular, sin estudiar la sucesión estratigráfica completa del distrito, este trabajo se basará en las características otorgadas por Geyne en 1963 para cada miembro del grupo Pachuca (figura 4), las cuales se describen a continuación.

La formación volcánica más antigua que se conoce en el distrito minero y, por ende, la formación base del Grupo Pachuca se denomina Formación Santiago. Está constituida principalmente por toba, brecha y derrames de lava de composición variable de riolítica a dacítica. A continuación, con una discordancia erosional, sobreyace la Formación Corteza, que está compuesta por derrames basálticos y andesíticos con menor cantidad de brecha y toba. La próxima unidad sobreyacente, se conoce con el nombre de Formación Pachuca, consiste en derrames de lava, brecha y toba de composición dacítica y andesítica. Encima de esta unidad, se encuentra la Formación Real del Monte que se caracteriza por una predominancia de brecha de derrame de composición promedio entre andesítica y dacítica. La Formación Santa Gertrudis está compuesta de rocas andesíticas. Después se encuentra la Formación Vizcaína que consiste en derrames de lava, brecha y toba de composición andesítica y dacítica. Sobreyaciendo se encuentra la Formación Cerezo que está constituida por derrames de lava, brecha y toba de composición variable de dacítica a riolítica. Finalmente tenemos a la Formación Tezuantla compuesta principalmente por derrames de lava de composición riolítica y representa la parte superior del grupo Pachuca. Geyne *et al.*, (1963)

Las siguientes dos formaciones más jóvenes del distrito no se han incluido en el grupo Pachuca por tener evidentes rasgos que las excluyen de los eventos que formaron a las unidades del grupo. La Formación Zumate consiste principalmente de brecha y derrames de lava de composición andesítica. La formación volcánica Paleógeno-Neógeno más joven dentro del distrito es la Formación San Cristóbal, la cual tiene una composición principalmente andesítica, con variaciones desde andesita de olivino a basalto; esta formación es famosa por ser la localidad tipo donde se encontraron los minerales tridimita y cristobalita los cuales fueron indexados por Vom Rath en 1868 y 1887 respectivamente.

Varias líneas de evidencia señalan que la fuente de una gran parte de las rocas volcánicas estuvo en la actual sierra de Pachuca, ya sea dentro o cerca del distrito minero. Quizás la mayor evidencia consiste en los mismos derrames de lava, ya que lavas tan viscosas como debieron haber sido las que alimentaron a los derrames riolíticos, dacíticos y andesíticos del distrito, no puede esperarse que hayan escurrido más que unos cuantos kilómetros.

En diferentes partes del distrito se describieron la presencia de numerosos cuerpos intrusivos compuestos de pórfidos dacíticos y cuarcíferos de edad Paleógeno-Neógeno. De manera general los

diques y cuerpos intrusivos más grandes de edad pre-Zumate coinciden en rumbo NO-SE con las fracturas que forman parte del sistema oriental de fracturas, tanto en el área de Pachuca como en el de Real del Monte, mientras que los diques paralelos a las fracturas del llamado sistema norte de fracturas del área de Real del Monte, son notablemente raros; razón por las que Geyne concluye que el sistema norte de fracturas se desarrolló después del emplazamiento de los diques de composición silícica o intermedia.

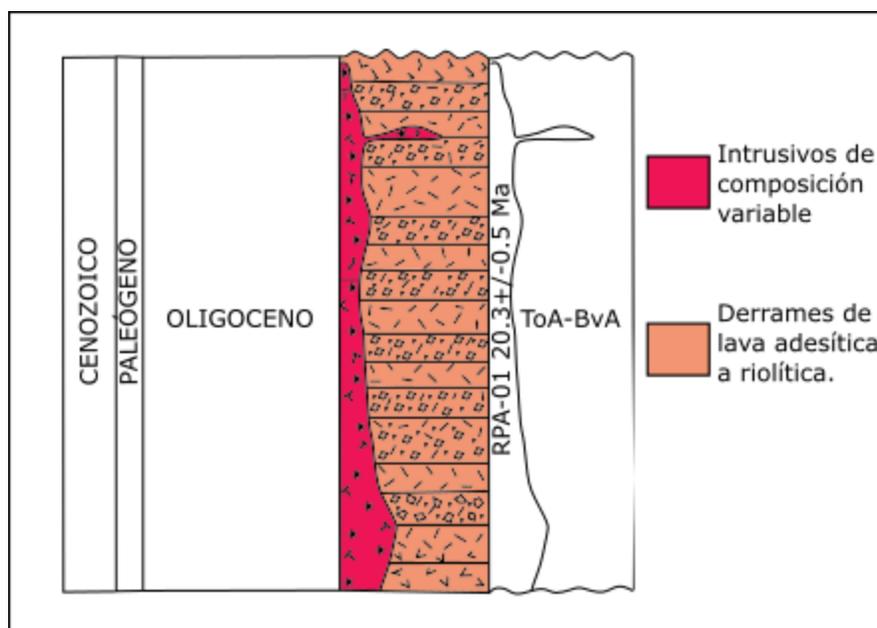


Figura 4. Columna estratigráfica. Las vetas del Distrito minero Pachuca – Real del Monte se encuentran encajonadas en los derrames de lava que componen al grupo Pachuca, en orden de antigüedad las formaciones que lo componen son las siguientes: Santiago, Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaína, Cerezo, Tezuntla; definido por Geyne et al., (1963) pertenecientes al oligoceno. Modificado de SGM.

2.3 Edad

Las edades de las rocas dentro del distrito han sido inferidas principalmente por la relación estratigráfica entre las unidades volcánicas y las unidades sedimentarias que las subyacen y las cuales se encuentran aflorando fuera del distrito. Se trata de un conglomerado de clastos de caliza que se refiere en el grupo El Morro, el cual se considera de una edad Eoceno tardío y Oligoceno temprano tomado en consideración una correlación estratigráfica con el conglomerado Guanajuato en el cual se han encontrado vertebrados fósiles, por lo que se concluye que la Formación Santiago no tiene una antigüedad mayor que el Oligoceno temprano. La evidencia para la edad de la parte superior del Grupo Pachuca consiste en impresiones de hojas fósiles en capas de arenisca tobacea y de limonita de la parte inferior de la Formación Cerezo. Las especies que se encontraron son *Quercus sp.*, una especie de encino, *Phoebe sp.*, una especie de laurel, *Arctostaphylos sp.*, y otras cuantas dicotiledóneas.

De acuerdo con las observaciones de Geyne la Formación Tezuntla es la roca volcánica premineral más joven en el distrito minero, mientras que la Formación Zumate es la roca volcánica posmineral

más antigua del distrito, lo que indica que la mineralización tuvo lugar durante mediados del Plioceno.

Posteriormente mediante una datación por medio de K-Ar, McKee (1992) obtiene una edad de 20.3 ± 0.5 Ma de las rocas alteradas por hidrotermalismo. La muestra utilizada para la datación es una andesita fuertemente alterada por adularia y metasomatizada por potasio, tomada del borde de la veta Maravilla a lo largo de la carretera Pachuca-Cerezo a unos cuantos kilómetros de la Ciudad de Pachuca.

Finalmente, Camprubí *et al.*, (2003) concluyen que los depósitos de estas edades están relacionados con el último episodio de ignimbritas de la Sierra Madre Occidental.

2.4 Estructuras

Las rocas marinas Cretácicas de la región fueron intensamente plegadas en el intervalo entre el Cretácico más tardío y el Eoceno tardío, durante la orogenia Laramide. El arreglo de los pliegues refleja un sistema regional de fuerzas en el que la fuerza principal mayor estuvo orientada en la dirección este-suroeste, mientras que la fuerza principal menor tuvo una orientación prácticamente vertical Geyne *et al.*, (1963).

Las rocas del Paleógeno-Neógeno más antiguas de la región, consistente en rocas clásticas continentales del Grupo El Morro formadas por material erosionado de las rocas cretácicas, se cree que comenzaron a depositarse hacia el final del Eoceno Geyne *et al.*, (1963). El plegamiento había cesado y la erosión había removido las crestas o charnelas de los anticlinales, antes de que estas rocas del Paleógeno-Neógeno más antiguas empezaran a depositarse, de acuerdo con la evidencia topográfica y estratigráfica. El fallamiento normal había alcanzado un estado muy activo, dando lugar a la acumulación de estos depósitos clásticos en las fosas (grabens) mientras seguía el fallamiento. Es decir, tectónicamente la región pasó desde una fase de plegamiento hasta una de fracturamiento y fallamiento normal.

A principios del Oligoceno, mientras el volcanismo se extendía por el distrito de Pachuca, el fallamiento había cesado casi por completo, por consiguiente, el sistema regional de esfuerzos experimentó otro cambio en que los esfuerzos principales horizontales llegaron a ser casi iguales a los esfuerzos principales y el sistema de esfuerzos en la región se acercó al estado normal.

Los elementos tectónicos mayores de acuerdo con Geyne *et al.*, (1963) consisten en la Falla Vizcaína-Rosario, que atraviesa el distrito en una dirección general noroeste –sureste y termina en ambos extremos al dividirse en ramales divergentes. A esta falla se le reconoce como una falla “pivote” o de “bisagra”, al oriente de esta falla se ha hundido el lado sur de la falla y al poniente de ella se ha hundido el lado norte. Paralela y al lado sur de la falla se encuentra la Depresión Central, cuya parte más honda está cerca del centro del distrito y se designa aquí con el nombre de Fondo. La Depresión Central contiene numerosas fallas, entre las cuales se encuentra la Santa Gertrudis – Pinta – Regla que se le considera de importancia especial. Paralelo a la Depresión Central y hacia el suroeste, se encuentra el Arco Cubitos, que representa el elemento tectónico más elevado del distrito. El Arco Cubitos tiene un Flanco Suroccidental. Al norte de la Falla Vizcaína la Plataforma Real del

Monte ocupa una gran área cerca de la parte centro – oriental del distrito. Al poniente de la plataforma se halla la Cuenca Cerezo – Zumate, un área hundida cubierta por las Formaciones Cerezo y Zumate que se extiende hacia el norte del límite del distrito. La plataforma Real del Monte y la Cuenca Cerezo – Zumate están separadas por una ligera combadura Geyne *et al.*, 1963.

De acuerdo con las observaciones realizadas durante el trabajo de campo de los diversos geólogos que contribuyeron a los registros de la Cia. Real del Monte se propone el siguiente orden de los elementos tectónicos: La parte de la Sierra de Pachuca en que se encuentra el distrito minero comenzó a hundirse, dejando los Flancos originales Suroccidental y Nororiental. En este periodo inicial comenzaron a formarse las Fallas Vizcaína – Rosario Viejo y Santa Gertrudis – Pinta – Regla, acompañadas por la iniciación de la Depresión Central, que dejó el Arco Cubitos entre la Depresión Central y el Flanco Suroccidental. El lado norte de la Falla Vizcaína llegó a ser una plataforma deprimida y casi horizontal, situada entre la Falla Vizcaína y la línea de bisagra con el Flanco Nororiental. Esto fue seguido por el hundimiento inicial de la Cuenca Cerezo – Zumate, dejando la Plataforma Real del Monte. Los otros elementos tectónicos ya mencionados continuaron desarrollándose, acompañados por el fallamiento normal extenso y culminado con la mineralización metálica. Después de la mineralización siguió hundiéndose la Cuenca Cerezo – Zumate, hubo fallamiento normal adicional de grado menor, seguido por fallamiento lateral significativo. (Figura 5).

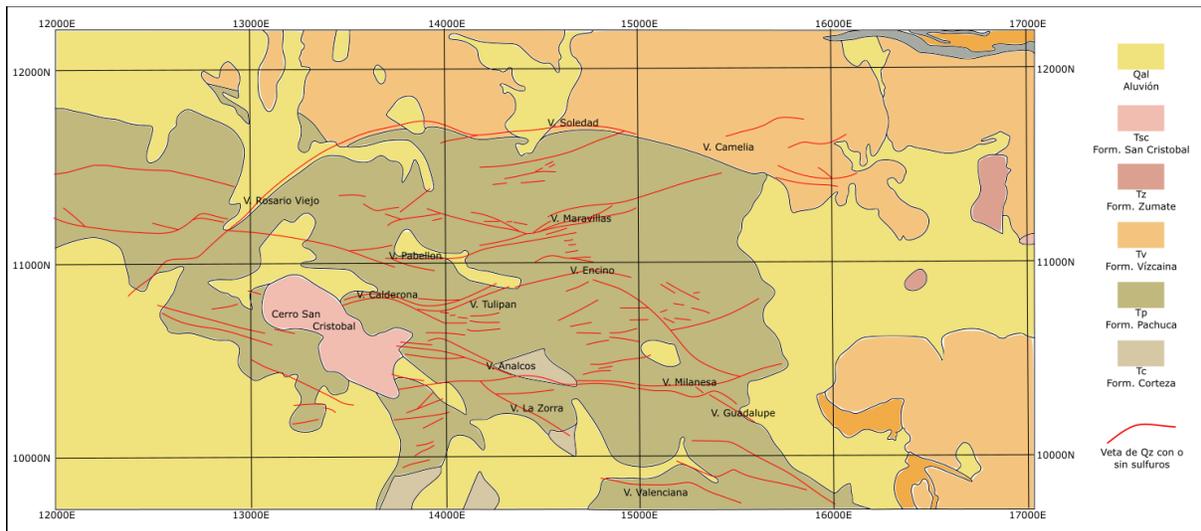


Figura 5. Sección del mapa de la geología superficial del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte. Modificado de Geyne *et al.*, 1963.

2.5 Mineralogía de las vetas de acuerdo con estudios anteriores

De acuerdo con los estudios realizados durante los periodos de explotación del distrito se sabe que la mineralización se encuentra encajonada en rocas volcánicas Paleógeno-Neógenas con una composición variable entre basalto y riolita, pero los tipos más comunes son la dacita y la andesita. Las rocas han estado sometidas, en grado variable, a uno o más de los siguientes procesos de alteración hidrotermal: propilitización, cloritización, silicatización, albitización, caolinización, sericitación, piritización y calcitización.

Los minerales primarios y secundarios identificados en las vetas del distrito llegan en número a unas 25 especies, entre estas, las más comunes consisten en sulfuros innobles primarios, sulfuros argentíferos primarios, cuarzo, calcita, albita y rodonita o bustamita. Entre los minerales innobles la pirita es el mineral más extendido, seguido por la esfalerita, galena, y calcopirita. Los principales sulfuros argentíferos son argentita, acantita, polibasita y la estefanita que se encuentran en menos de la mitad de las vetas del distrito hallándose en gran parte en el área de Pachuca, son raras la miargirita, pirargirita, proustita y sternbergita. El oro nativo se observó solo en muestras procedentes de algunas vetas. Los sulfuros cupríferos secundarios, tales como la calcosita y la covelita, son comunes, aunque en cantidades pequeñas.

El cuarzo, incluyendo la variedad amatista, el ópalo y la calcedonia, es el mineral más abundante de ganga de todas las vetas. La calcita se encontraba en todas las vetas en pequeñas cantidades.

La clorita, prehnita, caolín, barita, sericita, adularia, epidota y otros minerales de ganga presentes en cantidades que difieren considerablemente de uno a otro lugar, pero generalmente son menos abundantes que los minerales anteriormente mencionados en la ganga.

2.6 Reseña histórica del distrito minero de Pachuca – Real del Monte

Hasta 1963 el distrito minero de Pachuca – Real del Monte había producido el 16 por ciento de la producción total de plata mexicana, el equivalente al 6% de la plata extraída en todo el mundo durante los últimos cuatro siglos y medio (Geyne *et al.*, (1963)).

Leyendas de la fundición prehispánica de minerales argentíferos en las cercanías de Pachuca se aceptan generalmente casi como un hecho histórico. Cortés personalmente vio adornos y utensilios de plata en el tesoro de Moctezuma, parte de la cual probablemente tuvo su origen en Pachuca.

De acuerdo con Alan Probert para Geyne *et al.*, (1963) la historia del distrito se puede dividir en cinco periodos principales:

1) Los primeros doscientos años posteriores a la Conquista.

En 1528 Francisco Téllez llegó a la Sierra de Pachuca y junto con sus soldados arrasó con el pueblo que se encontraba en los costados de del río en la barranca aguas arriba de la cuenca, es decir un poco al norte de donde actualmente se encuentra la hacienda de beneficio de Loreto, al norte de la ciudad de Pachuca. Comenzaron la explotación de mineral argentífero en las menas aflorantes que se prestaron a la fundición como método de beneficio.

Para 1555 el sistema de beneficio consistía en la trituration del mineral en arrastres, hasta un lodo fino seguido por el traspaso del lodo a patios pavimentados con lajas, en donde se drenaba y se extendía para rociarlo con mercurio. La preparación para la amalgamación consistía en la conversión de los minerales de plata a cloruros por medio del rocío con sal cruda, con la adición de sulfato de cobre. El contacto íntimo entre el mineral, los reactivos químicos y el mercurio se lograban por medio de las pisadas, al principio por los indios descalzos, quienes posteriormente fueron reemplazados por caballos. Este sistema duró 350 años sin ninguna modificación, hasta el advenimiento de la cianuración.

Para este periodo Real del monte contaba con 26 haciendas de beneficio, en las cuales en promedio se trabajaba un tonelaje medio anual de 300 toneladas de mineral cada una. Para este periodo se debe considerar una ley promedio variable entre 600 y 2500 gr de plata por tonelada.

Las minas a lo largo de la gran veta Vizcaína en el área de Real del Monte se iban agotando en sus niveles superiores, arriba del límite económico del desagüe, esto se agravo con un brusco descenso de la producción por la escasez de mano de obra, por lo que para 1732 prácticamente se abandonaron todas las minas a lo largo de la veta Vizcaína.

2) Desde el proyecto de desagüe en 1738 hasta las guerras de independencia en 1810

Para el 1° de junio de 1739 don José Alejandro Bustamante junto con otros 30 socios obtuvieron la concesión de todas las minas a lo largo de la veta Vizcaína. Asignaron la quinta parte de las utilidades a proyectos para el establecimiento de tres instituciones caritativas nuevas, un Refugio para Pobres, un Orfanato y un Real Monte de Piedad para suministrar fondos a los necesitados.

El plan de desagüe consistió en la construcción de dos socavones paralelos, para llegar al original Socavón del Tesoro, tarea que tardo años en producir ganancias, por lo que varios socios se retiraron de la empresa y al mismo tiempo llegó Pedro Romero de Terreros, quien expresó gran interés en el proyecto. Después de inconvenientes, y una mayor inversión, para 1754 Romero de Terreros encontró importantes cuerpos de mineral de los que extrajo unos 171,000 kg de plata. Gracias a las ganancias obtenidas se pudo seguir con el desagüe y posterior acceso a la mayoría de las frentes abandonadas e inundadas. Con esto pudo contribuir con 20 por ciento de sus riquezas para las instituciones caritativas previamente nombradas.

Para esta época el distrito aun rendía tributo a la Corona Española y dada la riqueza de las minas en 1769 el Rey Carlos III concedió a don Pedro el título de Conde de Regla. El Conde hizo préstamos a la corona, muchos de los cuales no le fueron pagados, sin embargo, el Conde le regalo al Rey un buque de guerra con tres cubiertas, hecho de caoba y cedro y con 112 cañones montados, construido en los astilleros de La Habana. Este buque costo aproximadamente 2,500,000 pesos.

Para 1781 a la muerte del Conde sus minas habían rendido 300,000 kg. El segundo Conde, su hijo, fue menos afortunado, durante los siguientes 13 años hasta 1794, se produjeron solamente 10,700 kg de plata. Antes de permitir que el agua subiera, el Conde mandó que se examinaran todas las frentes y que se hicieran informes escritos acerca de las distancias entre obras y vetas.

El segundo conde murió en 1809, dejando un hijo único quien heredo el título, las minas y todos los bienes.

3) Modernización bajo la gerencia sucesiva de dueños privados ingleses, mexicanos y norteamericanos, hasta 1906.

Durante el periodo de la Independencia cesó la explotación minera. El tercer conde permitió a su administrador, don José Rodrigo Castelazo, ingeniero graduado de la Escuela de Minas de la Ciudad de México, realizar trabajos de comprobación para conservar las propiedades mineras.

En 1821 con la Republica fundada el Conde y Castelazo prepararon un informe apropiado para la organización de una compañía a base de acciones de participación, para la rehabilitación de las minas de la veta Vizcaína.

A fines de 1823 Rivafinoli, Kinder, John Taylor y otros más decidieron formar la Compañía de Caballeros Aventureros de la Minas de Real del Monte. Y mediante muchos esfuerzos lograron traer desde Liverpool bombas cónicas para el desagüe, accionadas por vapor, que dejarían atrás el uso de los malacates. Se instalarían también sierras accionadas por vapor, así como molinos de mazos para triturar las menas. Las extensas áreas pobladas por árboles de esa época estuvieron destinadas a pagar fuerte tributo al progreso mecánico, al suministrar combustible para las calderas de vapor.

En junio de 1827 se puso a trabajar la primera bomba de vapor en la mina Dolores, con un consumo diario de 3 cargas de leña de 135 kg cada una. El 15 de septiembre de 1827 se entregó a la Casa de Moneda en la Ciudad de México el primer pequeño embarque de plata con valor de 19, 272 dólares. En 1846 murió don Pedro Romero de Terreros, el tercer conde, quien había concedido sus minas a perpetuidad. A pesar de la bonanza durante ese periodo no se había alcanzado la inversión inicial, lo que dejaba pérdidas por más de 4,000,000 de pesos. En octubre de 1848 se hizo la venta a los propietarios mexicanos por parte de la compañía británica. En este periodo se comenzó a explotar la veta Rosario, produciendo 501, 508 kg de plata entre 1853 y 1862. Las menas procedentes de las vetas del sistema oriente – poniente eran susceptibles al tratamiento por amalgamación, mientras que las del sistema norte – sur eran refractarias, con leyes promedio de entre 1 y 1.25 kg por tonelada de plata.

4) Periodo bajo explotación privada desde 1906 a 1947

El siglo XX trajo los cambios más marcados en la historia de la minería del distrito de Pachuca. Durante la primera década la conversión de las plantas de amalgamación al proceso de cianuración volvió a revolucionar el beneficio del mineral. La fuerza eléctrica se introdujo en escala cada vez mayor. La invención de la bomba centrífuga simplificó el desagüe y permitió trabajar a profundidad a menor costo. La exploración en el subsuelo se activó notablemente con el uso de barrenas de diamante para sacar núcleos de roca.

En 1920 se cambió al actual nombre de Compañía de Real del Monte y Pachuca.

Para 1947 la United States Smelting, Refining and Mining Company vendió su participación en la Compañía de Real del Monte y Pachuca al gobierno de México.

5) Prolongación de la vida productiva del Distrito bajo la dirección del gobierno mexicano desde 1947 a 1990.

Con la compra de la Cía. De Real del Monte y Pachuca en 1947 en 3,500,000 dólares por la Nacional Financiera, corporación financiera gubernamental, la explotación del distrito pasó totalmente a manos del gobierno mexicano hasta 1990.

El promedio de ley del mineral extraído en 1947 fue cerca de 350 gr de plata y 3.5 gr de oro por tonelada. En 1948 la compañía de Real del Monte y Pachuca construyó y puso en operación una

planta de flotación para 100 toneladas diarias, con objeto de tratar la mena con ley relativamente alta en metales innobles (sulfuros de plomo y zinc) procedentes de una parte del área de Real del Monte.

Dado que el trabajo realizado por Geyne *et al.*, fue publicado en 1963, y el yacimiento sigue siendo explotado hasta el día de hoy se puede agregar un periodo a la reseña histórica de la explotación del Distrito Minero Pachuca – Real del Monte.

6) Reincorporación al sector privado de 1990 hasta la actualidad.

En 1990 es adquirida por el Grupo Acerero del Norte pasado así nuevamente al sector privado. Desde 2006 la exploración ha sido dirigida por joint venture entre Solitario Resources y Newmont Mining en áreas ya explotadas, y en las áreas al norte y noroeste con aparente potencial de extensión Del Rio-Torres (2009). Actualmente la producción proviene de tres minas distribuidas en el distrito:

Al norte del distrito cerca del poblado El Chico esta la mina Capula con una ley variable entre 150-180 g/tn de Ag. Al E de la hacienda de Loreto se encuentra la mina El Rosario con una ley mayor a 120 g/tn de Ag y con una producción promedio de 9000 tn al mes. Al N de la Ciudad de Pachuca en el Cerro de San Cristóbal se encuentra la mina El Cristo con ley variable de Ag entre 150-180 g/tn y una producción promedio de 6000 tn al mes. Y cuentan con dos proyectos por reabrir, proyecto Paricutin y Mina Santa Gertrudis.

3. Metodología

Para el presente trabajo se realizó un muestreo puntual dentro de los laboríos mineros de la mina El Cristo (figura 6) en el nivel 2550 y en la parte superficial, para el cual se tomaron muestras de diferentes tipos entre los que se tienen muestras de roca encajonante, muestras de vetillas con sulfuros, muestras de alteración, muestras de zona de falla, las cuales fueron agrupadas en siete grupos diferentes de acuerdo con los lugares donde fueron colectadas, los grupos descritos más adelante son Grupo C, que se refiere a muestras tomadas de la veta Calderona, Grupo H conformado por muestras tomadas de la veta Hormigueras, Grupo CH, muestras tomadas en los ramaleos de mineralización ubicados entre las Vetas Hormigueras y veta Calderona, Grupo CA que está integrado por andesitas en puntos intermedios de la veta Calderona, Grupo HW que está compuesto por muestras tomadas en diferentes puntos de la rampa 220, donde se conoce como el alto de veta Hormigueras, Grupo NS que comprende muestras tomadas de las vetas que conforman el sistema Norte – Sur el cual no tiene un nombre definido, y finalmente el grupo P, que trata de muestras tomadas en superficie en el área conocida como Pabellón, donde aflora la veta Maravillas.

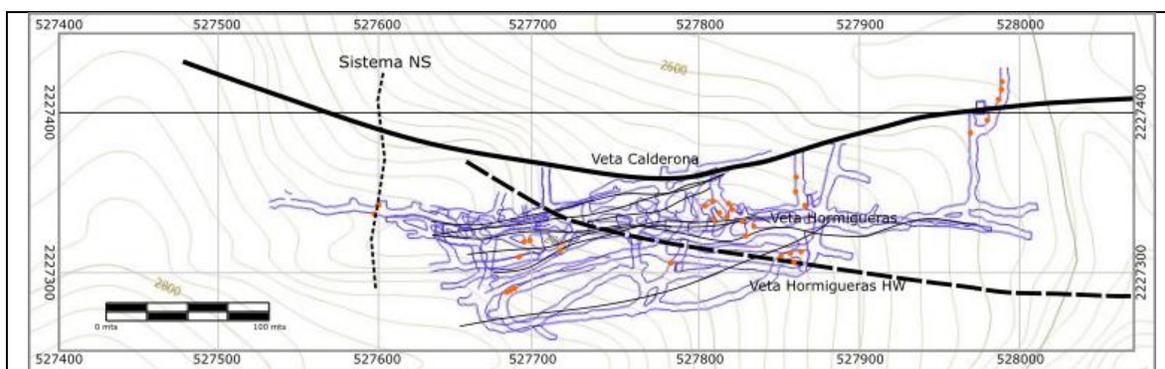


Figura 6. Mapa con la distribución espacial de las muestras en la mina El Cristo.

Para la caracterización de estas muestras, primero se describieron todas las muestras colectadas a nivel macroscópico, y aquellas con minerales no reconocibles en las vetillas fueron analizadas mediante la Nitón la cual esta calibrada para identificar mediante FRX valores de algunos elementos, particularmente de Ag. Se seleccionaron muestras tipo, representativas de mena donde los valores de la Nitón superan los 1000 ppm de Ag para realizar preparaciones como superficies pulidas calidad espejo para el análisis minerográfico de minerales opacos por luz reflejada y posterior análisis por Microscopio Electrónico de Barrido (Scanning Electron Microscope, SEM), también se seleccionaron muestras para preparar láminas delgadas para hacer la petrografía de las rocas encajonantes y descripción de las texturas de vetas mediante luz transmitida. Algunas muestras fueron utilizadas para identificar minerales de alteración mediante el espectrograma geoquímico obtenido por Difracción de Rayos X de polvos, así como análisis semicuantitativos de elementos mayores y de elementos traza por Fluorescencia de Rayos X. Finalmente algunas muestras fueron analizadas mediante copelación para analizar contenido de Au en muestras donde las vetillas eran muy pequeñas para ser analizadas mediante otras técnicas. A continuación, se describe brevemente los principios de cada técnica de análisis empleada.

3.1 Nitón

El Thermo Nitón es un analizador portátil para el análisis de elementos ligeros, es un instrumento con bajo nivel de detección para análisis de medición rápidos de XRF. Este analizador es capaz de detectar elementos ligeros sin la necesidad de recubrir o hacer una preparación especial de la muestra o condiciones de vacío para el análisis.

Equipo usado Thermo Niton XL3t GOLDD +, calibrado para la lectura de Ag y Au principalmente (figura 7). El equipo pertenece a la Compañía Minera Pachuca-Real del Monte.



Figura 7. Toma de lectura con Nitón a muestras de mano.

3.2 Minerografía

La minerografía es la parte de la mineralogía óptica que trata de las técnicas empleadas en la identificación microscópica de minerales opacos, para lo cual se requiere de un microscopio minerográfico, un microscopio con prácticamente los mismos elementos que el microscopio petrográfico, sin embargo, con una gran diferencia la luz polarizada es reflejada por la muestra en lugar de ser transmitida. Hernández *et al.*, (2019)

La superficie del material de mena o de un mineral que se va a estudiar en un microscopio minerográfico debe ser pulida hasta tener calidad espejo, sin pátina, con relieve casi nulo y libre de rayas ocasionadas por el pulido. La preparación debe colocarse en forma horizontal, para alcanzar esta característica se coloca en un portaobjetos con plastilina y se pasa por una prensa. La superficie pulida pasa a ser un elemento del microscopio minerográfico.

Propiedades observadas con luz paralela: Color, Reflectividad, Birrefractancia, Pleocroísmo y Dureza de pulido.

Propiedades observadas con nicoles cruzados: Anisotropía y extinción, Reflexiones internas, Maclados, Forma y hábito, Crucero y clivaje.

3.3 Petrografía

La mineralogía óptica o petrografía es la rama de la mineralogía que estudia las propiedades ópticas de los minerales transparentes cuando son analizados con un microscopio petrográfico de luz transmitida. Medina *et al.*, (2019)

El microscopio petrográfico (o de polarización) es un microscopio de los más utilizados en trabajos geológicos. Sirve para la determinación de las propiedades ópticas, identificación de los minerales, estudio de texturas y relaciones entre los minerales y clasificación de rocas.

Propiedades observadas con luz paralela: Color, Pleocroísmo, Forma, Clivaje, e Índice de refracción.

Propiedades observadas con nicoles cruzados: Anisotropía, Birrefringencia, Extinción, Elongación y Maclas.

Propiedades observadas con iluminación conosópica: Carácter y signo óptico (figura de interferencia), ángulo $2v$.

Para este trabajo se elaboraron catorce superficies pulidas y siete laminas delgadas de roca, la preparación de las muestras fue realizada por Brandt E&M. El estudio de las superficies pulidas calidad espejo y de láminas delgadas de roca fue realizado en el laboratorio de Yacimientos Minerales y la toma de fotos se realizó en el Laboratorio de Microscopía para la Investigación (LAMIP) de la Facultad de Ingeniería UNAM.

3.4 Microscopio Electrónico de Barrido (Scanning electron microscope, SEM)

El microscopio electrónico de barrido se basa en la obtención de una imagen de la muestra a partir de un barrido de esta con un haz de electrones, como resultado de la interacción entre los electrones incidentes y la muestra. El SEM se compone de un cañón de electrones con un filamento emisor de electrones, lentes magnéticas que dirigen y focalizan el haz de electrones sobre la muestra, un sistema de barrido porta muestra móvil y con giro universal, sistemas de obtención de imagen y de análisis Malgarejo *et al.*, (2010).

El número de electrones del haz incidente que son retrodispersados depende de la composición química promedio del mineral excitado. De este modo, cuanto más alto sea el promedio de los números atómicos de los elementos que compone el mineral analizado, tanto mayor será el número de electrones retrodispersados. Lo que significa que los minerales con elementos pesados emiten más electrones retrodispersados que los ligeros, de modo que los detectores captan mucha más intensidad y, por tanto, transmiten a la pantalla una imagen brillante. Mientras que los minerales con elementos más ligeros serán más oscuros Ostrooumov, (2009).

Los microscopios electrónicos de barrido pueden incorporar un detector de rayos X de tipo dispersivo en energía (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) que permite identificar cuáles son las energías de los rayos X emitidos por la muestra y así saber que elementos químicos existen en la muestra.

Las especificaciones del equipo utilizado para el análisis de las muestras para este trabajo son las siguientes.

Microscopio Electrónico de Barrido Zeiss EVO|MA10 con un detector/analizador Bruker SFlash6|10 y un detector NTS BSD, con un voltaje de 15.00 Kv (figura 8). Este equipo se encuentra en el laboratorio de Microscopía Electrónica del Instituto de Geología de la UNAM.

Para estos análisis se utilizaron superficies pulidas y pequeños fragmentos de cristales seleccionados de muestras de fallas (muestras molidas) mediante el uso del microscopio estereoscópico.



Figura 8. Microscopio Electrónico de Barrido Zeiss EVO|MA10 con un detector/analizador Bruker SFlash6|10 y un detector NTS BSD, con un voltaje de 15.00 Kv. Instituto de Geología UNAM.

3.5 Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X, es un método de análisis *instrumental*, que permite la *identificación mineralógica por su estructura cristalina*. Se basa en la distribución regular de los átomos del mineral, formando las redes cristalinas que se repiten de manera periódica, poniendo en evidencia las celdas unitarias de los minerales.

Los planos cristalográficos y las distancias interplanares son, por tanto, características particulares de cada muestra. De la interacción de los rayos X con los planos cristalográficos de la sustancia, se obtiene un conjunto de líneas características o picos, para esa sustancia, lo que se conoce como patrón de difracción o difractograma, equivalente a sus huellas dactilares, a través de la cual puede identificarse. El análisis se realiza sobre el material reducido a un polvo fino ($< 75 \mu\text{m}$), requiriéndose no más de un gramo de muestra (figura 9). En general, el límite de detección para esta

técnica es de alrededor del 1%, por lo tanto, sólo es aplicable para identificar macroconstituyentes cristalinos. La identificación de minerales se realiza por comparación de los datos obtenidos del difractograma con los datos teóricos reportados en la Base de Datos Internacional JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

El método de identificación consiste en: obtener el ángulo 2θ de reflexiones; medir la intensidad reflejada y calcular, mediante la ley de Bragg, las distancias interplanares.

Una sustancia bien cristalizada y homogénea se caracteriza por los picos de difracción altos y estrechos, mientras que un compuesto de baja cristalinidad y no homogéneo proporciona los máximos anchos y bajos (Ostrooumov, 2009).

Para el análisis de todas las fases minerales presentes, la muestra de mineral o de roca a identificar se pulveriza cuidadosamente, y el polvo se dispone en un porta muestras (con unos cuantos mm^3 es suficiente) (Figura 10).

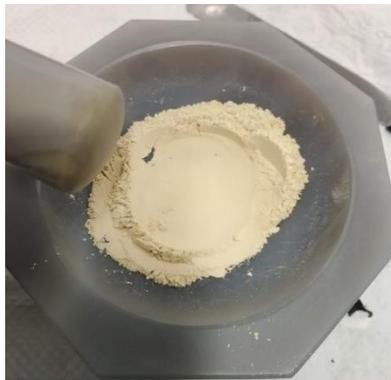


Figura 9. Molienda de la muestra con mortero de ágata.



Figura 10. Muestras para análisis de todas las fases presentes.

El difractor consiste en una fuente productora de rayos X, un portamuestras montado sobre un goniómetro giratorio con un rango de escaneo de 4° a 70° y un detector. El difractograma es un gráfico que en abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente (figura 11).



Figura 11. Difractómetro de Rayos X marca Siemens modelo D5000. Instituto de Geología UNAM.

Para la identificación de las arcillas de alteración, se toma la muestra original y se tritura finamente sin moler, se coloca en un tubo de ensayo y se le agrega agua destilada, aproximadamente 50 ml. Se agita durante varias horas con la finalidad de separar la parte más fina de la muestra, de la cual se toma por medio de un gotero pequeñas cantidades que se depositan en portamuestras de vidrio, los cuáles se dejan secar al aire; uno de ellos se calcina a 550° por 1 hora, al segundo se le trata con etilenglicol y al tercero no se le da ningún tratamiento. Las 3 preparaciones son analizadas en el difractómetro en el intervalo angular de $4-35^{\circ}$. Una vez obtenidos los difractogramas, se grafican y es entonces cuando, de acuerdo a las variaciones en las gráficas se puede identificar el tipo de arcilla presente (figura 12).



Figura 12. Muestras para el análisis de arcillas en la parte fina.

El equipo utilizado para el análisis de las muestras de este trabajo se encuentra en el laboratorio de Fluorescencia por Rayos X en el Instituto de Geología de la UNAM, (figura 13) y sus características son las siguientes.

El instrumento es un Difractómetro marca Siemens modelo D5000 y consta de:

- Generador de rayos X Siemens K 710H, Potencia 3 kW.
- Tubo de rayos X de Cu tipo FK 60-04 x 12.
- Goniómetro vertical Bragg-Bretano automático con detector de centelleo.
- Monocromador secundario de grafito en entrada del detector.



Figura 13. Difractómetro marca Siemens modelo D5000. Instituto de Geología, UNAM.

3.6 Fluorescencia de Rayos X

El análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) permite determinar la composición química de los elementos presentes en una muestra. En nuestro caso se realizó primero un análisis semicuantitativo y posteriormente un análisis cuantitativo de elementos mayores y traza. Para el semicuantitativo y elementos traza, la muestra se preparó pesando 5.6g de muestra finamente molida y secada en la estufa a 110°C por 2h a la cual se le agrega 1g de Cera-C que sirve como aglutinante, las cuáles se mezclan en un mortero de ágata hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se coloca en un dado de acero de 35 mm de diámetro y éste se introduce en una prensa hidráulica marca GRASEBY SPECAC aplicando una presión de 25 ton/in² durante 20-25 s. de tal manera que se obtenga una tableta (figura 14) la cual se introduce en el espectrómetro para su análisis y se somete al bombardeo de un haz electrónico de alta energía (método de excitación). Bajo su influencia aparece la radiación de rayos X secundaria (señal analítica), cuyo espectro es característico para cada elemento (Malgarejo *et al.*, 2010).



Figura 14. Muestras para el análisis de XRF.

Para la determinación de los elementos mayores en forma de óxidos: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , MnO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , PxC (perdida por calcinación). Se prepararon perlas de vidrio, a partir de la fusión de 0.4 g de muestra y 8.0 g de fundente ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ y LiBO_2 en relación 1:1). La fusión se realizó en crisoles de aleación Pt:Au (95:5) empleando LiI (250 g/L) como agente antiadherente. Para la determinación del porcentaje de la pérdida por calcinación (PxC), se pesa 1g de muestra en base seca y se calina a 950 °C. El cálculo de la PxC se hace multiplicando por 100 la diferencia de peso antes y después de la calcinación.

La composición química de elementos mayores y traza se determinada por fluorescencia de rayos X (FRX) en un espectrómetro Rigaku modelo ZSX Primus II (tubo de Rh y ventana de Be), calibrado previamente con Materiales de Referencia Certificados. Este equipo se encuentra en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X en el Instituto de Geología de la UNAM.

3.7 Espectroscopía de reflexión infrarrojo de onda corta (SWIR)

Es un método de identificación puntual de minerales por medio del análisis de espectroscopía de muestras de roca, suelos, arcillas, etc., por análisis de infrarrojo de onda corta. Se trata de una técnica no destructiva, con una rápida adquisición de resultados, las muestras analizadas no requieren de un tratamiento previo y es relativamente económico. Es una técnica que favorece la identificación y caracterización de arcillas y minerales hidratados, en la determinación y delimitación de alteraciones hidrotermales.

El método SWIR se basa en los patrones de reflectancia y absorción con longitudes de onda que van desde los 1300 a 2500 nm, principalmente, los cuales interactúan con los enlaces moleculares que tengan correspondencia con moléculas tales como OH, H_2O , AlOH, MgOH y FeOH (Thompson *et al.*, 1999).

El equipo utilizado para el análisis de las muestras de este trabajo es un espectroradiómetro OreXpress TM, marca Spectral Evolution con una resolución en Nanómetros fabricado en USA, y con longitud de onda SWIR 1200-2500 nm. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, en el Instituto de Geofísica de la UNAM.

3.8 Copelación

Es este es un método de separación de metales como oro y plata, usado desde la antigüedad, mediante el cual se desea medir el contenido de oro y plata principalmente en las muestras del grupo HW. Este método consta de dos fases: fusión y la copelación propiamente dicha.

La fusión consiste en moler el mineral, y junto a un fundente someterlos a la acción del fuego, para obtener dos productos, la escoria y el regulo. Este último consiste en un conjunto de plomo, plata y oro, con resto de otros elementos. En este primer paso el plomo actúa como captador de metales nobles.

Posteriormente por medio de la copelación propiamente dicha, se coloca al regulo obtenido en la fusión en una copela y nuevamente se expone a la acción del fuego para dejar libre a los metales nobles, es decir el plomo queda liberado a la atmosfera y adherido en forma de óxido de plomo en las paredes del cuenco usado como copela (Izquierdo, 1997).

Se hizo el ensaye de cuatro muestras por esta técnica y se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico de la Faculta de Ingeniería, UNAM.

4. Resultados

De acuerdo con la metodología seguida algunas muestras solo fueron descritas megascópicamente, se seleccionaron algunas muestras para ser descritas por microscopía óptica con el fin de describir tanto a la roca encajonante, es decir mediante petrografía, así como las relaciones texturales e identificación de minerales de mena, por mineragrafía. En algunas de las muestras analizadas por mineragrafía se encontraron cristales muy pequeños que impiden su clasificación mediante esta técnica por lo que algunas de ellas fueron analizadas con SEM. Durante el muestreo se colectaron muestras en zonas de falla o en áreas fuertemente alteradas, algunas muestras seleccionadas de este tipo fueron analizadas mediante DRX y FRX. Por otro lado, dado el tamaño de los cristales de pirita observables en delgadísimas vetillas de las muestras del grupo HW se usó copelación para conocer el contenido de oro en esas muestras, finalmente para la caracterización de alteraciones en muestras de mano se usó SWIR. En la tabla 1 se hace un resumen de las muestras colectadas por estructuras y los análisis realizados según su objetivo, en los apéndices de encuentran tablas a detalle de cada muestra analizada.

Grupo	Muestras tomadas	Petrografía	Mineragrafía	SEM	DRX	FRX	SWIR	Copelación
C	19	1	7	5	3	3	3	--
CA	10	2	3	1	--	--	1	--
H	4	1	1	1	--	--	1	--
HW	5	1	--	--	--	--	--	4
P	4	--	1	1	--	--	--	--
CH	6	1	2	--	--	--	1	--
NS	3	1	--	--	--	--	1	--

Tabla 1. Relación de muestras tomadas por grupo y análisis realizados para cada estructura.

Las muestras de los grupos C, CA, H, HW, CH, NS fueron colectadas en diferentes obras mineras en el nivel 2550 de la Mina El Cristo, mientras que las muestras del grupo P fueron colectadas en superficie en el área de Pabellón que se encuentra a 2610 msnm.

A continuación, se presenta una síntesis por cada grupo de muestras en el que se engloban los resultados obtenidos con los diferentes métodos aplicados para la caracterización químico – mineralógica de las muestras obtenidas en la mina El Cristo.

4.1 Grupos C y CA

Las muestras analizadas con claves C y CA, fueron tomadas en la estructura conocida como Veta Calderona que tiene una dirección preferencial E – SW. En la figura 15 se observan imágenes de petrografía (LP y NX) en las cuales podemos ver principalmente la roca encajonante, que se trata de una andesita porfirítica de matriz microlítica compuesta principalmente por plagioclasas y cuarzo, así como vidrio en cantidades accesorias, se observan fenocristales de plagioclasas moderadamente alterados a sericita, posiblemente se deba a una alteración de tipo deúterica, es decir propia de las últimas etapas de consolidación de los magmas que las formaron; también se observan fenocristales de anfíboles con una alteración selectiva moderada a clorita. Se observan minerales opacos diseminados en la matriz y dentro de los fenocristales, los que van aumentando de tamaño y

saturación conforme se acerca a las vetillas de cuarzo que atraviesan a la roca. En la figura 16 ver imágenes obtenidas con luz reflejada (mineragrafía (LP y NX)) en donde podemos ver el acomodo de los minerales opacos, se encontraron minerales intercrecidos entre cristales de cuarzo plumoso con textura crustiforme como acantita, galena, esfalerita, pirita, hematita, y plata nativa.

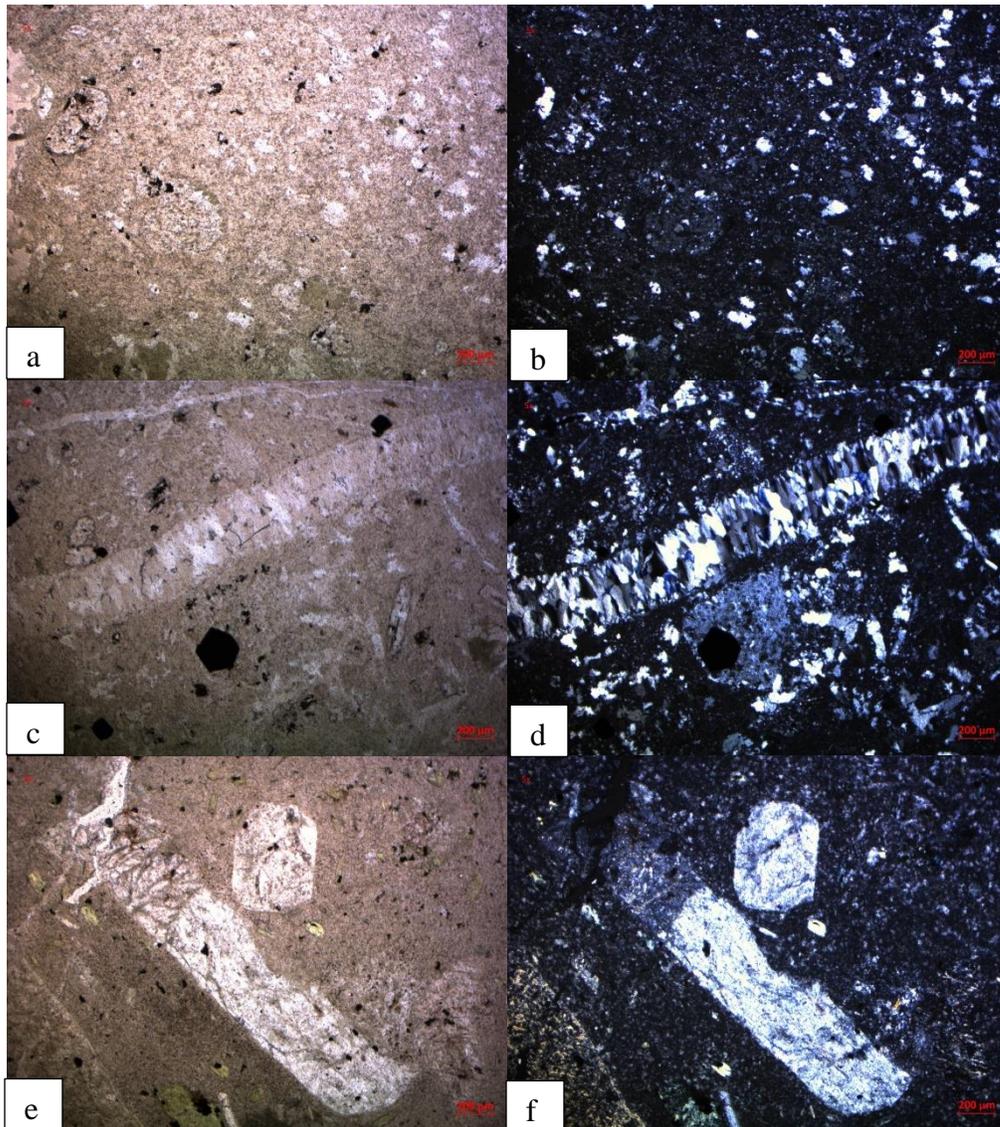


Figura 15. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) matriz microlítica de las andesitas. (c y d) Vetillas de cuarzo atravesando a la roca encajonante. (e y f) fenocristales de plagioclasa moderadamente alterados.

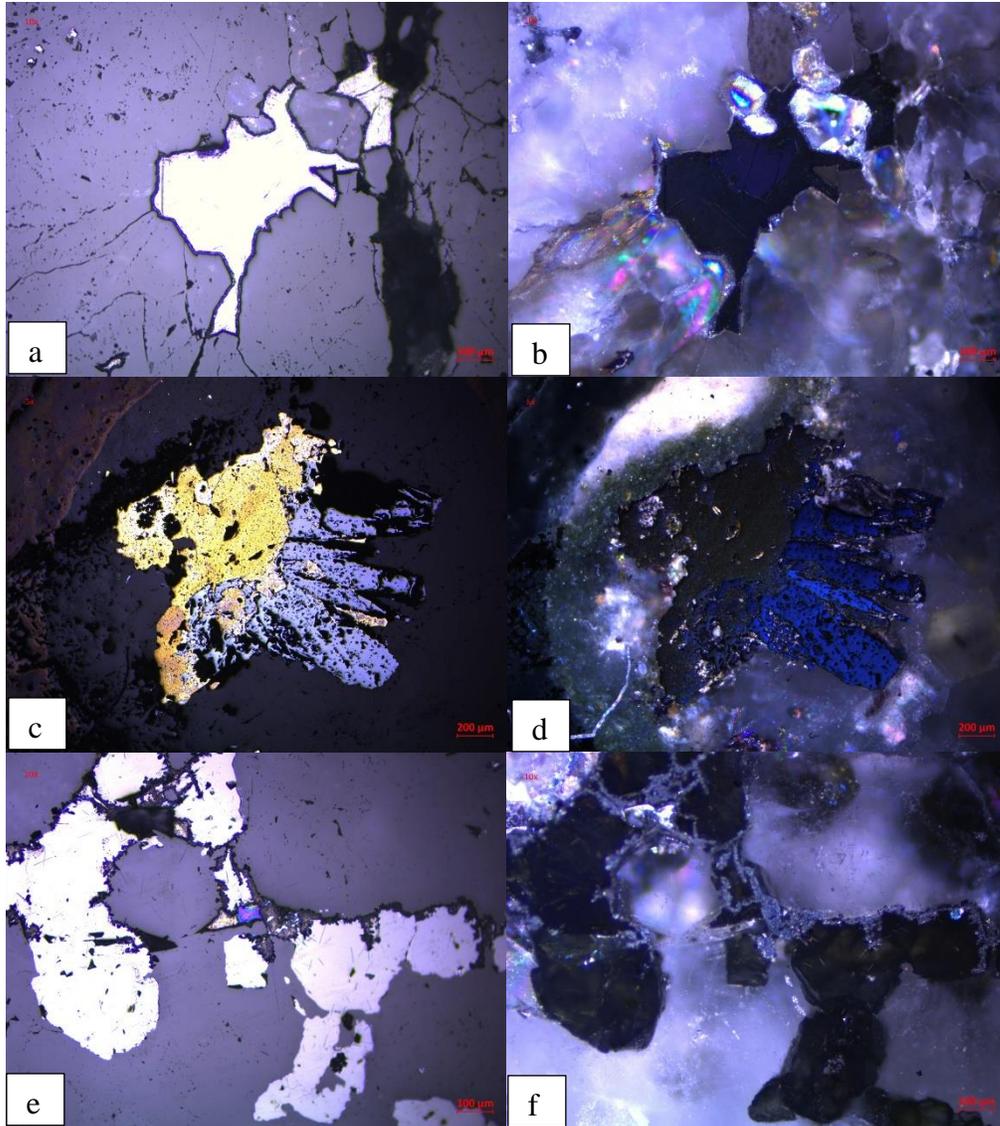


Figura 16. Fotos tomadas con microscopio minerográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) cristal de acantita relleno de cavidades de cuarzo. (c y d) cristales de pirita intercrecidos con calcopirita, alterado a hematita. (e y f) Cristales de galena intercrecidos con esfalerita y calcopirita, con pequeños cristales de acantita y stromeyerita en los bordes de la esfalerita se encontraron microcristales de Ag nativa.

De las muestras analizadas por DRX se obtuvo la caracterización de minerales arcillosos como esmectita y caolinita además de cuarzo en la fracción fina lo que describe una alteración argílica, mientras que por análisis de cristales por medio de SEM se encontró calcita hojosa (figura 17) y pequeñísimos cristales de adularia, intercrecidos junto a cristales de acantita (Apéndice D) la cual de acuerdo con la caracterización que hace Dong-Morrison (1995) se puede describir como tipo tabular, esta podría ser la evidencia de que estamos en un punto de ebullición y además de que el proceso de este evento fue muy rápido de acuerdo a las características de depósitos epitermales de baja e intermedia sulfuración propuestas por diferentes autores como Dong-Morrison (1995), Camprubí *et al.*, (2003), Heald *et al.*, (1987) y Hedenquist *et al.*, (2000) lo que seguramente favoreció la precipitación de acantita en pequeñas vetillas de cuarzo y calcita.

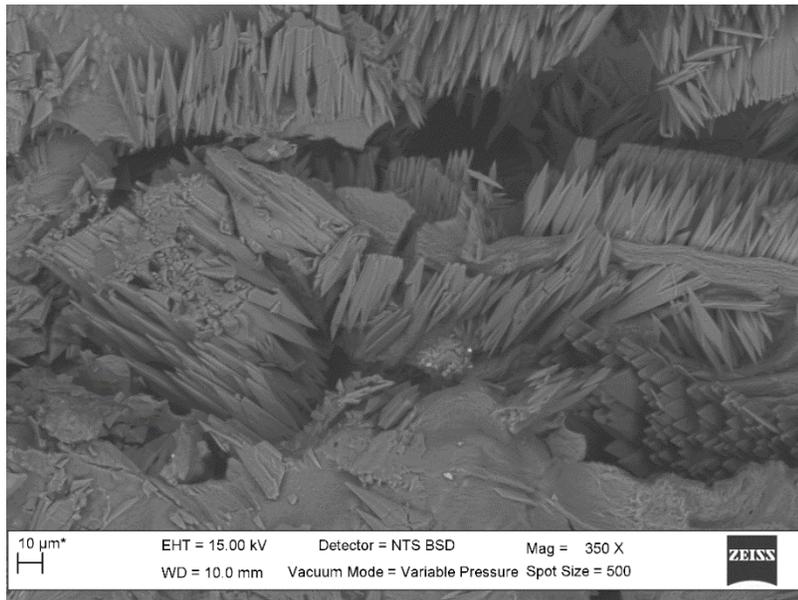


Figura 17. Cristales de calcita hojosa, imagen obtenida con SEM.

4.2 Grupo H

Las muestras analizadas con clave H fueron tomadas en la estructura mineralizada conocida como Veta Hormigueras, la cual al igual que otras estructuras del distrito tiene una dirección preferencial E – SW. En la figura 18 podemos ver imágenes obtenidas con microscopio petrográfico de la roca encajonante, que en esta parte del distrito se trata de una andesita porfirítica con matriz microlítica compuesta principalmente de plagioclasas, y en cantidades accesorias vidrio y cuarzo el cual está asociado a una silicificación posterior; se observan fenocristales de plagioclasas fuertemente alteradas a sericita; también hay fenocristales de anfíboles y ortopiroxenos que se presentan una alteración selectiva y fuerte a clorita. La estructura mineralizada es un ramaleo de vetas que varían en tamaño entre unos cuantos centímetros hasta 2 metros de espesor, pero además con base en estas observaciones se sabe que hay mineralización diseminada en la roca encajonante, la cual es

atravesada por múltiples vetillas, en las que se puede apreciar que primero hubo depósito de cuarzo en varios episodios hidrotermales, y en un último pulso hidrotermal precipito calcita, la cual presenta una textura hojosa evidencia de que las muestras tomadas están en lo que fue un punto de ebullición, además representa la principal diferencia de esta estructura (Hormigueras) con la otra estructura explotada en esta mina. En la figura 19 tenemos imágenes de algunos de los minerales opacos que se encuentran en esta estructura, los cuales fueron analizados por mineragrafía, en todos los casos se observan cristales intercrecidos en vetillas de cuarzo, calcita o adularia, se encontró galena, esfalerita, acantita, plata nativa, pirita, calcopirita, y stromeyerita, se puede concluir que la mineralización de los minerales de mena es similar entre ambas estructuras. De acuerdo con el análisis con SWIR se reconoció una alteración argílica intermedia, y por otro lado se encontró que la calcita tiene algo de Mg en su estructura.

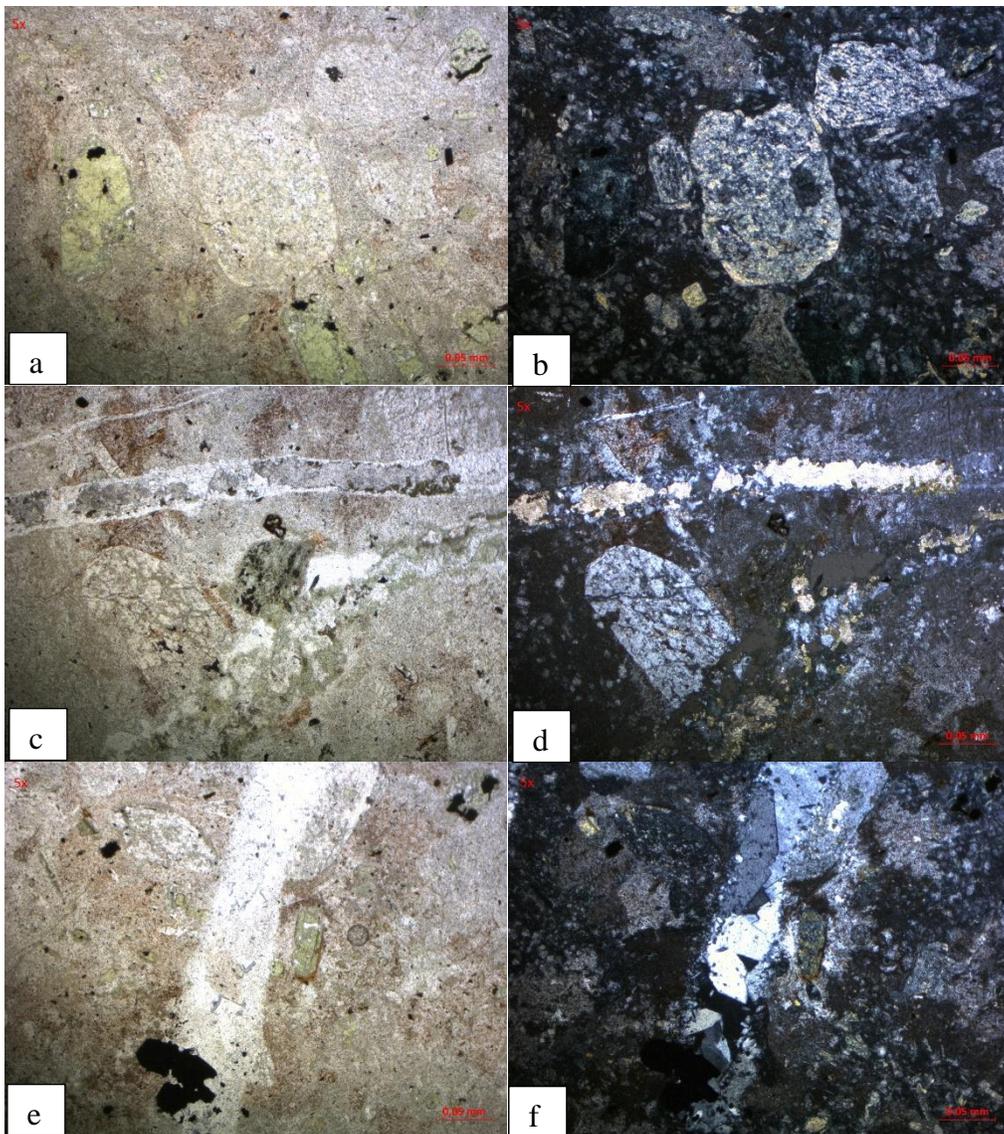


Figura 18. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) Fenocristales de plagioclasa fuertemente alterados a sericita y otros más de anfíboles cloritizados. (c

y d) andesita de matriz microlítica con fenocristales alterados y atravesada por una vetilla rellena de cuarzo y calcita blade. (e y f) andesita atravesada por vetilla rellena de cuarzo y con cristales de minerales opacos (py).

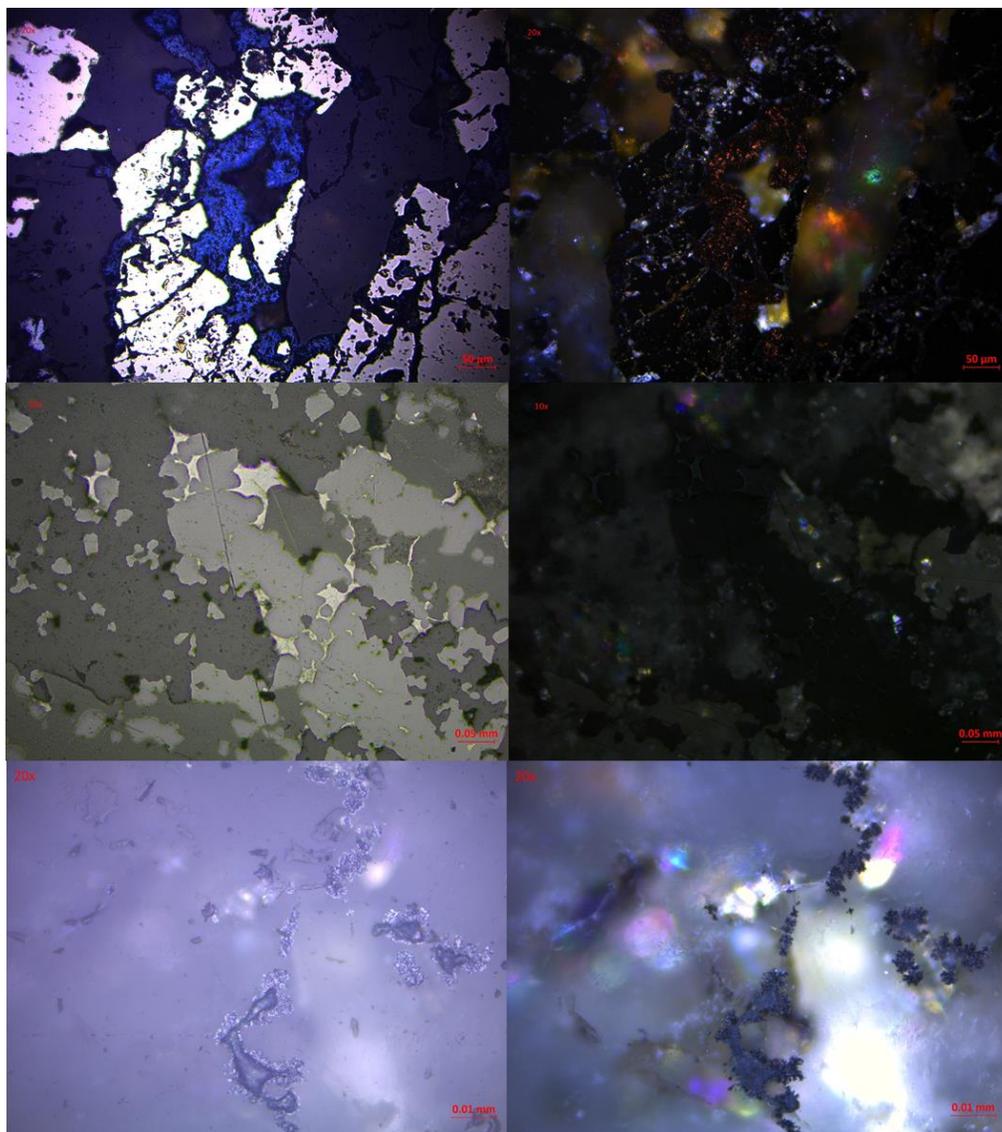


Figura 19. Fotos tomadas con microscopio minerográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) cristal de pirita fracturado con relleno de covelita. (c y d) cristales de esfalerita relleno cavidades de calcita con pequeños cristales de acantita. (e y f) Cristales de Ag nativa relleno cavidades de cuarzo.

4.3 Grupo CH

Estas muestras fueron tomadas en rocas donde no se tiene clara la diferencia entre las estructuras principales que son Calderona y Hormigueras, sin embargo, hay mineralización. En la figura 20 vemos una imagen de la roca encajonante que se trata de una andesita porfirítica con matriz microlítica compuesta principalmente de plagioclasas y vidrio, presenta algunos fenocristales de plagioclasas alterados a sericita, también hay fenocristales de ortopiroxenos y algunos, en menor cantidad, de anfíboles, que están moderadamente alterados, pero sobre todo presentan fuerte fracturamiento y entre sus fracturas vemos algunos minerales opacos, así como algunos disseminados en la roca pero sobre todo concentrados en las vetillas de cuarzo, que además tienen en algunas zonas algo de calcita tardía, lo que representa mayor afinidad con la Veta Hormigueras. En la figura 21 se muestra una imagen de un cristal de pirita fuertemente alterado y brechado, en algunas partes se le ve alterado a calcopirita y a hematita, lo cual es característico de estas muestras. Finalmente con el análisis realizado con SWIR se reconoció una alteración argílica y algunos minerales secundarios de Cu, como crisocola.

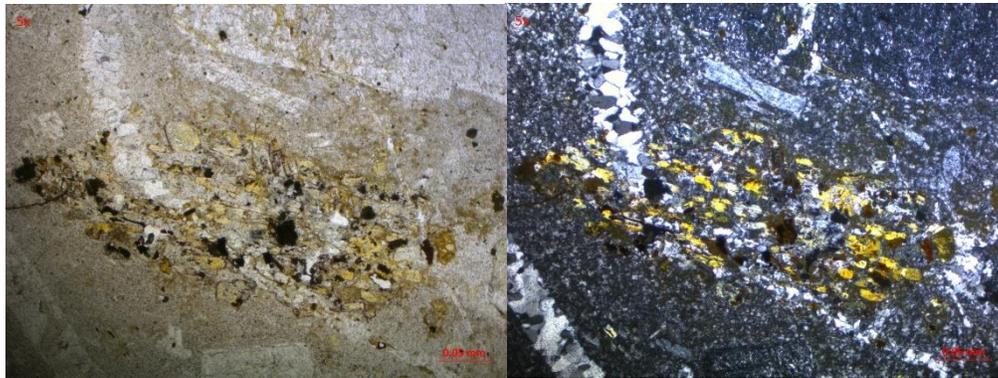


Figura 20. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. Andesita microlítica atravesada por vetillas de cuarzo y calcita con fenocristales de plagioclasa moderadamente alteradas, y fenocristal de ortopiroxeno fuertemente fracturado y con minerales opacos disseminados.

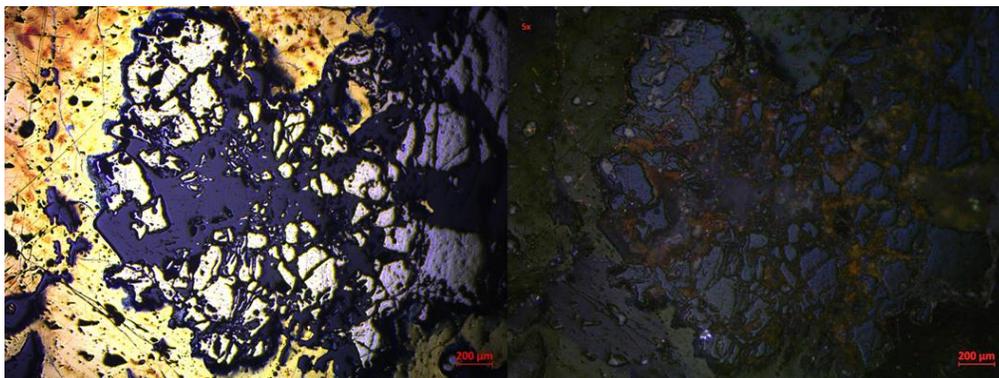


Figura 21. Fotos tomadas con microscopio mineralográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. Cristal de pirita fuertemente fracturado y alterado a hematita.

4.4 Grupo HW

El grupo HW representa a la parte Oeste de la Veta Hormigueras y las muestras tomadas en esta área fueron agrupadas por separado del resto de las muestras tomadas sobre Hormigueras por que se tenía registro de altos valores anómalos de Au, (qué rango o valores aproximados), en comparación con la relación Ag-Au promedio del distrito. De acuerdo con las descripciones megascópicas de estas muestras solo se realizó petrografía para describir a la roca encajonante y las vetillas que la atraviesan. En la figura 22 se observan vetillas rellenas de cuarzo, calcita y pirita euهدral lo que se asemeja a la tipología observada en el resto de las muestras pertenecientes a la Veta Hormigueras, pero además contiene algunos cristales de anatasa y sumado a esto el tamaño y grado de cristalinidad de la calcita y la pirita es mayor. La roca encajonante es una andesita porfídica de matriz microlítica compuesta por plagioclasas, cuarzo y en cantidades accesorias vidrio, con fenocristales de plagioclasas moderadamente alterados a sericita, y anfíboles fuertemente alterados a clorita.

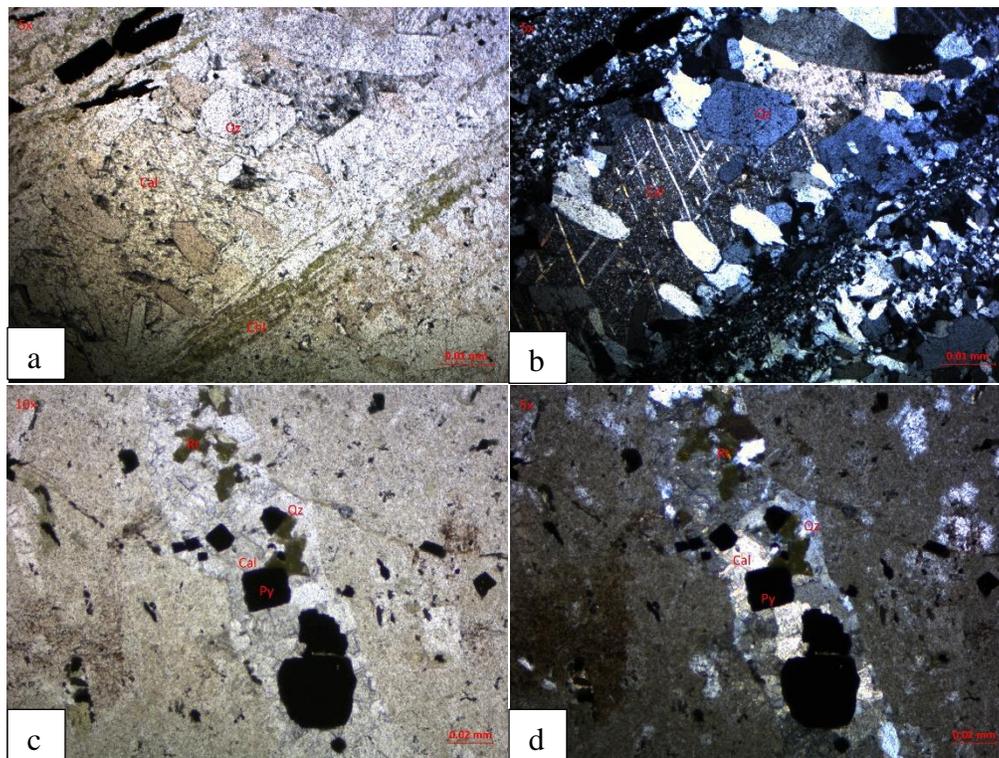


Figura 22. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) enrejado de vetillas rellenas de cuarzo, calcita y adularia. (c y d) Vetilla rellenas de cuarzo, calcita blade, rutilo y con algunos cristales de formas cuadradas opacos (py).

Dado que las vetillas que atraviesan a la andesita son 1-3 mm de espesor y los minerales reconocibles solo son pirita y calcopirita y se encuentran diseminados se optó por realizar análisis por copelación para la detección de Au.

Los resultados obtenidos con el ensaye por copelación arrojaron lo siguiente:

Muestra	Au	Ag
HW-001	0.05	10
HW-002	0.04	8
HW-003	0.03	6
HW-004	0.02	8

Los resultados están dados en gr/tn.

4.5 Grupo P

Las muestras con clave P, fueron tomadas en superficie en el área de pabellón donde se puede observar una veta de cuarzo amatista formando bandas con cuarzo incoloro con una textura de crustiforme a coliforme y se pueden observar contenidos de sulfuros grises entre las bandas de cuarzo (figura 23). Esta veta atraviesa a la andesita, la cual en las partes más proximales a la veta se observa atravesada por vetillas de cuarzo formando una textura brechada y se encuentra fuertemente alterada a esmectita, en zonas distales de la estructura la alteración disminuye, hasta solo observarse pirita diseminada.



Figura 23. Muestras de veta de cuarzo con textura crustiforme (izq) y coliforme (der) con bandas de galena y acantita.

Algunas de las muestras tomadas en esta área presentaron altos valores de Ag con la lectura del Nitón, y al realizar la minerografía se observaron pequeños cristales de acantita diseminada relleno de cavidades de cuarzo (figura 24).

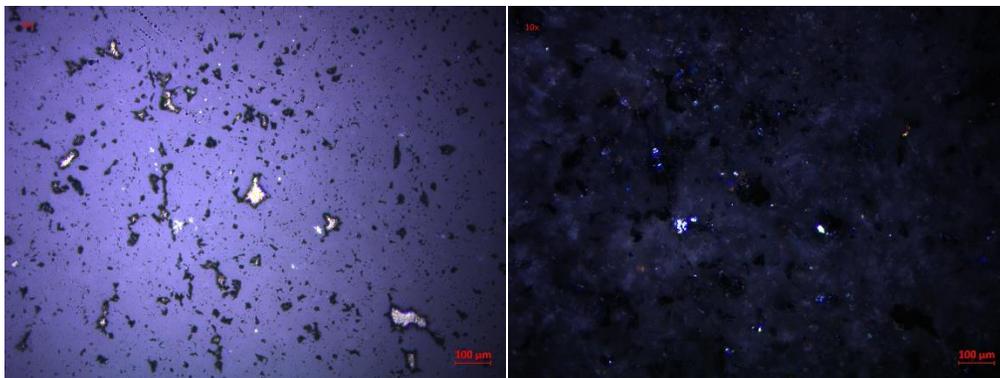


Figura 24. Fotos tomadas con microscopio minerográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. Cristales de acantita relleno de cavidades de cuarzo.

4.6 Grupo NS

El grupo NS, está compuesto por muestras colectadas en áreas donde se puede distinguir una estructura con dirección Norte-Sur, lo que la diferencia de las demás estructuras observadas, se trata de un ramaleo de vetas de cuarzo amatista con textura crustiforme. En algunas áreas además se observa cuarzo incoloro y cristales botroidales de calcita rica en Mg, mediante petrografía (figura 25), se pueden observar cristales euhedrales de cuarzo con zoneamientos y calcita rómbica, además de diferentes eventos de mineralización en los que precipitó cuarzo con piritita, acantita y galena diseminada. Mediante SWIR se reconocieron dos alteraciones primero una filíca ocasionada por altas temperaturas y posteriormente una argílica con temperaturas menores.

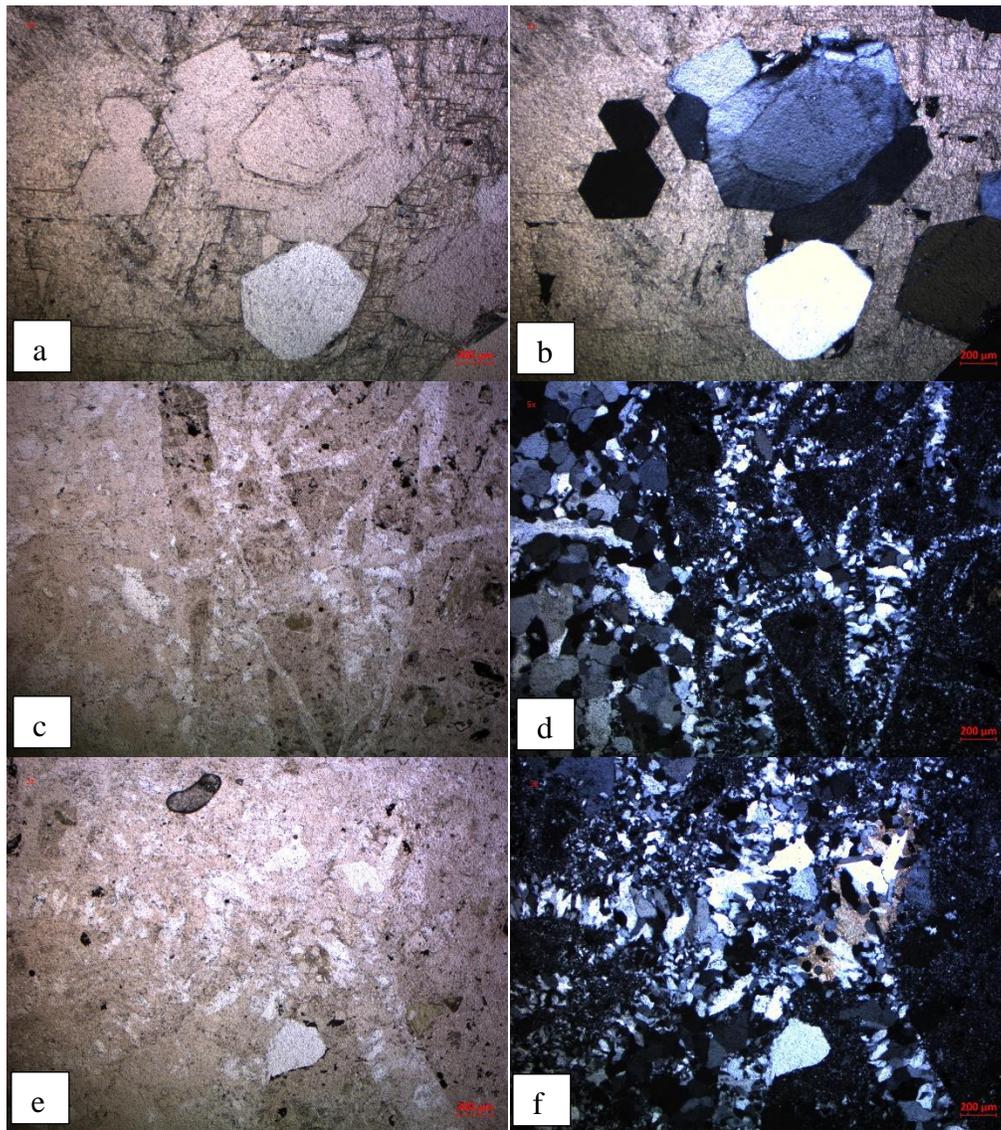


Figura 25. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicols cruzados. (a y b) Corte transversal de vetilla rellena por cuarzo y calcita botroidal. (c, d, e y f) enrejado de vetillas rellenas cuarzo, y calcita, atravesando a la andesita moderadamente alterada.

4.7 Rosario

El Distrito minero Pachuca – Real del Monte abarca el área norte de la ciudad de Pachuca, así como los poblados Mineral del Chico y Mineral del Monte, y durante su larga historia ha habido diferentes minas que han explotado el mineral de plata y oro de diferentes áreas de los sistemas de vetas que predominan en el área, sin embargo, de acuerdo con las descripciones hechas por Geyne *et al.*, (1963) y otros autores, parece que el régimen de mineralización es el mismo en toda el área, pero las relaciones texturales entre minas pueden verse diferenciadas por los saltos dados por las fallas que acompañaron a la mineralización en el distrito. Tal como ocurre con la veta explotada en la mina Rosario, la cual está al este de la Hacienda Loreto y en dirección SE en relación con El Cristo, en la que se observa una estructura de espesor variable entre 0.5-5 m con vetillas de cuarzo atravesando a la veta de calcita de grano grueso con cristales intercrecidos de tamaño medio a grueso de esfalerita y con relleno de cavidades de acantita (figuras 26 y 27).

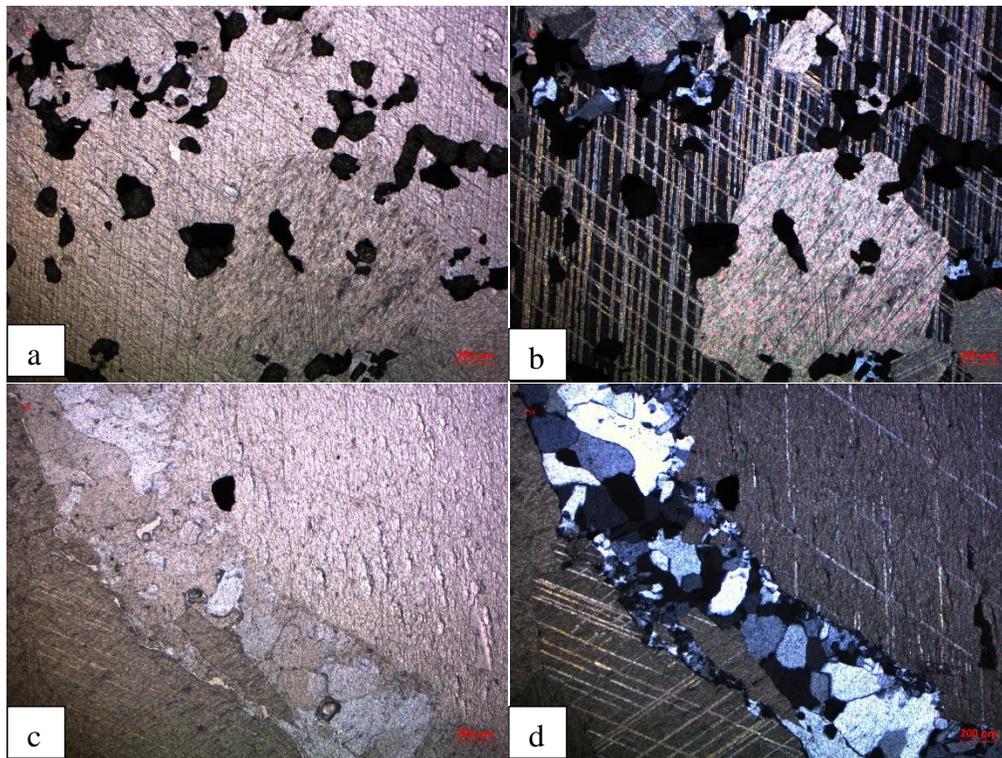


Figura 26. Imágenes tomadas con microscopio petrográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. (a y b) cristales de esfalerita intercrecidos en cristales de calcita. (c y d) vetilla rellena de cuarzo atravesando a la veta de calcita.

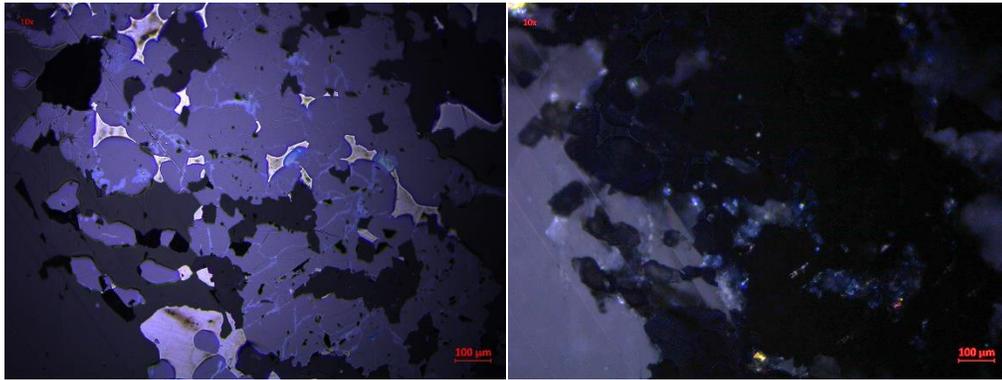


Figura 27. Fotos tomadas con microscopio minerográfico. De lado izquierdo observaciones con Luz paralela, de lado derecho con nicoles cruzados. Cristales de esfalerita intercrecidos con calcita rómbica y en algunas partes hojosa, y cristales de acantita relleno de las cavidades de la esfalerita.

4.8 Cuadros Paragenéticos

Finalmente se presentan los cuadros paragenéticos de las vetas principales explotadas en la mina El Cristo, Veta Calderona y Veta Hormigueras. (Tabla 2 y 3).

Tabla 2. Cuadro paragenético con las especies minerales encontradas en la Veta Hormigueras.

Cuadro paragenético de Veta Hormigueras				
Minerales	Andesita	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Plagioclasas	-----			
Anfiboles	-----			
Piroxenos	-----			
Cuarzo		-----	-----	-----
Clorita		-----		
Anatasa		-----		
Pirita		-----	-----	
Calcopirita		-----		
Galena		----	-----	
Esfalerita		-----		
Calcita			-----	-----
Adularia			-----	-----
Stromeyerita			-----	----
Acantita			-----	
Ag nativa			-----	
Electrum			-----	
Covelita				-----
Goethita – limonita				-----
Hematita				-----
Montmorillonita			-----	-----

Tabla 3. Cuadro paragenético con las especies minerales encontradas en la Veta Calderona.

Cuadro paragenético de veta Calderona					
Minerales	Andesita	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Plagioclasas	-----				
Anfíboles	-----				
Piróxenos	-----				
Cuarzo	-----	-----	-----	-----	-----
Sericita	----				
Clorita		-----			
Pirita		-----	-----		
Esfalerita			-----		
Galena			-----		
Calcopirita			-----		
Acantita			-----	-----	
Ag nativa				-----	
Adularia				-----	-----
Calcita					----
Argentojarosita					-----
Esmectita				-----	-----
Illita					----
Caolinita					-----
Goethita-limonita					-----

5. Discusión de los resultados

5.1 Contexto geológico

El Distrito minero Pachuca – Real del Monte un depósito de tipo epitermal de baja a intermedia sulfuración en el que se han explotado vetas con orientación preferencial NO-SE. La mineralización del depósito esta encajonada en rocas volcánicas del Paleogeno – Neogeno de composición variable entre andesitas y riolitas, que forman parte del Grupo Pachuca definido por Geyne *et al.*, en 1963. Las vetas Calderona y Hormigueras que son explotadas en la mina El Cristo se encuentran encajonadas en paquetes de andesitas pertenecientes a la formación Pachuca que sobreyace a la formación Cerezo, ambas pertenecen al Grupo Pachuca. Para cuando se realizó la toma de muestras utilizadas para este trabajo los laboríos mineros en los que afloraban ambas estructuras solo se encontraban en el nivel 2550 msnm.

La Veta Hormigueras tiene una orientación E-O y los minerales de ganga encontrados en las muestras obtenidas de esta estructura son Cuarzo, clorita, calcita y adularia. Mientras que los minerales de mena son pirita, calcopirita, galena, esfalerita en la primera etapa de mineralización, acantita, estromeyerita, plata nativa y electrum en la segunda etapa de mineralización al mismo tiempo que ocurrieron la adularia, la calcita rómbica junto a cuarzo plumoso que se ve coronado con una alteración argílica, finalmente en un evento secundario aparecen covelita, goethita-limonita y hematita lo cual representa un paleonivel ubicado dentro de las obras mineras y que indica que por encima de este nivel ya no hay mineralización dado que es la última etapa de esta estructura. Esta estructura se puede observar en superficie en el área de pabellón (2610 msnm), donde hay vetas de cuarzo con textura crustiforme y con bandas coliformes de alguna variedad de sílice de menor temperatura y menos cristalizada, entre las que se encontraron pequeños cristales de acantita rellenando las cavidades dejadas por el cuarzo plumoso. A pesar de no encontrarse en el mismo nivel se pueden encontrar texturas similares que ponen a la estructura en una zona de ebullición dentro del modelo de depósito epitermal.

La Veta Calderona tiene una orientación NO-SE, levemente diferente a hormigueras, y los minerales de ganga encontrados son Cuarzo principalmente plumoso y clorita, junto con minerales de mena como pirita y esfalerita con una alteración fílica, en un segundo evento de mineralización se observa cuarzo en mosaico y plumoso formando texturas crustiformes junto con minerales de mena como pirita, galena, esfalerita y acantita con una alteración argílica, después en un tercer evento se observa adularia tabular junto con cuarzo plumoso con el que se asocia minerales de mena como acantita y plata nativa, a este evento se le puede asociar una alteración argílica, y finalmente en la última etapa se observan parches de cuarzo oqueroso, con algunas bandas coliformes y con calcita hojosa, en este evento además se reconoce argentojarosita, caolinita, goethita-limonita y se reconocieron illitas y esmectitas. Esta estructura al igual que hormigueras se puede ubicar aun dentro del área de ebullición, sin embargo por la poca cantidad de carbonatos podríamos decir que apenas está en la parte más superficial del boiling.

De acuerdo con los resultados obtenidos y haciendo una comparación entre las características de los depósitos epitermales definidas por otros autores tenemos la siguiente tabla con las características observadas y descritas de las muestras analizadas en este trabajo.

Tabla 4. Cuadro comparativo con los elementos característicos de los depósitos epitermales definidos por Hedenquist et al.,(2000), Camprubí et al., (2003), Heald et al., (1987) y los datos obtenidos con las muestras provenientes de la mina El Cristo.

	Características observadas por Hedenquist et al.,(2000), Camprubí et al., (2003), Heald et al., (1987), para yacimientos epitermales de BS e IS	Características observadas en este trabajo.
Rocas Volcánicas asociadas	Vulcanismo subaéreo, rocas ácidas a intermedias (andesita-riodacita-riolita)	Derrames de lavas intermedias de composición andesítica.
Controles de emplazamiento	Régimen de falla o zonas de fractura estrechamente relacionadas a centros volcánicos.	Mineralización controlada por fallas normales.
Alteración asociada	Argilica Intermedia: Caolinita- illita/esmectita Avanzada: Caolinita-alunita (illita/smectita-azufre nativo) Filica/Sericítica: Sericita. Propilítica: Clorita-Epidota, clinozoisita, calcita, zoisita, albita.	Argilica: esmectita, kaolinita y cuarzo, en las secciones. Argilica avanzada: Caolinita en algunas zonas de falla. Subpropilítica: Clorita en las vetillas de cuarzo que atraviesan a la andesita junto con piritita.
Minerales clave de alteración proximal	Sericita o illita ± adularia, clorita.	illita ±adularia tabular en las zonas donde hubo metasomatismo, principalmente en las zonas de falla.
Geometría del cuerpo mineralizado	De tamaño variable y cuerpos tabulares	Cuerpos tabulares con flexiones de tamaño variable desde cm hasta kilómetros de largo.
Carácter de la mineralización económica	Vetas con relleno de cavidades, que cortan a la roca encajonante, hacia la superficie se presenta como stockwork o diseminada, según la naturaleza de la permeabilidad primaria y secundaria.	En el área de estudio se observan ramaleos de veta con dirección preferente NO-SE, en algunas partes las vetillas brechan a la roca encajonante formando stockwork.
Minerales de ganga	Cuarzo, calcedonia, calcita, rodocrosita, adularia, alunita, pirofilita, barita, fluorita, Illita y algunas veces, aunque muy ausente azufre nativo.	Cuarzo, calcita, rodonita, adularia, esmectita, clorita.
Minerales metálicos clave	Piritita, esfalerita, marcasita, galena, electrum, oro, sulfosales de Ag, arsenopiritita, argentita, calcopiritita, tetraedrita.	Piritita, esfalerita, galena, calcopiritita, acantita, plata nativa.
Otros minerales encontrados	Telururos, enargita, seleniuros, bismutinita	Estromeyerita, arjentojarosita, covelita, hematita.

Las muestras analizadas se tomaron a lo largo de las estructuras mineralizadas y se reconocieron alteraciones de tipo argílica intermedia, fílica y subpropilítica, además de que se encontraban zonados los múltiples ramaleos de vetas rellenas principalmente por cuarzo crustiforme, calcita y adularia, lo que ubica a las obras de la mina El Cristo en las zonas donde la roca parece tener una mayor permeabilidad, de acuerdo con el esquema propuesto por Hedenquist *et al.*, (2000). (figura 28).

Finalmente tomando los datos obtenidos se realizó la comparativa entre los datos propuestos por Hedenquist *et al.*, (2000) para inferir la profundidad a la que pudieron formarse las vetas Calderona y Hormigueras. Y como resultado se puede concluir que las estructuras se formaron a una profundidad de intermedia a profunda por debajo de los 300 m de acuerdo con Hedenquist *et al.* (2000) ya que la mayoría de las características coinciden con las características propuestas para niveles profundos de formación (tabla 4).

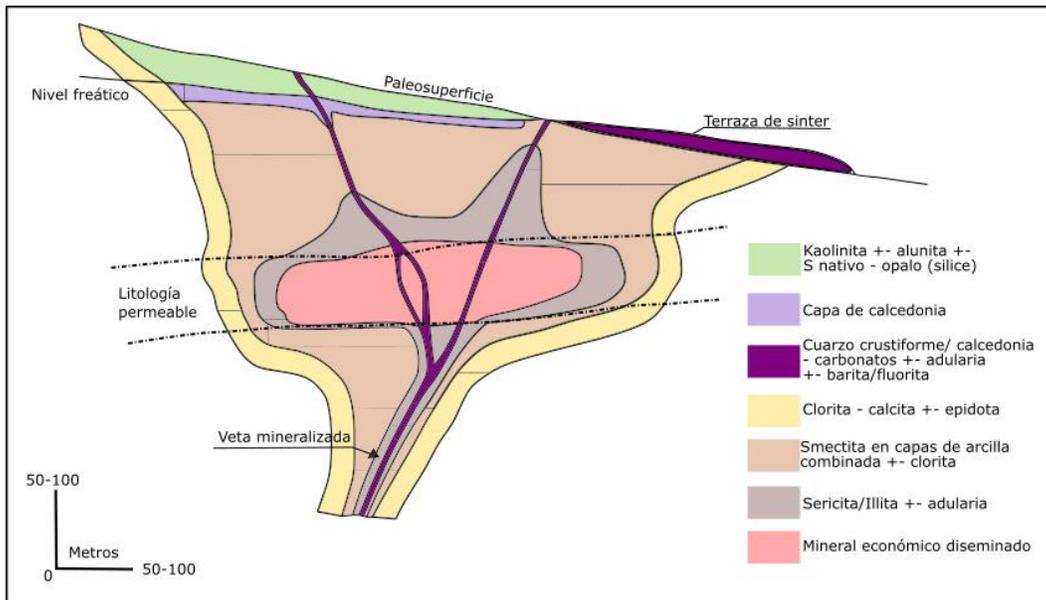


Figura 28. Sección esquemática de los patrones de alteración en sistemas de epitermales de baja sulfuración. Modificado de Hedenquist *et al.* (2000)

Tabla 5. Cuadro comparativo entre los elementos propuestos por Hedenquist et al., (2000) para definir la profundidad de un sistema epitermal de baja a intermedia sulfuración y los elementos encontrados en las muestras tomadas de la mina El Cristo.

	Superficial	Profundo	El Cristo
Profundidad de formación	0-300 m	300-800 m (raramente >1000m)	¿?
Roca encajonante	Domos, rocas piroclásticas y sedimentarias	Domos, Rocas piroclásticas y sedimentarias	Derrames de lava andesítica
Forma del depósito	Vetas, enjambre de vetas, stockwork, diseminado.	Vetas, cuerpos brechados, diseminados.	Vetas, enjambre de vetas, diseminados, cuerpos brechados
Relaciones texturales	Finas bandas, crustiforme, brecha	Bandas gruesas	Coloforme, crustiforme, de bandas finas.
Alteración	Capas de Alunita-Kaolinita, halo de arcillas	Arcillas, sericita, carbonatos, roscoellita, fluorita	Argilica intermedia, filica, propilitica
Minerales de ganga	Calcedonia, adularia, illita, calcita	Cuarzo, carbonatos, rodonita, sericita, adularia ± barita ± anhidrita ± hematita ± clorita	Cuarzo, Calcita, Adularia, Sericita, clorita, smectita, kaolinita, rodonita
Minerales de mena	Cinabrio, stibinita, pirita/marcasita, arsenopirita, selenuros de Au-Ag, Sulfosales, pirrotita, esfalerita rica en Fe	Pirita, Sulfuros y sulfosales de Au-Ag, esfalerita, galena, calcopirita, tatrehedrita/tennantita	Pirita, esfalerita, galena, acantita, plata nativa, calcopirita, covelita, estromeyerita.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Los minerales de ganga encontrados en la mina El Cristo son cuarzo, calcita, adularia, clorita y rodonita. Mientras que los minerales de mena son pirita, galena, esfalerita, calcopirita, estromeyerita, acantita y plata nativa. Finalmente se encontraron minerales como covelita, argentojarosita y crisocola que representan una mineralización secundaria propiciada por la interacción agua-roca existente en las fracturas que cortan tanto a las estructuras mineralizadas como a la roca encajonante, desde la superficie hasta niveles profundos, percolando aguas meteóricas, que disuelven metales de las vetas e inician con el proceso de metasomatismo que lleva a la precipitación de nuevas especies minerales. Estos minerales secundarios son importantes indicadores de paleoniveles; además representan la última fase de mineralización por lo que ubicarlos dentro del modelo de depósitos epitermal, junto con la profundidad aproximada de las demás fases, es útil para inferir como se comportará la mineralización a mayor profundidad.

De acuerdo con las relaciones texturales observadas mediante microscopía óptica y con los resultados obtenidos mediante técnicas analíticas, se concluye que en la Veta Calderona hubo cuatro eventos de mineralización, tres de ellos, los más tempranos, dominados por la precipitación de cuarzo con minerales metálicos como pirita, galena, esfalerita, acantita, y además se reconocieron alteraciones de tipo fílica y argílica intermedia, lo cual ubica al sistema en la denominada zona de metales preciosos. Con cambios de temperaturas de mayor a menor, mientras que el cuarto evento presenta estructuras de brechamiento en las que se puede observar la movilización de los fluidos por el alto grado de alteración de la roca encajonante y por la aparición de minerales tales como cuarzo oqueroso, adularia rómbica y tabular, y un pequeño porcentaje de calcita hojosa en las zonas de movilización de material, y por las alteraciones encontradas tales como argílica intermedia, subpropilítica y fílica podemos ubicar al yacimiento en una zona de mayor ebullición. Lo anterior puede significar la ocurrencia de Au en las oquedades del Cuarzo en zonas favorecidas por las flexiones de las vetas generando clavos ricos en metales preciosos, y dado que aún nos encontramos en partes someras de la zona de ebullición se espera encontrar estos clavos a mayores profundidades conforme vayan avanzando las obras en el interior de la mina. Finalmente esto puede representar que poco antes o durante el cuarto evento de mineralización ocurrió un movimiento del sistema de vetas dominado la tectónica local.

En la Veta Hormigueras se definieron tres eventos de mineralización, el primero de ellos es similar tanto en mineralogía como en relaciones texturales a los tres primeros eventos de mineralización de VC, por lo que posiblemente sean contemporáneos, mientras que el segundo evento se caracteriza por la presencia en un porcentaje considerablemente mayor en comparación al del cuarto evento de VC de calcita hojosa lo que indica que la veta se encontró en condiciones diferentes que permitieron estar expuesta mayor tiempo al periodo de ebullición. Finalmente, el tercer evento de mineralización es similar al cuarto evento de mineralización lo que indica que para el último evento se encontraban en una posición similar en el que cristalizó muy poca calcita hojosa además de los metales base junto a la acantita. Posteriormente cristalizaron minerales secundarios como calcopirita, covelita,

argentojarosita y crisocola que de nuevo indican un paleonivel además de un enriquecimiento de Cu supergénico.

En conjunto el buen uso de diferentes técnicas de análisis tanto cuantitativo como cualitativo para la determinación de especies minerales es una importante herramienta para el estudio de yacimientos epitermales y pueden responder a una problemática de la industria tanto en la etapa de exploración como en la etapa de extracción y beneficio de metales para seguir encontrando cuerpos mineralizados.

La descripción de esta parte restringida del Distrito minero Pachuca – Real del Monte aporta nuevos datos que pueden servir para enriquecer las características de los depósitos de tipo epitermal de sulfuración intermedia. Además, aporta características específicas dentro de un sistema de gran tamaño, las que pueden servir para estudios posteriores en los que se encuentren particularidades aisladas dentro de sistemas similares y sirvan como datos de comparación para generar nuevas teorías sobre los factores de formación de minerales secundarios que no tengan aparente relación con el resto de la mineralogía observada.

6.2 Recomendaciones

Dada la complejidad de las estructuras de un depósito epitermal y su estrecha relación con los movimientos causados por el sistema de fallas que rige en la región se recomienda realizar un análisis estructural detallado para configurar arreglos de sistemas con los que se espera encontrar vetas de acuerdo con los tensores de esfuerzos que generaron fallas extensivas y/o zonas dilatacionales con el fin de reconocer hacia donde podríamos encontrar más zonas de bonanza de minerales preciosos o incluso reconocer el cambio a mineras base para preparar a la planta cuando se tenga que cambiar el método de beneficio.

Por otro lado, y como resultado de los movimientos estructurales se recomienda realizar un análisis de microtermometría con inclusiones fluidas para identificar las temperaturas de formación de los cuerpos de cuarzo que se encuentran en superficie para determinar con mayor precisión en que parte del sistema se encuentra la mina El Cristo, además de un muestreo sistemático para poder identificar el comportamiento de las alteraciones en relación con los minerales de metales base y metales preciosos, esto para interpretar si la mineralización económica puede continuar a profundidades mayores.

6.3 Comentarios adicionales

La caracterización a detalle de una zona restringida de un sistema tan grande sirve para encontrar nuevas pistas que pueden ayudarnos a entender fenómenos que posiblemente se encuentran tan aislados que resultan difíciles de explicar tal es el caso de la goldschmidtita, un nuevo mineral encontrado dentro de un diamante el cual contiene elementos propios de una corteza más primitiva mientras que el diamante por sí mismo representa un ambiente diferente (Meyer, *et al.*, 2019), o la posibilidad de encontrar diamantes intercrecidos en cromita en ambientes epitermales en los cuales las temperaturas difícilmente sobrepasan los 220° C, lo que supone características totalmente

diferentes a las que se han aceptado para la formación de estos valiosos minerales (Farré-de-Pablo *et al.*, 2018), así mismo nos enfrentamos ante el reto de explicar por qué podemos encontrar minerales de Cr en rocas volcánicas de composición ácidas a intermedia o porque dentro de un mismo sistema mineral encontramos pirita cristalizado en cubos y en eventos diferentes la podemos encontrar como dodecaedros, pero no las vemos creciendo en el mismo evento temporal. Vamos cada nuevo estudio de caracterización aporta pequeños eslabones en el universo del conocimiento y nos recuerda que en la geología no todo está escrito.

7. Referencias

Camprubí, Antoni, y Tawn Albinson. «Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica.» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* Volumen Conmemorativo del Centenario (2006): 27-81.

Camprubí, Antoni, Luca Ferrari, Cosca Michael A., Cardellach Esteve, y Canals Angels. «Ages of epithermal deposits in Mexico: Regional Significance and links with the evolution of tertiary vulcanism.» *Economic Geology* 98 (2003): 1029-37.

Camprubí, Antoni, Eduardo González-Partida, Gilles Levresse Jordi Tritlla, y Alejandro Carrillo-Chávez. «Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa.» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, n.º LVI (2003): 10-18.

Dong, G., y G. W. Morrison. «Adularia in epithermal veins, Queensland: morphology, structural state and origin.» *Mineral. Deposita* 30 (1995): 11-19.

Geyne, A. R., Carl Fries, Kenneth Segerstrom, R. F. Black, y I. F. Wilson. «Geología y yacimientos minerales del distrito de Pachuca - Real de Monte, estado de Hidalgo, México». Consejo de Recursos Naturales no Renovables, 1963.

Heald, Pamela, Nora K. Foley, y Daniel O. Hayba. «Comparative Anatomy of Volcanic-Hosted Epithermal Deposits: Acid-Sulfate and Adularia-Sericite Types». *Economic Geology* 82 (1987): 1-26.

Hedenquist, Jeffrey W., Antonio Arribas R., y Eliseo Gonzalez_Urien. «Exploration for Epithermal Gold Deposits». *SEG Reviews* 13 (2000): 245-77.

Hernández Treviño, José Teodoro, Karina Martínez-Bautista, Aldo Ramos Rosique, y Alfredo Morales-Victoria. «El microscopio mineragráfico». En *Manual para identificación de minerales opacos*, 3-15. México, 2018.

Hollister, Victor F. «Models of precious metal epithermal deposits». En *Discoveries of epithermal precious metal deposits*, I:IX-XIV. United States of America: Society of Mining Engineers, 1985.

Izquierdo, Rocío. «Sobre la copelación de plata en el mundo Tartésico.» *Spal* 6 (1997): 87-101.

McKee, Edwin H., John E. Dreier, y Donald C. Noble. «Early miocene hydrothermal activity at Pachuca-Real del Monte, México: An example of space-time association of volcanism and epithermal Ag-Au vein mineralization.» *Economic Geology* 87 (1992): 1635-1367.

Medina Escutia, Francisco Javier, Alfredo Victoria-Morales, y José Teodoro Hernández Treviño. «El microscopio petrográfico». En *Manual de laboratorio de mineralogía óptica*, 34-45. México, 2018.

Melgarejo, Joan Carles, Joaquin A. Proenza, Salvador Gali, y Xavier Llovet. «Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y su aplicación en exploración y explotación minera.» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 62, n.º 1 (2010): 1-23.

Ostrooumov, Mikhail. «Análisis químicos principales en la caracterización de minerales y rocas.» En *Mineralogía Analítica Avanzada*, Primera., 19-32. México: Fondo Editorial Morevallado, 2009.

———. «Difracción de Rayos X (DRX) en la investigación de minerales.» En *Mineralogía Analítica Avanzada*, Primera., 33-62. México: Fondo Editorial Morevallado, 2009.

Apéndice A

Descripción sistemática de las muestras tomadas en la mina El Cristo, durante el periodo del 08 de abril al 06 de mayo del 2018. Para esta descripción se realizaron diferentes estudios, dependiendo del tipo y objetivo de cada muestra.

Para fines de estudio y caracterización las muestras han sido agrupadas en 7 grupos, los cuales se diferencian por estructuras en las que fueron tomadas cada muestra.

Veta Calderona. Mina El Cristo. Nivel 2550								
Muestra	Obra	Tipo	Clasificación	Análisis	Qz	Calcita	Veta	alteracion
C-001	Fte w135w	RV	To	M	P			
C-002	Reb. 300/5	V	pilar	M, SEM	Pa, Cr		xxx	
C-003	Cro N140W	V	TA-W	M	Cr		xx	argilica
C-004	pto 5/12	R	TA-W	DRX, FRX		H		argilica
C-005	pto 5/12	R	TA-W	DRX, FRX	O, Pa			argilica
C-006	pto 5/10	V	TA-W		O, Pa, Cr			
C-007	Cro N140W	V-F	TA-W	M, SEM	O, P, Cr		xxx	
C-008		V	To		O, Pa, Cr			
C-009	pto 140/5	V	TA-W	M, SEM	O, P, Cl, Cr		x	argilica
C-010	pto 140/5	F	TA-W	DRX, FRX				
C-011	Fte	V	To	M	O, Pa, M		x	Mn limonita
C-012	Rbje 190	TA	TA-I		Cl			Mn limonita
C-013	Rbje 190	F-V	C		O, P, Cr			Mn limonita
C-014	Rbje 190	F-V	C		P			Mn limonita
C-015	Rbje 190	F-V	C					argilica
C-016	Rbje 190	TA	TA-D	P	Pa, M, Cr			Mn limonita
C-017	Rbje 190	F-V	pilar	SWIR	Pa		xxx	argilica
C-018	Rbje 285	F		M, SEM, SWIR	O, P		xxx	argilica, filica
C-019	Rbjr 285	F		SEM, SWIR	O, P	H		argilica, filica

Andesitas Calderona. Mina El Cristo. Nivel 2550								
Muestra	Obra	Tipo	Clasificación	Análisis	Qz	Calcita	Veta	alteracion
CA-001	Fte w135w	T	To		P		x	filica
CA-002	Fte w135w	T-R	To	P	P			
CA-003	pto 5/6	T	TA-W		P			subpropilitica
CA-004	pto 5/12	T	TA-W		P			mn limonita
CA-005	Fte w135w	R	TA-E	M	P			filica
CA-006		T	TA-E	SWIR	P		x	filica, argilica
CA-007		T-R	TA-E	P, M, SEM	P, M		x	argilica
CA-008	pto 140/5	V	TA-EW	M	P		x	filica
CA-009	pto 250/2	T	TA-E		P		x	subpropilitica
CA-010	pto 250/1	R	C		P, M		x	filica

Calderona Hormigueras. Mina El Cristo. Nivel 2550								
Muestra	Obra	Tipo	Clasificación	Análisis	Qz	Calcita	Veta	alteracion
CH-001	Cro N110W	R	TA	M, SWIR	O, P		x	argilica
CH-002	Cro N110W	V	TA		P	H	x	argilica
CH-003	pto 13/3	R	TA-E		P			filica
CH-004	pto 13/2	R	TA-W		O, P	R		filica
CH-005	pto 13/1	R	TA-W	M	P		x	filica
CH-006	pto 95/3	V	C	P	P			filica

High Wall Hormigueras. Mina El Cristo. Rampa 220								
Muestra	Obra	Tipo	Clasificación	Análisis	Qz	Calcita	Veta	alteracion
HW-001	Rampa 220	T	C		P		x	filica y subpropilitica
HW-002	Rampa 220	R	TA-D	C	P		x	filica y subpropilitica
HW-003	Rampa 220	R	TA-D	P, C	P, M, Z	H		
HW-004	Rampa 220	R	TA-D	C	P		x	filica y subpropilitica
HW-005	Rampa 220	R	TA-D	C	P		x	argilica

Veta Hormigueras. Mina El Cristo. Nivel 2550								
Muestra	Obra	Tipo	Clasificación	Análisis	Qz	Calcita	Veta	alteracion
H-001	Cro w250w	R	To-E		Pa	R	x	subpropilitica
H-002	Cro w250w	R	To-W	p	P, M		x	subpropilitica
H-003	pto 140/3	V		M, SEM, SWIR	P	R	xxx	argilica
H-004	pto 135/1	V	TA		P		x	filica

Sistema Norte-Sur. Mina El Cristo. Nivel 2550								
Muestra	Obra	Tipo	Clasificación	Análisis	Qz	Calcita	Veta	alteracion
NS-001	Fte 261	V	To		Pa			filica
NS-002	pto 261/12	V	To	P, SWIR	P, M	R, H		filica y argilica
NS-003	pto 261/12	V			P, M		x	filica y subpropilitica

Pabellón. Mina El Cristo. Superficie								
Muestra	Obra	Tipo	Clasificación	Análisis	Qz	Calcita	Veta	alteracion
P-001	Tiro Cristo	V	Superficie		P			filica
P-002	Tiro Cristo	V	Superficie		P		x	Mn argilica
P-003	Tiro Cristo	V	Superficie		P			Mn limonita
P-004	Tiro Cristo	V	Superficie	M, SEM	O, P, Cl		x	argilica

Significado de las abreviaciones usadas.				
Tipo	Clasificación	Análisis	Tipos de Qz	Tipo de Calcita
V=Veta	C=Cabeza	P=Petrografía	Pa=Plumoso amatista	H=Hojosa
R=Ramaleo	TA=tabla	M=Minerografía	P=Plumoso	R=Rombica
T=Tepestate	To=Tope	DRX=DifracciónRX	O=Oqueroso	
F=Falla	RE=Rezaga	FRX=FluorescenciaRX	M=Mozaico	
		SEM=MicroElecBarrido	Cr=Crustiforme	
		SWIR	Cl=Coloforme	
		C=Copelación	Z=Zonal	

Descripción macroscópica

En el grupo C está formado por aquellas muestras tomadas a lo largo de la Veta Calderona, dentro de esta estructura, que es una de las principales en este yacimiento, vamos a encontrar diferencias muy marcadas entre las muestras, y tratare de encontrar las relaciones mineralógicas que nos ayuden a entender los eventos de mineralización.

C-001 (26201), tomada del Frente W135W

La muestra es de un fragmento de andesita de color gris, muy alterada a color verde, que se encuentra dentro del ramaleo de veta, el cual está fuertemente alterado por mineral arcilloso de color amarillo ocre, ligeramente rojizo el cual podemos observar alrededor de la muestra; además presenta vetilleo de cuarzo, en algunos puntos incluso es posible observar drusas de cuarzo transparente, con cristales de 5 a 20 mm, dentro de la vetillas es posible observar pirita diseminada a lo largo de las estructuras, en algunas zonas es posible encontrar pirita y calcopirita acumulada, se observa un mineral de color gris medio con lustre metálico en cristales muy finos, que está en la misma fase que la pirita diseminada, como ya mencione antes la muestra está fuertemente alterada y en la vetilla que la atraviesa se puede ver una alteración de color naranja rojizo que se encuentra sobre los cristales de cuarzo, y en menor cantidad



una de color amarillo, que está posicionada entre el cuarzo y la alteración rojiza, por último las partes donde se encuentra la calcopirita se ve que comienza a alterarse a color negro.

C-002 (26207), Rebaje 300/5

Muestra de veta, es principalmente cuarzo incoloro y blanco, el cual en algunas partes se encuentra masivo, y algunas partes es posible observar la pirámide de los cristales, el crecimiento no tiene una sola dirección lo que nos indica que la mineralización ocurrió en un espacio relativamente amplio(?), se observan vetilleos de mineral de color gris oscuro con lustre metálico de tamaño muy fino, se tiene reportado que en este punto la presencia de argentita, la cual esperamos ver más adelante en superficie pulida.



C-003 (26208), Crucero N140W

Muestra de andesita muy alterada con la matriz de color morado y las plagioclasas de un color verdoso claro, además tiene pirita diseminada por toda la muestra en un porcentaje menor a 1%, con vetillas de cuarzo transparente en compañía de pirita y mineral de Ag (reportado), en la andesita podemos ver mineral arcilloso de color amarillo anaranjado, y en las zonas más cercanas a las vetillas se observa un mineral arcilloso de color blanco y uno más sobrepuesto a este de color amarillo verdoso, en ambos se ve pirita diseminada.



C-004 (26211), Punto 5/12

Muestra de vetas que atraviesan a la andesita fracturada, esta muestra es de relleno de falla por ello el cuarzo está fuertemente molido, además está acompañado por minerales arcillosos, uno es de color blanco con lustre terroso y otro de color verde pistache(?) con un lustre jabonoso el cual se adhiere a las andesitas en las caras fracturadas.



C-005 (26212), punto 5/12

Al igual que la muestra anterior se trata de material de relleno de falla (misma estructura), lo que la diferencia es el color, esta es de color anaranjado con cuarzo molido y algunos fragmentos de andesita, con estas muestras se pretende identificar las alteraciones que se presentan en la veta calderona.



C-006 (26213), punto 5/10

Muestra de veta, se trata principalmente de cuarzo blanco y transparente, en algunas oquedades se pueden ver cristales subhedrales, pero en su mayoría es masivo, hay algunos fragmentos de andesita fuertemente silicificada, y se logran distinguir algunas bandas de gris oscuro, ocasionalmente hay pequeños cristales de color gris de lustre metálico diseminados en el cuarzo.



C-007 (26215), Crucero N140W

Muestra de veta, principalmente cuarzo, con fragmentos de andesitas fuertemente silicificadas, y con bandas de color gris medio, las bandas no tienen una dirección preferencial, lo cual indica un fracturamiento muy fuerte en el que fueron depositadas. Tiene una alteración moderada de color amarillo naranja, y otra menos intensa de color verde pistache(?) que se encuentra principalmente sobre el cuarzo.



C-008 (26216), Crucero N140W

Muestra de color blanco al fresco, con zonas de color amarillo dado por una alteración supergenica, también hay alteraciones de color negro a rojo que están concentradas en las partes donde se pueden ver vestigios de sulfuros. El cuarzo se encuentra en bandas partiendo de un fragmento de andesita muy silicificada, generando una textura crustiforme; se observan mosaicos de granos de tamaño medio de cuarzo, y en algunas caras de la muestra se llegan a distinguir drusas de cuarzo con cristales de tamaño variable de 1-15mm; algunas bandas de sulfuros son de color gris oscuro, con ciertas tonalidades verdes y con pirita diseminada.



C-009 (26230), Punto 140/5

Muestra de veta, esencialmente de cuarzo blanco y transparente, con bandas de color gris oscuro, presenta una alteración intermedia de color amarillo ocre, una de menor intensidad de color blanco terroso.



C-010 (26231), Punto 140/5

Muestra tomada en una fractura, se trata de material de relleno de falla y es principalmente material arcilloso de color naranja, con una textura similar a la plastilina tiene fragmentos de cuarzo y de andesitas muy molidos.



C-011 (26232),

Muestra tomada de ramaleo de vetas de cuarzo, es de color blanco, con zonas de color amarillo producto de alteración supergenética, hay fragmentos de andesita verde con cristales de plagioclasas muy alterados a arcillas de color blanco, en algunas zonas se puede distinguir una textura crustiforme formada por bandas de cuarzo alternadas con bandas de sulfuros que llegan a tener 2 cm de ancho, con cristales muy finos en su interior, estas bandas son de color gris con tonalidades verdes, se puede distinguir pirita acumulada formando amalgamas de tamaños que varían de 1-5 mm en diferentes partes de la banda de sulfuros, sobre esta banda se observa una alteración de color negro y en algunas partes de color rojo.



C-012 (26238), Rebaje 190

Andesita gris con tonalidades moradas y verdes, presenta microfracturamiento relleno de cuarzo, en algunas zonas es posible ver vetas de cuarzo y en otras partes donde el fracturamiento es mayor y más reciente hay relleno de arcillas de color amarillo naranja, evidencia de alteración supergénica. La roca está fuertemente silicificada y hay pirita diseminada por toda la muestra, con un porcentaje menor a 1%.



C-013 (26239), Rebaje 190

Muestra de veta de cuarzo, la muestra es de color blanco, se pueden ver diferentes texturas, en algunas partes hay cuarzo vugular, mientras que en otras partes se distinguen brechas con clastos de andesitas de diferentes tamaños, que varían de 1 a 10 cm, los cuales están embebidos en una matriz de cuarzo que crece en diferentes direcciones, algunos de los fragmentos están totalmente alterados por arcillas de color blanco con tonalidades verdes, mientras que otros se comienzan a alterar por limonita, y unos más presentan un alteración negro rojiza con raya negra.



C-014 (26240), Rebaje 190

Muestra de veta – falla de cuarzo, la muestra está muy fracturada debido a que las fracturas están rellenas de limonita, aun se pueden observar fragmentos de tamaños variables de varios cm de cuarzo, algunos son vugulares, otros aún se pueden ver crustiformes con fragmentos de andesitas; en algunos de los fragmentos de cuarzo también se llega a observar



una alteración de arcillas blancas , mientras que en otros se ve una alteración roja, y en menor cantidad se encuentran dendritas de manganeso, con su color negro característico.

C-015 (26241), Rebaje 190

Muestra de veta – falla de cuarzo, la muestra está fuertemente molida, se pueden encontrar fragmentos de unos 5-10 cm pero en su mayoría son granos de mm, además de cuarzo hay arcillas de color blanco en un porcentaje mayor al 50%, en algunos de los clastos se ve una lee alteración de color negra.



C-016 (26242), Rebaje 190

Muestra de andesita fuertemente alterada, de color gris claro, las plagioclasas tienen un color lila, mientras que la matriz es de un color verde muy claro, en algunas zonas además se puede ver que la roca está silicificada, y además hay vetas de cuarzo plumoso con cristales de tamaños variables de 1 – 5 mm, en estas vetas se pueden observar que hay algunos otros minerales que dan una coloración gris verdosa, en toda la muestra hay al menos 1% de pirita diseminada, se llegan a observar caras de dodecaedros de pirita, pero también se presenta como amalgamas relleno pequeños espacios. En donde la roca está fracturada hay relleno de limonita principalmente, pero además hay acumulaciones de manganeso.



C-017 (26243), rebaje 190 (pilar)

Esta muestra fue tomada en un pilar, que forma parte de la veta – falla, el material está muy molido, se trata principalmente de cuarzo, en su mayoría es de color blanco, pero además hay una gran cantidad de amatista, aun cuando está muy molido podemos encontrar fragmentos en los que observamos al cuarzo en bandas que tienen en esa misma estructura (las bandas) sulfuros de color gris oscuro. Todo está fuertemente alterado por arcillas de color blanco, y en un porcentaje menor hay limonita y manganeso.



C-018 (26246), rebaje 285

Muestra de veta – falla, la muestra es de color blanco, y se trata de cuarzo plumoso con cristales de tamaño variable entre 5 y 20 mm, el cuarzo forma bandas que dan como resultado un textura crustiforme, en medio de las bandas de cuarzo se puede ver una banda de color verde con espesor promedio de 30 mm en la que hay piritita en amalgamas rellenando pequeños espacios, se espera que lo que da la coloración verde sean sulfuros de Ag; en otras partes el cuarzo esta corroído y ahí es donde hay una mayor acumulación de estas arcillas.



C-019 (26247), rebaje 285

Muestra de veta – falla, material fuertemente molido, de color blanco al fresco, pero mayormente alterada por arcillas de color blancas y negras, hay algunos fragmentos de cuarzo bugui con cristales bien formados de tamaños variables entre 5 – 15 mm, lo que podría ser parte de un evento post – falla, ya que en esos mismos fragmentos donde vemos el cuarzo bugui podemos ver cuarzo fuertemente corroído, y alterado,



incluso es posible ver cavidades donde posiblemente ante hubieron fragmentos de roca que ya fueron totalmente alterados.

El grupo CA está formado por muestras principalmente de andesita, que es la roca encajonante del yacimiento, las cuales fueron colectadas cerca de los puntos donde aflora la veta calderona, con el objetivo de identificar si se trata de la misma formación donde se encuentra emplazada la veta Calderona.

CA-001 (26205), Fte. W135W

Andesita de color gris medio, se ven cristales euhedrales y subhedrales de plagioclasa de diferentes tamaños que varían entre 1-5 mm y totalmente desordenados, estos cristales ya se encuentran fuertemente alterados, al igual que la matriz que los contiene, que además tiene vetillas rellenas de cuarzo, también podemos ver una veta de 20 mm de espesor promedio en la que cristaliza cuarzo bugui, y relleno de cavidades hay pirita en amalgamas así como también calcopirita, sobre la veta podemos ver una alteración supergénica moderada de color naranja rojizo, e incluso partes de cuarzo se ven corroídas.



CA-002 (26206), Fte. W135W

Andesita de color gris con tonalidades verdes, se observa una textura porfídica, en la cual los cristales de plagioclasa tienen tamaños variables de entre 1-5 mm y están fuertemente alterados, la matriz también está fuertemente alterada y comienza a tener un lustre jabonoso, la roca tiene vetillas de cuarzo y en toda la muestra hay pirita diseminada en un porcentaje menor al 1%.



CA-003 (26209), Pto 5/6

Andesita de color gris claro, moderadamente cloritizada, con textura porfídica, los cristales de plagioclasas están fuertemente alterados a arcillas blancas, con tamaños variables entre 1-5 mm, tiene algunos cristales de pirita disseminados en un porcentaje menor al 1%.



CA-004 (26210), Pto 5/12

Andesita de color rosa – ocre, de textura porfídica, fuertemente alterada, esta muestra se tomó en medio de zonas de falla muy marcadas, en las que las alteraciones son muy evidentes, la muestra tiene vetillas de cuarzo, en algunas partes puede verse bugui evidenciando el sentido de la mineralización, en medio de los crecimientos del cuarzo, donde quedaron espacios se ven acumulaciones de arcillas blancas y en otras zonas se ven oxidados los cristales de cuarzo que tienen tamaño variable entre 1 – 5mm. Además de la alteración supergénica de limonita hay partes de la muestra que tienen una alteración de color negra que forma dendritas en las caras fracturadas, se trata de una acumulación de Mn.



CA-005 (26214), Fte W135W

Andesita de color gris de textura porfídica moderadamente cloritizada y silicificada, con vetillas de cuarzo bugui con cristales de tamaño promedio de 1 mm con algo de pirita disseminada (menos del 1%), en las caras de la muestra, que eran planos de fracturas recientes, hay alteración supergénica de limonita; también hay vetas de 10 mm de espesor promedio de cuarzo con calcopirita y un mineral negro de lustre metálico, que se encuentra sobrepuesto como capa de alteración tal vez se trate de goethita, en algunas cavidades de la veta de cuarzo se encuentra una capa de color azul



con lustre terroso de material muy fino, podría ser una alteración asociada al cobre de las calcopiritas.

CA-006 (26217),
Andesita de color gris, con tonalidades verdes por la leve cloritización, con una textura porfídica, tiene vetas de cuarzo bugui con cristales de hasta 5 mm, en los espacios que deja el cuarzo hay acumulación de arcillas blancas y verdes, y también hay pirita en amalgamas rellenando espacios; se observa una veta de 30 mm de espesor promedio de arcilla blanca con fragmentos de cuarzo y andesitas, con pirita diseminada (hasta un 5% de contenido).



CA-007 (26218),
Andesita de color gris, con textura porfídica, los cristales de plagioclasa están fuertemente alterados y son de tamaños muy variables de entre 1-10 mm, en los planos de fractura reciente hay acumulación de limonita, como alteración supergénica; hay vetilleos de cuarzo, y en una veta de 10 mm de espesor promedio hay acumulación de sulfuros, entre ellos pirita y otro de color gris, posiblemente se trate de sulfuros de Ag.



CA-008 (26229), Pto 140/5

Andesita de color gris verdoso, fuertemente cloritizada, de textura porfídica, con vetillos de cuarzo que forma mosaicos de granos finos con pirita diseminada y algunas acumulaciones de sulfuros grises, posiblemente sulfuros de Ag.



CA-009 (26244), Pto. 250/2

Andesita de color gris, de textura porfídica, moderadamente cloritizada y silicificada, con vetillos de cuarzo y con pirita diseminada en toda la muestra, en algunas partes hay pequeñas acumulaciones de pirita en amalgamas, llegando a un 5% de pirita en toda la muestra, posiblemente también hay calcopirita pero en un porcentaje mucho menor al 1%.



CA-010 (26245), Pto 250/1

Brecha de andesita verde fuertemente cloritizada y silicificada con vetas de cuarzo blanco que tienen concentraciones de sulfuros y con pirita diseminada, en algunas partes el cuarzo forma drusas de cristales pequeños de tamaño promedio de 1 mm, en los cuales se esta acumulando arcillas de



color blanco y limonita, además de pequeñas concentraciones de Mn.

El grupo CH, está compuesto por rocas tomadas de ramales de vetas encontrados entre las estructuras principales del yacimiento, es decir entre las vetas Calderona y Hormigueras, pero que sin embargo no están definidas como parte de uno u otro sistema, razón por la cual es importante definir la mineralogía y las texturas de estas muestras para poder relacionarlas a algún sistema.

CH-001 (26219), Cro N110W

Muestra de andesita de color gris medio, de textura porfídica, con abundante vetilleo de cuarzo bugui con cristales que varían de tamaño entre 1-5 mm, en algunas partes y de manera muy débil se ve cuarzo amatista, además de las vetas de cuarzo hay vetillas de sulfuros como piritas, calcopiritas y otros sulfuros de color gris oscuro, estas vetillas con alto contenido de cobre presentan acumulación de minerales de diferentes tonalidades de color verde que se espera sean minerales ricos en cobre; en las zonas de fractura reciente hay acumulación de diferentes alteraciones, primero se ven arcillas de color blanco, después sobrepuestas hay arcillas de color verde y por ultimo hay acumulación de limonita al mismo tiempo que dendritas de Mn.



CH-002 (26220), Cro N110W

Muestra de andesita gris de textura porfídica, moderadamente alterada, con vetas de calcita y cuarzo, con acumulación de sulfuros, piritas algo de calcopirita y otro de color gris oscuro; la muestra comienza a presentar una alteración supergénica de limonita, además en las vetas hay arcillas de color blanco y verde claro.



CH-003 (26221), Pto 13/3

Muestra de andesita con vetas de cuarzo, la muestra es de color gris, se trata de una andesita de textura porfídica, levemente cloritizada y moderadamente silicificada, tiene vetillo de cuarzo y algunas vetas de cuarzo de entre 10-30 mm de espesor variable con algunas acumulaciones de pirita en las cavidades dejadas por los cristales de cuarzo, el cual es transparente mayormente, pero en algunas partes se puede ver leve amatista y en otras partes comienza a ser alterado por limonita, además tiene algo de calcita en la veta.



CH-004 (26222), Pto 13/2

Andesita fuertemente alterada de color gris claro de textura porfídica, con vetillos de cuarzo y algo de calcita, con pirita diseminada, la atraviesa vetas de cuarzo, fuertemente alteradas, el cuarzo es bugui y en algunas partes solo se observa el mosaico de grano medio de cuarzo, en algunas cavidades se han depositado sulfuros, principalmente pirita, las alteraciones son diferentes, hay una alteración de arcillas blancas que se deposita en cavidades, mientras que en otras partes hay una fuerte oxidación que parece estar afectando a los cristales de cuarzo.



CH-005 (26223), Pto 13/1

Andesita de color gris claro de textura porfídica, moderadamente alterada, con vetillas de cuarzo bugui con tamaños promedio de 5 mm, presenta una veta con acumulación importante de pirita y calcopirita, las cuales están rellenas las cavidades dejadas por el cuarzo. Presenta diferentes alteraciones, primero se ve la acumulación de arcillas blancas en las partes donde hay veta de cuarzo, en menor cantidad se observa una acumulación de arcillas de color verde y atacando a toda la muestra hay una leve acumulación de



<p>limonita, en menor cantidad se ven dendritas de Mn.</p>	
<p>CH-006 (26224), Pto 95/3 Andesita de color gris, moderadamente alterada a color café con tonos naranjas, aun se le puede ver la textura porfídica, tiene vetas cuarzo que también están moderadamente alteradas, y tiene pirita diseminada por toda la muestra; en algunas partes hay acumulaciones de Mn.</p>	

El grupo HW está compuesto por muestras tomadas en diferentes puntos de la rampa 220, es decir la rampa principal de acceso a la mina El Cristo, estas muestras fueron tomadas con el objetivo de encontrar oro asociado a piritas, describir sus texturas, ver su relación mineralógica y generar una hipótesis sobre su génesis en estos puntos en los cuales esta reportado. Se ha llamado HW a este grupo por su relación con veta Hormigueras la cual puede considerarse como la parte oeste de la veta.

<p>HW-001 (26233), rampa 220, pto 220/4* Andesita de color gris claro, moderadamente alterada, apenas y se alcanza a distinguir la textura porfídica, con los cristales de plagioclasa totalmente alterados a arcillas; hay vetillas de cuarzo con algo de calcita, cubos de pirita diseminados por toda la muestra, y se llega a observar una vetilla de pirita con calcopirita, esta última se puede ver algo alterada a colores azul – púrpura en algunos cristales.</p>	
---	--

HW-002 (26248), Rampa 220, pto 220/42
Andesita de color gris, moderadamente cloritizada, aún se puede distinguir la textura porfídica con algunos cristales de plagioclasa aun sanos; la roca tiene vetilleos de cuarzo, piritita diseminada en toda la muestra, pero principalmente se acumula en las zonas de fractura, se llegan a ver pequeñísimas acumulaciones de calcopirita.



HW-003 (26249), Rampa 220, pto 220/42
Andesita de color gris de textura porfídica, fuertemente cloritizada, con vetilleo de cuarzo y calcita y con piritita diseminada en algunos planos de fractura.



HW-004 (26250), Rampa 220, pto 220/42
Andesita de color rojizo de textura porfídica, con cristales de plagioclasa euhedrales de tamaño promedio de 5 mm, algunos aun frescos, pero en su mayoría alterados a arcillas, la roca esta levemente cloritizada, y en los planos de fractura hay cristales de tamaño medio de piritita cubica diseminada.



HW-005 (26251), Rampa 220, pto 220/42
Muestra tomada en zona brechada con fragmentos de andesita fuertemente cloritizados y silicificados, embebidos en una matriz de cuarzo con un poco de calcita y con piritita diseminada en varias zonas de la muestra; además está fuertemente fracturada, y en los planos de fractura hay acumulación de limonita y otras alteraciones, como arcillas blancas, y en menor cantidad algunas arcillas de color negro.



El grupo H está formado por las muestras tomadas en los puntos donde aflora la veta hormiguera, una de las estructuras principales de esta mina.

H-001 (26202), Cro W250W

Andesita de color gris claro fuertemente cloritizada, con una alteración de color rojizo en algunos planos de fractura, y con vetas de cuarzo y calcita que varían entre 10-30 mm de espesor, formando mosaicos de grano grueso, y en algunas partes donde la veta se fracturo se pueden ver los cristales de calcita; hay calcopirita y bornita diseminada en la roca encajonante cerca de las vetas.



H-002 (26203), Cro W250W

Andesita de color rojizo moderadamente cloritizada con textura porfídica, y con vetillos de calcita y cuarzo de grano fino, con pequeñas acumulaciones de pirita, calcopirita y bornita; en algunos planos de fractura hay una alteración de color rojo en la cual también hay pirita diseminada.



H-003 (26226), Pto 140/3

Muestra de veta de calcita con acumulación de sulfuros, entre ellos pirita, pero principalmente uno de color gris con tonalidad azul de grano muy fino el cual no se reconoce en muestra de mano, pero por la relación textural, el crecimiento de los cristales de calcita finos con algunos de cuarzo, y todo revuelto con los sulfuros y algunas arcillas blancas, se espera que se trate de sulfuros de Ag.



H-004 (26228), Pto 135/1

Muestra de ramaleo de veta, con fragmentos de andesita gris claro con textura porfídica fuertemente alterada a arcillas de color blanco, verdes y por último una oxidación de color naranja rojizo, las vetas de cuarzo se encuentran muy corroídas con acumulación de arcillas de color negro en las cavidades dejadas por el crecimiento de los cristales



EL grupo NS está compuesto de muestras tomadas en vetas de cuarzo cuya dirección preferencial es Norte – Sur, opuesta a las estructuras principales que tienen direcciones preferenciales Este – Oeste, por ello se ha definido este sistema de vetas como Norte – Sur.

NS-001 (26204), Fte 261

Muestra de veta de cuarzo blanco que en los últimos eventos se deposita cuarzo amatista de textura plumosa con cristales de tamaño variable entre 3-15 mm, también hay fragmentos de tamaños variables de andesita muy silicificada, con tonos verdes a grises con vetillos de cuarzo blanco y algunos cristales de calcita, envueltos en la veta de cuarzo amatista, se ven pequeños cristales de sulfuros diseminados tanto en el ramaleo de vetas como en los fragmentos de roca.



NS-002 (26225), Pto 261/12

Muestra de ramaleo de veta de cuarzo blanco con cristales de tamaño variable entre 1-5 mm, con fragmentos de andesita verde fuertemente silicificada, en algunas partes en donde se pueden ver las cavidades dejadas por los cristales de cuarzo hay cristales blancos lechosos con lustre vítreo y de habito botroidal de tamaño aproximado de 5 mm que se sobrepone a los cristales



de cuarzo, se trata de calcita. En toda la muestra hay sulfuros diseminados, principalmente se observa pirita, pero además también hay algunos sulfuros de color gris que se determinaran con microscopia. Además de lo fuertemente silicificada que está la roca se observa una alteración moderada de arcillas de color blanco a verde.

NS-003 (26227), Pto 261/12

Muestra de ramaleo de veta de cuarzo blanco crustiforme con cristales finos, tiene entre las bandas de crecimiento del cuarzo sulfuros depositados, como pirita y otros mas no reconocibles en muestra de mano, en donde la veta toca con la roca encajonante se observa una fuerte silicificación, además de una fuerte cloritización que está alterando a la andesita, aunque aún es posible reconocer la textura porfídica.



El grupo P está formado por muestras tomadas en superficie, en el área de Pabellón, lugar en el que aflora la Veta Hormigueras; estas muestras nos servirán para ver la diferencia de alteraciones y comparar la paragénesis mineral.

P-001 (26234), Pabellón

Muestra de andesita roja, de textura porfídica, fuertemente cloritizada, con vetillas de cuarzo y pirita cubica fina; en los planos de fractura hay acumulación de limonita como resultado de la alteración supergénica.



P-002 (26235), Pabellón

Muestra de veta de cuarzo blanco oqueroso con cristales de tamaño variable entre 5-20 mm fuertemente alterada por Mn y por limonita. Dentro de las bandas formadas por el cuarzo se observa la acumulación de sulfuros de color gris oscuro, que al ser analizado con el Nitón dio una lectura para Ag de 250 ppm, por lo que se espera que se trate de sulfuros de Ag como acantita, lo cual se describirá con microscopía.



P-003 (26236), Pabellón

Muestra de falla, se trata de material muy molido con fragmentos de veta de cuarzo y de andesita fuertemente alterada: en general todo el material de esta falla se encuentra fuertemente limonitizado, aunque es posible observar vetilleos de cuarzo blanco y de arcillas verdes que en relación textural se puede inferir que fueron post-falla.



P-004 (26237), Pabellón

Muestra de veta de cuarzo blanco, en algunas partes se puede observar el crecimiento de cristales formando mosaicos de grano medio a grueso mientras que en algunas pequeñas áreas es posible ver drusas con cristales de tamaño variable entre 1-10 mm, se encuentra formando bandas dando como resultado una textura crustiforme, y se evidencia la presencia de sulfuros en algunas bandas, que están intercaladas con cuarzo, las cuales se distinguen por tener un color gris oscuro que al ser analizadas con el Nitón dio valores para Ag de 14591 ppm, se identificara la especie mineral con microscopía.



P-005 (26234), Pabellón

Muestra de veta de cuarzo, se observan claramente las bandas de crecimiento de cuarzo intercaladas con sulfuros, que dan como resultado una textura crustiforme, y en un lado de la muestra se ven los cristales de cuarzo oqueroso que indican la dirección de crecimiento que tuvo la mineralización.

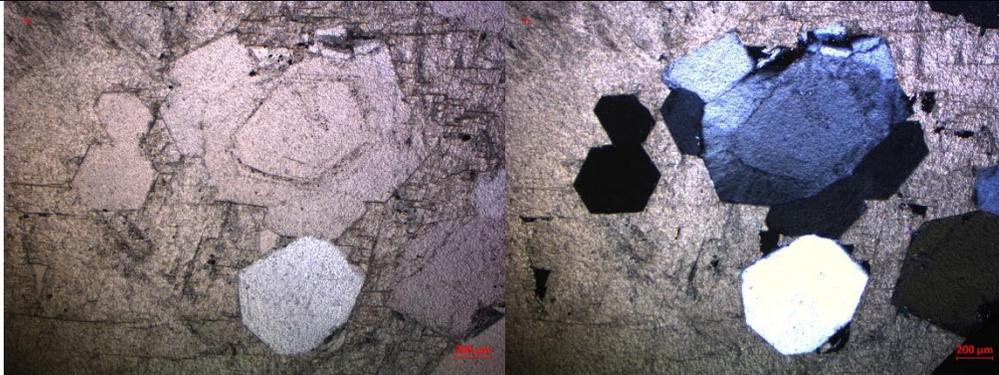


Apéndice B

Estudio petrográfico

NS-002-a

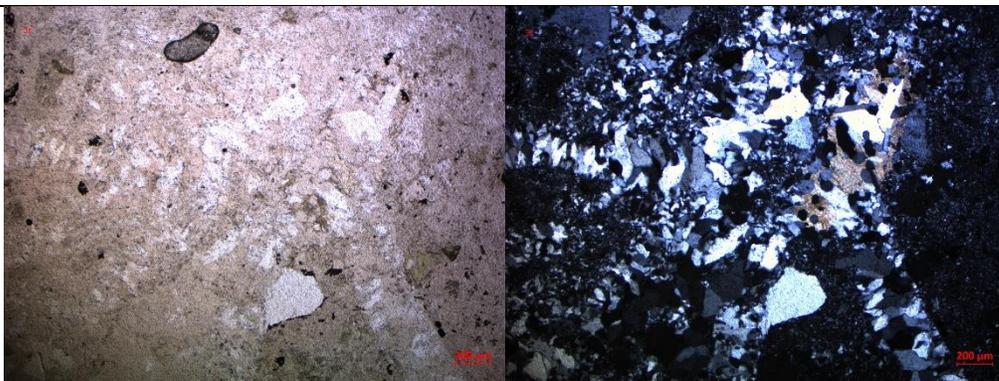
Se trata de un corte paralelo de una vetilla rellena de cuarzo con calcita. Los cristales de calcita presentan una extinción ondulante que parece indicar diferentes eventos de mineralización y en algunas fracturas se ven algunos minerales opacos disseminados.



NS-002-b

Se trata de una roca porfídica con fenocristales de cuarzo, plagioclasas y anfíboles embebido en una matriz fina de cuarzo, plagioclasa, ferromagnesianos y algunas arcillas. La roca presenta una alteración selectiva en los ferromagnesianos hay una cloritización moderada, y en la matriz se observa una silicificación. En un evento posterior la roca fue brechada por fracturas las cuales fueron rellenadas de cuarzo y calcita en diferentes eventos de mineralización.

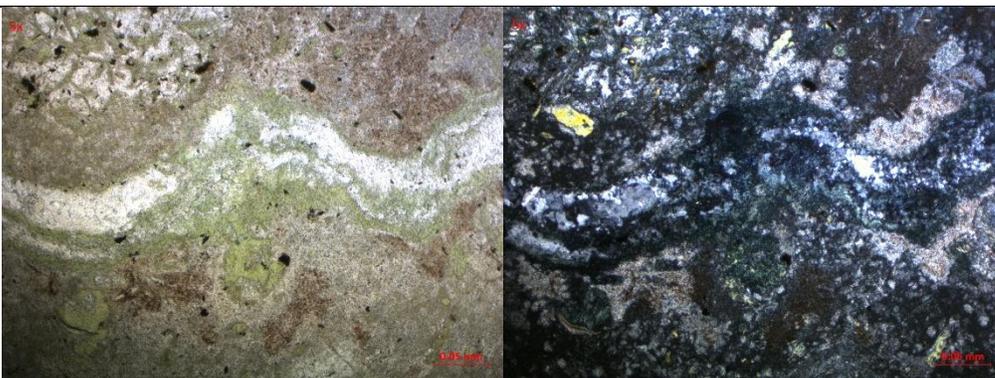
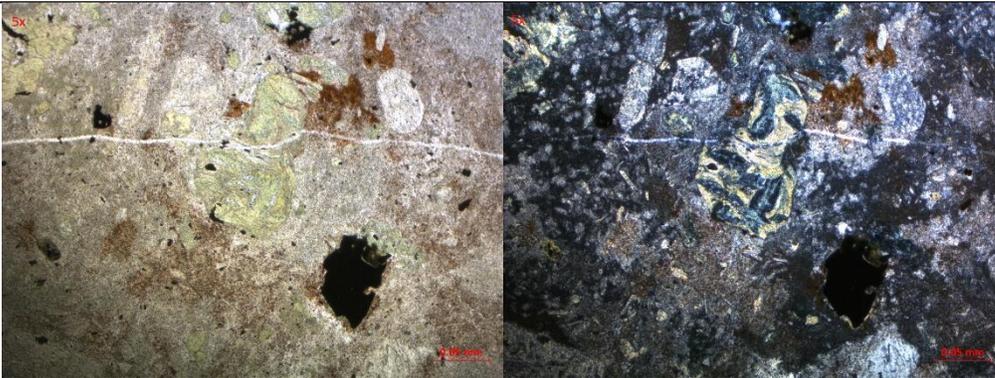
Hay minerales accesorios, que representan apenas un 3%, como zircón, rutilo, pirita y otros opacos no reconocidos en lámina delgada.



H-002-a

Roca de textura porfirítica, con una matriz de grano fino compuesta por cuarzo y feldespatos fuertemente alterada por sericita.

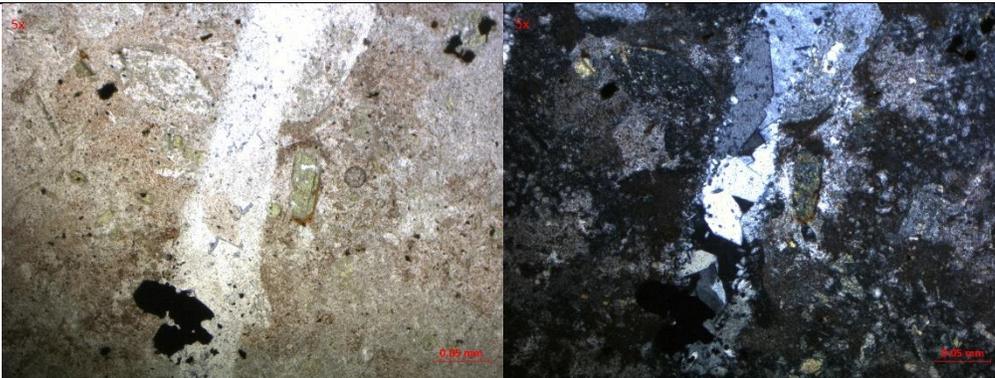
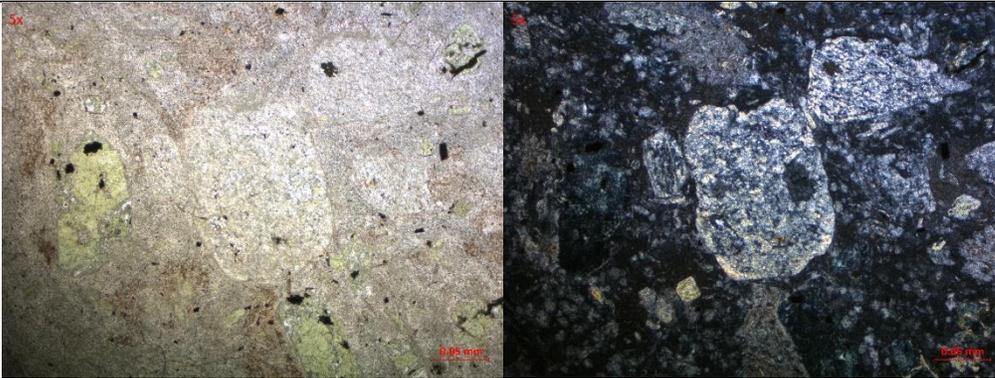
Se observan fenocristales de composición ferromagnesiana, posiblemente anfíboles, con una alteración selectiva e incipiente de color rojo y otra alteración pervasiva de clorita. También se observan cristales subhedrales de plagioclasa con textura poiquilitica, algunos fuertemente alterados a sericita, aunque también hay algunos otros con poca alteración en los que aún se pueden apreciar las maclas de carlsbad de contacto.



H-002-b

Roca de textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa, algunos de ellos con alteración incipiente a sericita y algunos cristales de composición ferromagnesianas con alteración selectiva y pervasiva a clorita e incipiente a ferroginosa.

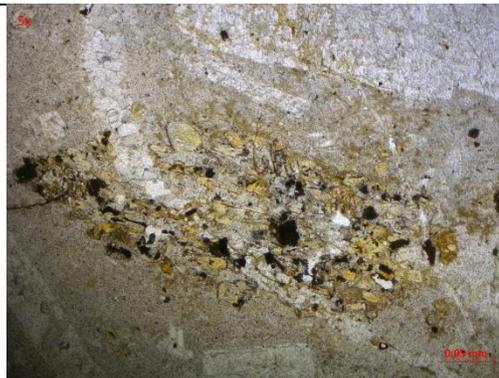
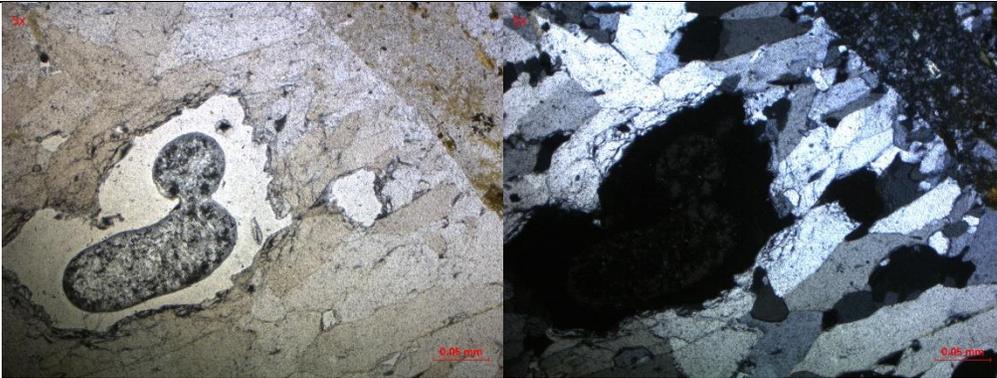
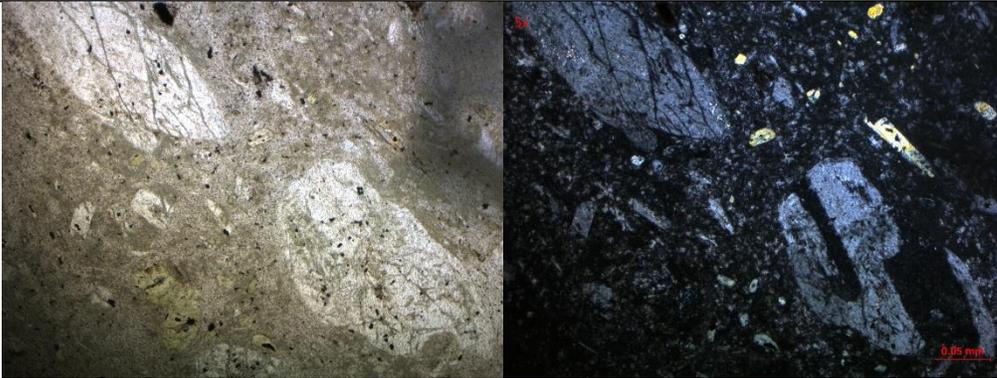
Estos fenocristales están embebidos en una matriz muy fina de color pardo con apariencia sucia, compuesta principalmente de cuarzo, plagioclasa, y algunos ferromagnesianos. Hay pequeños minerales opacos diseminados por toda la roca, aunque solo representan un 3%. La roca presenta diferentes vetillas rellenas principalmente de cuarzo oqueroso, y en el centro de las vetillas hay cristales de calcita junto con algunos minerales opacos no reconocibles con luz transmitida.



CH-006

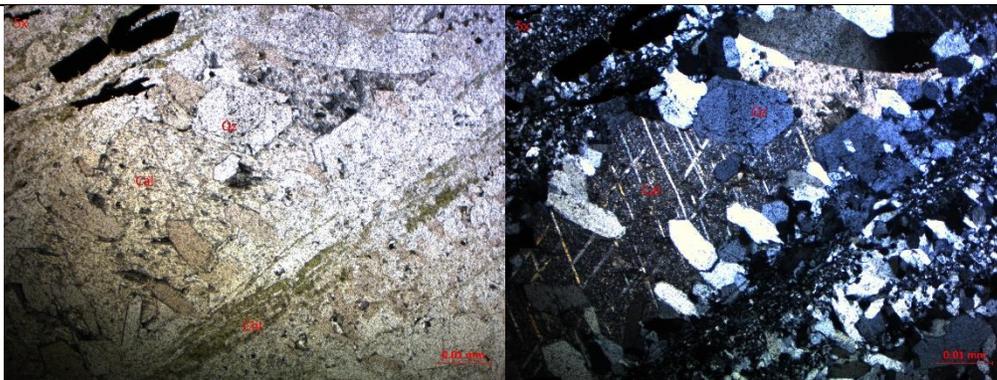
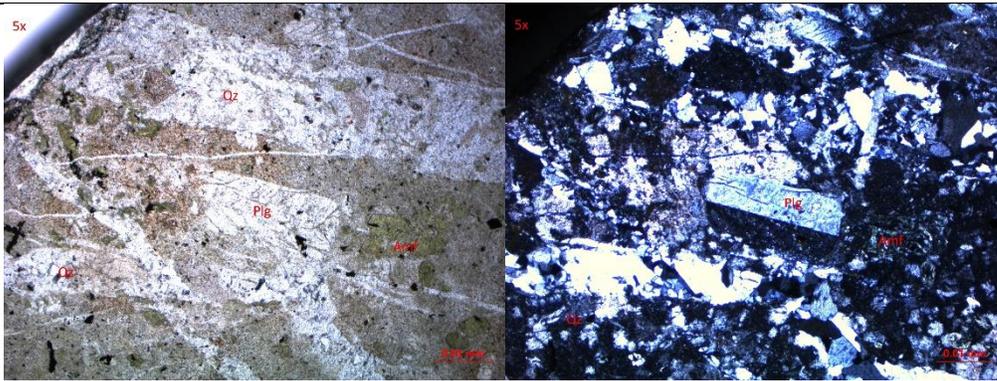
Se trata de una andesita fuertemente alterada, con fenocristales de plagioclasas alteradas y algunos anfíboles mayormente cloritizados. Hay algunas vetillas de cuarzo que cortan la roca en diferentes direcciones.

Se observan cristales subedrales de relieve moderado a alto, de color amarillo, con un fuerte pleocroísmo que cambia a varias tonalidades de amarillo, presenta extinción recta, posiblemente se trate de un ortopiroxeno. Dentro de estos cristales (sobre todo en aquellos fuertemente fracturados) hay algunos minerales opacos, algunos de ellos los de color negro son cuadrados por lo que se infiere que se trate de pirita, hay algunos otros anedrales de color pardo oscuro a rojizo que podrían ser limonita o hematita alterando a la pirita.



HW-003-a

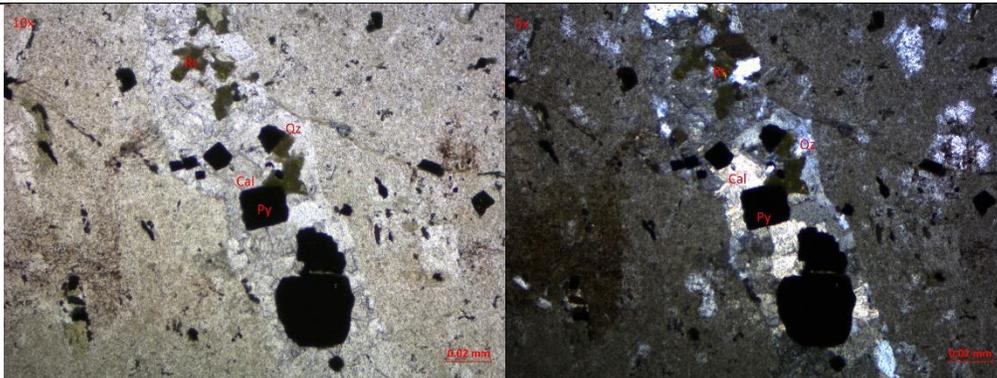
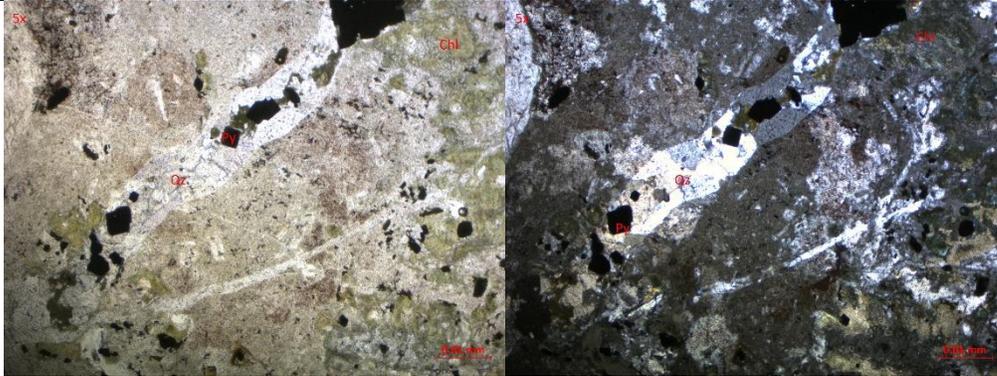
Andesita de textura porfirica, con fenocristales de plagioclasas moderadamente alteradas, se pueden ver cristales completos y eudrales con macla de contacto. También hay fenocristales de anfíboles fuertemente alterados a clorita con contenido de minerales opacos. La matriz microlítica está compuesta principalmente de plagioclasas moderadamente alterada a sericita. La roca presenta abundantes vetillas rellenas de cuarzo, en algunas, sobre todo en aquellas más gruesas se pueden ver cristales de calcita en el centro entre los cristales de cuarzo. Los minerales opacos se pueden encontrar diseminados en la matriz, adentro de los fenocristales y entre los cristales de las vetillas.



HW-003-b

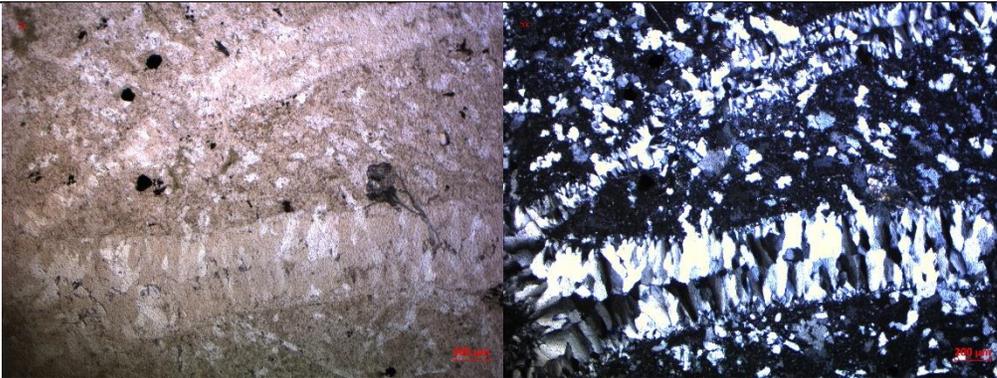
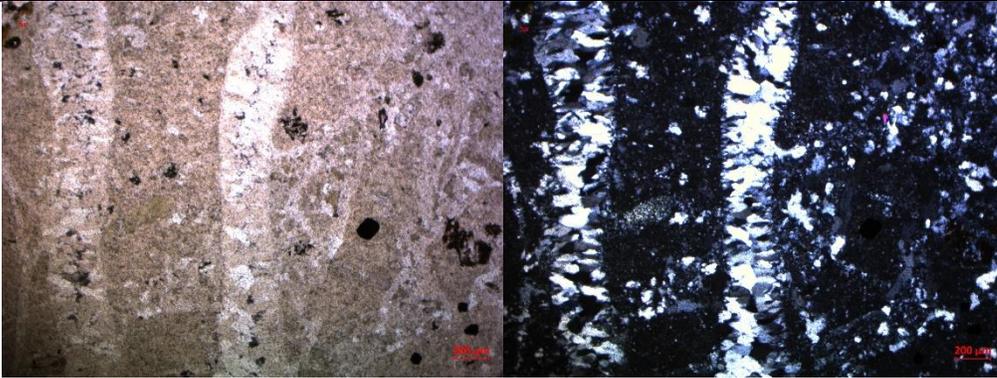
Roca porfírica con fenocristales de plagioclasas fuertemente alteras y fenocristales de anfíboles y piroxenos moderadamente cloritizados, la matriz microlítica está compuesta de plagioclasas y cuarzo y se presenta algunas zonas con oxidación visible por la coloración roja.

Hay vetillas de cuarzo con minerales opacos entre los cristales, por la forma cuadrada de estos minerales se infiere que se trata de pirita.



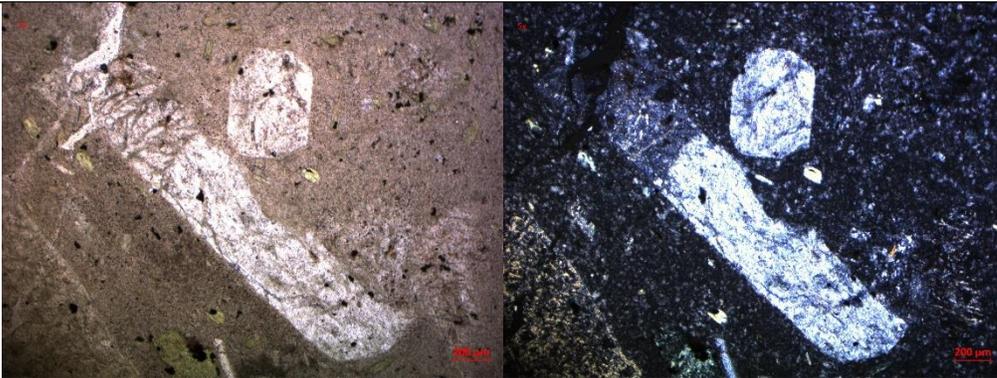
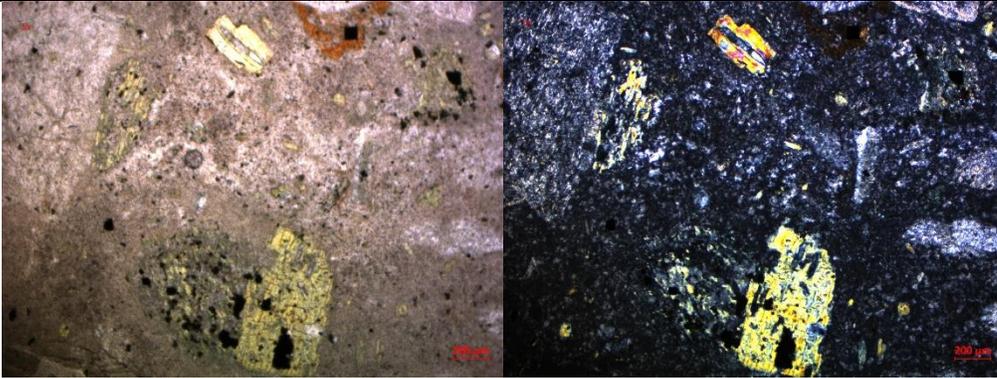
C-016

Muestra de andesita, fuertemente silicificada con vetillas rellenas de cuarzo y en el centro con calcita. En algunas es posible ver hasta dos periodos de mineralización de cuarzo, la calcita se precipito en un tercer evento en el cual se observa textura de relleno de hematita (triángulos). Hay pirita diseminada en la roca la cual se reconoció por la forma de cuadrados y hexágonos de los cristales opacos. Se observan relictos de cristales de plagioclasa con alteración incipiente de arcillas. También se observan algunos cristales de anfíboles con alteración incipiente a clorita.



CA-002

Se trata de una roca andesítica, con una matriz microgranulada formada sobre todo de plagioclasas. Se observan fenocristales de plagioclasas con una alteración media a sericita. También se observan fenocristales de minerales ferromagnesianos, posiblemente se traten de anfíboles fuertemente alterados a biotita y epidota. Hay cristales cuadrados de pirita diseminados por toda la matriz y algunos concentrados en huecos dejados por las fracturas en minerales ferromagnesianos. Hay algo de hematita alrededor de los fenocristales de epidota.

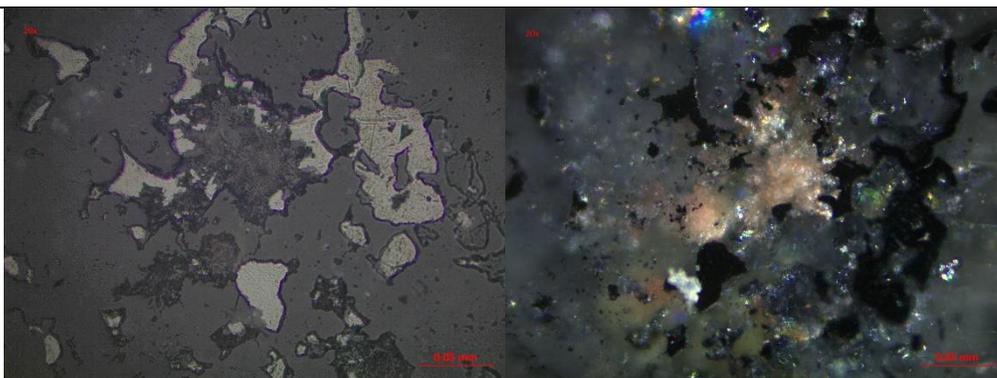
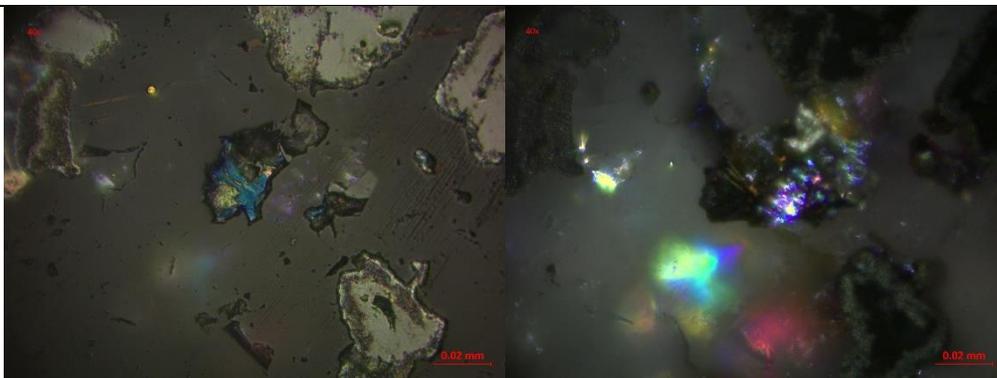
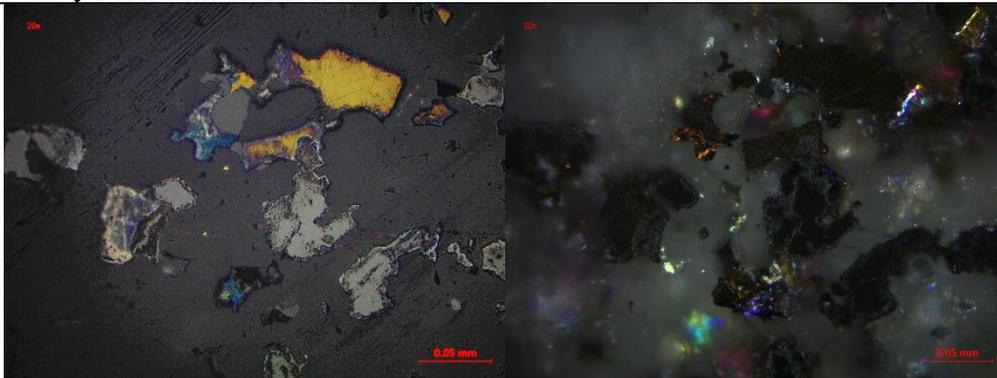


Apéndice C

Estudio minerográfico

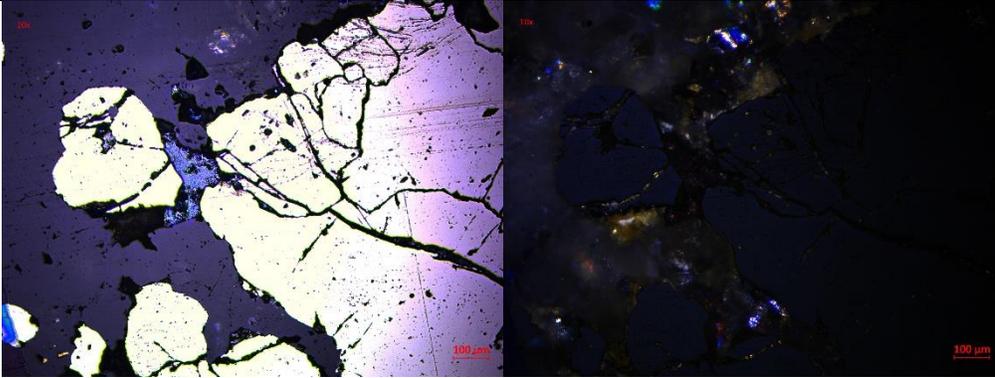
H-003-b

Se observa una textura con intercrecimientos de minerales tales como acantita, pirita, esfalerita y galena relleno de cavidades de minerales transparentes tales como cuarzo y calcita. En algunas partes la pirita está siendo alterada a calcopirita, en los cristales más grandes se pueden apreciar bordes de reacción. En algunas cavidades de menor tamaño se observan pequeños cristales de covelita intercrecidos con cristales de calcopirita y de acuerdo con los estudios del microscopio electrónico de barrido (SEM) un pequeño cristal de estromeyerita intercrecido.



H-003-c

Se trata de una muestra tomada de una veta donde se encontró cristales intercrecidos de galena, esfalerita y pirita rellenando cavidades entre las bandas de cuarzo y calcita. Los cristales de mayor tamaño son de pirita, algunos de ellos están fuertemente fracturados y los bordes del cristal y de las fracturas comienzan a estar alterados a calcopirita. En los cristales de esfalerita de mayor tamaño hay pirita diseminada. Así mismo hay cristales de pirita que tienen intercrecidos cristales de cuarzo y de esfalerita.

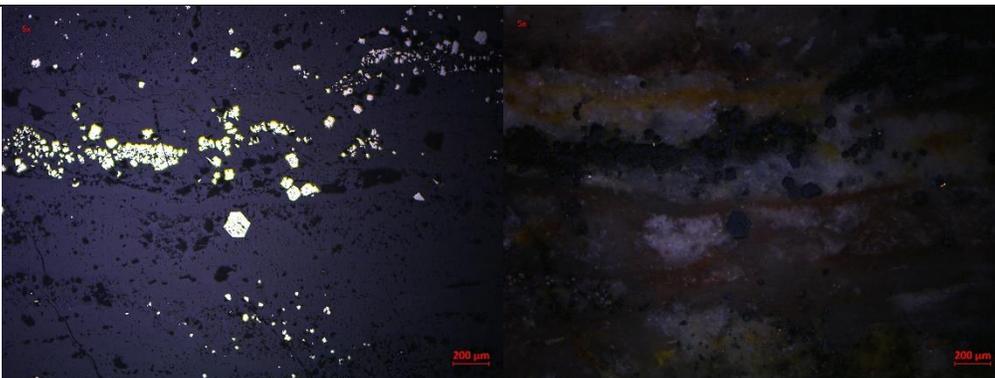


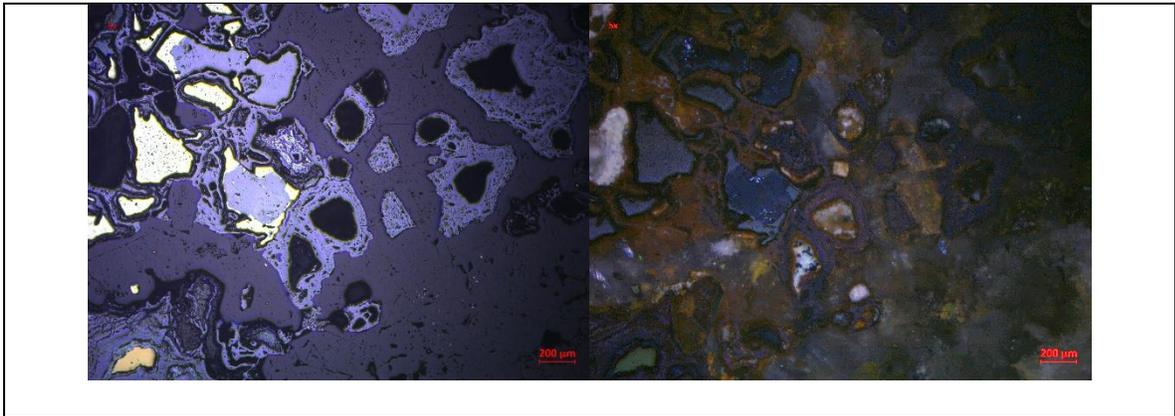
C-001

Muestra de una vetilla de cuarzo con calcita de entre 10 y 15 mm de espesor que atraviesa a la andesita en la que hay un intercrecimiento de pirita y calcopirita con bordes de reacción avanzados de goethita-limonita

Se observan bandas de pirita diseminada con cristales euedrales, algunos forman formas cuadradas que representan cubos de pirita y en otras partes se observan formando formas hexagonales las cuales representan rombododecaedros por lo que se puede inferir dos eventos de mineralización diferentes en estas vetillas.

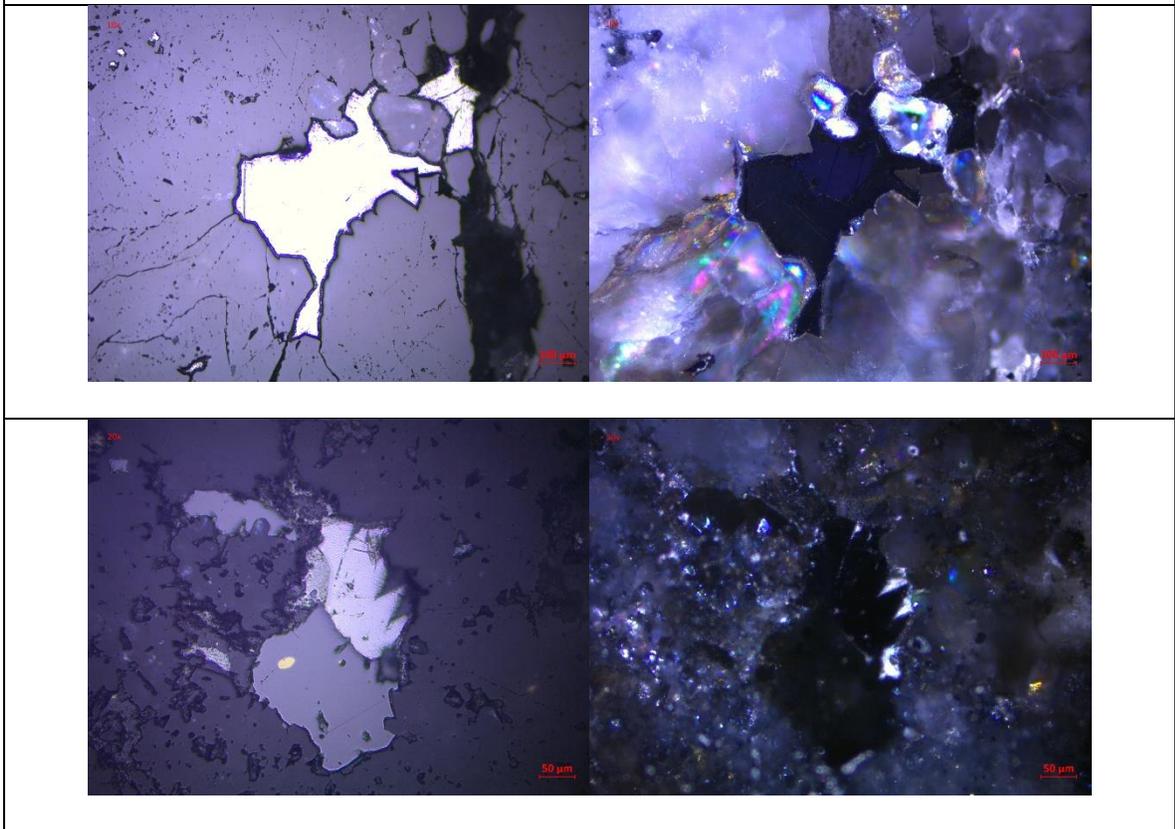
En esta sección se puede observar una textura brechada en la que los fragmentos angulosos corresponden con cristales de pirita y calcopirita y se encuentran cementados por un mineral gris con reflexiones internas de color naranja – amarillo el cual es goethita-limonita, que en realidad está reemplazando a la pirita.





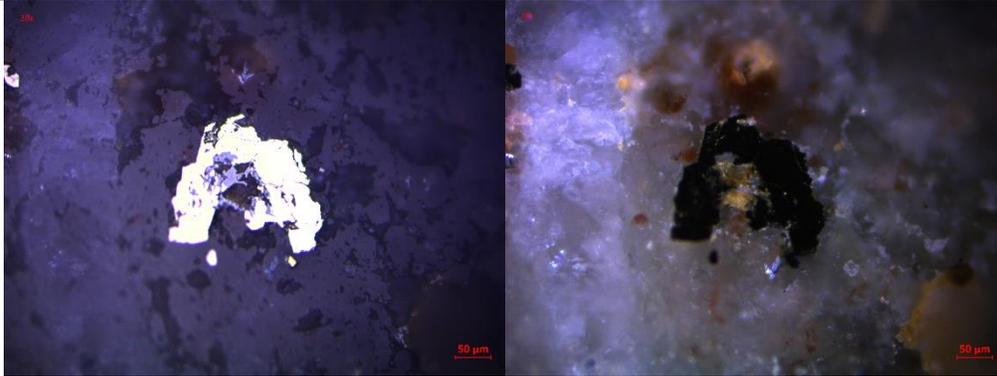
C-002

Muestra de ramaleo de veta con cristales de acantita, galena, esfalerita, pirita, calcopirita y stromeyerita relleno de cuarzo.



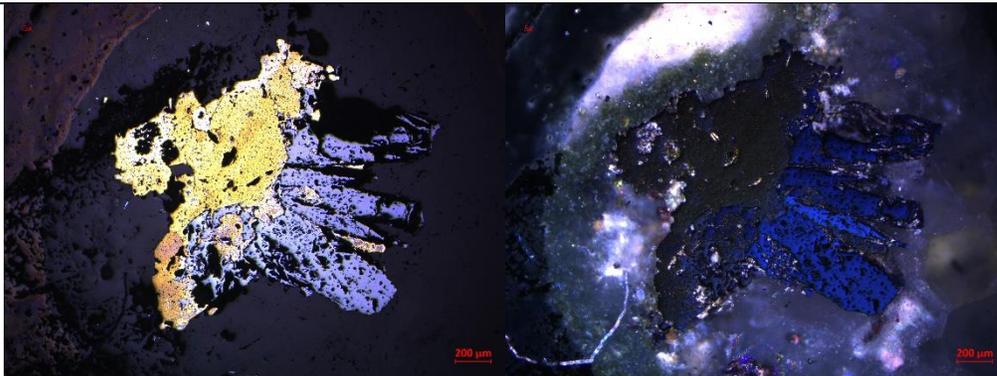
C-003

Se trata de una muestra de andesita fuertemente alterada a sericita y clorita, se puede distinguir la textura porfiritica con fenocristales de plagioclasas y piroxenos fuertemente alterados y una matriz compuesta principalmente de microcristales de plagioclasas y cuarzo, con cristales de pirita diseminados por toda la matriz.



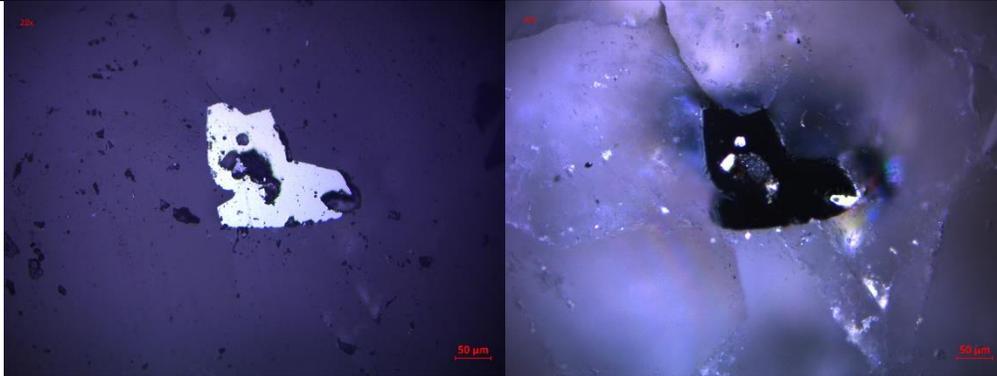
C-007A

Muestra de brecha con clastos de andesita cementados con cuarzo, hay cristales de pirita diseminados por el cuarzo y algunos más, de mayor tamaño se encuentran cerca de los clastos de andesita, estos mismos cristales de pirita se encuentran intercrecidos con cristales de hematita.



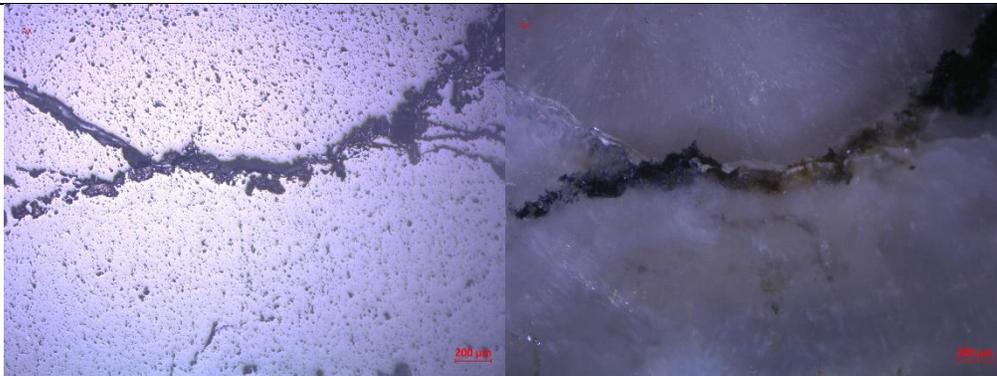
C-007B

Muestra de veta de cuarzo con algunos fragmentos de andesita, en algunas partes intercrecidos con el cuarzo se pueden observar cristales de pirita intercrecidos con esfalerita, acantita y algo de calcopirita, en algunas partes se pueden observar los contactos planos entre ellos, pero en general están esparcidos a lo largo de la veta de cuarzo con una misma dirección por lo que se infiere son contemporáneos.



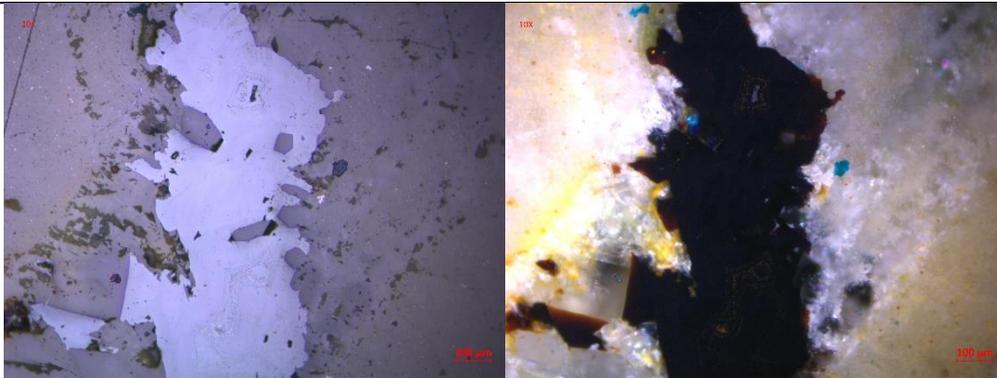
C-009

Muestra de veta con una textura coloforme de cuarzo con algo de rodonita, se pueden observar tres eventos de cuarzo, que crecen formando bandas, y entre cada uno hay un mineral de alteración amarillo (¿?) que está en las puntas de los cristales de cuarzo, además de pequeños cristales de pirita en el tercer evento, finalmente se puede observar un último evento de cuarzo que atraviesa de manera recta a los otros 3.



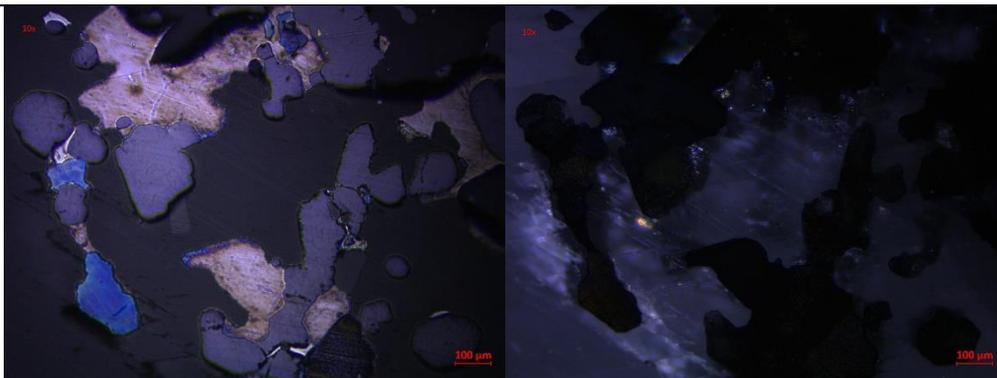
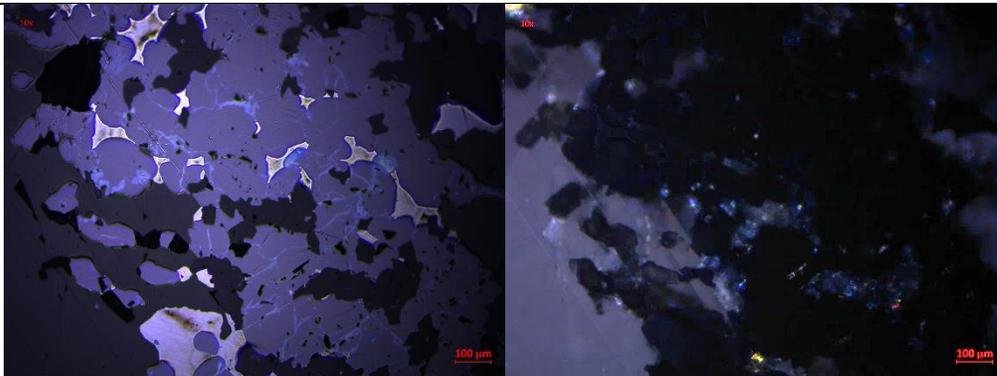
CA-005

Muestra de vetilla de cuarzo con cristales de pirita y calcopirita que parecen estar siendo reemplazados por hematita.



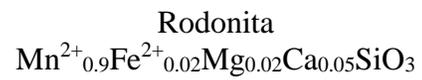
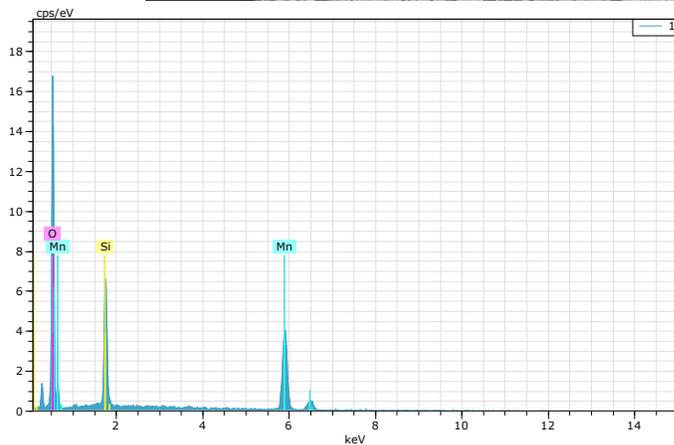
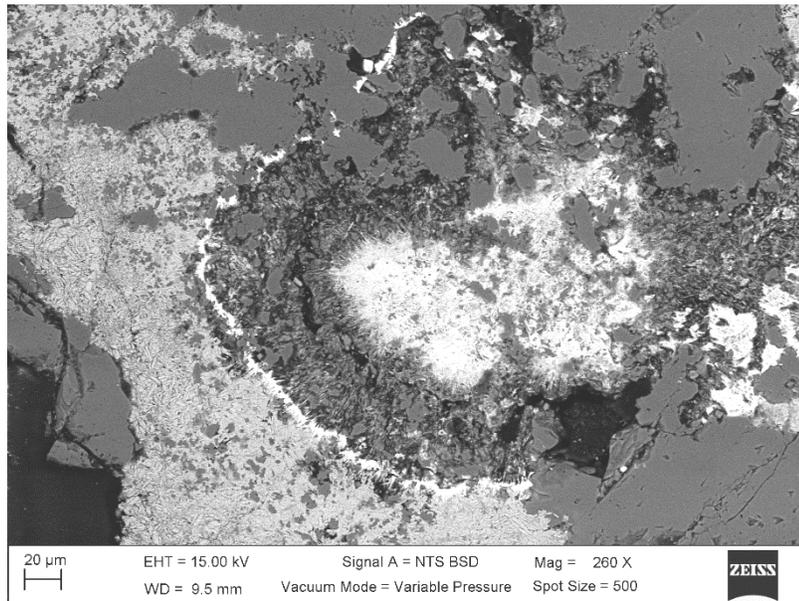
Rosario

Muestra de veta con cristales grandes de calcita intercrecidos con cristales pirita y esfalerita en los que se observa un borde de reacción el cual contiene algo de plata, además en algunas partes y en menor cantidad se observan pequeños cristales de acantita junto con la esfalerita.

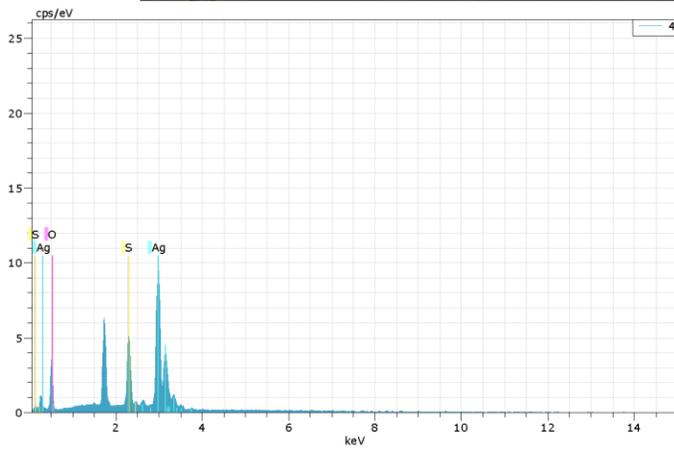
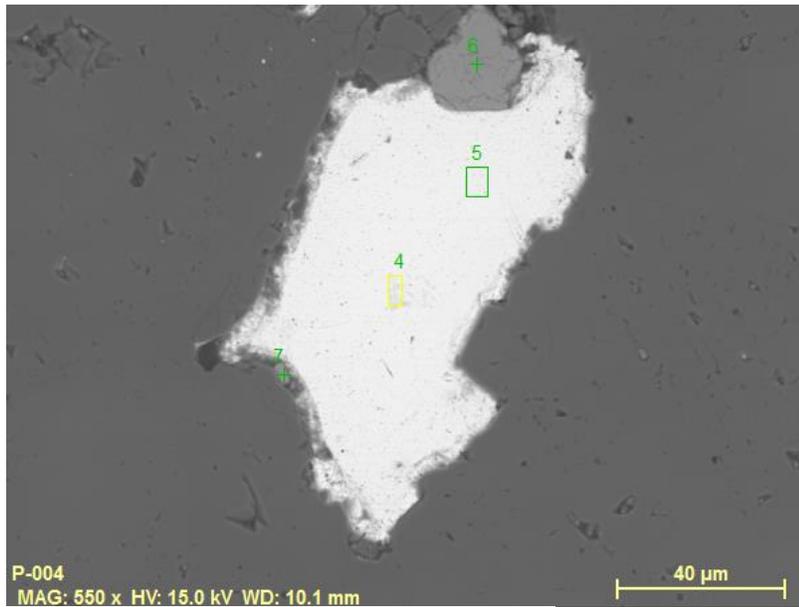


Apéndice D

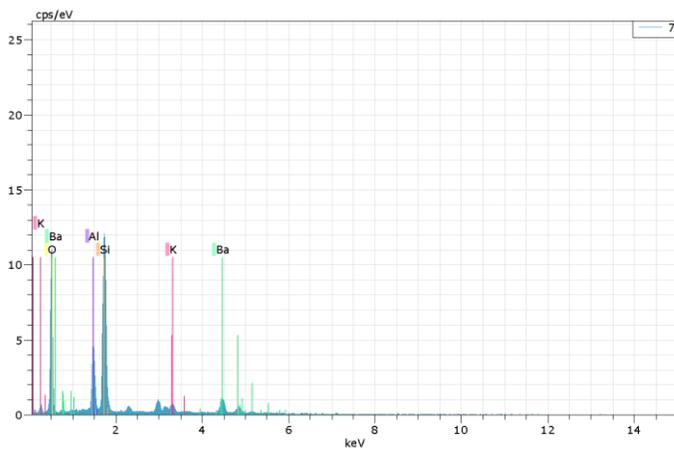
A continuación, se exponen los resultados obtenidos mediante el análisis de las muestras por Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).



Cristales de Rodonita intercrecidos en bandas de cuarzo colorforme.

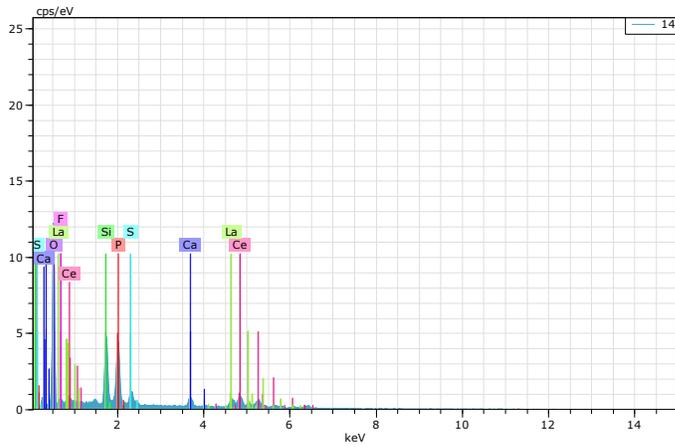
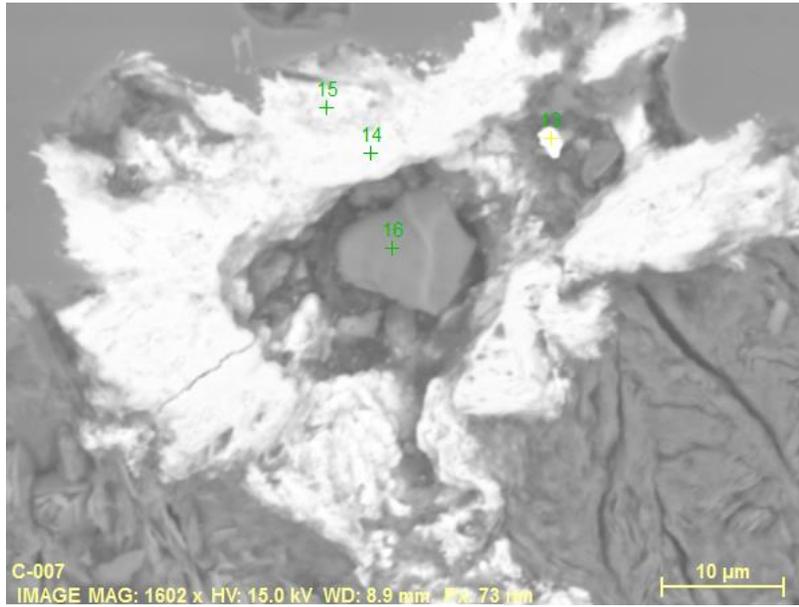


Acantita
 Ag_2S

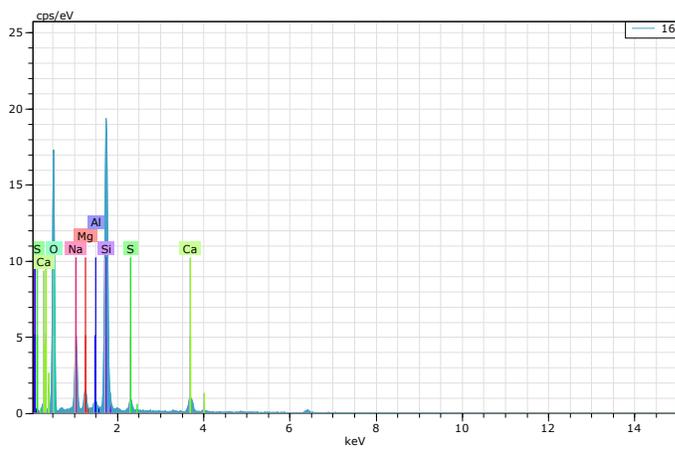


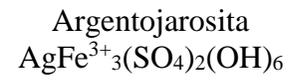
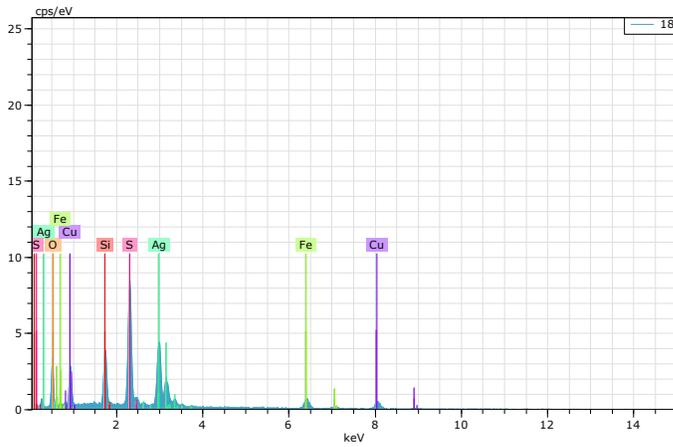
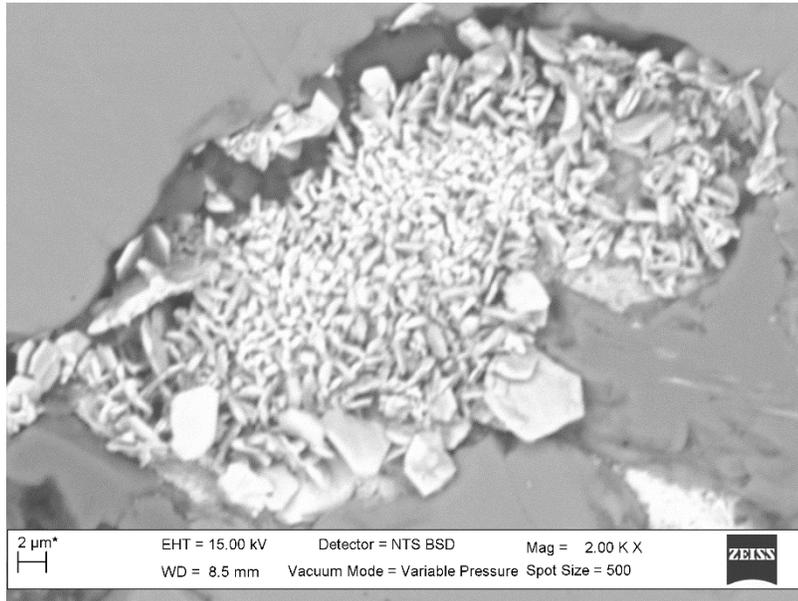
Adularia
 KAlSi_3O_8

Cristal de Acantita (4 y 5), intercrecido en cuarzo, con un cristal de hematita (6) y un microcristal de adularia con B reemplazando en parte al K (7).

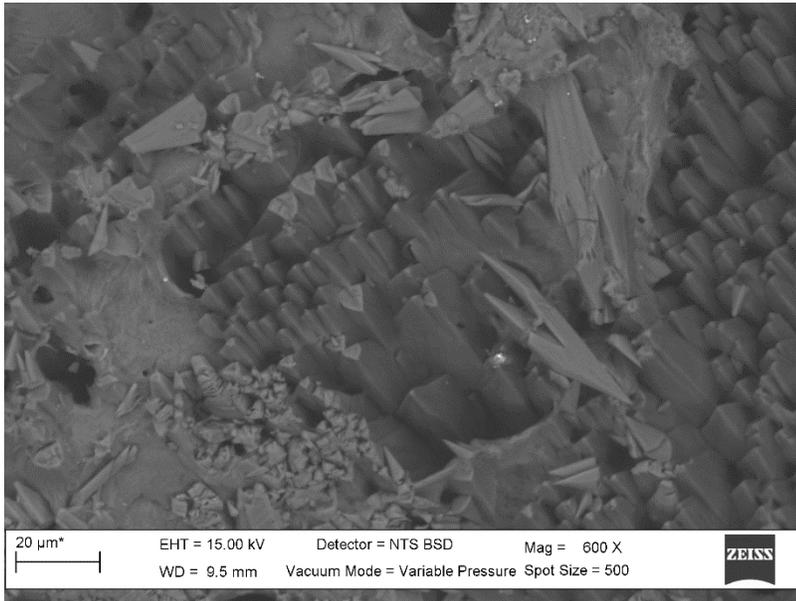


Monacita
 $Ce_{0.5}La_{0.25}Nd_{0.2}Th_{0.05}(PO_4)$

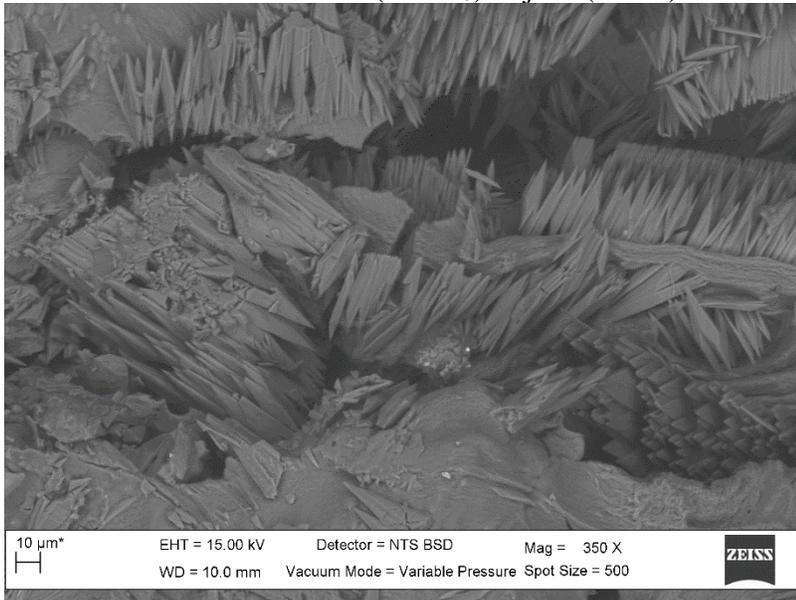




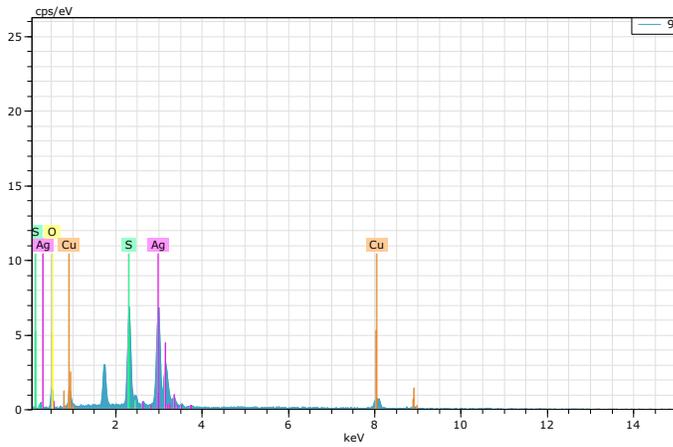
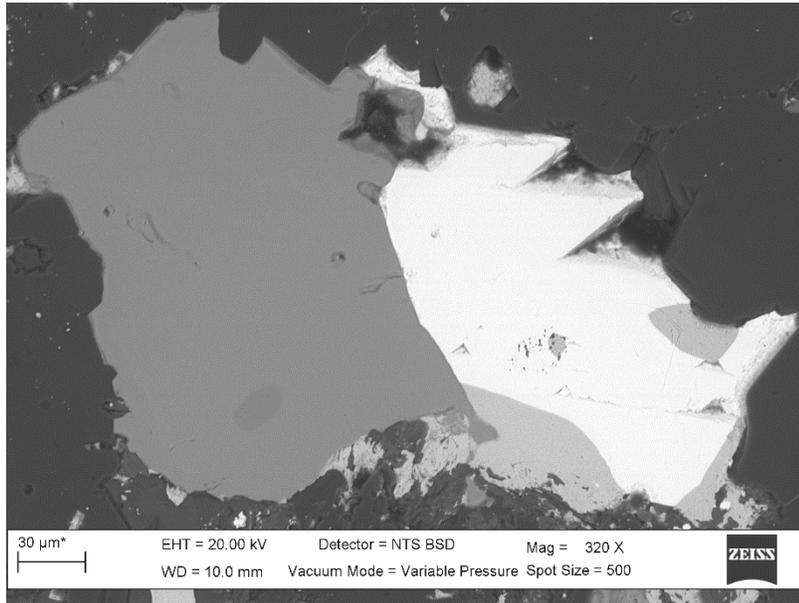
Láminas hexagonales de argentojarosita alterando cristales de acantita intercrecidos con piritita.



Cristales de calcita (CaCO_3) hojosa (Blade).

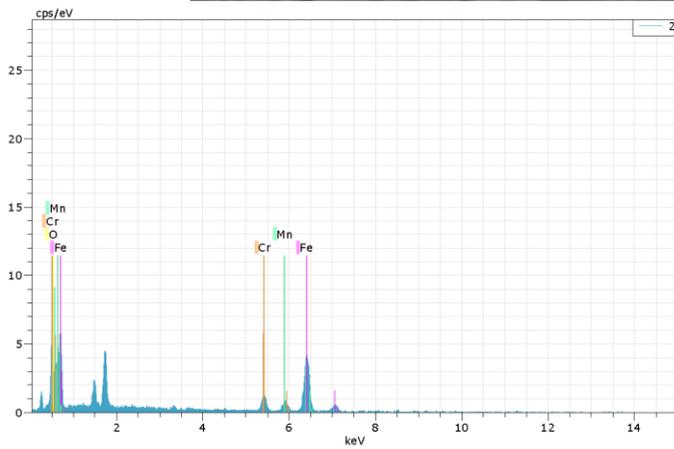
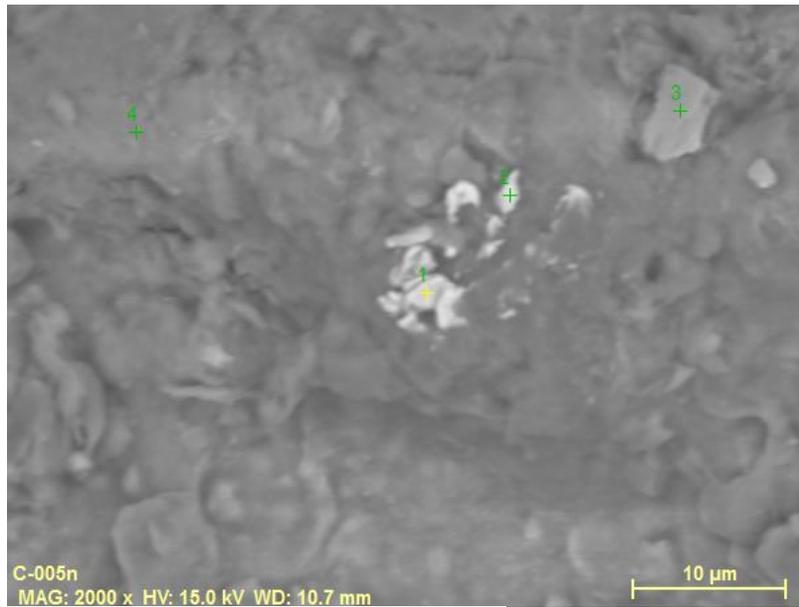


Cristales de calcita (CaCO_3) hojosa (Blade).



Stromeyerita
 CuAgS

Intercrecimiento de cristales de esfalerita con galena. Cristales de stromeyerita relleno de cavidades entre la galena y el cuarzo.

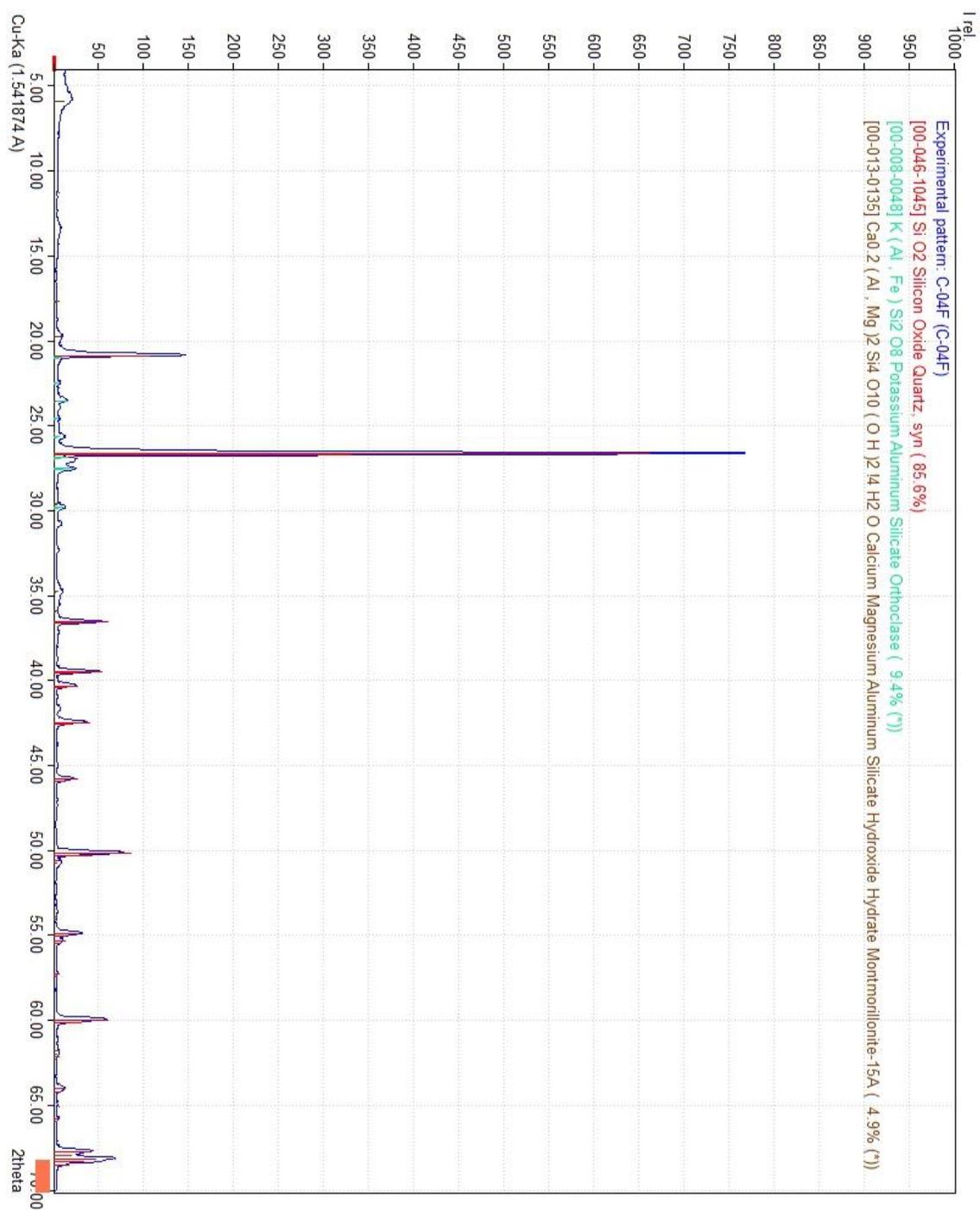


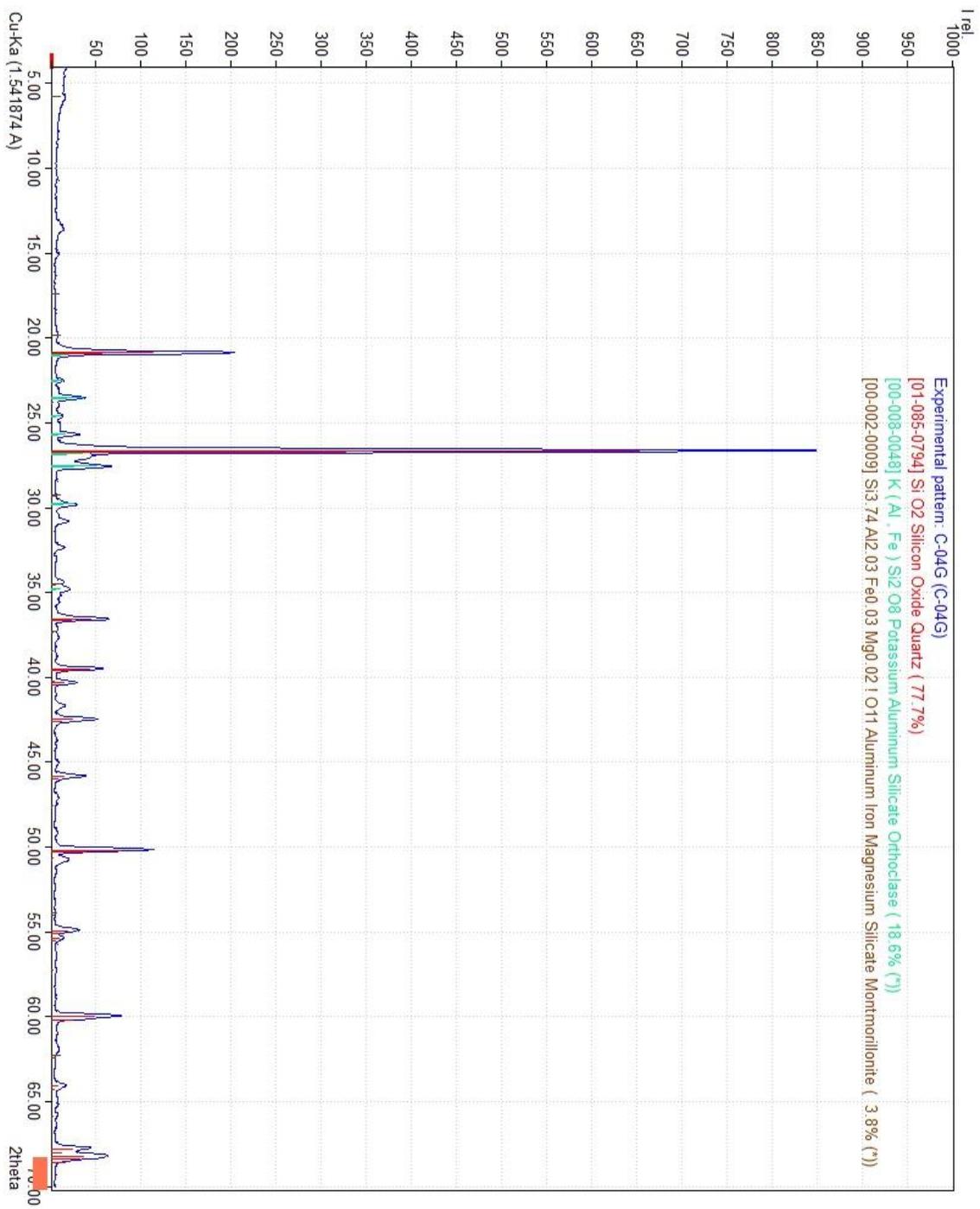
Mineral de Fe, Cr y Mn

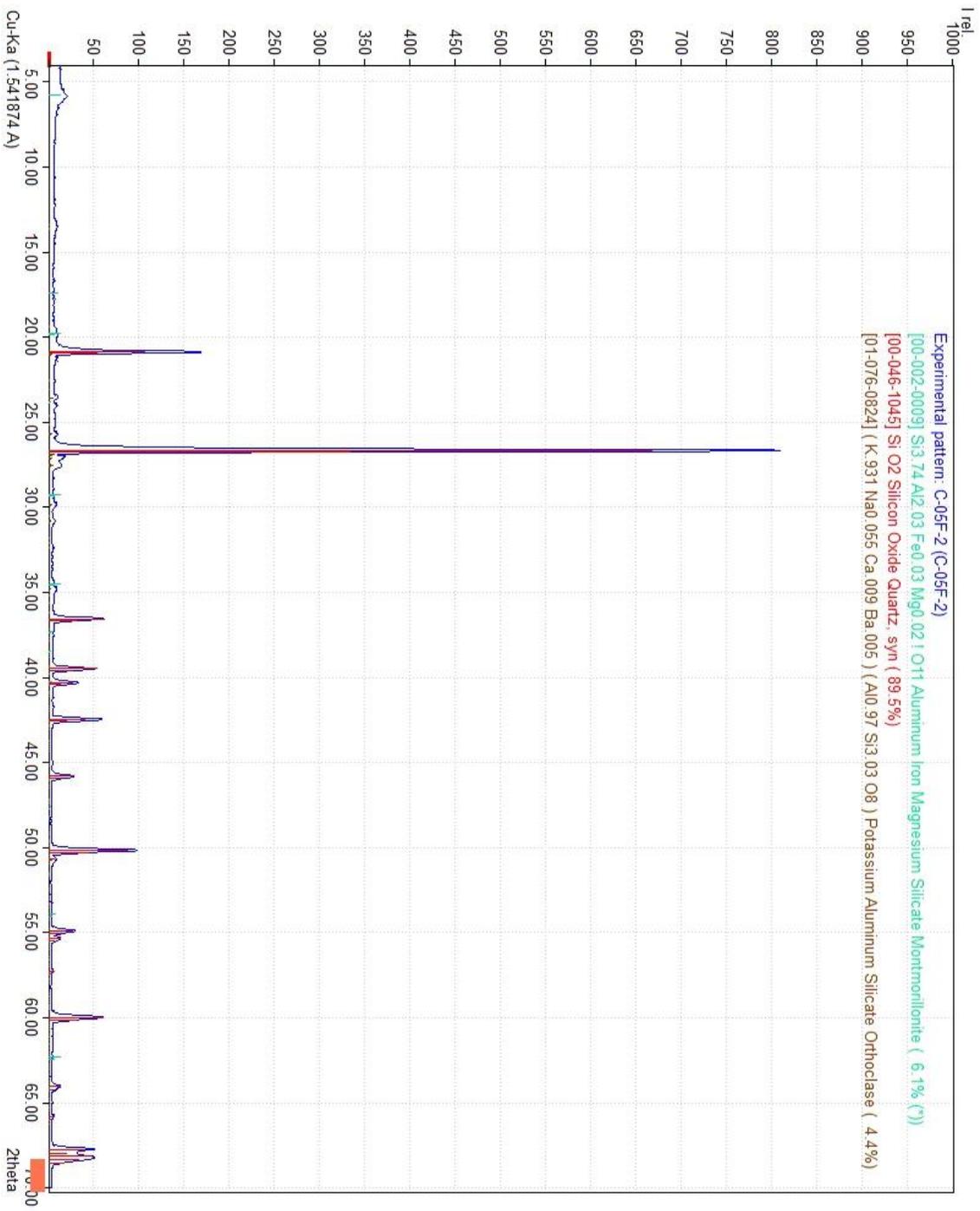
Microcristales encontrados en las zonas de falla.

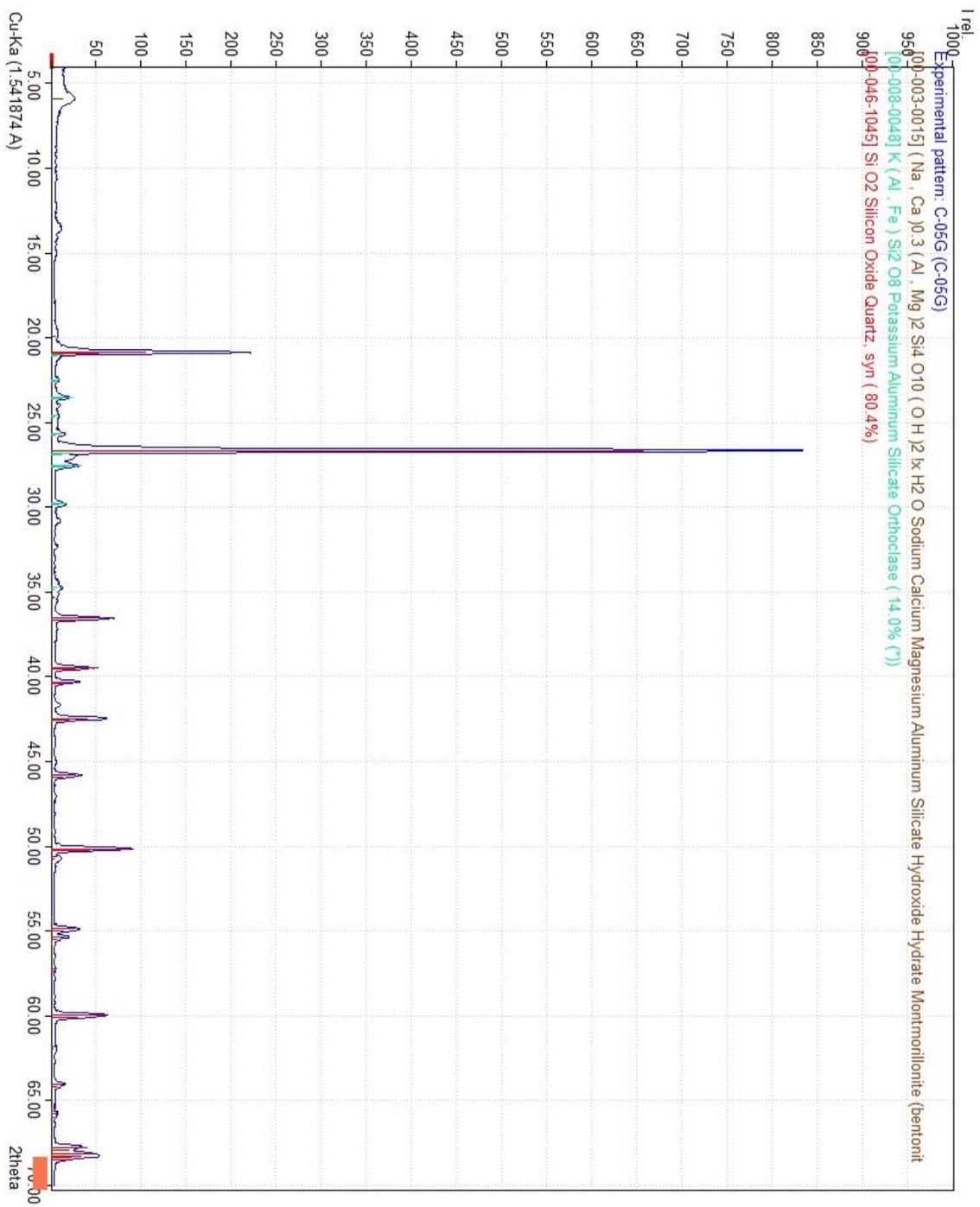
Apéndice E

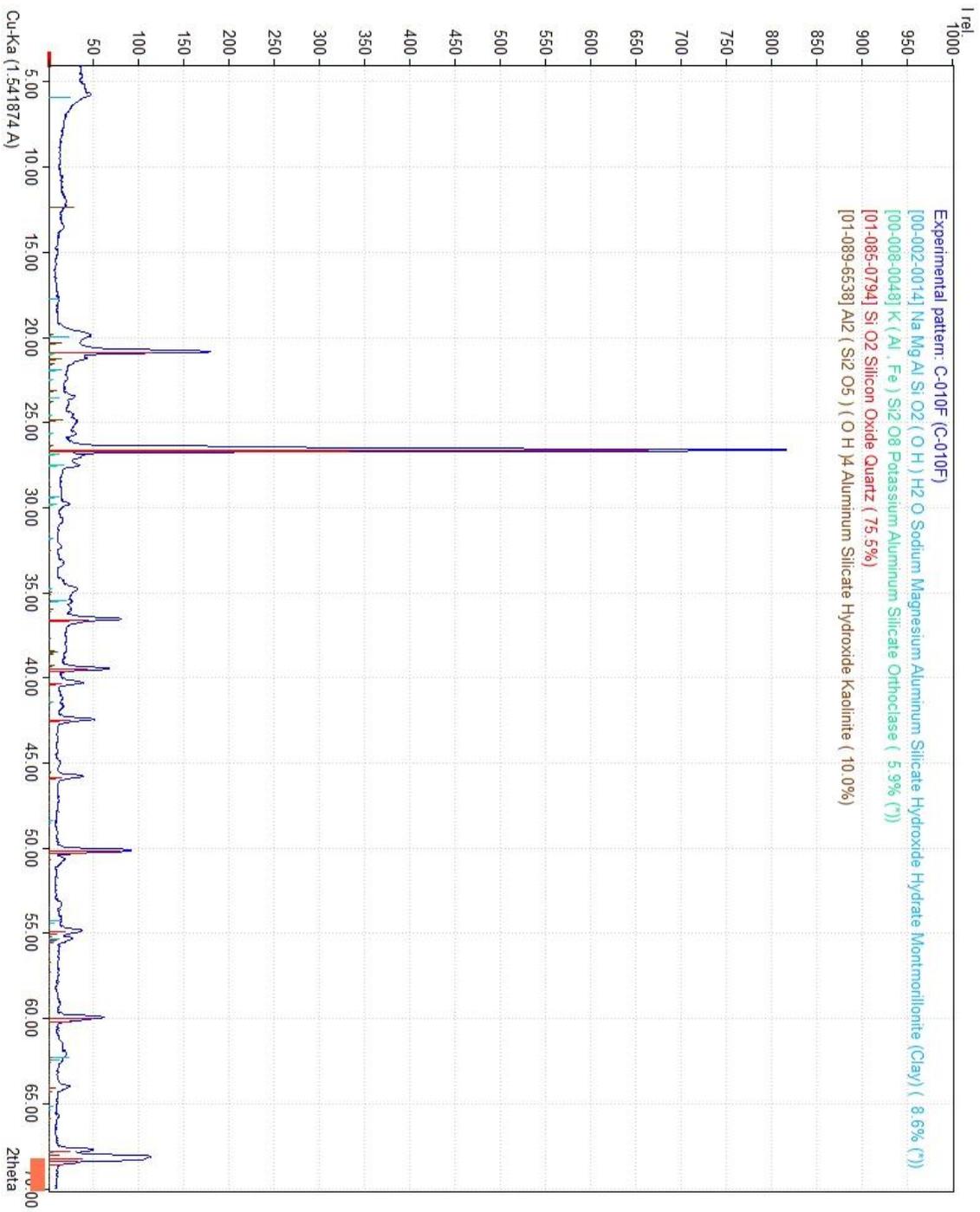
Resultados de análisis por Difracción de rayos X para muestras totales. Se trata de estimaciones semicuantitativas, en las que se pueden ver las fases minerales presentes en mayor cantidad para las muestras seleccionadas.

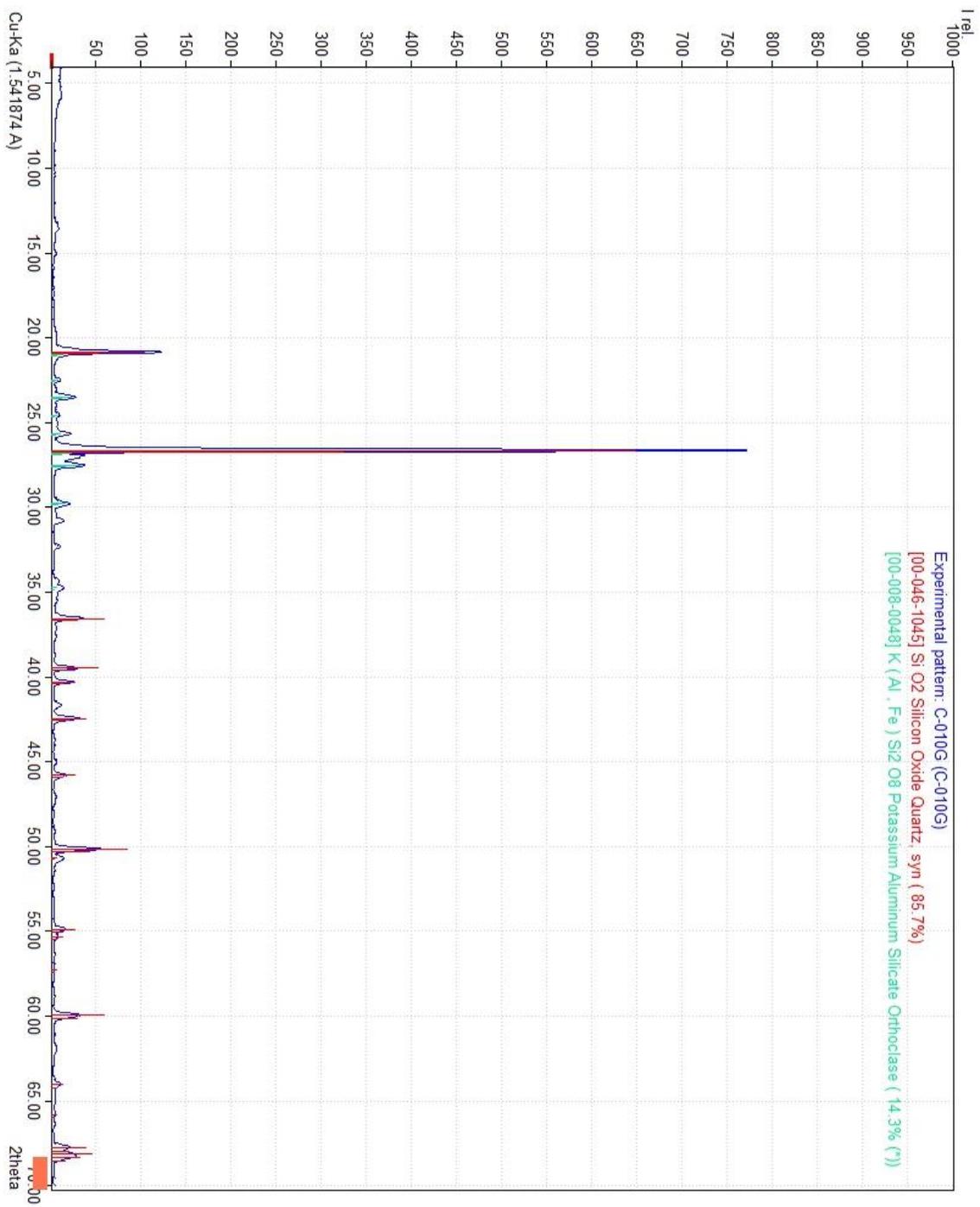




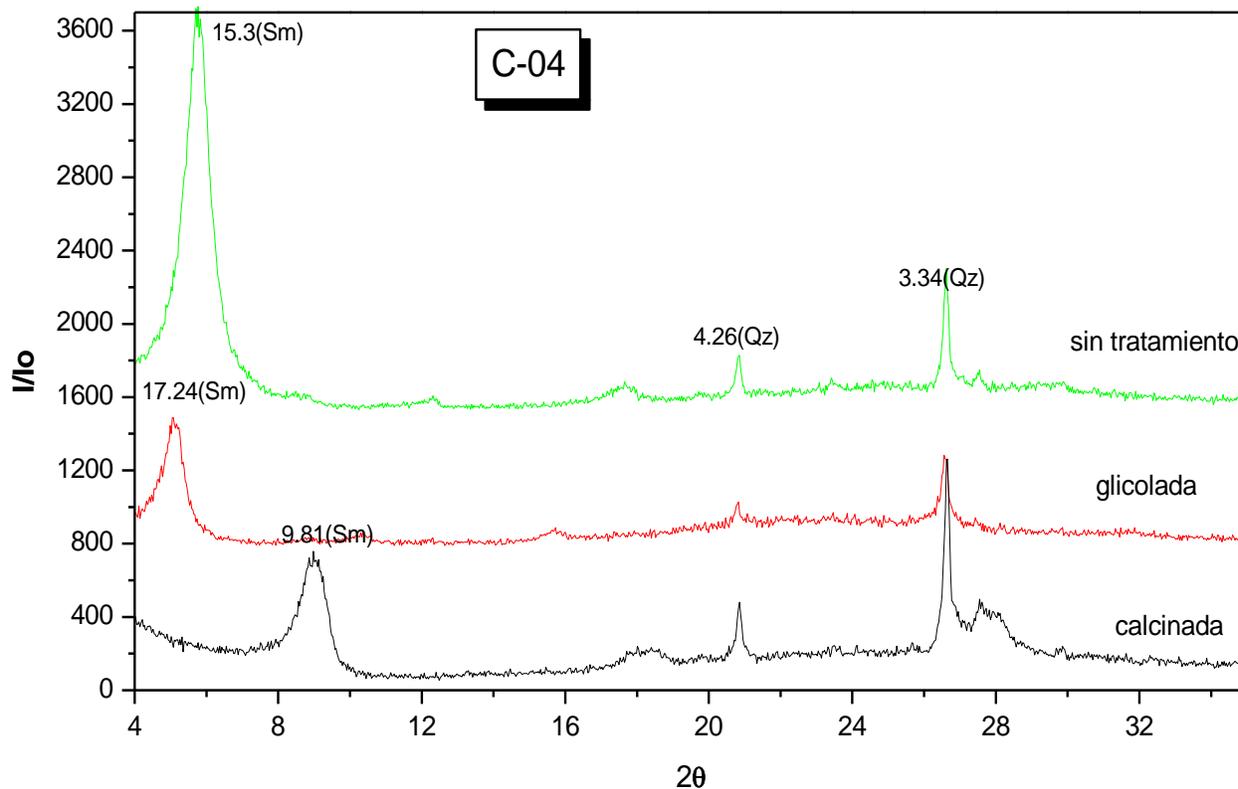




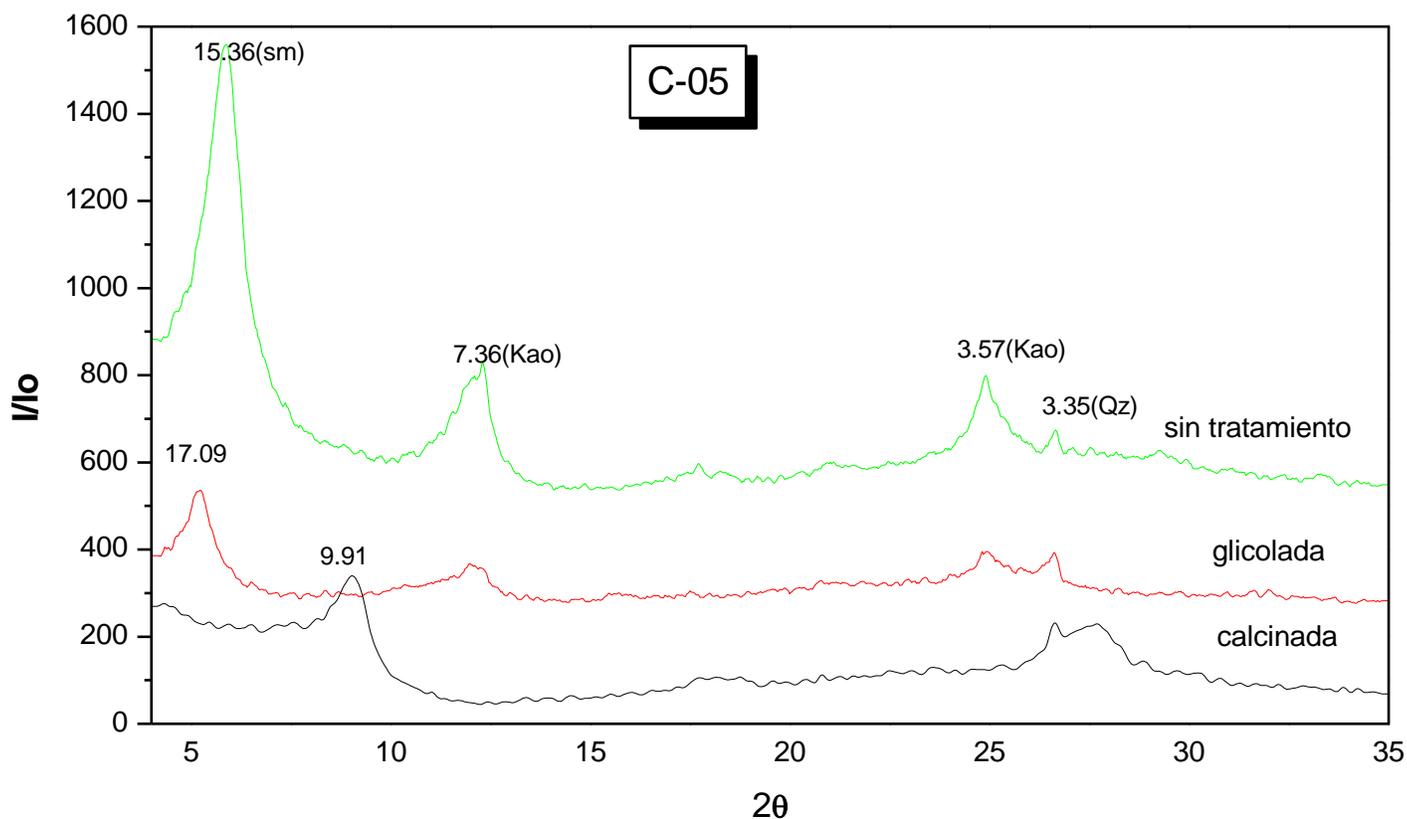




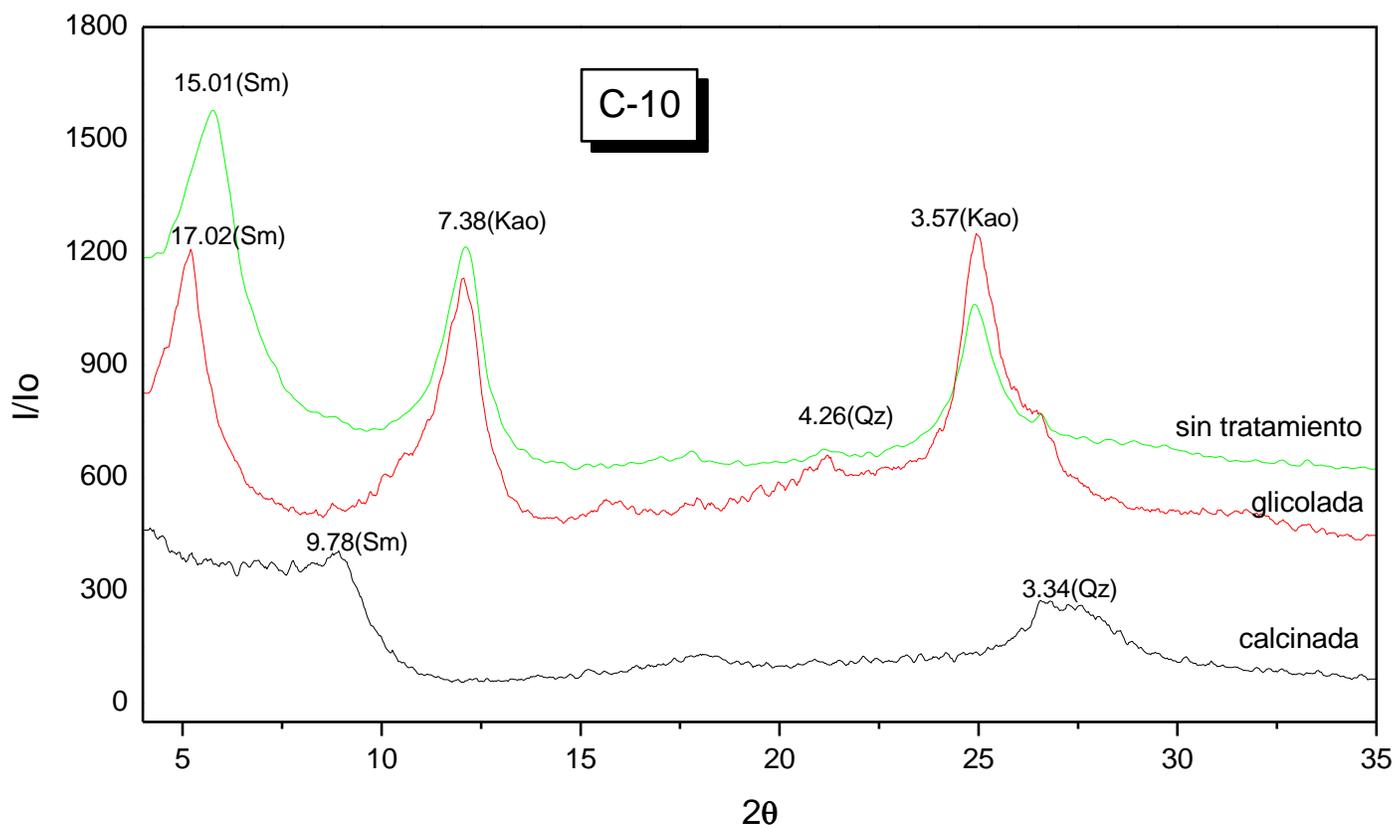
Resultados de Difracción de rayos X para parte fina.



En verde se observa el espectrograma para la muestra sin tratamiento, en el cual sobresale el pico 15 para Smectita, 4.26 y 3.34 para cuarzo lo que indica que hay en tamaño muy fino en esta muestra. En rojo se observa la muestra con Etilen glicol con el pico en 17.24 para Smectita, y se ven los picos para cuarzo. Finalmente, en negro se observa el espectrograma obtenido de la muestra calcinada en la que se comprueba la Smectita con el pico 9.81, y también se observan los picos para el cuarzo.



En verde se observa el espectrograma para la muestra sin tratamiento, en el cual sobresale el pico 15 para Smectita, 7.36 para Kaolinita y los picos 3.57 y 3.35 para cuarzo lo que indica que hay en tamaño muy fino en esta muestra. En rojo se observa la muestra con Etilen glicol con el pico en 17.09 para Smectita, y se ven los picos para kaolinita y cuarzo. Finalmente, en negro se observa el espectrograma obtenido de la muestra calcinada en la que se comprueba la Smectita con el pico 9.91, y también se observan los picos para el cuarzo.



En verde se observa el espectrograma para la muestra sin tratamiento, en el cual sobresale el pico 15 para Smectita, 7.38 para Kaolinita y los picos 4.26 y 3.57 para cuarzo lo que indica que hay en tamaño muy fino en esta muestra y por la poca definición de los picos se infiere que tiene un bajo grado de cristalinidad, además de que por el tamaño de los picos se infiere que esta muestra hay una cantidad mayor de kaolinita. En rojo se observa la muestra con Etilen glicol con el pico en 17.02 para Smectita, y se ven los picos 7.38 para kaolinita y 4.26 y 3.57 para cuarzo. Finalmente, en negro se observa el espectrograma obtenido de la muestra calcinada en la que se comprueba la Smectita con el pico 9.78, y también se observa el pico 3.34 para el cuarzo.

Resultados para Fluorescencia de Rayos X.

Elementos mayores (en % de óxidos).

Componente	C-004	C-005	C-010
SiO ₂	88.63	90.53	80.51
TiO ₂	0.37	0.24	0.37
Al ₂ O ₃	5.09	3.48	11.1
Fe ₂ O ₃	0.9	1.39	4.34
MnO	0.02	0.03	0.03
MgO	0.39	0.59	0.67
CaO	0.2	0.17	0.28
Na ₂ O	0.03	0.01	0
K ₂ O	2.95	1.54	1.26
P ₂ O ₅	0.07	0.06	0.09
LOI1	1.34	1.96	1.36
	99.99	100	100.01

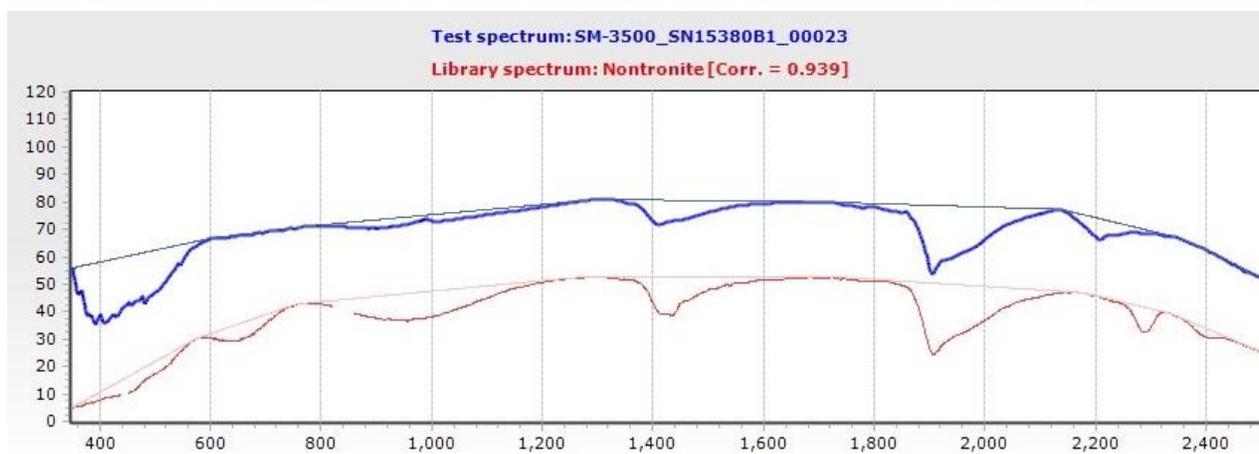
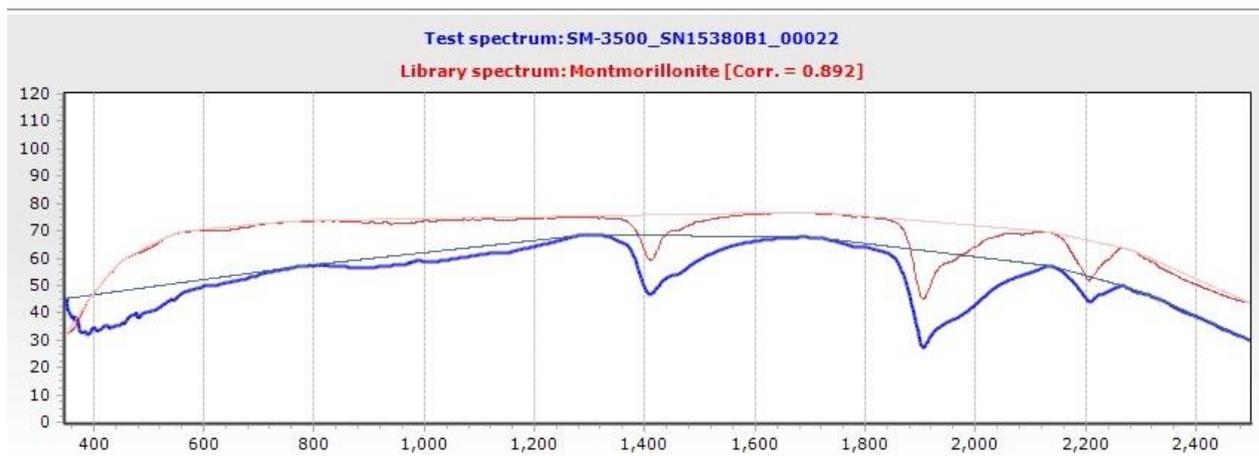
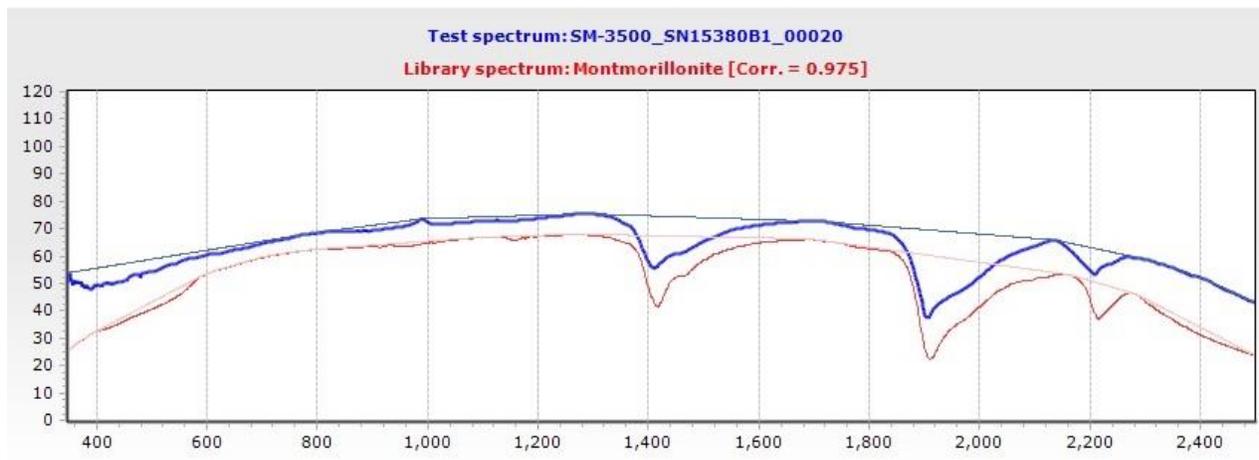
Elementos traza (ppm).

Componente	C-004	C-005	C-010
Rb	101	53	47
Sr	39	27	25
Ba	412	314	221
Y	17	9	20
Zr	39	17	62
Nb	10	6	7
V	71	61	129
Cr	24	21	85
Co	13	13	10
Ni	8	9	21
Cu	14	39	73
Zn	79	249	429
Th	<3	<3	<3
Pb	21	41	177

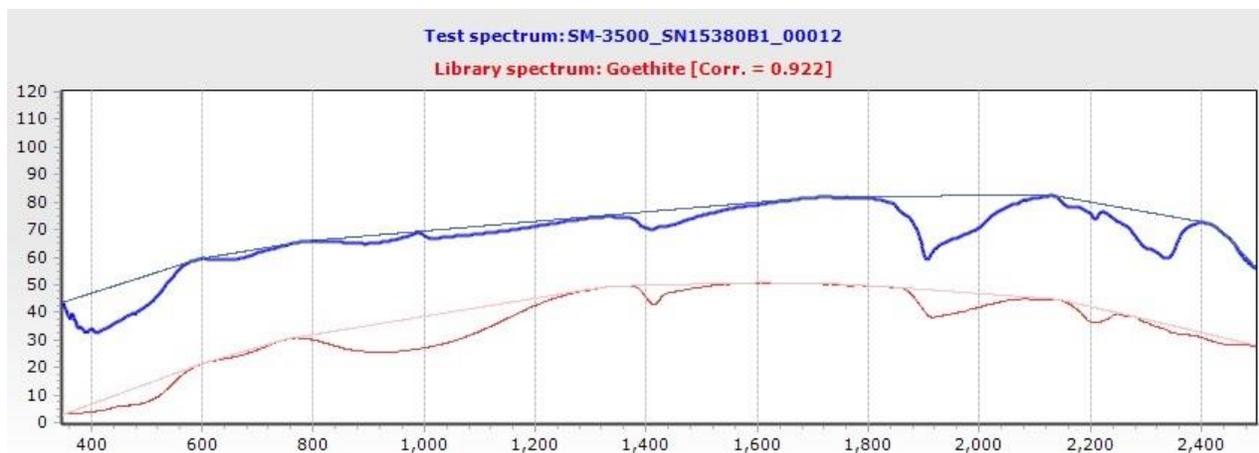
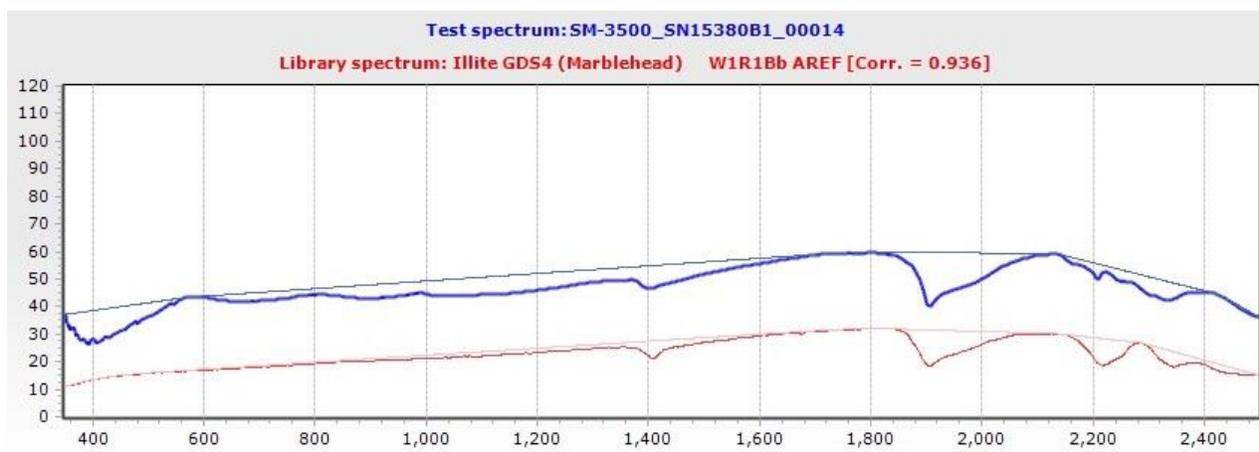
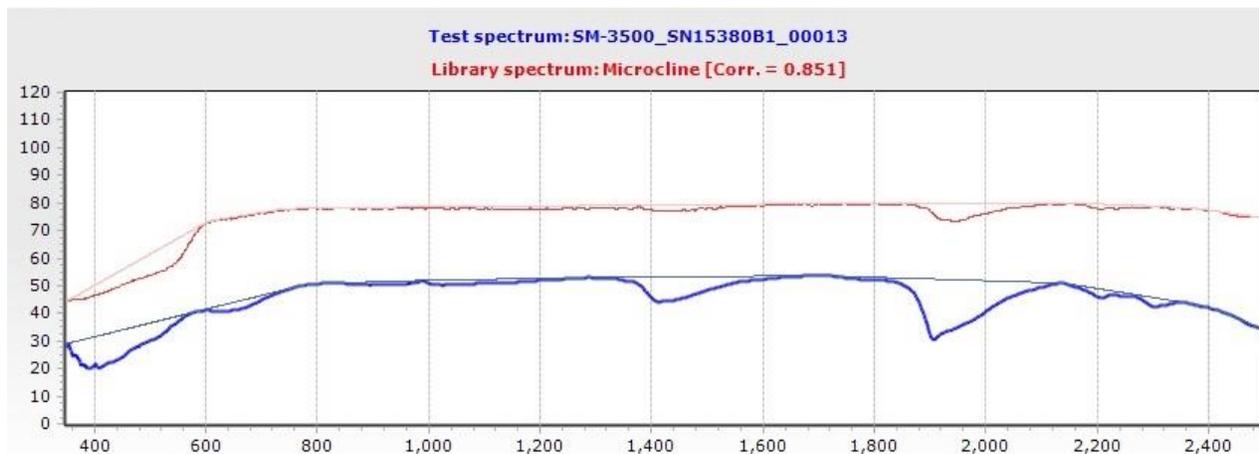
Apéndice F

A continuación, se presentan los espectrogramas obtenidos por SWIR

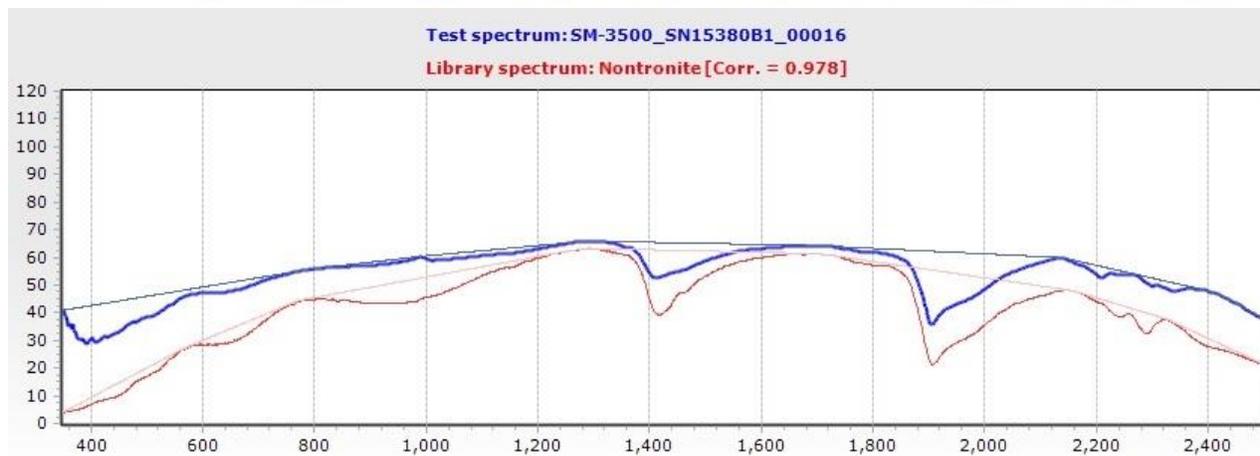
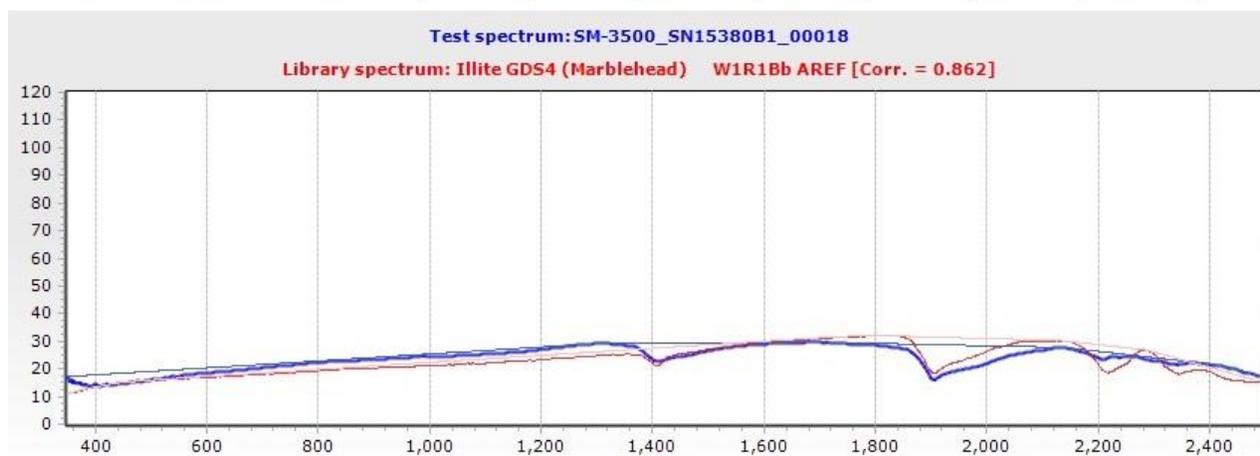
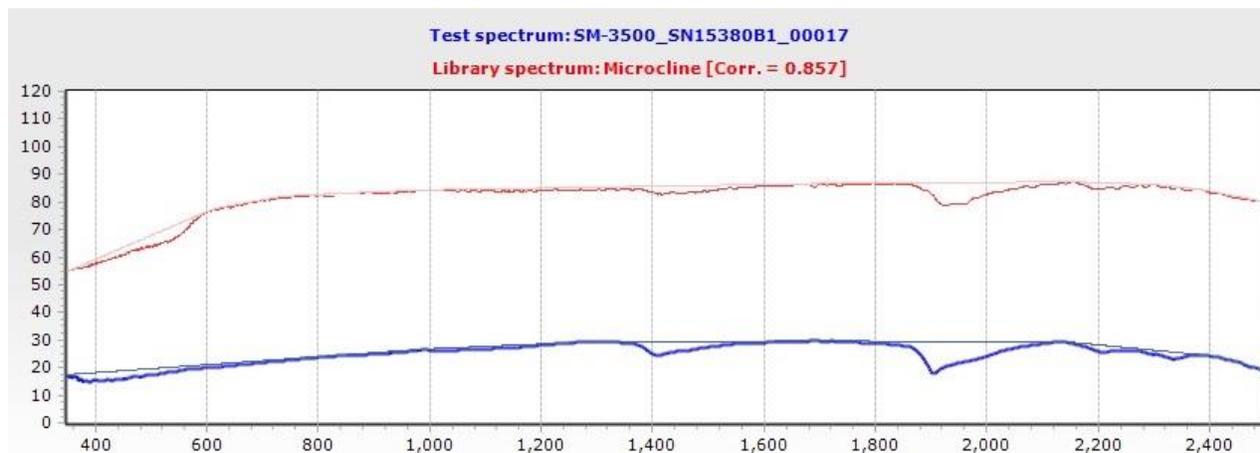
C017



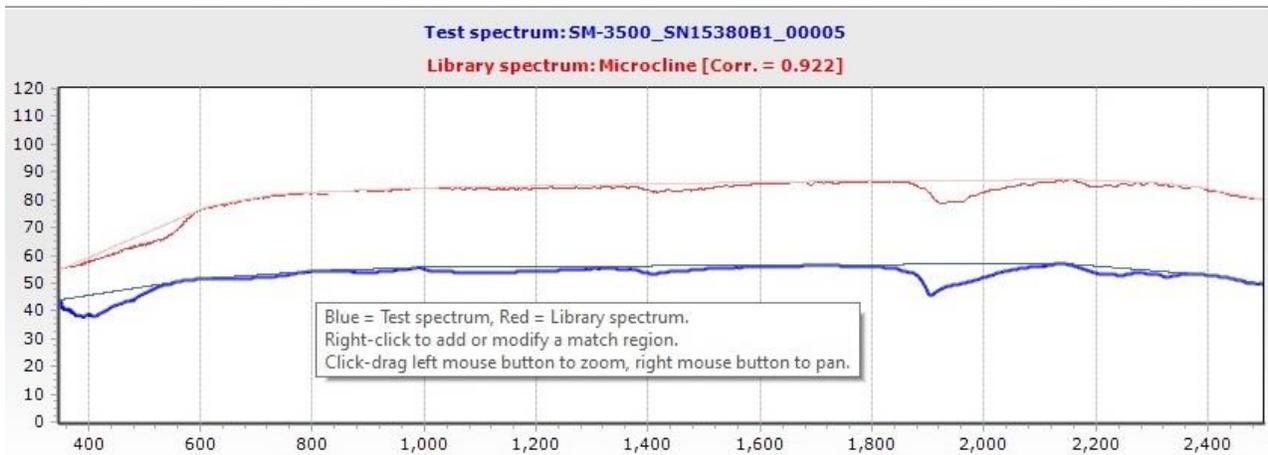
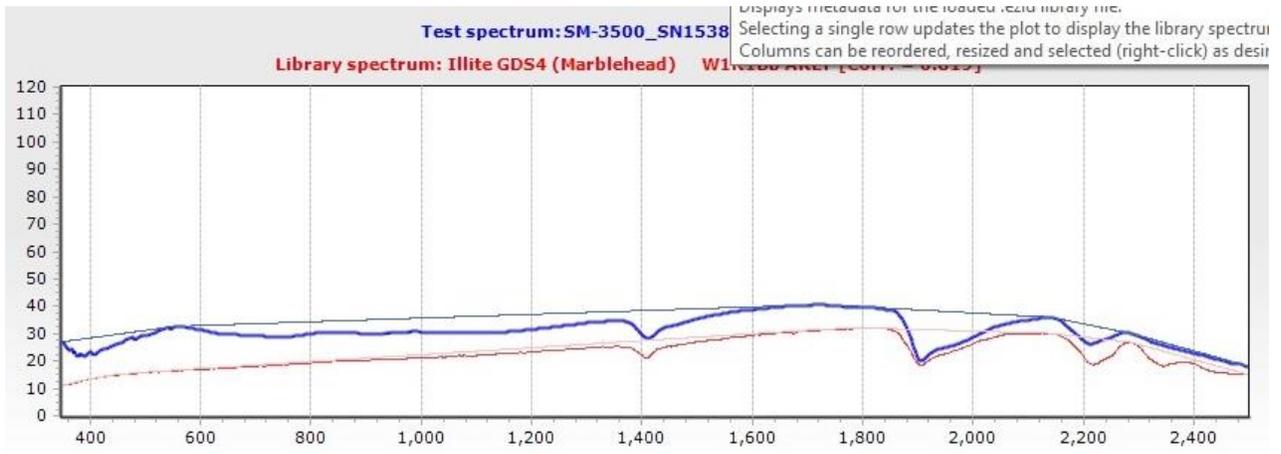
C018



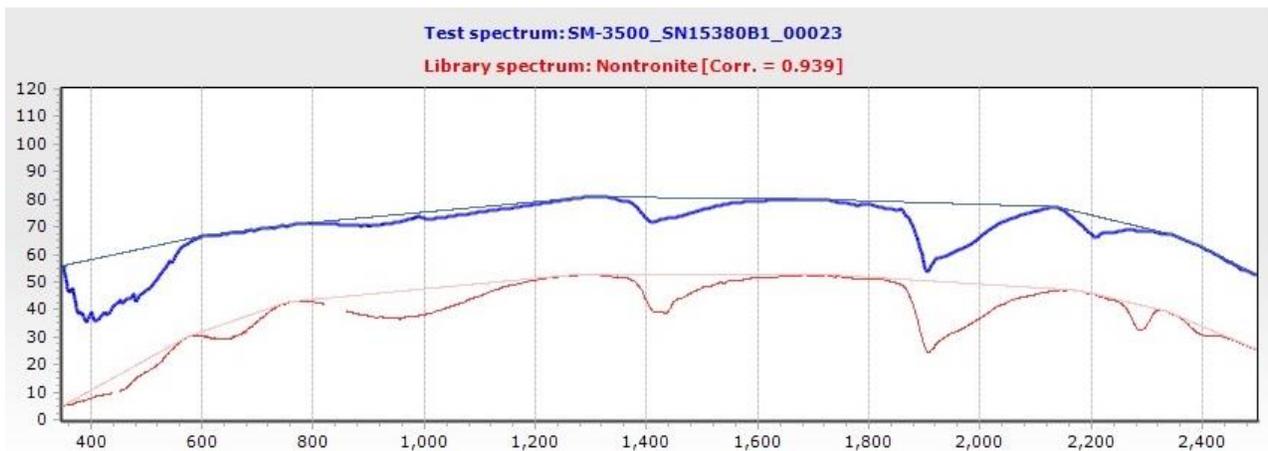
C019

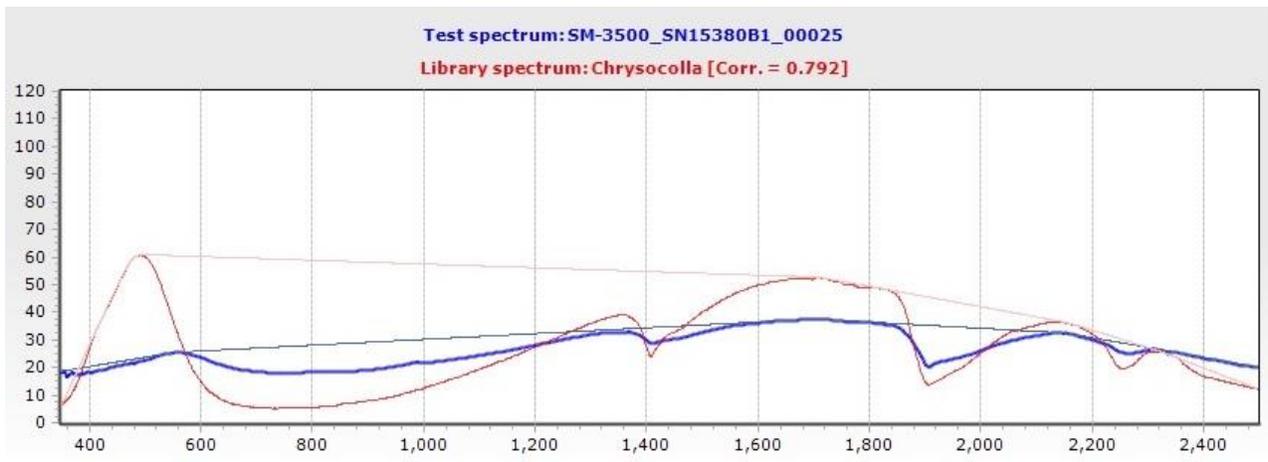


CA006

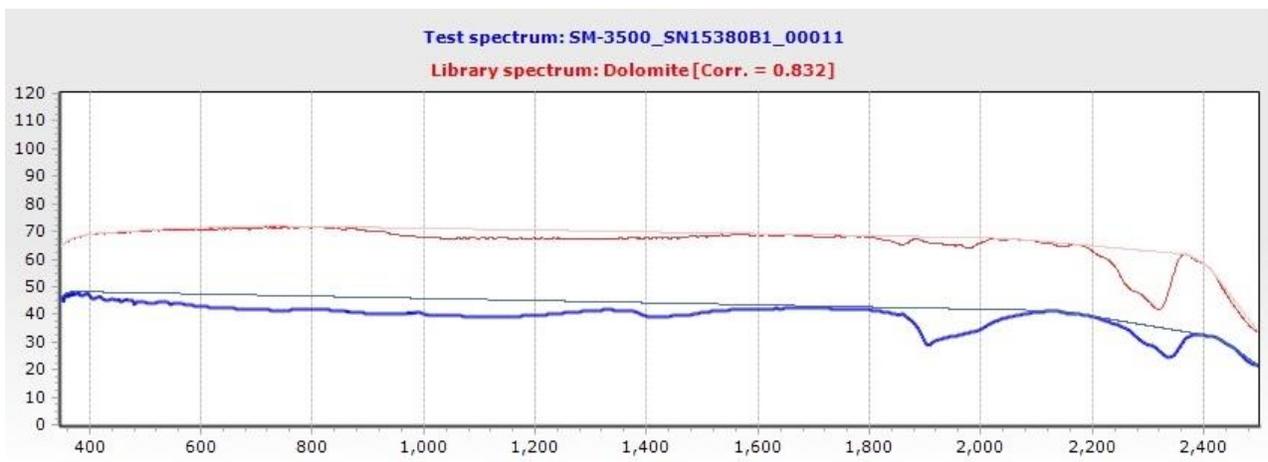
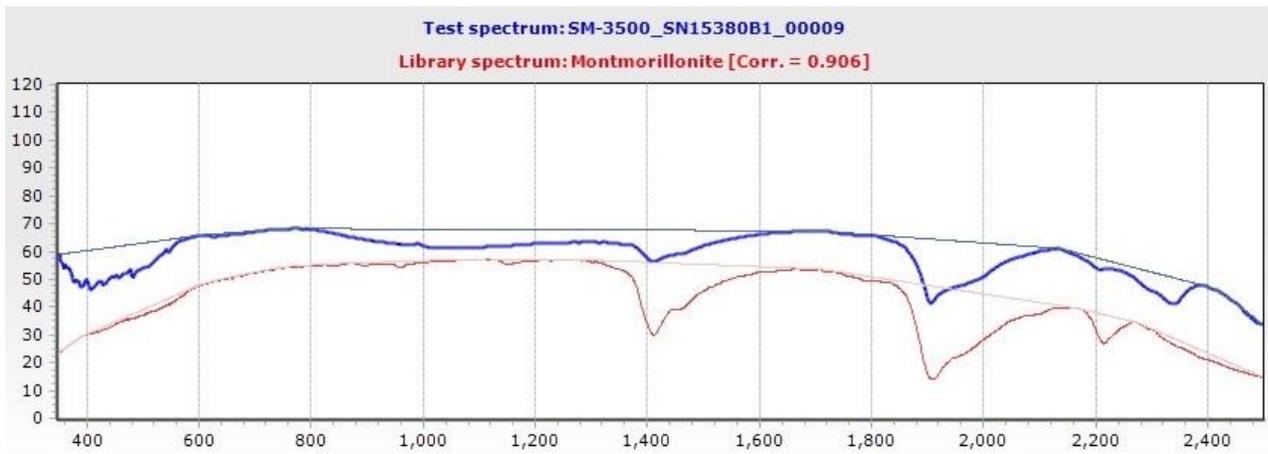


CH001





H003



NS002

