



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS
MINERALES DE INTERÉS ECONÓMICO DE LA
MINA EL ESPÍRITU, DISTRITO MINERO DE
ZIMAPÁN, ESTADO DE HIDALGO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GÉOLOGO

P R E S E N T A:

ALEJO JIMÉNEZ CÉSAR ADRIÁN



**DIRECTOR DE TESIS:
ING. ALFREDO VICTORIA MORALES
2014**



Estructura observada dentro de la Mina El Espíritu, nivel -250. En ella se puede observar el reemplazamiento llevado a cabo por los sulfuros y sulfosales.

Dedicatoria

Esperanza Camacho (†)
Virginia Hernández (†)
Miguel Jiménez (†)

Agradecimientos

A mis padres
A mi familia
A mis amigos

Agradecimientos especiales

A la Universidad Nacional Autónoma de México
Al Instituto de Geología de la UNAM
A la M. en C. María Guadalupe Villaseñor
Al Ing. Alfredo Victoria
A mis sinodales
A mis maestros

*We all change. When you think about it, we're all different people all through our lives, and
that's okay, that's good, you gotta keep moving, so long as you remember all people that
you used to be.*
I will not forget one line of this. Not one day.

-The Doctor

Índice

1. Resumen/Abstract.....	1
2. Antecedentes	5
3. Marco Geológico	11
4. Metodología (Aplicada)	29
5. Resultados	39
6. Discusión y Conclusiones	55
7. Referencias Consultadas	62
8. Micro-fotografías y tablas.....	66
Índice de Figuras.....	80
Índice de Foto-Micrografías.....	82
Índice de Tablas	83

1. Resumen/Abstract

La mayoría de los más grandes depósitos de alta temperatura de Ag-Pb-Zn, emplazados en carbonatos, tipo skarn, se encuentran en el norte de México. Muchos han estado en producción desde el siglo XVII y han aportado un alto porcentaje de la Ag, Pb y Zn de México. El Distrito Minero de Zimapán, pertenece a este tipo de yacimientos minerales.

Durante la época de la conquista en México, los españoles mostraron interés en la zona de San Juan Zimapán, por la riqueza mineral que los habitantes les mostraron. En ese tiempo, no existían técnicas adecuadas para la obtención de zinc y tener un interés económico en él, por lo tanto el interés en la extracción era principalmente de plomo y plata. Con el paso de los años se ha generado información en donde se ha comprobado que en la región de Zimapán, abundan los yacimientos de plomo, zinc y plata.

Los yacimientos minerales presentes en El Distrito Minero de Zimapán, están emplazados en una secuencia de rocas carbonatadas de edad Cretácico Superior, intrusionados por cuerpos graníticos laramídicos. Son depósitos polimetálicos de skarn, que se presentan como chimeneas, mantos y vetas, formados por piroxenos y granates, remplazados por una mineralización económica de sulfuros y sulfosales de plomo, zinc y plata.

La mina El Espíritu se encuentra ubicada en la parte NE del distrito minero de Zimapán, Hidalgo, en el cerro Los Lirios, que pertenece a los fundos mineros de la compañía minera El Espíritu. Esta mina tuvo un período de actividad previo al actual, en donde lo que principalmente se extraía era material de mena de la zona de óxidos. La principal actividad que se lleva a cabo hoy en día es la extracción de concentrados de Pb, Zn y un poco de Ag, que presenta una problemática respecto a la recuperación de estos valores. Estos elementos se encuentran principalmente como galena y esfalerita, pero también se observan sulfosales de plomo, lo cual hace que al momento de obtener concentrados de plomo y zinc, restan pureza y son castigados los precios de venta.

Se realizó un estudio de caracterización mineralógica del cuerpo que se encuentra actualmente en explotación, en donde se identificaron los siguientes sulfuros: galena, esfalerita, arsenopirita, pirrotita, calcopirita y pirita, y las siguientes sulfosales: jamesonita, boulangerita y tetraedrita.

o o o o o

Most of the greatest high temperature ore deposits of Ag-Pb-Zn, hosted in carbonated rocks, skarn type, are located in the north part of Mexico. Many of them, have been in production since the XVII century, and they contributed a high percentage of Ag, Pb and Zn in Mexico's history. The Mining District of Zimapan, belongs to this kind of ore deposits.

During the Spanish Conquest in Mexico, the spanish, showed interests in San Juan Zimapan region, in consequence of the mineral richest that observed. In that time, don't existed bot the appropriate tecniques for obtain zinc and had an economic interest in it, that's, because the principal interest was in lead and silver. The years gone, the generated information proved that in the Zimapan region, proliferate the ore deposits of lead, zinc and silver.

The ore deposits located in the Mining district of Zimapan, are located in a sequence of carbonated rocks with ages of Upper Cretaceous, intruded by laramidic granitic bodies. They are polymetalic deposits skarn type, they have been presented like chimneys, mantles and veins, formed by pyroxenes and garnets, replaced with economic mineralization of sulphides and sulfosalts of lead, zinc and silver.

"El Espíritu" Mine are located in the northeast part of the Mining District of Zimapan, in Los Lirios hill. It belongs to the states of the El Espíritu Mining Company. This mine had an activity period previously, where the principal activity of extraction was the minerals in the oxides zone. Today, the principal activity is the extraction of concentrates of Pb and Zn , with a little contents of silver. This elements are present as galena and sphalerite, but also lead- sulphosalts, for that

reason in the moment to obtain concentrates of lead and Zn, these subtracted purity and the selling prices are punished.

We performed a study of mineral characterization of the body that today is on mining operation, identifying next sulphides: galena, sphalerite, arsenopyrite, pyrrhotite, chalcopyrite and pyrite, and these sulphosalts: jamesonite, boulangerite and tetrahedrite.

2. Antecedentes

2.1 Historia del Distrito minero de Zimapán, Hidalgo.

Durante la época Colonial se inició la explotación de los yacimientos del Distrito Minero de Zimapán en la última mitad del Siglo XVI. Los españoles se asentaron en la zona de San Juan Zimapán, aproximadamente antes de 1564, este hecho no se debió a lo fértil de sus tierras, ni a la abundante agua que había, esto obedeció a la riqueza mineral que poseían estas tierras, con buenos contenidos de plata y plomo. La explotación de yacimientos con ley de plata a finales del siglo XVI se dio porque estaban más al alcance de los colonos por los métodos de explotación y beneficio que se conocían.

Si se analiza la situación particular de Zimapán en esa época se puede reconocer lo siguiente:

- a) La abundancia de plomo era mayor que la de plata. Esto se reportó desde el siglo XVI por Alejo de Murguía (1579).
- b) Los minerales explotados eran aquellos que estaban a su alcance, en superficie y habían sido oxidados. Por este motivo fueron los que estuvieron más accesibles en las primeras etapas de explotación de las minas.

Todo lo anterior se ha corroborado con la exploración y caracterización a lo largo de los años y se ha comprobado que Zimapán es un distrito con yacimientos principalmente de plomo, zinc y plata, clasificados del tipo Skarn. (Simons y Mapes, 1957).

Industria minera en Zimapán

En los últimos 464 años el distrito minero Real del Monte y Pachuca ha producido 40,000 toneladas de plata y 231 de oro, lo que representa 16% de la producción nacional de plata y 6% de la producción mundial.

La historia de la minería en el distrito minero de Zimapán, inicia con el descubrimiento de minerales oxidados en el área de Carrizal y desarrollo de la mina Lomo de Toro en el año de 1632 a partir de ese año se llevaron a cabo

trabajos ininterrumpidos hasta que en 1810 tuvieron que detenerse por el movimiento de Independencia. Posteriormente se reanudaron las labores en 1870, para verse interrumpidas nuevamente en 1910 a causa del movimiento revolucionario. Durante 1920 operaban un total de 18 minas, época en la cual la Hidalgo Mining and Smelting Co., inicio trabajos de explotación en el área de El Monte. En 1945 se descubrieron nuevos cuerpos en la mina Lomo de Toro, en esta misma época la compañía Fresnillo S. A. Inicia explotación de minerales en el área de El Monte. Con la conducción del camino San Francisco - El Monte en el año 1957 se estimuló la producción llegando a un promedio de 2,500 toneladas al mes (SE-SGM, 2011).

Andrés Manuel del Río

Entre los aspectos a destacar en la historia del Distrito Minero de Zimapán, específicamente en el área de la mineralogía están las aportaciones de Andrés Manuel Del Río, que sin lugar a dudas fue una figura ilustre que llegó a México en 1794, en donde se desempeñó como profesor de mineralogía y de geología. Su pasión por la mineralogía lo llevó al descubrimiento de un nuevo elemento al que nombró eritrónio. En ese momento no se reconoció como un elemento nuevo, sino hasta el año de 1830 en que Nils Gabriel Sefström lo redescubrió y lo nombró Vanadio (D Cserna, 1990).

2.2 Mina El Espíritu

La mina El Espíritu se encuentra ubicada al NW del poblado de Zimapán, Hidalgo, en el cerro Los Lirios (Figura 1), que pertenece a los fundos mineros de La Compañía Minera El Espíritu, en donde lo que principalmente se extraía eran minerales de la zona de oxidación.

La principal actividad que lleva a cabo la Compañía El Espíritu hoy en día, es la explotación de cuerpos minerales para la obtención de concentrados de Zn y Pb. Las labores que se realizan en esta mina sirven como fuente de trabajo para los habitantes de Zimapán y también de los pueblos aledaños, por lo que es relevante considerar a la minería como una importante fuente de ingresos para la economía local.

El yacimiento mineral que está siendo explotado, es clasificado como tipo skarn, el cual debido a lo complejo de la geología estructural se encuentra altamente brechado y por tal razón no pueden emplearse indicadores estructurales para definir que parte corresponde al endoskarn y que parte al exoskarn.

Del cuerpo mineralizado que se explota actualmente en La Mina El Espíritu se obtienen concentrados de Zn y Pb, los cuales son castigados por contener altos valores de Fe para el Zn y Sb y As para el de Pb, lo cual hace que disminuyan su valor económico.



Figura 1. Plano de ubicación del Cerro de Los Lirios al NW del Poblado de Zimapán. Allí se encuentra la mina El Espíritu, se observa como el Río Moctezuma sirve como límite estatal entre el Estado de Hidalgo y el Estado de Querétaro.

2.3 Objetivo

La importancia de llevar a cabo una caracterización mineralógica de un material de mena, es realizar una identificación de los minerales que la constituyen y la descripción de las relaciones texturales que presentan; así como determinar la composición química de los minerales presentes. Con esta información se puede planear la forma de extracción del cuerpo mineralizado, así como definir condiciones de molienda y procesos de beneficio apropiados para ese cuerpo.

Estos aspectos son los que le interesan a La Compañía Minera El Espíritu y por lo cual solicitaron al Instituto de Geología llevar a cabo los estudios que les brindaran la información que ellos requieren, puesto como se mencionó con anterioridad, se tiene una problemática de obtener concentrados de Pb y Zn que no son competitivos comercialmente por las impurezas que presentan.

El objetivo de este trabajo fue realizar estudios petrográficos y minerográficos para identificar a los minerales presentes y sus relaciones texturales, microscopía electrónica de barrido para observar las relaciones texturales y distribución de elementos, y microsonda electrónica para conocer la composición química de las fases minerales encontradas. Con la información obtenida proponer una paragénesis del cuerpo analizado e indicar los tipos de intercrecimientos que presentan los minerales.

3. Marco Geológico

3.1 Localización geográfica

El Distrito Minero de Zimapán se localiza en el municipio de Zimapán en la parte occidental del estado de Hidalgo (Figura 2), su acceso es por la carretera federal 85, México-Laredo, a la altura del kilómetro 207. Sus coordenadas geográficas son 20° 47' N y 99°24' W, a una altura de 1, 780 m.s.n.m. Se encuentra limitada por los siguientes municipios:

- Al norte Pacula.
- Al este con Nicolás Flores.
- Al sureste con Tecozautla.
- Al oeste, con el estado de Querétaro con límite geográfico natural el río Moctezuma.

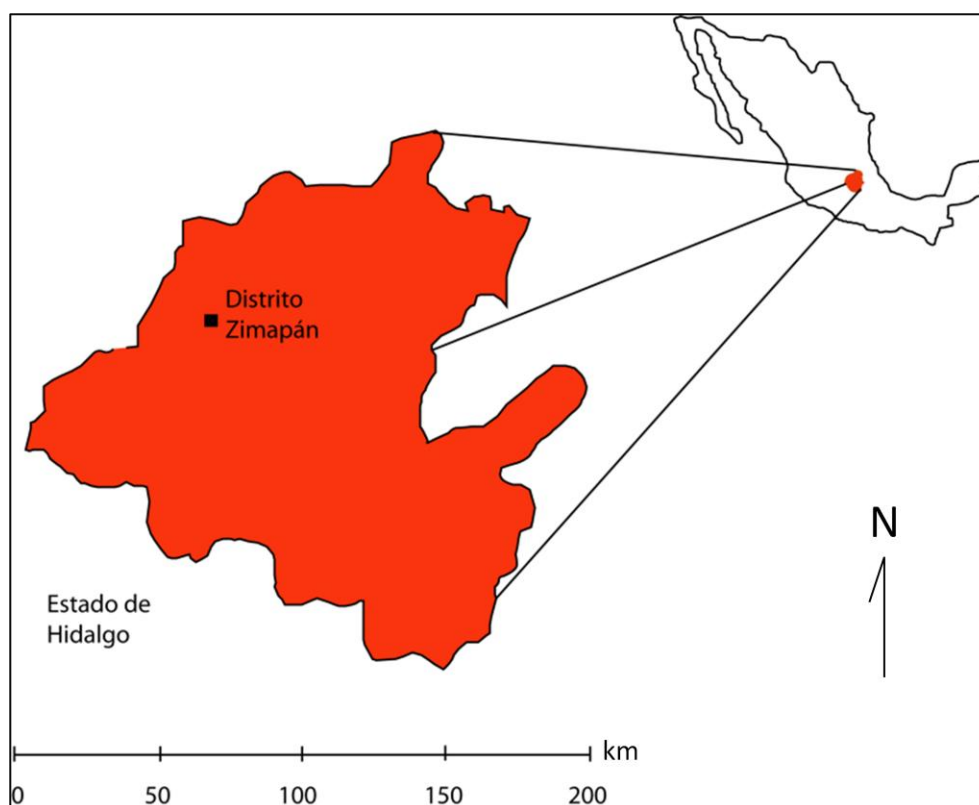


Figura 2. Mapa de localización del Distrito Minero Zimapán dentro de la República Mexicana (Modificado de García y Querol, 1991).

El área se encuentra localizada en la zona limítrofe de las provincias fisiográficas Mesa Central y Sierra Madre Oriental. Cuenta con cuatro áreas mineras de suma relevancia, las cuales son: Santa Gorgonia – San Pascual, La Luz – La Cruz, El Monte y Carrizal (Simons y Mapes, 1956).

3.2 Fisiografía

Los principales rasgos fisiográficos del área de estudio son: la Sierra El Monte, el Abanico Aluvial de Zimapán y el Río Tolimán (afluente del río Moctezuma: límite geográfico entre los estados de Hidalgo y Querétaro).

La Sierra El Monte, está orientada E-W y forma el flanco norte del valle de Zimapán, el cerro de San Nicolás de 2,720 msnm corresponde a la mayor elevación. La Sierra El Monte continúa al oriente hasta el Puerto de la Estancia, hacia el poniente está cortada por la barranca del río Tolimán, la cual está bordeada por fuertes acantilados, el área Carrizal está localizada dentro de esta barranca. (García y Querol, 1985).

El patrón de desagüe de Zimapán está controlado fuertemente por la litología; tiene un aspecto rectangular producido por los arroyos que desaguan paralelos a los estratos calcáreos.

Ésta zona se encuentra dentro de la Cuenca del Río Moctezuma y pertenece a la vertiente del Golfo de México, sus afluentes más importantes son los ríos Tolimán y Maconí.

3.3 Estratigrafía regional

La litología regional del Distrito Minero de Zimapán, está formada por rocas sedimentarias marinas de edades variables entre el Jurásico Superior hasta el Cretácico Superior. Adicionalmente, existen sedimentos continentales y derrames volcánicos pertenecientes al periodo Neogeno (Figura 2). La secuencia sedimentaria marina es cortada por rocas ígneas plutónicas e hipabisales de composición monzonítica (Carrillo, 1998), las cuales están asociadas a la mineralización y pequeños diques andesíticos que pertenecen también al Neogeno. También pueden encontrarse sedimentos semiconsolidados que son producto de abanicos aluviales de finales del Neogeno y principios del Cuaternario.

Formación Las Trancas – Sistema Jurásico

Esta formación está constituida por lutitas calcáreas filíticas, limonitas calizas micríticas piritíferas, pedernal se puede encontrar en algunas partes, grauvacas y areniscas, son las rocas más antiguas de la región (Segerstrom, 1961).

Segerstrom (1961) ubica esta formación en edades del Jurásico Tardío por los fósiles endontrados. Esta formación aflora al Norte del Distrito con un espesor aproximado de 800 m. Según Simons y Mapes (1956) la formación subyace de forma concordante a la Formación El Doctor y es el basamento del distrito.

Formación El Doctor – Sistema Cretácico

La Formación El Doctor, constituye la mayor parte de la zona montañosa, además de ser la roca encajonante de la mineralización, lo cual la convierte en la de mayor importancia económica. Su espesor está medido entre 750 y 900 m. Está constituida por calizas de colores grises claros y oscuros, con intercalaciones de estratos de pedernal negro, el cual en zonas cercanas a las mineralizaciones se torna blanco. También se puede apreciar una caliza masiva de aspecto lenticular de posible origen arrecifal en partes suele ser muy fosilífero. De acuerdo a López

Ramos (1979), esta formación se puede datar en la parte media del periodo Cretácico.

Formación Soyatal – Sistema Cretácico

La Formación Soyatal, está compuesta por lutitas amarillas en alternancia con margas y calizas de color negro. Existen variaciones laterales en su fase calcárea. Su espesor aproximado es de 1,000 m según Simons y Mapes (1956). El contacto inferior es gradual y de forma concordante con la Formación El Doctor. Dentro de la región estudiada, esta Formación se puede datar en el Cretácico superior lo cual se pudo determinar por el nanoplancton (M. Kiyokawa, en García y Querol, 1985). Sobre esta descansan rocas del Neogeno y depósitos del Cuaternario.

Fanglomerado El Morro, Formación Las Espinas – Sistema Neógeno

El Fanglomerado El Morro, está compuesto por un conglomerado fluvio-lacustre constituido por calizas, margas y rocas volcánicas, con una matriz de arenisca (Simons y Mapes, 1956). El espesor máximo, medido al poniente del Distrito, es de 360 m, con variaciones laterales. Su edad es desconocida pero puede correlacionarse con el conglomerado Guanajuato y se puede inferir su edad dentro del periodo Paleógeno.

La Formación Las Espinas, está formada por una serie de rocas volcánicas, constituidas por derrames y aglomerados con composición andesítica y dacítica, las cuales sobreyacen de forma concordante con la Formación El Morro y discordante a formaciones antiguas (Carrillo y Suter, 1991). También se pueden encontrar ocasionalmente basaltos y latitas cuarcíferas. Esta formación aflora al Sur del Distrito, con variaciones en su espesor, con un máximo de 150 m. No se ha determinado su edad absoluta. (García y Querol, 1985).

Rocas intrusivas

De acuerdo a lo expresado por Miguel Carrillo Martínez (1998), dentro de la región de Zimapán aflora una gran variedad de rocas intrusivas, en regiones como la que se encuentra Corral Blanco y San Juan de la Rosa existe aflorando un cuerpo

tabular félsico porfídico, en donde la presencia de clastos dentro de la intrusión sugieren una edad perteneciente al Jurásico Tardío.

Cerca de la región de Quitasueño, aflora una intrusión de granodiorita porfídica, por otra parte, en el flanco sudoccidental del anticlinal El Piñon existe un número importante de troncos de tamaño pequeño, diques y mantos, en donde su composición varía entre riolita, latita, andesita y basalto,

Existen otros cuerpos volcánicos los cuales son de composición félsica y de edad probable del Mioceno Tardío.

3.4 Geología Estructural

Debido a la composición de las Formaciones Las Trancas y Soyatal, estas no presentan competencia estructural, por el contrario La Formación El Doctor es de alta competencia estructural (Carrillo y Suter, 1991).

La cabalgadura El Doctor, está conformado por una falla que involucra superficialmente al miembro Cerro Ladrón (Wilson et al, 1955), tiene una dirección SE.

El distrito se encuentra dentro del denominado Anticlinorio El Piñón y forma parte de la Sierra Madre Oriental formada por los plegamientos de la Orogenia Laramide, constituida de sedimentos del periodo Cretácico. Su orientación regional es NW-SE. El anticlinorio se encuentra delimitado al NE por el Sinclinal del Aguacate y al SW por el Sinclinal de Maconí. Su extensión se puede apreciar a lo largo del Cañón del Río Moctezuma y además posee una anchura de 11 km. Su parte SW la forman una serie de pliegue que afecta a las formaciones El Doctor y Soyatal. Estas estructuras pueden apreciarse en el área de Carrizal, en donde se observan estratos calcáreos masivos y reciben el nombre de manera local de Anticlinal de San José Volador, Sinclinal La Carolina y Anticlinal La Paz (Simons y Mapes, 1956).

Algunas características del Anticlinorio El Piñón según Carrillo y Sutter, 1991:

- Constituido por pliegues bien definidos por el contacto de la Formación Soyatal.
- El relieve estructural es de más de 1800 m y la amplitud de los pliegues varía de 100 a 180 m.
- El techo y el flanco, consiste en varios anticlinales y sinclinales internos de planos axiales subverticales, estrechamente espaciados.

En el área El Monte se localiza el anticlinal de Verdosas (Figura 3), el cual también forma parte del Anticlinorio El Piñón, tiene un rumbo NW 45 SE. Este anticlinal se

encuentra afectado por un conjunto de fallas regionales que obedecen a un rumbo general NE 65 SW, las cuales son de carácter normal con desplazamiento horizontal lateral izquierdo. La orientación del anticlinal ha influenciado a los diques de rocas ígneas emplazándose en direcciones diversas.

El área Carrizal se encuentra en el flanco recostado del Anticlinal San Rafael, perteneciente también al Anticlinorio El Piñón. Este es un anticlinal recostado en donde su plano axial buza 30° al NW. Esta área se encuentra muy fracturada y estas fracturas se pueden seguir en superficie hasta más de 3 km.

El intrusivo Carrizal afecta a la zona central del área, está orientado NE – SW y presenta una gran cantidad de diques con orientación predominante NW – SE, estos son paralelos a la estructura regional (García y Querol, 1985).

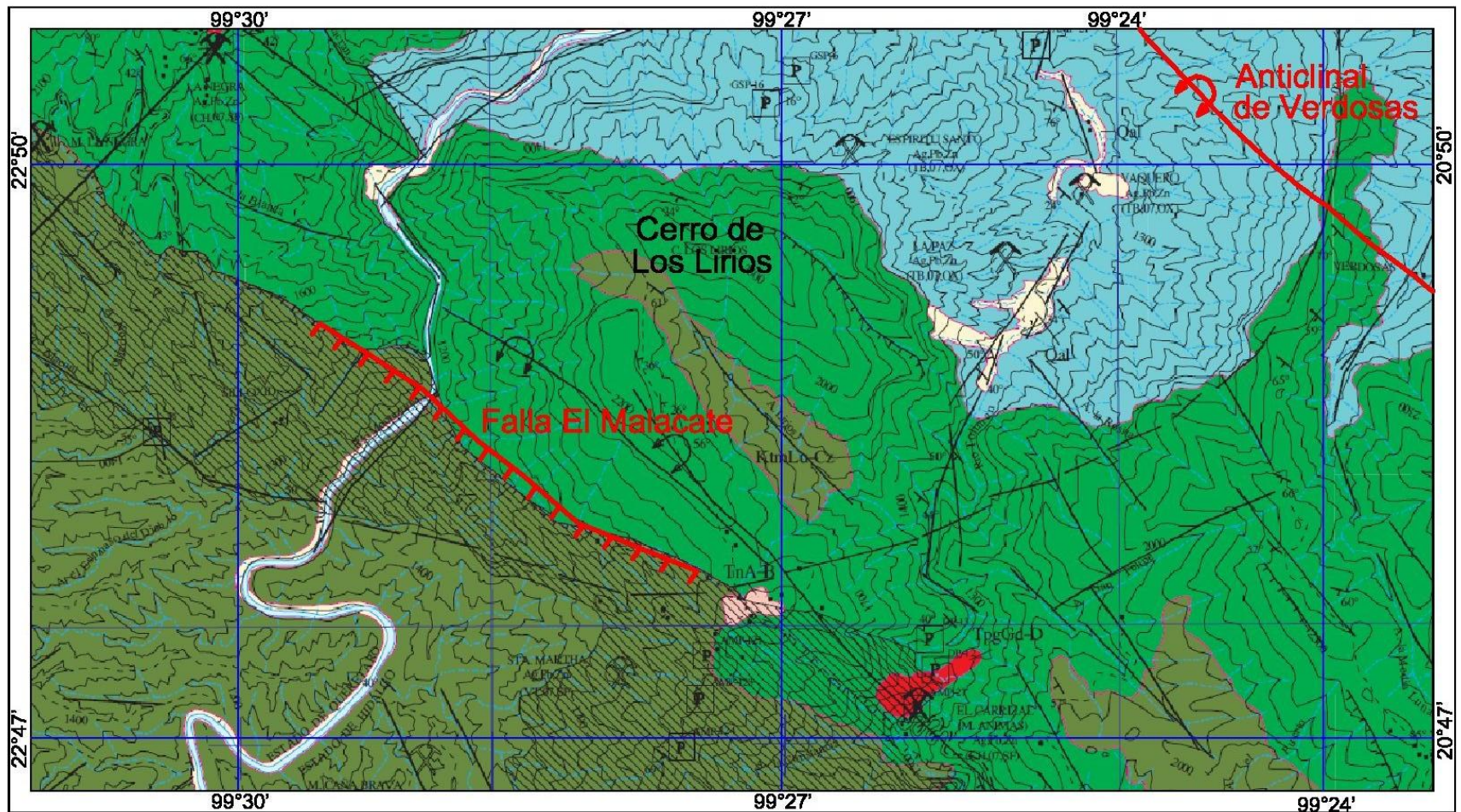


Figura 3. En la figura se puede observar la falla el Malacate descrita por Sánchez Loyo (2012) y el anticlinal de Verdosas descrito por García y Querol 1985. Modificada de carta geológico-minera San Joaquín (SGM,)

3.5 Geología de los fondos de la Minera El Espíritu

Estratigrafía

El registro estratigráfico presente en esta zona, está definido únicamente por las formaciones Las Trancas y El Doctor, las cuales están afectadas por sistemas de plegamientos, recumbencias y cabalgaduras (Figura 3).

Las características de estas formaciones, son desiguales debido a los distintos mecanismos que les dieron origen. La Formación Las Trancas presenta material arcilloso lo que la hace poco competente, mientras que la Formación El Doctor está constituida por calizas arrecifales y localmente se divide en cuatro facies: San Joaquín, La Negra, La Negra-arcillosa y Cerro Ladrón, cuyas principales características se encuentran en la Figura 4.

El comportamiento de cada litología presente, está dado por su composición, por esa razón la resistencia a los procesos de deformación no era la misma en todos los casos. Otra situación que se observa debido a su composición litológica es el producto final del metamorfismo de contacto que las afectó, ya que en el caso de los horizontes arcillosos y/o lutíticos, las rocas se comportan como material de fácil desplazamiento entre las calizas, al cual se le observa metamorfismo de bajo grado.

Entre las características que propiciaron que los fluidos mineralizantes fluyeran con mayor facilidad, están las fracturas generadas por el cizallamiento en la Facies La Negra (Sánchez - Loyo, 2012).

Columna litoestratigráfica del área correspondiente a la mina "El Espíritu"

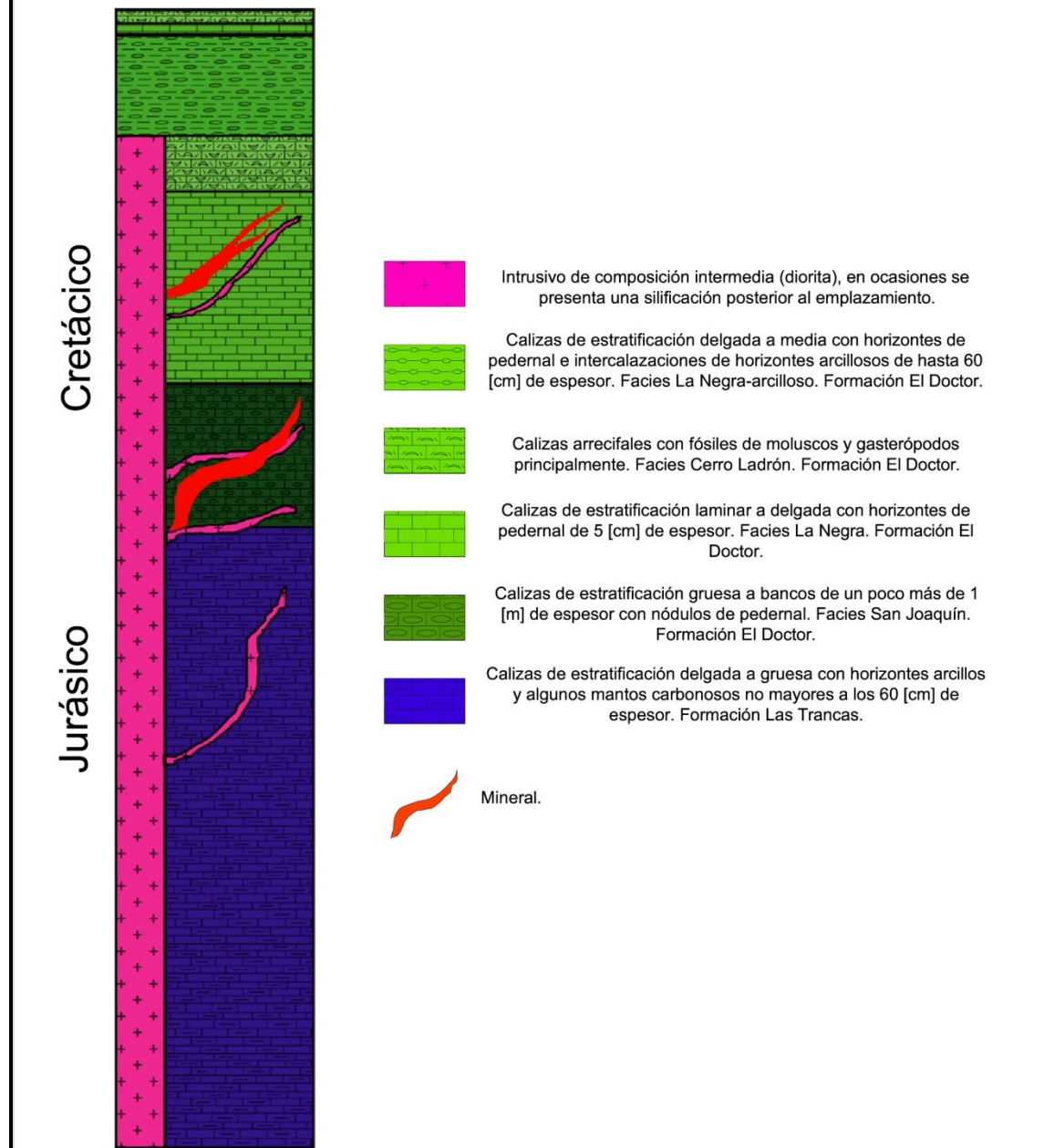


Figura 4. Modificada de Sánchez Loyo, 2012.

Estructuras

La Falla El Malacate, cuya dirección de distensión es NE-IW, tiene su origen en la parte NW de Zimapán y continúa bordeando la porción NW de la cabalgadura El Doctor, que pone en contacto a la Formación del mismo nombre con la Formación Soyatal. Esta falla es importante ya que en los fundos pertenecientes a la minera El Espíritu, existe un sistema de fallas normales cuya dirección es NE-SW. La mineralización presente en estas fallas se debe a que la circulación de los fluidos mineralizantes fueron favorecidos por estas estructuras (Sánchez- Loyo, 2012).

Los cuerpos mineralizados de La Mina El Espíritu están formada por vetas, mantos y chimeneas. El muestreo para los trabajos de caracterización llevados a cabo en este trabajo, fueron en una chimenea cortada por los niveles del 120 a 250.

En los yacimientos hidrotermales, los metales son transportados por fluidos desde la intrusión ígnea, hasta el lugar en donde son depositados, este fenómeno es considerado como el de mayor importancia en la formación de minerales epigenéticos y a medida que se alejan de la intrusión ígnea, los fluidos pierden el calor que presentaban, lo cual permite la precipitación de los minerales de mena y ganga.

Como guías de mineralización en la Formación El Doctor se encuentran como evidencias la silicificación, recristalización, en ocasiones marmorización, vetilleo de calcita de grano grueso, diseminación de sulfuros de Fe y oxidación de éstos.

Debido a la presencia de fracturas y a la apertura de las juntas entre los estratos a causa de los eventos tectónicos, se facilitó el emplazamiento de intrusiones ígneas de composición diorítica, y posteriormente se observa un sistema ígneo de composición félsica formando diques y diquestratos.

Se observó que el primer sistema de intrusión ígnea de composición intermedia, sirvió como uno de los principales controles estructurales de los primeros fluidos hidrotermales aportados por intrusiones posteriores de composición más félsica;

posteriormente se suscitaron otras etapas hidrotermales con fluidos enriquecidos del mineral de mena emplazándose en la roca preparada previamente por la recrystalización antes mencionada. (Sánchez Loyo, 2012)

3.6 Acerca de los depósitos polimetálicos de Skarn, chimenea brechada, manto de reemplazo y veta.

Los contactos mineralizados de Skarns metasomáticos, se desarrollan en márgenes continentales y arcos oceánicos, principalmente en donde los intrusivos entran en contacto con rocas carbonatadas (Sawkins, 1990).

Existe una gran variedad de tipos de depósitos y asociaciones de metales, que se pueden agrupar en la categoría de depósitos de Skarn, en las cuales se pueden encontrar yacimientos de W, Sn, Mo, Cu, Fe, Pb – Zn y Au. Los diferentes metales que se pueden encontrar, dependen de la composición, estado de oxidación y las afinidades metalogénicas con la intrusión ígnea. Como regla general, los Skarns de Au y Fe, son asociados a intrusivos de composición máfica a intermedia. Skarns de Cu, Pb, Zn y W, asociados a intrusivos calci – alcalinos (Robb, 2005).

Según Robb (2005), los Skarns pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de roca que intrusiona, calizas o dolomías. Estos se pueden clasificar como endo – o exo – Skarns, dependiendo si el metasomatismo es interno o externo, de acuerdo a la intrusión del cuerpo ígneo (Figura 5).

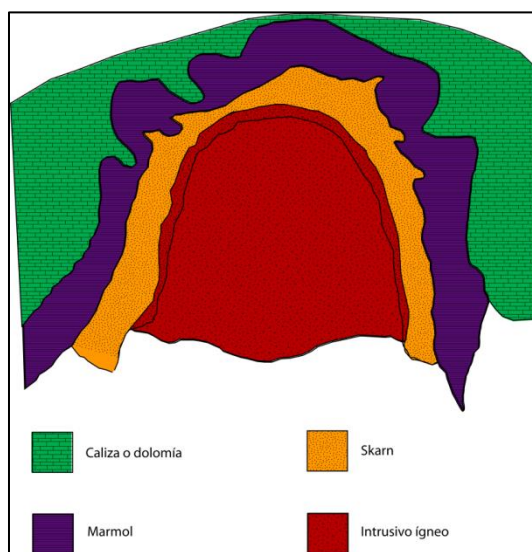


Figura 5. Modelo esquemático de un yacimiento de tipo Skarn (Modificado de Sawkins, 1990)

Existen similitudes a nivel regional tales como la litología, edad, las características de las rocas ígneas, el control estructural, los metales contenidos, el grado de alteración y la mineralogía. Por otra parte existen diferencias que pueden ser encontradas en inclusiones fluidas y la información de los isotopos estables de los minerales (Megaw, 1988).

El Distrito Minero de Zimapán Hidalgo, se encuentra dentro del Terreno tectonoestratigráfico de la Sierra Madre Oriental (Figura 6), el cual se puede datar en sucesiones gruesas de los periodos Jurásico y Cretácico, que fueron deformados por la Orogenia Laramide (Sedlock et al, 1993).

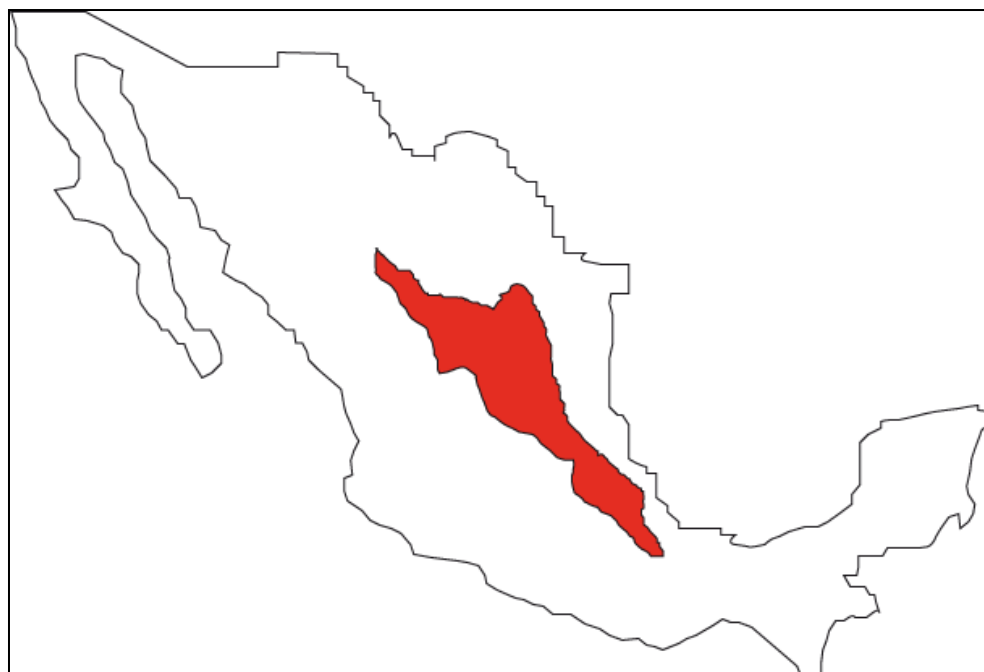


Figura 6. Terreno tectonoestratigráfico Sierra Madre Oriental dentro del cual se encuentra el Distrito Minero de Zimapán (Modificado de Campa y Coney, 1984).

Según Carrillo-Matínez (1998), tanto los intrusivos como la mineralización son contemporáneos con edades que van del Jurásico tardío al Mioceno Tardío.

De acuerdo en la clasificación de Megaw et al (1988) los depósitos de esta zona se pueden dividir en depósitos de Skarn de contacto proximal con troncos, skarn de contacto con diques o sills constituidos por sulfuros masivos epigenéticos, que

varían a chimeneas y mantos de reemplazamiento y a mantos de sulfuros masivos de reemplazamiento distales y hay algunos que están considerados como intermedios entre los tipos de Skarn de contacto proximal y de sulfuros masivos (epigenéticos) distales, los cuales no se tiene conocida alguna relación con algún intrusivo.

El reemplazamiento de carbonatos de la roca encajonante es común, y los depósitos de Ag-Pb-Zn-(Cu) de alta temperatura encajonados por carbonatos del norte de México (Figura 7), ocupan una zona que corre en forma paralela a la posición de la paleotrinchera, pero por lo general bastante al oriente de la provincia de cobre porfídico del noroeste de México (Clark et al, 1982).

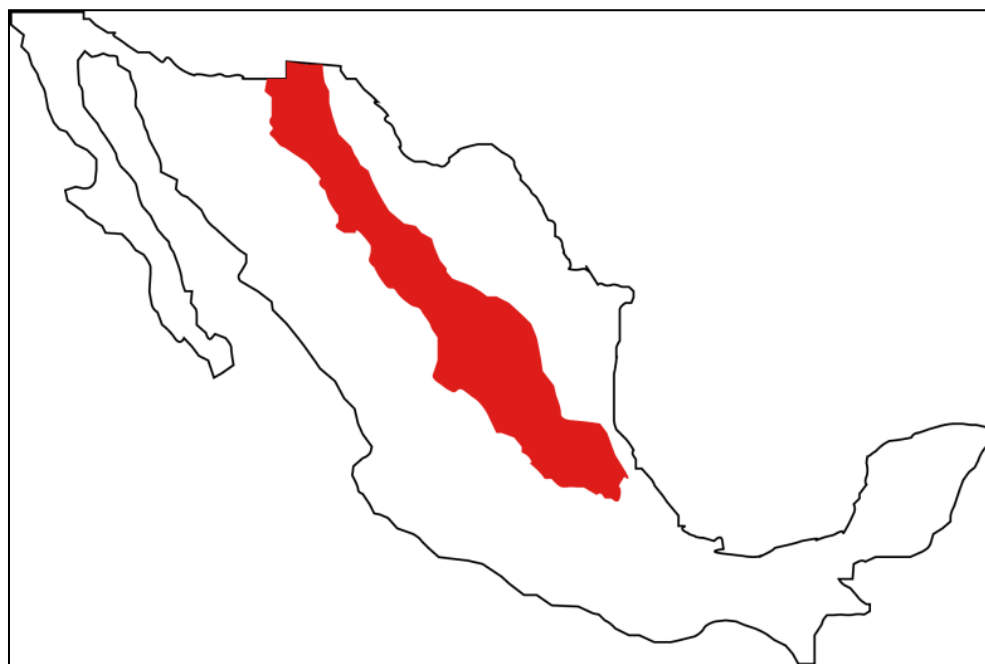


Figura 7. Franja de mantos, chimeneas y vetas de Zn-Pb-Ag-Cu (Modificado de SE-SGM, 2010)

3.7 Génesis de los yacimientos en Zimapán

La génesis de los yacimientos de Zimapán está ligada al emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos de composición monzonítica. El fenómeno hidrotermal que dio origen al emplazamiento de los cuerpos mineralizados, fue producto de la actividad de los diques, dando origen al Skarn metasomático. Se han generado diferentes períodos sucesivos de mineralización, pero la gran mayoría son posteriores al fenómeno de skarn, algunos se dieron de manera simultánea (Carrillo, 1998)

Cabe señalar que la mineralización es de edades menores que las rocas encajonantes. Las características de las calizas, sirvieron para favorecer el paso y depósito de los minerales de mena, siendo por relleno de fracturas y reemplazamiento. Obedeciendo a la calidad de roca encajonante y la profundidad en que se encontraba. Los Yacimientos se pueden clasificar dentro del rango de mesotermiales (profundidades de 1500 a 4500 m y temperaturas entre 200 a 400 °C) y epitermales (profundidades menores a 1500 m y temperaturas entre 50 a 200 °C (Robb, 2005)).

4. Metodología (Aplicada)

Para realizar la caracterización mineralógica de las fases asociadas en La Mina El Espíritu, se efectuó un muestreo en los niveles internos en producción a los que se tuvo acceso, 120 a 250 y en niveles superiores a estos, en donde se tuvo acceso pero actualmente se encuentran abandonados, logrando analizar el material y así proponer una paragénesis (Figura 8). Se llevaron a cabo estudios petrográficos, minerográficos, de microscopía electrónica de barrido y de microsonda electrónica para análisis cuantitativo y mapeo de distribución elemental de las muestras previamente seleccionadas.

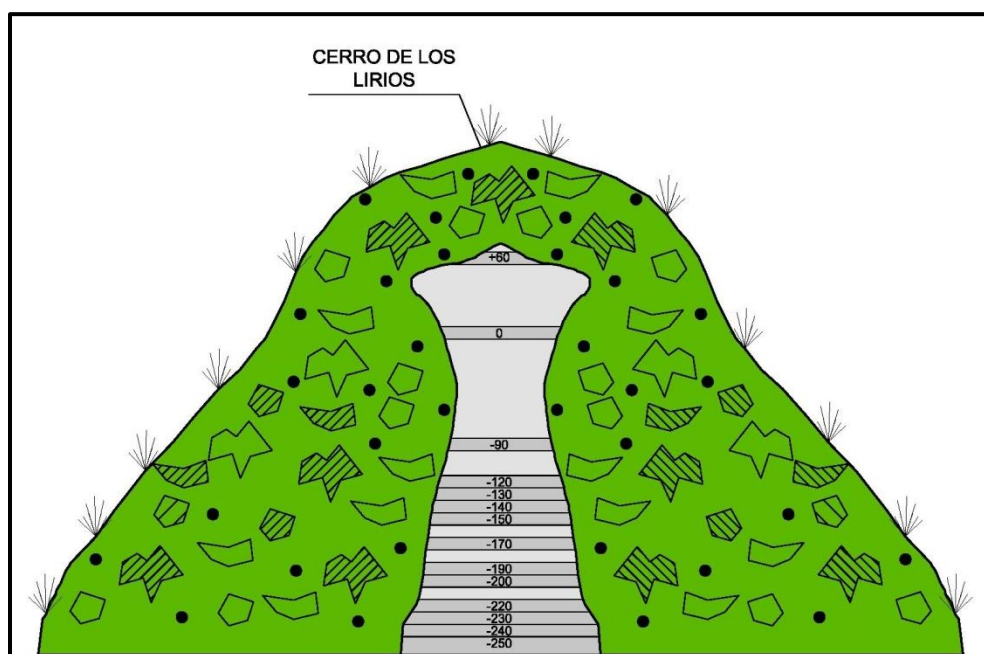


Figura 8. Croquis en donde se puede observar los niveles que fueron muestreados.

Una vez hecha la caracterización mineralógica y con la información obtenida esta podrá ser utilizada con el fin de apoyar, optimizar y mejorar las formas de extracción y beneficio de los minerales que se encuentren en La Mina El Espíritu.

El muestreo de rocas es una actividad de suma importancia en cualquier ámbito de la geología, tomando principal importancia en la prospección de yacimientos minerales y siendo un método científicamente fundamentado de revelación de la calidad de las menas, la composición mineral y la química, se debe realizar de acuerdo a las necesidades que se tengan. Por lo tanto existen diferentes métodos, los cuales se adecuan a éstas.

En el muestreo en la prospección de yacimientos minerales, según A. B. Kazhdan (1977) se pueden distinguir cuatro tipos:

1. Muestreo ordinario: Se emplea para determinar el contenido de componentes útiles e impurezas nocivas o minerales útiles.
2. Muestreo técnico: Se emplea para estudiar las diversas propiedades físicas y químicas de los minerales.
3. Muestreo tecnológico: Se emplea para estudiar las propiedades tecnológicas de los minerales en condiciones de laboratorio semi-industriales e industriales.
4. Muestreo mercantil: Se ejecuta para determinar la calidad de las masas extraídas de mineral y de los productos de su transformación.

El muestreo ordinario, dadas las condiciones en las cuales se trabajó dentro de la mina fue el que más se adecuó a las necesidades debido a las características del cuerpo mineral. Tomando en consideración los criterios de trabajo de éste método, se escogió el muestreo aleatorio debido al alto brechamiento presente en el cuerpo mineralizado, de esta forma se trató de obtener muestras representativas de la mineralización.

Actualmente, en algunas compañías mineras, se emplea un equipo portable llamado analizador Nitton, con el cual se pueden hacer pruebas rápidas y exactas de análisis elementales, todo esto in “situ”. Para fines de una caracterización mineralógica, ayudaría a la selección de muestras y saber en qué zonas la mineralización es más abundante, pero el alto costo de éste equipo, limita su uso en mineras como El Espíritu.

El muestreo dentro de la mina, se realizó con la ayuda de dos personas, las cuales sirvieron de apoyo durante la toma de muestras. Se tomó en consideración que ya se conoce parte de la mena de la mina, por lo cual, las muestras se tomaron siguiendo la mineralización o cambios en ésta. Cada muestra fue tomada con la intención de que fuera representativa de las características tanto físicas como químicas de la mena, el tamaño de cada una fue de aproximadamente 20 [cm].

La empresa minera suministró de planos topográficos, los cuales se utilizaron como base para conocer los datos de ubicación dentro de la mina, así como para desplazarse dentro de ella con seguridad.

El acceso al interior de la mina podía ser a pie o en camioneta y de igual manera el traslado dentro de ésta, puesto que es una mina pequeña.

Se muestrearon 52 muestras de mano, teniendo como criterio donde se pudiera apreciar algo distinto a los diferentes niveles o algún cambio en la mineralización, debido a esto, la cantidad varía de un nivel a otro. Este trabajo se realizó durante el mes de septiembre de 2012.

Posterior al muestreo se realizaron los análisis, megascópicos, microscópicos y de microsonda electrónica, de éstas.

El Muestreo se inició en el nivel más profundo, -250, pasando por los niveles -240, -230, -220, -210, -200, -190, -170, -150, -140, -130, -120, -90, 0 y terminó en el nivel +60. Se tomaron un total de 56 muestras de las cuales se seleccionaron

En los niveles 0 y +60, quedan remanentes de la primera etapa de la extracción de óxidos de la mina, aproximadamente en el siglo XVI (Murguía, 1979), ya que la cantidad de éstos es abundante en el área y aún se pueden observar los rieles sobre los cuales se movían los carros que transportaban el mineral y construcciones con las cuales extraían los minerales. Dentro de estos niveles hay sectores que se encuentran derrumbados y fueron abandonados hace mucho tiempo, ya que la distancia a las vías de comunicación existentes, no facilitaban la extracción del mineral. Actualmente estos niveles se encuentran en exploración, porque se planea rediseñar las vías de acceso, debido a que el desplazamiento dentro de estos dos niveles es complicado y peligroso.

En los niveles inferiores, que son los que actualmente se encuentran en producción, las condiciones para llevarlo a cabo son más adecuadas para la extracción de minerales, en cuestión de traslado, desplazamiento y seguridad, dentro de la mina.

En Los niveles a los que no se tiene acceso, es debido a que la explotación llegó a su límite o las condiciones para esto, ya no eran las adecuadas.

4.1 Material empleado en la toma de muestras:

- Martillo de geólogo
- Lupa
- Cincel
- Bolsas para las muestras
- Plumón de aceite para marcar las muestras
- Cinta para sellar las bolsas
- Mapas topográficos de los diferentes niveles de la mina
- Equipo de seguridad suministrado por la compañía minera (overol, botas, casco con orejeras, lámpara de casco, auto-rescatador, guantes de carnaza, lentes de seguridad, respirador)

En el Instituto de Geología de la UNAM, se procedió al análisis de las 56 muestras obtenidas, primeramente con muestras de mano, haciendo una descripción megascópica del color, textura y los minerales observables.

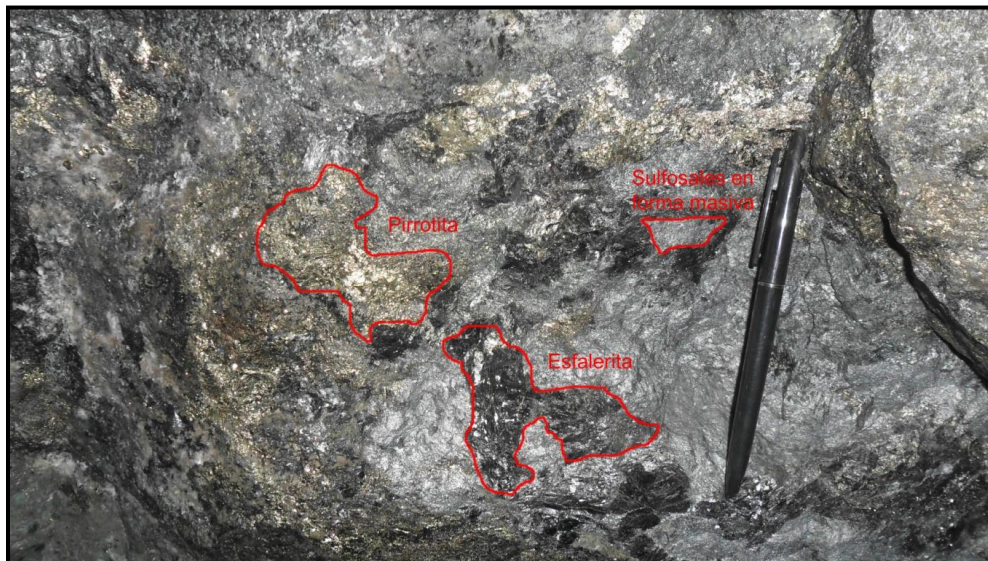


Figura 9. Sulfuros y sulfosales en forma masiva



Figura 10. Muestra de mano de galena.



Figura 11. Cristales de pirita y de calcita, formados en oquedades.



Figura 12. Parche de fluorita en el nivel -150

Durante el muestreo se observó que los minerales se encontraban de forma masiva. También se pudo observar que parte de los minerales de ganga, se encontraron rellenando oquedades tal es el caso de la calcita y la pirita (Figura 11), así como pudo verse que los sulfuros estaban en contacto con fluorita en el nivel -150 (Figura 12).

Posterior al muestreo, se seleccionaron muestras para cortarse de tal manera que se pudieran observar mejor los minerales presentes y algunas otras se conservaron tal cual se obtuvieron.

En esta etapa lo que se pudo observar con más detalle fueron sulfuros de (Zn, Pb, Cu y Fe) y la presencia de sulfosales. Durante este análisis se seleccionaron algunos fragmentos que resultaron de interés para conocer con más a detalle la mineralogía presente y se dio especial énfasis en los análisis de las muestras provenientes del nivel 240, ya que a partir de ese nivel es donde el cuerpo en donde se encuentra la mineralización comienza a separarse en dos y se han llamado Cuerpo A y Cuerpo B, en dicho nivel es en donde actualmente se llevan a cabo los niveles de explotación con más intensidad.

Se mandaron preparar láminas delgadas pulidas, las cuales se analizaron con un microscopio óptico de luz polarizada marca Olympus modelo BX50, con el cual se empleó luz reflejada para realizar la mineragrafía, con objeto de identificar las asociaciones minerales, y la forma en que se encuentran (Texturas presentes). Para clasificar los minerales se obtuvieron sus propiedades ópticas y con ellas se clasificaron empleando bibliografía referente.

Con los estudios mineragráficos se identificaron minerales y sus relaciones texturales, habiendo también algunos que no pudieron reconocerse plenamente, por lo cual se decidió hacer estudios por microscopio electrónico de barrido y de microsonda electrónica.

El Microscopio electrónico de barrido (MEB) puede revelar la superficie topográfica del material observado, por medio de electrones secundarios emitidos desde la muestra o muy cerca de la superficie, como resultado de la incidencia de un haz de electrones. Este equipo proporciona una gran resolución y profundidad de campo y permite observar el material a grandes aumentos. (Reyes – Salas. 2013). La operación de este equipo está a cargo de la Dra. Margarita Reyes Salas y la M. C. Sonia Ángeles García

El MEB del Instituto de Geología es marca JEOL modelo IGEOL-6300 que tiene acondicionado un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X con el cual se pueden llevar a cabo estudios composicionales y semicuantitativos. Las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

- 20 kV
- Diámetro del haz 1 micrón
- Corriente de 20 nA

Se emplearon electrones retrodispersados y electrones secundarios para imágenes tridimensionales.

Las láminas delgadas pulidas presentaron igualmente algunas zonas de interés por lo cual se llevaron a analizar mediante microsonda electrónica de barrido (ME),

la cual pertenece al Instituto de Geofísica, es marca JEOL modelo JXA899-R. Cuenta con 5 espectrómetros de longitud de onda de rayos X, con los cuales se pueden hacer análisis cuantitativos. Las condiciones de trabajo fueron:

- 20 KeV
- Corriente de 2.0×10^{-8} (A)
- Diámetro de as 1 micra
- Tiempo de adquisición de 40 segundos para cada elemento.

La operación de este equipo está a cargo del Ing. Carlos Linares López.

Los porcentajes en peso de elementos obtenidos pueden ser comparados con los teóricos y de esta forma se puede saber que mineral es el que se encuentra presente en las láminas delgadas pulidas, sin embargo, para tener mayor precisión al momento de identificar minerales con los porcentajes en peso obtenidos, fue necesario hacer el cálculo de la fórmula del mineral de interés.

Previo a los estudios de microscopía electrónica, se dibujó un mapa de la muestra observada con microscopio mineragráfico, en donde se marcaron las zonas de interés, con el fin de localizar fácilmente estas zonas y ahorrar tiempo de trabajo.

Después de marcadas las láminas se mandaron a recubrir con carbón para hacerlas conductoras para evitar errores en las mediciones por efecto de la carga.

La interpretación de resultados se realizó con el apoyo de la M. en C. Guadalupe Villaseñor Cabral, quien es la responsable de los estudios solicitados por parte de la Compañía Minera El Espíritu.

5. Resultados

Los resultados obtenidos por medio de los métodos empleados para la caracterización mineralógica, permitieron determinar con certeza y clasificar los minerales presentes en las muestras de la mena. Para llevar a cabo la caracterización se siguió un proceso en el cual no a todas las muestras se les hicieron los mismos análisis, esto se determinó conforme se avanzaba en el estudio de cada una, de tal manera que durante la descripción macroscópica sirvió para seleccionar material para preparar láminas delgadas pulidas y superficies pulidas, de ellas, se escogieron y marcaron las que mostraran zonas de interés para llevarlas a analizar a la microsonda electrónica y para obtener la composición química de las fases diferenciadas.

5.1 Descripción megascópica

Se realizó una descripción megascópica de todas las muestras colectadas, que sirvió además para la selección de muestras a las que se les realizaron superficies y láminas pulidas (Tabla 1).

Con las observaciones megascópicas se identificaron los siguientes minerales y las relaciones texturales que presentan (Tabla 1), cuyas principales características se anotan a continuación:

Galena

Representa la fase mineral de Pb más abundante dentro del yacimiento y se encuentra en cantidades similares a la esfalerita. Se encuentra de forma masiva y en cristales euhedrales (cubos). Texturalmente se observaron dos diferentes tipos de grano, uno de grano grueso, el cual se encuentra en la mayor parte del cuerpo mineralizado y otro de grano fino, que se observa en los niveles -240 y -250 principalmente.

Esfalerita

Representa la fase mineral de Zn uno de los minerales más abundantes del cuerpo estudiado. Se observó de manera masiva y en forma de cristales

euhedrales (cubos), el mineral está intercrecido con la galena, pirrotita y sulfosales. Es considerada junto con la galena, como los minerales de interés económico para La Compañía Minera El Espíritu.

Pirrotita

Es un mineral de ganga de hierro, se presenta en menor cantidad que los anteriores minerales, está en forma de vetillas sin orientación aparente, cortando a los intercrecimientos de los otros sulfuros y a la calcita.

Pirita

Es el mineral de ganga de hierro de menor abundancia, se encuentra en diferentes tamaños, esto debido a que las características de formación en los distintos lugares que influyeron en su crecimiento, ya que se observaron cubos de 1 milímetro hasta de 5 centímetros formando parte del mosaico de sulfuros y diseminados en la calcita.

Sulfosales

Estas se encontraron en dos hábitos, de forma acicular incluidas en el mosaico de sulfuros las cuales son muy escasas, o rellenando parcialmente oquedades incluidas en calcita, las más abundantes son de forma masiva y están formando parte del mosaico de sulfuros que es la forma común en que se pueden observar en el cuerpo estudiado. Clasificarlas en esta etapa de los análisis no es posible, por lo cual se recurrió a los estudios posteriores.

Minerales de ganga no metálicos.

Se identificaron tres minerales de ganga, calcita la más abundante, cuarzo, fluorita y únicamente en la muestra ESP-ZIM-13 Presenta granates.

La calcita se encuentra formando la caliza que encajona el cuerpo y en los fragmentos de caliza incluidos en el cuerpo mineral. También se encontró en diferentes hábitos formando vetillas dentro de la caliza y cortando al mosaico de sulfuros; como relleno de oquedades en donde se pudo observar con inclusiones

de sulfosales y en el nivel -130 formando prismas hexagonales incoloros muy diáfanos.

La fluorita se observó únicamente en los niveles -150 y -140, con una coloración verde, en donde forma parches de aproximadamente 10 centímetros como parte del mosaico de sulfuros.

El cuarzo se presenta como relleno de oquedades en hábito prismático y en partes de tipo botroidal intercrecido con óxidos.

Para referencias de los nombres de los minerales con su respectiva clave y claves de las muestras con el nivel de que pertenecen consultar la Tabla 2 y Tabla 3.

5.2 Mineragrafía

La selección de material para la preparación de superficies y láminas delgadas, pulidas, donde se hicieron los estudios mineragráficos se anexan en la Tabla 3.

Se pudieron identificar a mayor detalle los minerales de mena y se observaron características texturales y de tamaño de partícula relacionados a procesos en su formación.

En el estudio mineragráfico además de los minerales identificados megascópicamente se identificó arsenopirita y se diferenció a la tetraedrita de las sulfosales de plomo. Las relaciones texturales de las distintas fases minerales se enlistan a continuación:

Galena (PbS)

Se presenta como parte del mosaico de sulfuros intercrecida con la esfalerita y se puede observar en diferentes morfologías, como islas, continentes u océanos, así como, en diferentes tamaños, sus formas van de euhedrales a subhedrales. En partes se aprecian inclusiones de sulfosales (Foto-micrografía 1). Está en contacto con minerales como la esfalerita (Foto-micrografía 2) o pirrotita (Foto-micrografía

3), y en sus bordes puede existir reemplazamiento por sulfosales (Foto-micrografía 2).

En ocasiones puede observarse bordes corroídos por minerales transparentes que la han brechado, formando fragmentos angulosos.

Esfalerita (ZnS)

Se observó intercrecida con la galena formando un mosaico homogéneo reemplazando a la pirrotita, así como formando un mosaico homogéneo sin la presencia de otros sulfuros en formas que varían de tamaño e incluso se observan como parte de océanos de galena (Foto-micrografía 2).

Dentro de este mineral pueden observarse cristales de calcopirita incluidos en la esfalerita como exolución, lo cual se conoce como enfermedad de la calcopirita (Foto-micrografía 4). También se observa un reemplazamiento a través de sus bordes por las sulfosales (Foto-micrografía 2).

Al igual que la galena se encuentra brechada por vetillas y parches de minerales transparentes, calcita y cuarzo.

Pirrotita ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x = 0 - 0,2$)

La pirrotita se presenta como un mosaico de cristales anhedrales de grano fino, que forma islas y continentes dentro de un océano de galena (Foto-micrografía 3), o como franjas dentro de mosaico de galena y sulfosales (Foto-micrografía 5). Los contactos con otros minerales, principalmente con galena y esfalerita, son en forma de golfos y penínsulas (Foto-micrografía 3).

Dentro de este mineral no se observaron inclusiones de sulfosales, pero se observan ocasionalmente inclusiones de pirita y algunos minerales transparentes de sección hexagonal probables granates (Foto-micrografía 3).

Pirita (FeS_2)

La pirita es un mineral que fue muy difícil poder observarlo en los estudios microscópicos debido a que es muy escaso. Los cristales observados, presentaban tamaños menores a las 100 micras y formas subhedrales, en contacto y o reemplazado principalmente a la pirrotita (Foto-micrografía 3).

Arsenopirita (FeAsS)

Los cristales de arsenopirita se observaron en forma euhedral o subhedral de sección rómbica, en contacto con sulfosales o dentro de los minerales transparentes que rellenaron las fracturas (Foto-micrografía 6).

Los tamaños son de alrededor de las 200 micras, los bordes de sus contactos se encontraban corroídos por minerales transparente probablemente calcita (Foto-micrografía 6).

Tetraedrita ((Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃)

Los cristales de tetraedrita por lo regular son difíciles de observar en microscopio mineragráfico por lo pequeños que son, pero en ocasiones se observaron en tamaños cercanos a las 200 micras y con formas anhedrales en los bordes de minerales como la galena o la esfalerita (Foto-micrografía 4).

Sulfosales de Pb (boulangerita (Pb₅Sb₄S₁₁) y jamesonita (Pb₄FeSb₆S₁₄))

Las sulfosales se observan en la mayor parte de las muestras en tamaños que varían de 10 hasta mayor o igual a 200 micras. Se presentan como agujas o inclusiones redondeadas dentro de la galena o esfalerita (Foto-micrografía 2), en minerales transparentes, así como bordes en cristales de galena (Foto-micrografía 6).

En ocasiones se encuentra como islas y continentes incluidos dentro de la galena y se observa como una “mancha” de color gris (Foto-micrografía 4).

5.3 Microsonda Electrónica y Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

De las 13 muestras que se analizaron con microscopio mineragráfico, se seleccionaron 7 muestras para estudios por SEM (Scanning Electron Microscopy) y EPMA (Electron Probe Microanalyzer, Microsonda Electrónica de Barrido por sus siglas en inglés). Para realizar análisis químicos cualitativos y cuantitativos, con objeto de identificar los tipos de sulfosales para clasificarla, de tetraedritas para conocer a que fases minerales de este grupo pertenecen y campos con esfalerita para determinar el contenido de Fe .

Mediante análisis con EDS (Espectrometría de energía característica dispersada de Rayos X) y WDS (Espectrometría de longitud de onda de Rayos X) se obtuvieron resultados en cantidad de porcentajes en peso de elementos químicos que constituyen los minerales. También se obtuvieron mapeos de distribución elemental de las superficies de las muestras con los cuales se pudo observar la disposición de los elementos y la forma de los minerales que los contenían.

El trabajo de microsonda electrónica fue la parte final de los estudios realizados, con la finalidad de confirmar los minerales ya identificados e identificar aquellos que no había sido posible, con el SEM además de observar las relaciones texturales presentes en las muestras, se observaron aquellos minerales que por su tamaño resultó difícil hacer en microscopio mineragráfico.

Microscopio Electrónico de Barrido

Las imágenes obtenidas sirvieron para observar las asociaciones minerales que no se podían identificar con los aumentos del microscopio mineragráfico, estas sirvieron para complementar la forma y características de los minerales (Figura 13 y Figura 14). También se obtuvieron análisis semicuantitativos que ayudaron a su clasificación (Figura 15).

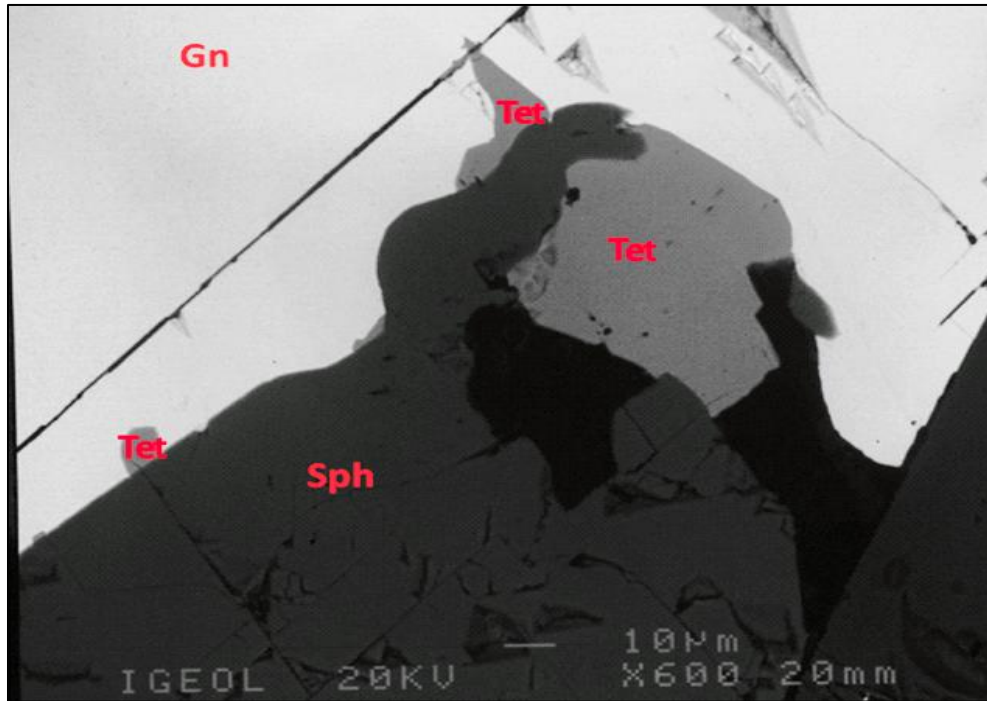


Figura 13. composicional (BEI: Backscattered electron image) en donde se pueden observar los contactos entre tetradrita (Tet), galena (Gn) y esfalerita (Sph).

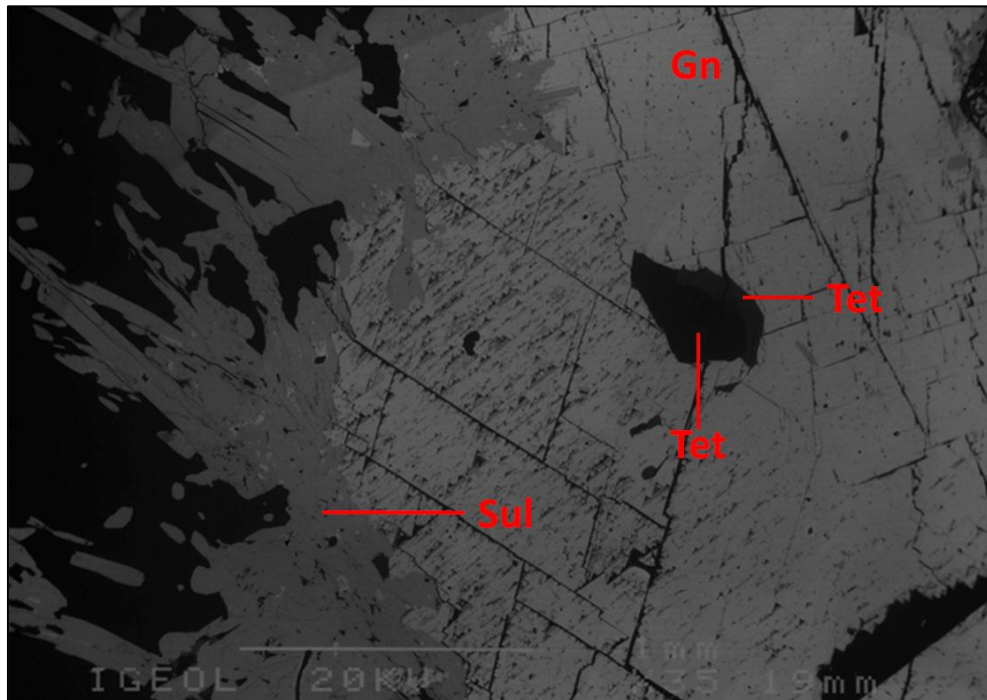


Figura 14. . Imagen composicional (BEI) en donde se aprecian las sulfosales en la orilla de un mar de galena (Gn) en contacto con sulfosales (Sul), en donde hay inclusiones en forma de islas de esfalerita (Sph) y tetradrita (Tet).

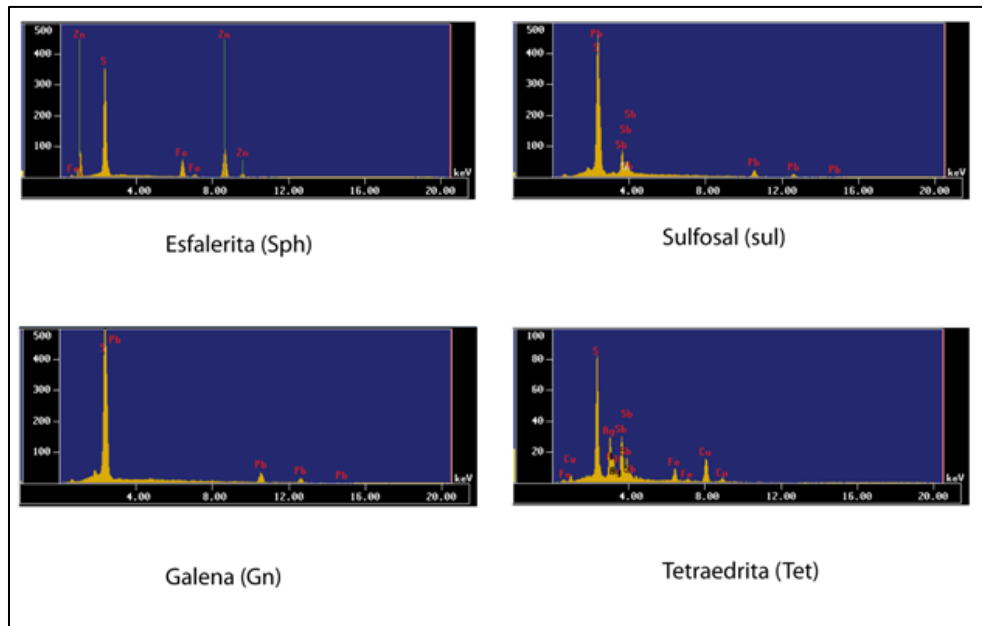


Figura 15. Espectros de energía dispersada de Rayos X de las fases minerales analizadas, se obtuvieron resultados químicos elementales semicuantitativos, en donde se puede apreciar la diferencia en la composición de dichas fases.

Microsonda Electrónica de Barrido (EPMA)

Se realizaron mapeos de distribución elemental (MDE) con WDS de los siguientes elementos: Arsénico (As), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Antimonio (Sb), Hierro (Fe) y Cobre (Cu), donde se puede observar la distribución de dichos elementos y por lo tanto la morfología de los minerales y su componente elemental predominante.

Muestra ESP-ZIM-12

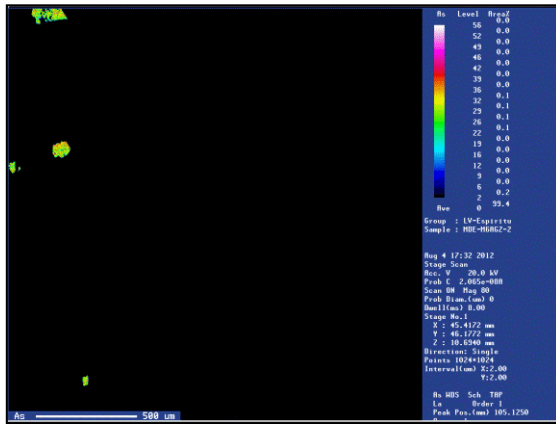


Figura 16. Mapeo de distribución elemental de Arsénico, aquí se puede distinguir fácilmente a la arsenopirita (Apy), ya que son cristales euhedrales y subhedrales de buen tamaño.

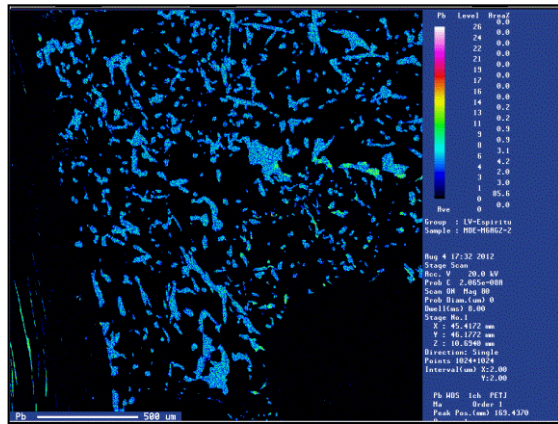


Figura 17. Mapeo de distribución elemental de Plomo, se pueden apreciar los minerales constituidos por este elemento, en donde las zonas de mayor concentración presentan un color verde lo cual indica que su composición corresponde a galena (Gn), el color azul indica menor cantidad de éste y la presencia de sulfosales la cual se identificó como boulangerita (Bou)

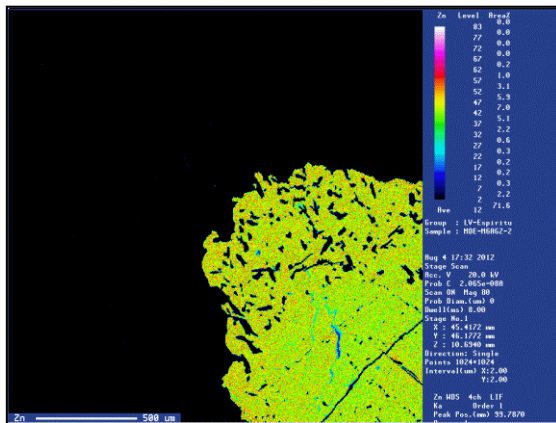


Figura 18. Mapeo de distribución elemental de Zinc, aquí es demasiado evidente que el Zn se encuentra solamente en un mineral, en este caso es esfalerita y se puede observar que la concentración de este elemento es alta.

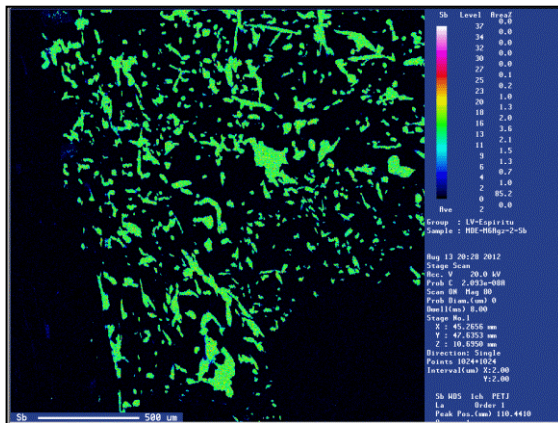


Figura 19. Mapeo de distribución elemental de Antimonio, se observa que la concentración de este elemento corresponde con la sulfosal de plomo y complementa la composición de la boulangerita.

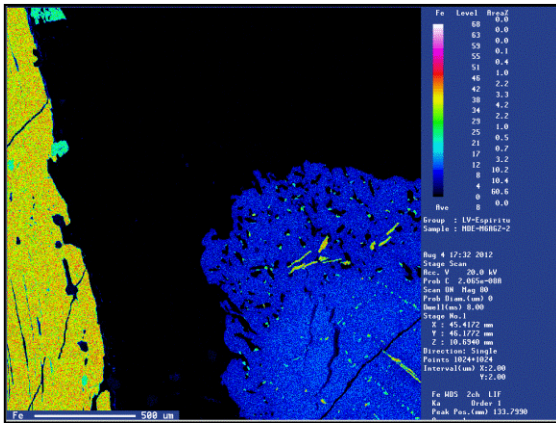


Figura 20. Mapeo de distribución elemental de Fe, se distinguen tres concentraciones de interés, del lado izquierdo, una franja de color amarillo que indica mayor cantidad de este elemento, se clasificó como pirrotita (Po), el tono verde concuerda con el mapeo de As y complementa la química de la arsenopirita y por último el color azul, que es la menor concentración y está dentro de la esfalerita, la presencia de Fe en la composición de la esfalerita, indica una variedad de ésta y es catalogada como esfalerita ferrífera o marmatita (Moreno – Tellez, 2012).

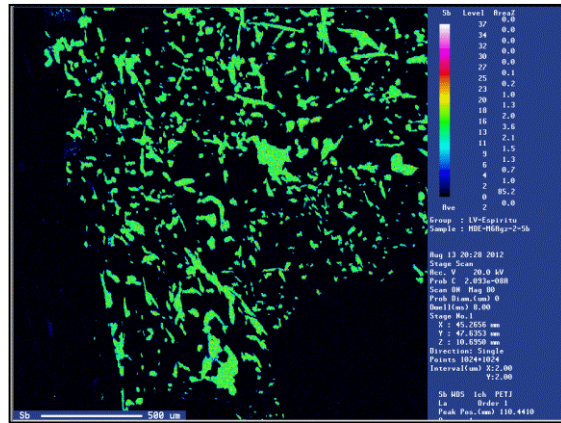


Figura 21. Mapeo de distribución elemental de cobre, la presencia de este elemento se puede observar únicamente sobre la esfalerita, con concentraciones pequeñas que coincide con lo que hemos mencionado como enfermedad de la esfalerita, que son reemplazamientos de calcopirita.

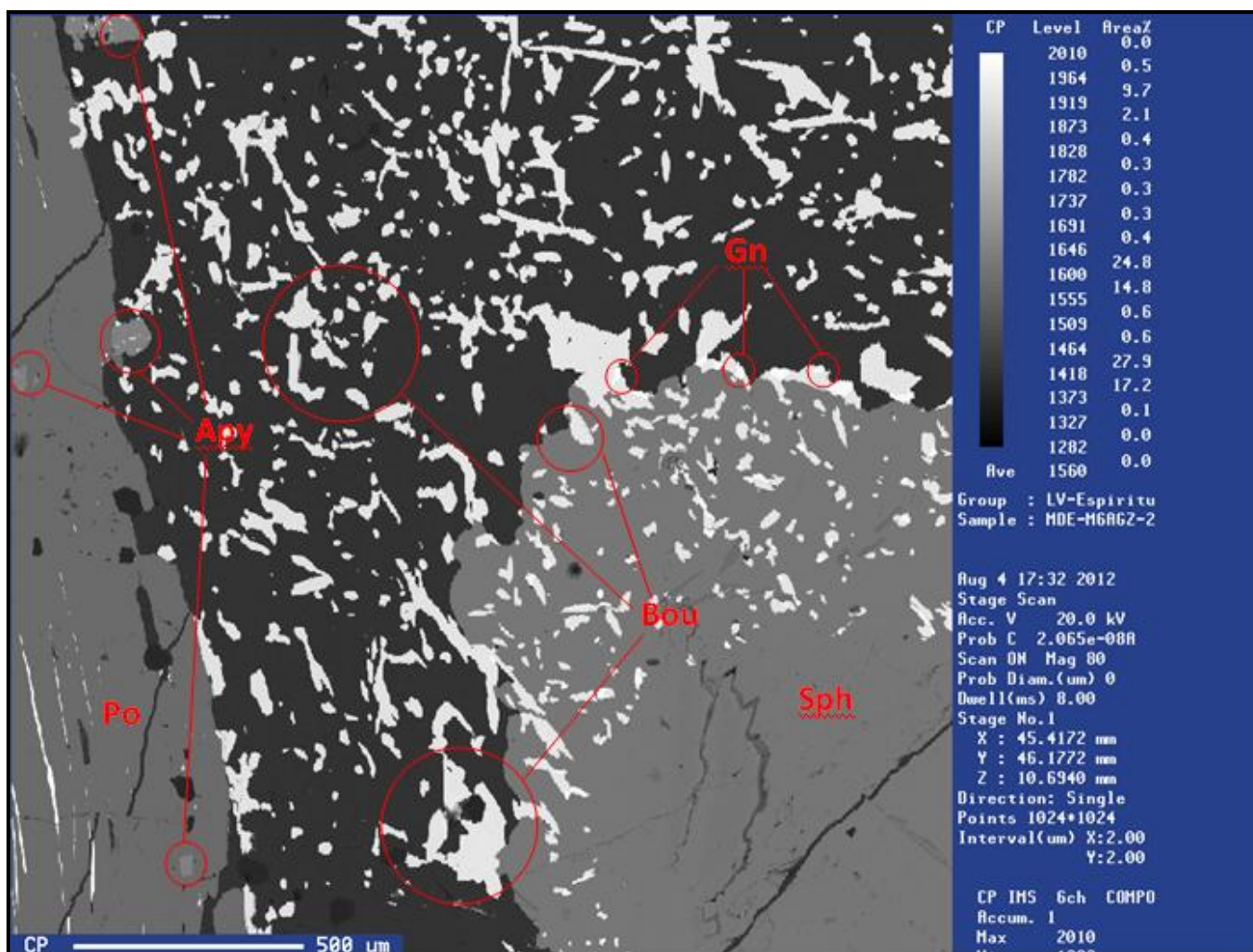


Figura 22. . Imagen (BEI) de la muestra ESP-ZIM-12 tomada con microsonda electrónica de barrido. En la imagen se puede apreciar que las sulfosales se formaron sobre la esfalerita.

Muestra ESP-ZIM-13

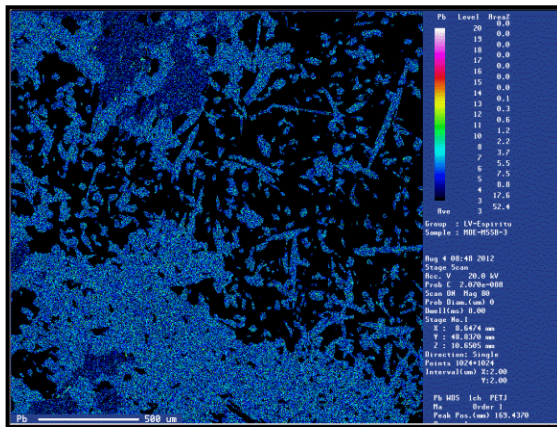


Figura 23. Mapeo de distribución elemental de plomo, se puede apreciar tres diferentes concentraciones, las que son en color verde, que indican mayor concentración de este elemento, son remanentes de galena reemplazada por las sulfosales de Pb, y los tonos azules que son las sulfosales, el más claro se clasificó como boulangerita y el más oscuro como jamesonita.

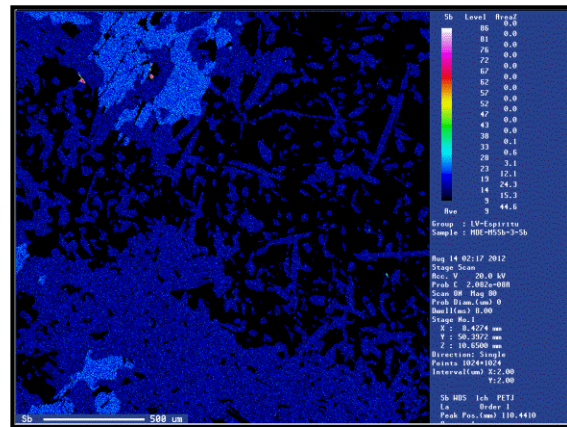


Figura 24. Mapeo de distribución elemental de antimonio, este mapeo sirvió para diferenciar las dos sulfosales, siendo el color azul claro la que se clasificó como jamesonita al contener mayor cantidad de éste elemento y el color azul oscuro como boulangerita, por tener menor concentración.

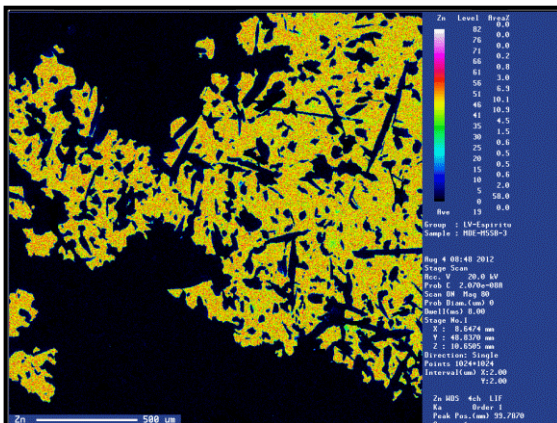


Figura 25. Mapeo de distribución elemental de zinc, aquí se identifica fácilmente la esfalerita, sobre la cual están las sulfosales.

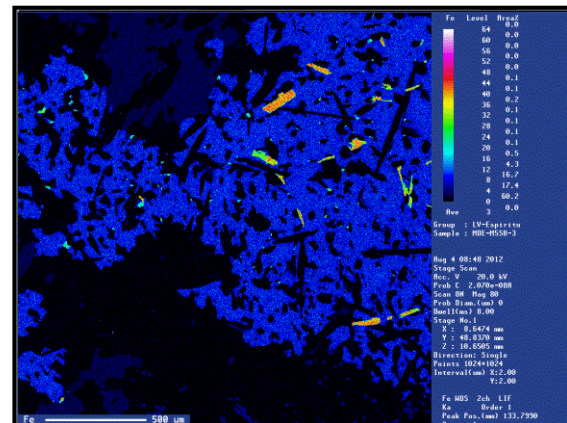


Figura 26. Mapeo de distribución elemental de hierro, nuevamente aquí se puede observar que la esfalerita puede ser catalogada como marmatita o esfalerita ferrosa. También se pueden observar algunos cristales de pirrotita, fácilmente identificables por ser las zonas con mayor concentración de este elemento.

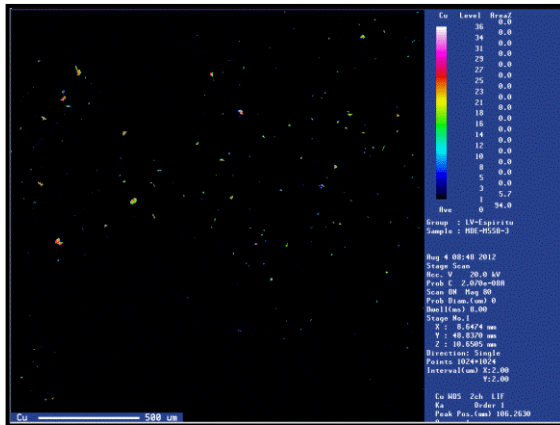


Figura 27. Mapeo de distribución elemental de cobre, la distribución de este elemento sobre el mineral de zinc, denota la condición, que ya se ha mencionado, llamada enfermedad de la esfalerita.

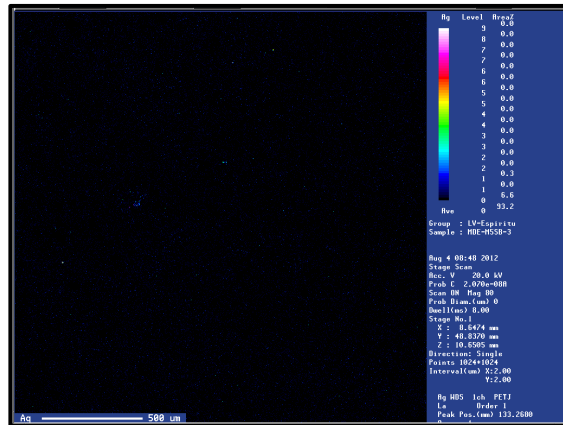


Figura 28. Mapeo de distribución elemental de plata, este elemento se encuentra en cantidades muy pequeñas y las zonas donde existe mayor concentración de este son difícilmente apreciables, por lo cual se necesitó de un análisis puntual de esas zonas para identificar plenamente el mineral.

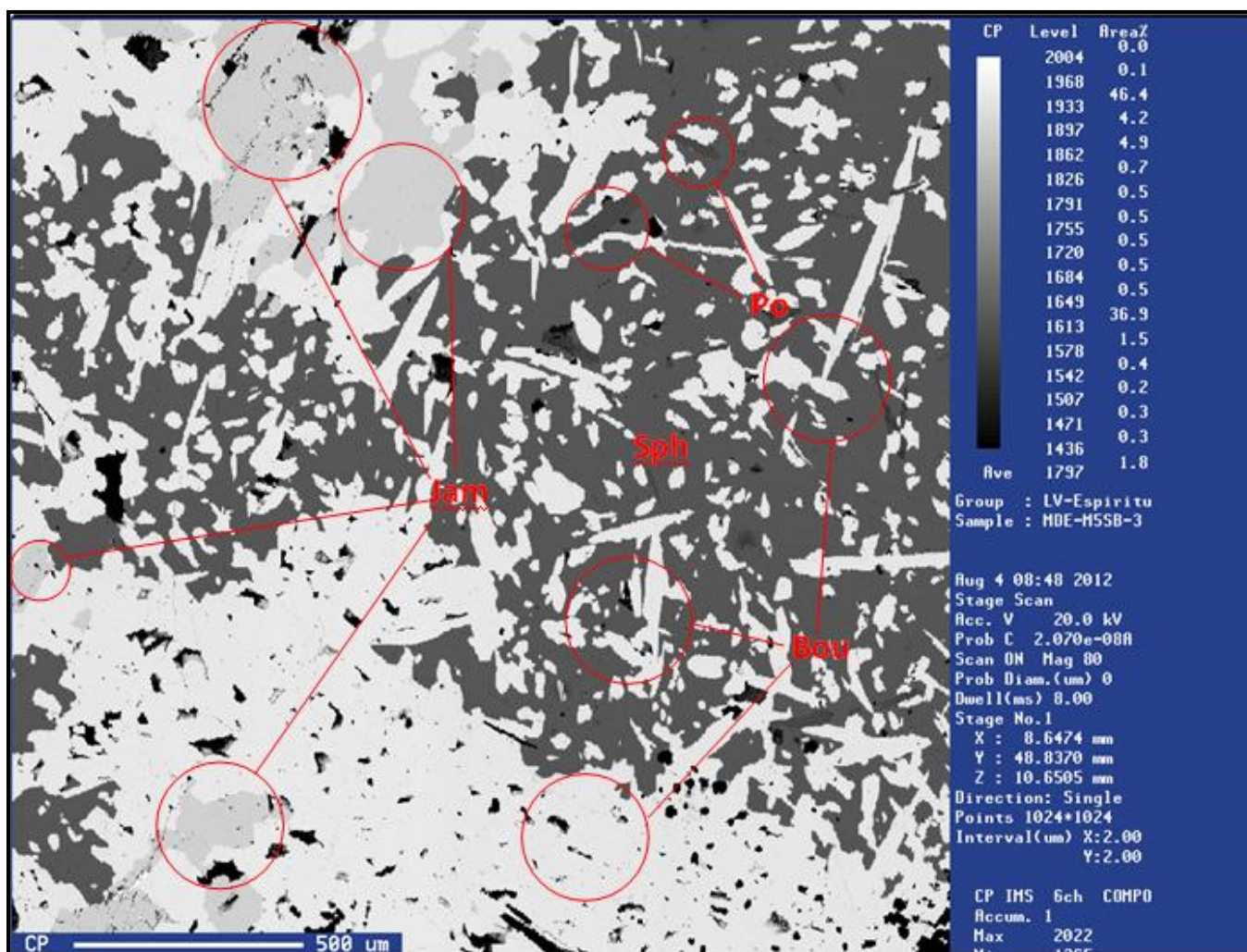


Figura 29. Imagen (BEI) de la muestra ESP-ZIM-13 tomada con microsonda electrónica en donde se pueden apreciar los minerales contenidos en ella. En la imagen se puede observar un campo donde se distingue la forma de algunos cristales en los cuales se llevaron a cabo los análisis cuantitativos por WDS de éstos, para obtener los porcentajes en peso de los elementos que los componen.

Mediante análisis cuantitativos puntuales de minerales, se observó la cantidad de los elementos que los conforman, con base a estos porcentajes en peso se identificaron con mayor precisión los minerales de mena y se pudo diferenciar entre las sulfosales y además identificar los minerales que por su tamaño no pudieron ser identificados con microscopio mineragráfico o con los mapeos de distribución de elementos, con estos resultados se calcularon las formulas de los minerales (Tabla 5).

6. Discusión y Conclusiones

6.1 Discusión

A través de los estudios efectuados para llevar a cabo la caracterización mineralógica de los minerales de interés económico de La Mina El Espíritu, se identificaron minerales, entre los que abundan la galena (PbS) y la esfalerita (ZnS), con estos se recupera Pb, Zn y algo de Ag. A estos dos minerales, se le suman la pirrotita ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x = 0 - 0,2$), pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS), calcopirita (CuFeS_2), minerales del grupo de la tetraedrita ($((\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13})$), boulangerita ($\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$) y jamesonita ($\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$).

Estos minerales se pueden diferenciar en dos grupos: sulfuros (galena, esfalerita, pirrotita, pirita, arsenopirita y calcopirita) y sulfosales (boulangerita, jamesonita y los pertenecientes al grupo de la tetraedrita).

Los sulfuros son minerales en donde uno o más metales son combinados con azufre. Las sulfosales son un subgrupo de estos en donde uno de los metales puede ser As, Sb o Bi (Wuensch, 1976).

El grupo de los sulfuros tiene por formula general AMX_p , donde X es el átomo más grande y usualmente es el azufre pero puede ser arsénico, antimonio, telurio, bismuto o selenio y A es uno o más metales. Las sulfosales, que son más raras que los sulfuros, tienen como fórmula AMBNX_p , donde A es comúnmente Ag, Cu o Pb, B es comúnmente As, Sb o Bi y X es azufre (Robb, 2005).

Como ya se dijo, los minerales de interés económico en las labores de extracción de La Mina El Espíritu, son la galena y la esfalerita. En el caso de la galena se tiene el problema que además de ella, se obtienen sulfosales de Pb – Sb, que afectan la recuperación de Pb, y en el caso de la esfalerita – marmatita, en su composición química tiene Fe, lo cual provoca que disminuya el porcentaje de Zn. Debido a esto, conocer la mineralogía es de gran interés para ellos, puesto que en el momento en que llega el material extraído a la planta de beneficio, los concentrados obtenidos de Pb y Zn, no tienen la calidad que ellos esperan.

Las sulfosales de Pb – Sb identificadas fueron la boulangerita y la jamesonita, entre las cuales la principal diferencia es la cantidad de Sb presente, siendo mayor en la boulangerita. Por otra parte la composición química de la jamesonita mostró que además del Sb y del S, hay Fe en su estructura.

Por otra parte, la Ag extraída se encuentra asociada a los minerales del grupo de la tetraedrita que junto con las sulfosales, esta es la serie isotípica más compleja, por la multiplicidad de sustituciones iso y heterovalentes. Estos minerales están relacionados texturalmente con los minerales de interés económico. (Möelo, 2008).

De acuerdo a Möelo (2008), este grupo se encuentra en numerosos depósitos minerales. Acepta en su estructura diversas sustituciones y refleja características del fluido mineralizante y se ha reportado siete especies de sulfosales bien definidas.

- tetrahedrita $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}]$
- tenantita $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2\text{As}_4\text{S}_{13}]$
- **freibergita** $\text{Ag}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2\text{Sb}_4\text{S}_{13-x}]$
- argentotenantita $\text{Ag}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2\text{As}_4\text{S}_{13}]$
- goldfieldita $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2(\text{Te},\text{Sb},\text{As})_{13}]$
- hakita $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2\text{Sb}_4\text{Se}_{13}]$
- giraudita $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2\text{As}_4\text{Se}_{13}]$

De acuerdo a los análisis obtenidos con microsonda electrónica, la tetraedrita encontrada se clasificó como freibergita, de acuerdo a los porcentajes de plata que presenta, el cual es alrededor del 23% y según Möelo (2008), entra en esa clasificación.

Paragénesis

Con base a los estudios realizados, se propone una paragénesis en la cual se pueden distinguir 4 etapas de mineralización. En la cual se puede observar que la galena se presenta en dos eventos, en los cuales, el segundo evento corresponde con la formación de las sulfosales. Los demás minerales se presentan en un solo evento.

La génesis de los minerales transparentes observados en las láminas delgadas pulidas, correspondería con el fracturamiento observado en la pirrotita, por lo cual son posteriores a la etapa de formación de la pirrotita y anteriores a la arsenopirita, encontrándose diseminados en cristales euhedrales dentro de ellos (Figura 30)

Fase Mineral	Etap 1	Etap 2	Etap 3	Etap 4
Galena		_____		

Esfalerita	_____			
Pirrotita	_____			
Pirita			_____	
Calcopirita		_____		
Arsenopirita				_____
Sulfosales			_____	
Minerales transparentes		_____		

Figura 30. Paragenesis propuesta.

6.2 Conclusiones

Importancia de una caracterización

El llevar a cabo una caracterización mineralógica, no solo ayuda a conocer los minerales presentes, ayuda a conocer su origen y de qué manera se encuentran en un yacimiento. Todos los estudios que se llevaron a cabo, siguieron una secuencia que fue fundamental para lograr los objetivos buscados. En cada etapa de ésta se obtuvo información que se complementaba al avanzar. Al tener todos los resultados, estos se conjuntaron para llevar a cabo la discusión acerca de los minerales encontrados. Esta información es útil para los fines que disponga la minera El Espíritu.

De esta forma antes de iniciar cualquier proyecto geológico, (explotación minera, estudios ambientales, etc.) es recomendable que se realicen estos estudios y darle más importancia a la mineralogía, ya que se podría ahorrar tiempo y dinero en el desarrollo de éstos. Se recomienda que estos estudios se realicen de forma continua durante el tiempo que se encuentren en actividad este tipo de obras.

Boulangerita y jamesonita como mena

Puesto que ambos minerales no se han considerado económicamente, es importante encontrar un método de beneficio en donde se puedan separar sus componentes y obtener concentrados de Sb y Pb, de esta manera obtener resultados económicos favorables, ya que al hacerlo, también mejorarían los concentrados obtenidos de la galena y de la esfalerita.

Microsonda electrónica

Mediante este método se pudo conocer que eran dos sulfosales diferentes que existen en el yacimiento, las cuales no se encontraban diferenciadas, además de conocer las diferencias químicas entre ellas. También, se pudo observar que la tetraedrita se encontraba en contacto con la galena y que en su mayoría los tamaños eran demasiado pequeños para observarse en muestra de mano o con

microscopio mineragráfico, por lo cual fue determinante para saber en qué condiciones se encontraba.

Este método puede ser determinante para confirmar la presencia de elementos (y eventualmente, minerales) de los cuales se tuviera duda de que podrían estar presentes en materiales geológicos, por lo cual su empleo se recomienda sea posterior a estudios en donde se comience a conocer el material de interés y poder una hipótesis acerca del material (características físicas y químicas).

Futuros estudios

Los resultados obtenidos por los métodos empleados, arrojaron información que será de gran utilidad para La Compañía Minera El Espíritu y se espera que cumpla sus expectativas respecto al estudio que ellos solicitaron al Instituto de Geología. Esta información puede ampliarse mediante otros estudios que servirían para conocer más acerca de la génesis del yacimiento, principalmente el estudio de inclusiones fluidas en minerales como la calcita, fluorita y esfalerita, así como la fluorescencia de rayos X.

Inclusiones fluidas: Existe material que se obtuvo durante el muestreo, que puede ser empleado para elaborar material con el cual se puedan llevar a cabo estudios de inclusiones fluidas, en donde los resultados que se obtengan ayudarían a complementar la información que actualmente ya se posee, esto con la finalidad de elaborar una paragénesis más precisa, ya que se dispondría de datos como la temperatura de formación del yacimiento

Fluorescencia de rayos X: Por otra parte, estudios de fluorescencia de rayos X ayudaría a conocer más a fondo la composición química de las zonas mineralizadas y rocas presentes, y así, establecer la paragénesis y la naturaleza de los minerales identificados, así como las asociaciones entre ellos.

Además de los estudios que se sugiere que efectúen, sería recomendable llevar a cabo una caracterización que complemente el muestreo realizado para el desarrollo de este trabajo, de los minerales de interés económico, con el fin de

poder elaborar una paragénesis con mayor detalle a la que se propone en este trabajo y poder elaborar un modelo del yacimiento que ayude a conocer la génesis del lugar.

7. Referencias Consultadas

Bateman, Alan M. 1961. Yacimientos minerales de rendimiento económico. Editorial Omega.

Campa, M. F., Coney 1983. Tectono-Stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 20, pp. 1040 – 1057.

Carrillo – Martínez, Miguel, 1982. Libro de guía de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, estados de Hidalgo y Querétaro. Sociedad Geológica Mexicana.

Carrillo – Martínez, Miguel y Suter 1991- Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro. UNAM, Instituto de Geología, UNAM, Hidalgo, Inst. Invest. Ciencias de la Tierra; Soc. Mex. Mineralógica, Región de Zimapán Hidalgo. Observación de un ejemplo de la tectónica de la Sierra Madre Oriental. Excursión Geológica, pp. 22 – 41.

Carrillo – Martínez, Miguel. 1998. Resumen de la geología de la Hoja Zimapán, Estados de Hidalgo y Querétaro. Instituto de Geología, UNAM.

Clark, K. F., Foster, C. T., y Damon, P. E. 1982, Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 93, p- 533-544.

Clark , Kenneth F., 2009. et al. Geología Económica de México, Servicio Geológico Mexicano- AIMMG.

De Cserna, Zoltan, 1990. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Instituto de Geología, UNAM.

García, G. y F. Querol, 1985. Descripción de algunos yacimientos del Distrito Zimapán, Zimapán, Hgo. Geología económica de México, pp. 383 – 400.

Kazhdan, A. B., 1977, Prospección de Yacimientos Minerales. Editorial Mir. Pp....

Lopez – Ramos, Ernesto, 1981. Paleogeografía y tectónica del Mesozoico en México. UNAM, Instituto de Geología, UNAM. Revista, vol. 5, pp. 158 – 177.

Megaw, Peter K., 1988. High Temperature, Carbonate-Hosted Ag-Pb-Zn(Cu) Deposits of Northern Mexico: Economic Geology, v. 83, pp. 1856 – 1885.

Melgarejo, Joan, et al, 2010. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 62, Núm. 1, pp. 1 – 23.

Möelo, Yves, et al, 2008. Sulfosalt Systematics: a review. Report of the sulfosalt sub – committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. Eur. J. Mineral, vol. 20, pp. 7 – 46.

Murguía, Alejo, 1579. Archivo General de Indias: Relación de Zimapán.

Reyes – Salas, 2013. Notas de clase sobre Microsonda Electronica y Microscopio electrónico de barrido. Inedito.

Robb, Laurence, 2005. Introduction to Ore – Forming Processes. Blackwell Publishing. Pp-----

Sánchez – Loyo, R., 2012. Estudio geológico y control estructural de los yacimientos de Ag, Pb, Zn y Sb, de la mina El Espíritu, Distrito Minero de Zimapán, Estado de Hidalgo. Tesis de licenciatura, ESIA, IPN.

Sawkins, F. J., 1990, Metal deposits in relation to plate tectonics: Berlin-Heidelberg, Alemania, Springer-Verlag, 461 p.

Sedlock, R. L., F. Ortega-Gutierrez, and R.C. Speedm Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico: GSA Special Paper 278, 153, 1993.

SGM, 1998. Carta Geológico Minera San Joaquín, Clave F14- C58. Servicio Geológico Mexicano, Secretaría de Economía.

Segerstrom, K., 1961, Geology of the Bernal – Jalpan area, Queretaro State, México. U.S. Geol. Survey Bull., 1104 B, pp. 19 – 85.

Simons, Frank S. y Mapes, 1956. Geología y Yacimientos minerales del distrito minero de Zimapán, Hidalgo, México. Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Mineros.

Spry, Paul G., 1987. Economic Geology: Tables for the Determination of Common Opaque Minerals. The Economic Geology Publishing Company.

Wilson, B., et al, 1955. Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 18, pp. 1 – 10.

8. Micro-fotografías y tablas.

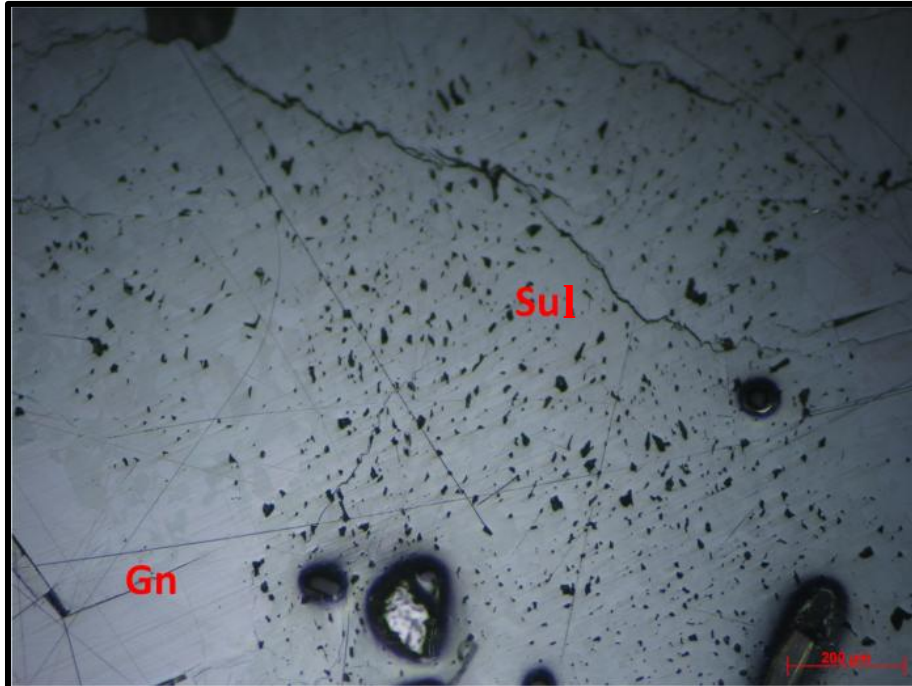


Foto-micrografía 1. Campo de la muestra esp-zim13.océano de galena (gn) con reemplazamiento de sulfosales (sul) en forma de islas. Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.

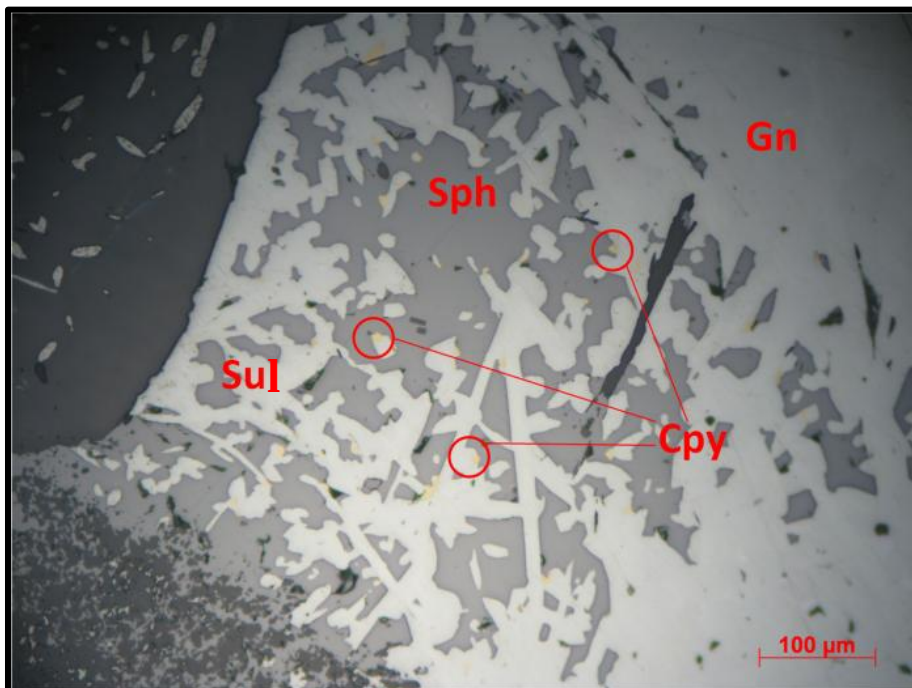


Foto-micrografía 2. Campo de la muestra ESP-ZIM-07. Islas de galena (Gn) en contacto con esfalerita (Sph) con cristales de calcopirita (Cpy) y reemplazamiento de sulfosales (Sul). Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.

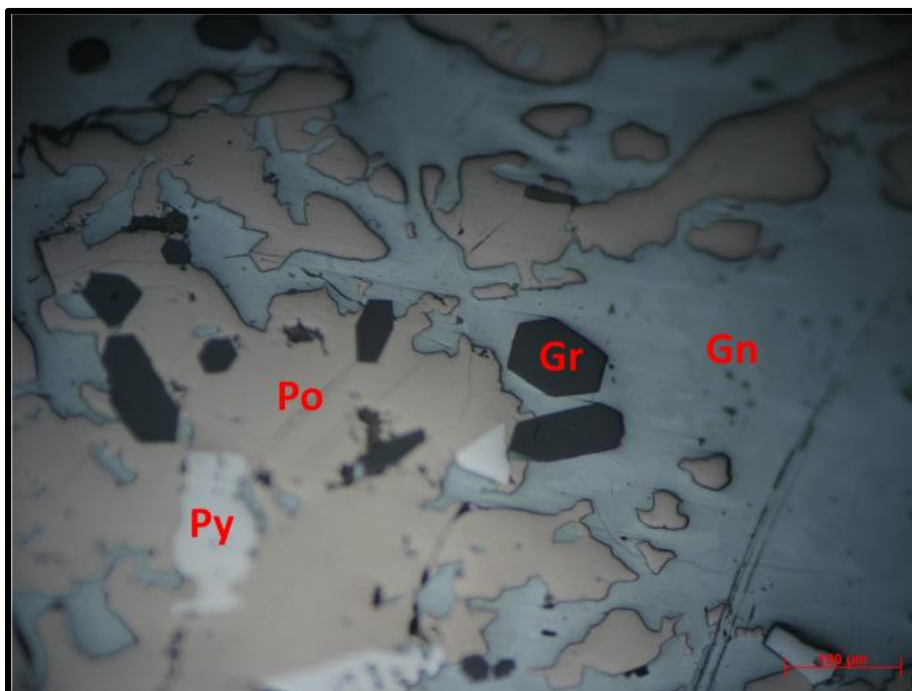


Foto-micrografía 3. Campo de la muestra ESP-ZIM13. Islas y continentes de pirrotita, inclusiones de granate (Gr) y pirita (Py). Contactos con galena (Gn) en forma de golfos y penínsulas. Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.

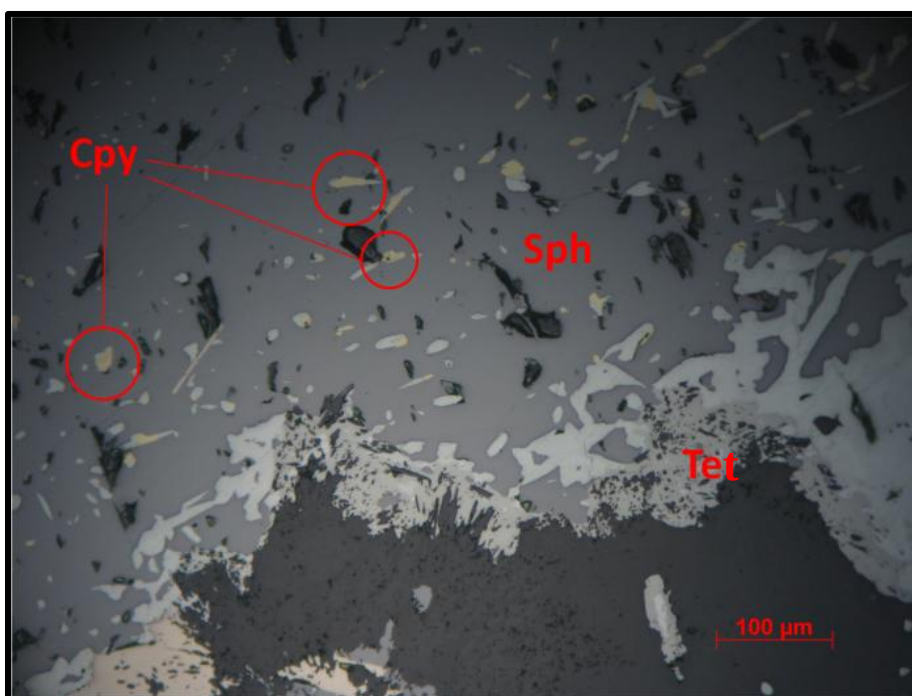


Foto-micrografía 4. Campo de la muestra ESP-ZIM-07. Oceano de esfalerita (Sph) con cristales de calcopirita (Cpy) y de sulfosales (Sul), en sus bordes se observa cristal de tetraedrita (Tet). Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.

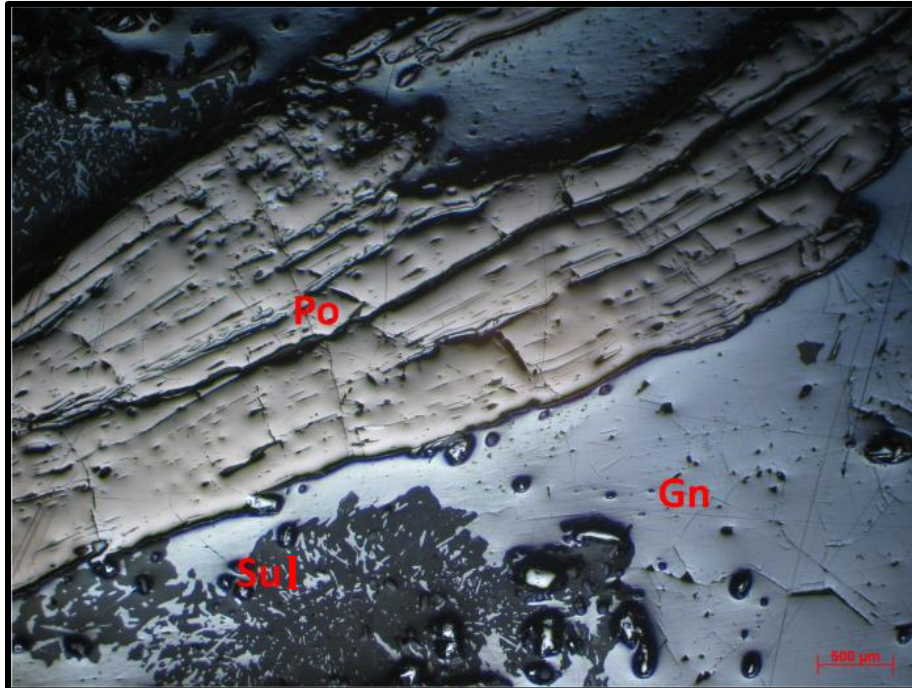


Foto-micrografía 5. Campo de la Muestra ESP-ZIM13. Se observa franja de pirrotita (Po) en contacto con galena (Gn), reemplazadas por minerales transparentes con inclusiones de sulfosales (Sul). Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.

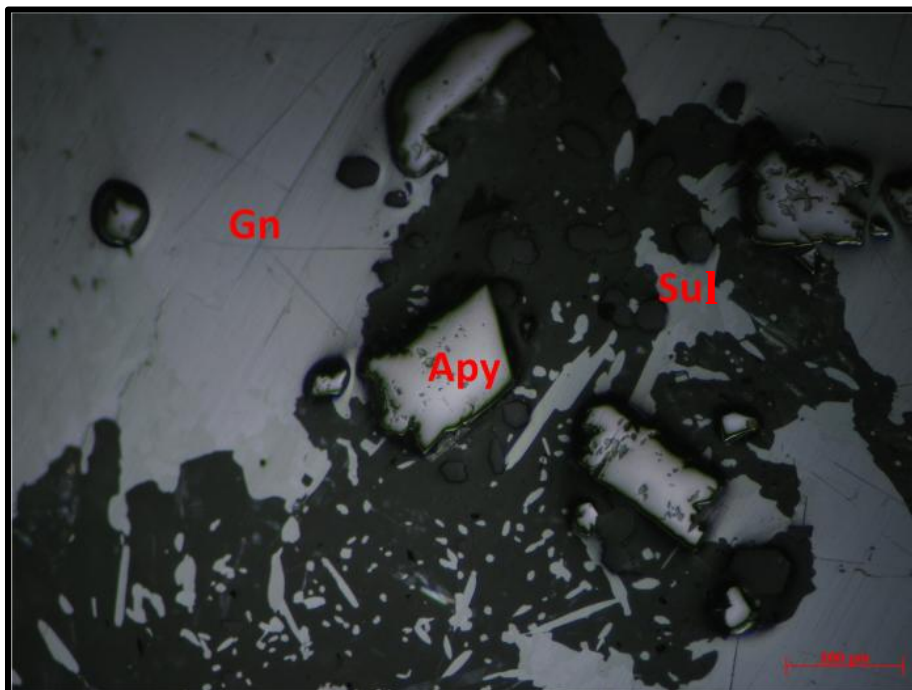


Foto-micrografía 6. Campo de la muestra ESP-ZIM13. Se observa un cristal de arsonopirita (Apy) al centro de la imagen junto con ella sulfosales (Sul). A las orillas se puede observar continentes de galena (Gn). Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.

Tabla 1. Descripción de muestras de mano.

Nivel	No. De muestras	Numeración	Material para lamina	Minerales observables en muestra de mano	Descripción
+60	3	01, 02, 03	Sí	Pirita, galena, esfalerita, alteraciones y óxidos	Los colores que presentan las muestras son tonos rojos-anaranjados, oscuros y claros. Los óxidos, están por encima de la esfalerita y de la galena
0	6	04, 05, 06, 07, 08, 09	Sí	Pirita, esfalerita, alteraciones, óxidos y cuarzo	Los colores que presentan las muestras son grises, amarillos, blanco y tonos rojos. Algunas muestras presentan fragmentos de caliza, la cual es de grano fino, en donde las cavidades presentes se rellenaron con calcita. El cuarzo presente es de aspecto botroidal.
-90	3	10, 11, 12	No	Alteraciones, silicatos, calcita	Los colores que presentan las muestras son tonos anaranjados, grises y blancos. En las muestras se puede observar caliza de grano fino y relleno de cavidades con calcita.
-120	3	13, 14, 15	No	Calcita, Sulfosales, esfalerita, óxidos	Los colores que presentan las muestras son tonos de grises, tonos rojos y anranjados y blanco. Se puede apreciar a la calcita y dentro de ella, como se fueron formando los sulfuros.
-130	2	16, 17	Sí	Cuarzo, pirita, calcita, esfalerita	Los colores que presentan las muestras son amarillos, grises y blanco. Se puede observar que dentro de la calcita se fueron formando sulfuros y lo que aparentemente son inclusiones.
-140	9	18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25. 50	Sí	Esfalerita, óxidos, pirrotita	Los colores que presentan las muestras son amarillos, algunos tonos azules y gris oscuro. Se puede observar que los fluidos que dieron origen a los sulfuros fueron interactuando entre ellos.
-150	2	26, 27	Sí *	Fluorita, galena, esfalerita, pirrotita, pirita	Los colores que presentan las muestras son grises claros, amarillos y blanco. Se pueden apreciar los planos de los cristales de la galena, los sulfuros de color amarillo podrían estar

-170	1	51	Sí	Sulfosales, esfalerita	por encima de ella. Los colores que presentan las muestras son grises- Se pueden apreciar las sulfosales en interacción con la esfalerita. Las sulfosales se encuentran de forma masiva.
-190	3	28, 29, 52	Sí	Galena, esfalerita, silicatos, pirrotita, sulfosales	Los colores que presentan las muestras son grises (claros y oscuros), amarillo y blanco. Se pueden observar los cristales de galena bien formados, la calcita presenta dentro de ella algunas inclusiones de agujas de sulfosales, la pirrotita se puede observar que sigue el patrón del fluido mineralizante y las sulfosales de forma masiva.
-200	2	30, 31	No	Óxidos, pirrotita, esfalerita, galena	Los colores que presentan las muestras son tonos rojos y anaranjados, amarillo, tonos de gris(oscuros y claros). Se pueden observar en interacción a la esfalerita, galena, pirrotita y muy escasa pirita. Todos los sulfuros de forma masiva y sobre ellos los óxidos.
-220	2	32, 33	No	Sulfosales, esfalerita, galena, pirita, pirrotita	Los colores que presentan las muestras son tonos grises (oscuros y claros) y tonos amarillos. Se observa a la pirrotita siguiendo un patrón de relleno de cavidades por la forma de hilos que tiene y que se encuentra por encima de la galena y la esfalerita. Por otra parte las sulfosales se aprecian de forma masiva y sobre yaciendo todo, se encuentran los óxidos.
-230	6	34, 35, 36, 37, 38, 39	No	Sulfosales, esfalerita, cuarzo, pirrotita,	Los colores que presentan las muestras son tonos de gris (claro y oscuro), amarillo. Los fragmentos de caliza (oscura de grano fino), en la parte que estaba en contacto con vetillas, tiene una especie de recubrimiento de óxidos sobre la clacita que las rellenó. Por otra parte las sulfosales presentes tienen apariencia fibrosa pero se encuentran en forma masiva. La pirrotita se encuentra siguiendo los patrones del fluido mineralizante.

-240	3	40, 41, 42, 53 (cuerpo A), 54 (cuerpo B)	Sí	Pirita, sulfosales, silicatos	Los colores que presentan las muestras son grises (claros y oscuros), amarillos y blanco. Se puede apreciar un hábito, acicular y granular de lo que aparentemente son sulfosales, estas podrían estar remplazando a los sulfuros presentes, ya que adoptan formas de ellos y también se forman en cavidades presentes.
-250	5	43, 44, 45, 46, 47	No	Esfalerita, galena, sulfosales, pirrotita, pirita	Los colores que presentan las muestras son grises (oscuros y claros) y amarillo. Se pueden observar que en mayor proporción se encuentran la esfalerita y la galena, entre ellas se encuentra la pirrotita. La presencia de óxidos y de caliza con inclusiones de agujas de sulfosales, también es notoria.
Barreno más largo	2	55, 56	Sí*	Galena, esfalerita, sulfosales, calcita	Los colores que presentan las muestras son grises (oscuros y claros), amarillos y blanco. Se puede apreciar la disposición de los sulfuros unos en contacto de otros. Posiblemente debido a la interacción de los fluidos mineralizantes.

Tabla 2. Claves de minerales

Mineral	Clave
Arsenopirita	Apy
Boulangerita	Bou
Calcopirita	Cpy
Esfalerita	Sph
Galena	Gn
Granate	Gr
Jamesonita	Jam
Pirita	Py
Pirrotita	Po
Sulfosales	Sul
Tetraedrita	Tet

Tabla 3. Claves de las muestras y nivel procedente

Nivel	Clave de la muestra
+60	ESP-ZIM-01
0	ESP-ZIM-02
-90	-
-120	-
-130	ESP-ZIM-03
-140	ESP-ZIM-04, ESP-ZIM-05
-150	ESP-ZIM-06
-170	-
-190	ESP-ZIM-07
-200	-
-210	-
-220	-
-230	-
-240	ESP-ZIM-08, ESP-ZIM-09. ESP-ZIM-10, ESP-ZIM-11, ESP-ZIM-12, ESP-ZIM-13

Tabla 4. Descripciones mineragráficas

Muestra	Nivel	Mineral	Color	Forma	Pulido y dureza	Pleocroísmo	Anisotropía	Reflexiones internas	Asociaciones minerales
ESP-ZIM-13	240 cuerpo A	Galena	Gris brillante	Euhedral, cúbica	Pulido medio, se alcanzan a observar las líneas de este.	No	No	No	Se presenta en la mayor parte de la superficie de la muestra, por lo cual dentro de ella se alcanzan a observar sustituciones de sulfosales, las cuales son de un tono de gris más oscuro (boulangerita y jamesonita).
ESP-ZIM-07	-190	Esfalerita	Gris oscuro	Anhedral	Pulido malo, en algunas zonas se observa de forma irregular y con relieve.	No	No	Sí, pocas	Se encuentra de forma masiva sobre la lámina, dentro de esta se puede llegar a apreciar “enfermedad de la esfalerita” en donde se pueden observar cristales de calcopirita. Los cuales
ESP-ZIM-13	240 cuerpo A	Pirrotita	Amarillo opaco	Anhedral tabular, franjas	Pulido malo, presenta mucho relieve	Sí, muy débil	Sí	No	Se encuentra en forma de franjas atravesando la superficie, aparentemente cortando a otros minerales como la galena y esto se deba a fluidos posteriores los cuales reemplazan a los minerales existentes.
ESP-ZIM-13	240 cuerpo A	Pirita	Amarillo claro	Euhedral-subhedral, cúbica	Bueno, se pueden observar los cristales sin relieve	No	No	No	Se observó muy poca pirita en las muestras, pero en donde se pudo apreciar, esta se encontraba en contacto por la pirrotita.
ESP-ZIM-07	-190	Calcopirita	Amarillo-anaranjado	Anhedral	Medio, no se observaron marcas de relieve, pero si algunas del pulido	Sí, débil	Sí, muy débil	No	Esta se encontró principalmente como reemplazamientos sobre la esfalerita, cristales esparcidos sobre esta sin seguir un patrón aparente.
ESP-ZIM-13	240 cuerpo A	Arsenopirita	Gris, tonos verdes-amarillos	Euhedral, rombos	Medio, se observan marcas de relieve	Sí, débil	Sí, fuerte	No	Se encuentra esparcida sobre las muestras, cristales bien desarrollados en algunos casos sus bordes son corroídos como parte de la interacción con otros sulfuros como la galena.
ESP-ZIM-13	240 cuerpo A	Sulfosales	Diferentes tonos de grises	Anhedral	Medio, se observan muestras del pulido	Sí	Sí	Sí	Se encuentran reemplazando a minerales como la galena y esfalerita, en el caso de la galena se encuentran sobre su superficie con

									un color más oscuro que ésta. En la esfalerita, se encuentra de forma esparcida, como si fueran gotas. Es muy peculiar el cambio de tonalidad de los grises entre la galena y la esfalerita.
ESP-ZIM-12	240	Pirrotita	Amarillo opaco	Tabular, franjas	Medio, se observa relieve	Sí, muy bajo	Sí	No	Se observa una franja que cruza la superficie, que corta a otros minerales. Esta franja presenta relieve lo cual indica que el pulido es de medio a malo.
ESP-ZIM-12	240	Sulfosales	Diferentes tipos de grises	Anhedral	Medio, se puede observar pulido en algunas muestras	Sí	Sí	Sí	Se observan como reemplazamientos sobre algunos minerales, como la galena, en donde está de forma esparcida.
ESP-ZIM-01	+60	Esfalerita	Gris oscuro	Anhedral	El pulido es malo, se puede observar demasiado relieve en la muestra	No	No	Sí, pocas	Se observa demasiado relieve sobre la muestra. El color es uniforme en donde se encuentra el mineral y se aprecian algunas oquedades y zonas más oscuras con formas definidas.
ESP-ZIM-01	+60	Arsenopirita	Gris	Euhedral, rombos	Pulido medio	Sí	Sí, fuerte	No	Se pueden observar formas definidas de la apy, en algunos bordes se puede observar corrosión por parte de otros minerales.
ESP-ZIM-02	0	Arsenopirita	Gris y tonos verdes	Euhedral, rombos	Malo	Sí	Sí, fuerte	No	Se observan los cristales del mineral con sus bordes corroídos, el mineral presenta formas de rombos.
ESP-ZIM-02	0	Galena	Gris brillante	Euhedral, cúbica	Medio, se observan algunas líneas de éste.	No	No	No	Se puede apreciar en forma masiva y las oquedades que se forman en donde ya no hay mineral, sirven como característica específica para identificarlo.
ESP-ZIM-02	0	Sulfosales	Diferentes tipos de grises	Anhedral	Medio, se alcanzan a ver marcas del pulido	Sí	Sí	Sí	Se observan dentro de la galena como reemplazamientos. Están esparcidas sobre ella.
ESP-ZIM-03	-130	Esfalerita	Gris oscuro	Anhedral	Pulido malo, se observa relieve	No	No	Sí, pocas	Se observa en forma masiva y con relieve. No muestra inclusiones de otro mineral.
ESP-ZIM-03	-130	Galena	Gris brillante	Euhedral, cubica	Medio, en algunas zonas se puede	No	No	No	Se observa en forma masiva y se pueden apreciar las formas de los huecos que la hacen fácilmente de

					observar el sentido del pulido					distinguir.
ESP-ZIM-03	-130	Tetraedrita (?)	Gris opaco	Anhedral	Malo	No	No	No se distinguieron		Posible tetraedrita, se encuentra dentro de la galena mostrando un color gris más oscuro
ESP-ZIM-04	-140	Esfalerita	Gris oscuro	Anhedral	Malo, se observa demasiado relieve	No	No	Sí, pocas		Se observa el mineral con demasiado relieve, dentro se pueden distinguir algunos remanentes de galena y algunos grises que no se pudieron identificar por su tamaño tan pequeño.
ESP-ZIM-04	-140	Galena	Gris brillante	Euhedral, cubica.	Medio, se observan alguna líneas del pulido	No	No	No		Los triángulos que forman las oquedades son demasiado evidentes, lo cual ayuda a la identificación del mineral
ESP-ZIM-04	-140	Pirrotita	Amarillo opaco	Tabular, franjas	Medio, se puede observar relieve	Sí, bajo	Sí	No		Se observan franjas del mineral atravesando la superficie, está en contacto con la galena aparentemente sobre ella.
ESP-ZIM-06	-150	Pirrotita	Amarillo opaco	Tabular, franjas	Medio	Sí, muy bajo	Sí	No		Se puede observar el relieve, debido al pulido que presenta, el mineral se presenta como franjas a lo largo de la superficie.
ESP-ZIM-06	-150	Esfalerita	Gris oscuro	Anhedral	Malo, puede observarse demasiado relieve en la muestra	No	No	Sí		Puede observarse demasiado relieve en el mineral, presenta algunas inclusiones de galena.
ESP-ZIM-06	-150	Galena	Gris brillante	Euhedral, cubica	Medio, se puede observar la dirección de pulido	No	No	No		El color brillante y las formas que quedan en las oquedades donde el mineral ya no está presenta, facilitan la identificación del mineral. La presencia de sulfosales sobre la galena, hace pensar en un reemplazamiento de ésta.
ESP-ZIM-08	-240	Pirita	Amarillo	Euhedral, cubica	Bueno	No	No	No		Se pueden observar las formas de los cubos del mineral, en tamaños muy pequeños.
ESP-ZIM-08	-240	Galena	Gris brillante	Euhedral, cúbica	bueno	No	No	No		Se pueden observar muy bien los cruceros de los cristales y algunas sulfosales dentro de ella.

Tabla 5. Análisis cuantitativos de microsonda usados para el cálculo de las formulas de los minerales

Sb	Si	Pb	Al	Cd	Mn	As	Ag	Fe	B i	Cu	S	Zn	Tl	Total	Formula	Nombre del mineral
0.322	0	88.006	0.006	0	0	0	0.223	0.024	0	0	11.579	0	0.021	100.18 1	PbS	galena
0.028	0	0	0.004	0.531	0.228	0	0	12.905	0	0.013	30.93	50.722	0	95.361	ZnS	esfalerita
0.024	0	0	0.004	0	0	0.073	0	62.443	0	0	35.843	0	0.073	98.46	Fe _{1-x} S _x = 0 - 0,2	pirrotita
0.376	0.012	0.023	0.000	0.017	0.000	45.69	0.077	33.712	0	0.000	19.080	0.028	0.395	99.410	FeAsS	arsenopirita
0	0.008	0	0.007	0	0	0.623	0.066	48.736	0	0.005	49.694	0	0	99.139	FeS ₂	pirita
27.173	0	0	0	0	0.014	0.53	15.534	6.798	0	23.92	21.608	0.072	0	95.649	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	tetraedrita
21.304	0	23.762	0.014	0	0.032	0.119	12.52	4.638	0	16.20	18.17	1.811	0.114	98.691		mineral no identificado
25.599	0	57.515	0	0	0	0	0	0.123	0	0.417	16.831	0	0.409	100.89 4	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁	boulangerita
35.018	0	41.987	0.004	0	0	0.185	0	2.853	0	0	19.868	0	0.134	100.07 8	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄	jamesonita

Tabla 6. Resultados de análisis cuantitativos obtenidos con Microsonda Electrónica

Sb	Si	Pb	Al	Cd	Mn	As	Ag	Fe	Bi	Cu	S	Zn	Tl	Total	Muestra	Mineral
0.202	0	88.577	0	0	0	0	0.008	0.262	0	0.485	11.808	0.012	0.261	101.615	ESP-ZIM-04	galena
0.322	0	88.006	0.006	0	0	0	0.223	0.024	0	0	11.579	0	0.021	100.181	ESP-ZIM-06	galena
0.24	0	87.648	0	0	0	0	0	0.03	0	0	11.419	0	0	99.337	ESP-ZIM-06	galena
0.788	0	86.016	0.003	0	0	0	0.229	0.108	0	0	11.883	0.595	0.28	99.902	ESP-ZIM-03	galena
0.288	0	87.454	0.01	0	0.012	0	0.034	0.04	0	0.034	11.704	0.366	0.01	99.952	ESP-ZIM-03	galena
0.028	0	0	0.004	0.531	0.228	0	0	12.905	0	0.013	30.93	50.722	0	95.361	ESP-ZIM-03	esfalerita
0.034	0	0	0.005	0.435	0.226	0	0	13.192	0	0	30.862	50.791	0	95.545	ESP-ZIM-03	esfalerita
0.024	0	0	0.004	0	0	0.073	0	62.443	0	0	35.843	0	0.073	98.46	ESP-ZIM-05	pirrotita
0	0	0	0.005	0	0	0.007	0	62.164	0.093	0.015	36.15	0.006	0.173	98.613	ESP-ZIM-05	pirrotita
0.021	0.001	0.046	0	0	0	0.013	0.05	62.936	0	0	36.567	0.007	0.109	99.75	ESP-ZIM-06	pirrotita
0.353	0.005	0	0.004	0	0.003	42.262	0	37.268	0	0.015	19.545	0	0.284	99.739	ESP-ZIM-08	arsenopirita
0.541	0	0.018	0	0	0	42.223	0.122	36.854	0.014	0.044	19.141	0.014	0.022	98.993	ESP-ZIM-08	arsenopirita
0.996	0	0	0	0	0	42.498	0.114	36.837	0	0	19.001	0.014	0.097	99.557	ESP-ZIM-08	Arsenopirita
0.376	0.012	0.023	0.000	0.017	0.000	45.690	0.077	33.712	0.000	0.000	19.080	0.028	0.395	99.410	ESP-ZIM-12	Arsenopirita
0	0.008	0	0.007	0	0	0.623	0.066	48.736	0	0.005	49.694	0	0	99.139	ESP-ZIM-08	Pirita
0	0	0	0.023	0	0.006	0.812	0	47.827	0	0.019	50.221	0.013	0.008	98.929	ESP-ZIM-08	Pirita
26.808	0	0	0	0	0	0.556	17.029	6.628	0	22.014	20.969	0.029	0.127	94.16	ESP-ZIM-04	Tetraedrita
26.824	0	0	0	0	0	0.581	16.201	6.965	0	23.143	21.052	0.032	0.203	95.001	ESP-ZIM-04	Tetraedrita
27.173	0	0	0	0	0.014	0.53	15.534	6.798	0	23.92	21.608	0.072	0	95.649	ESP-ZIM-04	Tetraedrita
21.304	0	23.762	0.014	0	0.032	0.119	12.52	4.638	0	16.207	18.17	1.811	0.114	98.691	ESP-ZIM-03	mineral no identificado
24.608	0	12.338	0.011	0	0.018	0.392	13.743	5.674	0	20.409	20.28	1.962	0	99.435	ESP-ZIM-03	mineral no identificado
26.612	0.067	0.009	0	0.068	0.019	0.581	29.864	5.802	0	13.859	20.162	0.045	0.048	97.136	ESP-ZIM-13	Freibergita
26.131	0.004	0.105	0.000	0.019	0.000	0.571	26.277	5.339	0.000	15.502	20.207	0.069	0.223	94.447	ESP-ZIM-13	Freibergita
25.599	0	57.515	0	0	0	0	0	0.123	0	0.417	16.831	0	0.409	100.894	ESP-ZIM-04	Boulangerita
25.2	0	57.299	0.028	0	0.03	0	0	1.617	0	0	16.916	0.026	0.014	101.13	ESP-ZIM-04	Boulangerita
25.222	0	57.641	0	0	0	0	0	0	0	0.032	16.69	0	0.092	99.677	ESP-ZIM-06	Boulangerita

25.411	0	57.035	0	0	0	0	0	0.011	0	0.015	16.724	0.004	0.05	99.25	ESP-ZIM-06	Boulangerrita
25.294	0	57.839	0	0	0	0	0.057	0.05	0	0.027	16.832	0	0.284	100.383	ESP-ZIM-06	boulangerrita
25.316	0	57.694	0.002	0	0.041	0	0	0	0	0	16.749	0	0.137	99.939	ESP-ZIM-06	boulangerrita
25.057	0	57.513	0	0	0	0	0	0.013	0	0.011	16.742	0	0	99.336	ESP-ZIM-06	boulangerrita
24.824	0	57.442	0.005	0	0.013	0	0	0.032	0	0	16.535	0.055	0.056	98.962	ESP-ZIM-06	boulangerrita
24.670	0.000	55.513	0.000	0.070	0.027	0.000	0.025	0.019	0.000	0.000	17.247	0.000	0.099	97.670	ESP-ZIM-12	boulangerrita
24.626	0.000	55.719	0.003	0.048	0.000	0.000	0.125	0.045	0.000	0.000	17.117	0.000	0.129	97.812	ESP-ZIM-12	boulangerrita
24.475	0.000	55.655	0.012	0.056	0.010	0.000	0.006	0.057	0.000	0.006	17.138	0.000	0.249	97.664	ESP-ZIM-12	boulangerrita
24.415	0.000	55.784	0.005	0.050	0.044	0.000	0.000	0.047	0.000	0.003	16.930	0.000	0.187	97.465	ESP-ZIM-12	boulangerrita
24.525	0.030	55.346	0.007	0.098	0.000	0.071	0.002	0.019	0.000	0.008	17.039	0.000	0.000	97.151	ESP-ZIM-12	boulangerrita
24.825	0.000	55.336	0.000	0.100	0.000	0.049	0.054	0.031	0.000	0.020	17.273	0.000	0.030	97.718	ESP-ZIM-12	boulangerrita
34.696	0	41.464	0	0	0.007	0.23	0	2.976	0	0.039	19.776	0	0.014	99.202	ESP-ZIM-08	jamesonita
34.433	0	41.358	0	0	0.027	0.225	0	2.859	0	0.019	19.549	0	0.189	98.659	ESP-ZIM-08	jamesonita
34.161	0	41.408	0.003	0	0.031	0.167	0	2.791	0	0	19.1	0.005	0.226	97.892	ESP-ZIM-08	jamesonita
34.594	0	41.973	0.035	0	0.04	0.16	0.048	3.012	0	0.015	19.625	0.011	0.191	99.704	ESP-ZIM-08	jamesonita
34.219	0	41.016	0.011	0	0.025	0.231	0	2.791	0	0	19.202	0	0.192	97.687	ESP-ZIM-08	jamesonita
35.018	0	41.987	0.004	0	0.029	0.185	0	2.853	0	0	19.868	0	0.134	100.078	ESP-ZIM-08	jamesonita
33.795	0.000	40.494	0.000	0.030	0.019	0.194	0.000	2.664	0.000	0.017	20.077	0.000	0.063	97.353	ESP-ZIM-12	jamesonita
33.897	0.000	40.635	0.007	0.011	0.040	0.249	0.000	2.566	0.000	0.003	19.811	0.000	0.254	97.473	ESP-ZIM-12	jamesonita
33.993	0.000	40.765	0.000	0.046	0.030	0.312	0.000	2.602	0.000	0.000	19.983	0.000	0.068	97.799	ESP-ZIM-12	jamesonita
33.917	0.000	40.806	0.003	0.063	0.035	0.352	0.000	2.499	0.000	0.000	20.124	0.000	0.141	97.940	ESP-ZIM-12	jamesonita
33.775	0.000	40.858	0.010	0.057	0.000	0.342	0.075	2.495	0.000	0.033	19.872	0.000	0.184	97.701	ESP-ZIM-12	jamesonita

Índice de Figuras

Figura 1. Plano de ubicación del Cerro de Los Lirios al NW del Poblado de Zimapán. Allí se encuentra la mina El Espíritu, se observa como el Río Moctezuma sirve como límite estatal entre el Estado de Hidalgo y el Estado de Querétaro.	9
Figura 2. Mapa de localización del Distrito Minero Zimapán dentro de la República Mexicana (Modificado de García y Querol, 1991).	12
Figura 3. En la figura se puede observar la falla el Malacate descrita por Sánchez Loyo (2012) y el anticlinal de Verdosas descrito por García y Querol 1985. Modificada de carta geológico-minera San Joaquín (SGM,).....	20
Figura 4. Modificada de Sánchez Loyo, 2012.	22
Figura 5. Modelo esquemático de un yacimiento de tipo Skarn (Modificado de Sawkins, 1990).....	25
Figura 6. Terreno tectonoestratigráfico Sierra Madre Oriental dentro del cual se encuentra el Distrito Minero de Zimapán (Modificado de Campa y Coney, 1984).	26
Figura 7. Franja de mantos, chimeneas y vetas de Zn-Pb-Ag-Cu (Modificado de SE-SGM, 2010) ...	27
Figura 8. Croquis en donde se puede observar los niveles que fueron muestreados.....	30
Figura 9. Sulfuros y sulfosales en forma masiva	34
Figura 10. Muestra de mano de galena.	35
Figura 11. Cristales de piritita y de calcita, formados en oquedades.	35
Figura 12. Parche de fluorita en el nivel -150	36
Figura 13. composicional (BEI: Backscattered electron image) en donde se pueden observar los contactos entre tetraedrita (Tet), galena (Gn) y esfalerita (Sph).	46
Figura 14. . Imagen composicional (BEI) en donde se aprecian las sulfosales en la orilla de un mar de galena (Gn) en contacto con sulfosales (Sul), en donde hay inclusiones en forma de islas de esfalerita (Sph) y tetraedrita (Tet).	46
Figura 15. Espectros de energía dispersada de Rayos X de las fases minerales analizadas, se obtuvieron resultados químicos elementales semicuantitativos, en donde se puede apreciar la diferencia en la composición de dichas fases.....	47
Figura 16. Mapeo de distribución elemental de Arsénico, aquí se puede distinguir fácilmente a la arsenopiritita (Apy), ya que son cristales euhedrales y subhedrales de buen tamaño.	48
Figura 17. Mapeo de distribución elemental de Plomo, se pueden apreciar los minerales constituidos por este elemento, en donde las zonas de mayor concentración presentan un color verde lo cual indica que su composición corresponde a galena (Gn), el color azul indica menor cantidad de éste y la presencia de sulfosales la cual se identificó como boulangerita (Bou)	48

Figura 18. Mapeo de distribución elemental de Zinc, aquí es demasiado evidente que el Zn se encuentra solamente en un mineral, en este caso es esfalerita y se puede observar que la concentración de este elemento es alta..... 48

Figura 19. Mapeo de distribución elemental de Antimonio, se observa que la concentración de este elemento corresponde con la sulfosal de plomo y complementa la composición de la boulangerita. . 48

Figura 20. Mapeo de distribución elemental de Fe, se distinguen tres concentraciones de interés, del lado izquierdo, una franja de color amarillo que indica mayor cantidad de este elemento, se clasificó como pirrotita (Po), el tono verde concuerda con el mapeo de As y complementa la química de la arsenopirita y por último el color azul, que es la menor concentración y está dentro de la esfalerita, la presencia de Fe en la composición de la esfalerita, indica una variedad de ésta y es catalogada como esfalerita ferriera o marmatita (Moreno – Tellez, 2012). 49

Figura 21. Mapeo de distribución elemental de cobre, la presencia de este elemento se puede observar únicamente sobre la esfalerita, con concentraciones pequeñas que coincide con lo que hemos mencionado como enfermedad de la esfalerita, que son reemplazamientos de calcopirita. ... 49

Figura 22. . Imagen (BEI) de la muestra ESP-ZIM-12 tomada con microsonda electrónica de barrido. En la imagen se puede apreciar que las sulfosales se formaron sobre la esfalerita. 50

Figura 23. Mapeo de distribución elemental de plomo, se puede apreciar tres diferentes concentraciones, las que son en color verde, que indican mayor concentración de este elemento, son remanentes de galena reemplazada por las sulfosales de Pb, y los tonos azules que son las sulfosales, el más claro se clasificó como boulangerita y el más oscuro como jamesonita. 51

Figura 24. Mapeo de distribución elemental de antimonio, este mapeo sirvió para diferenciar las dos sulfosales, siendo el color azul claro la que se clasifico como jamesonita al contener mayor cantidad de éste elemento y el color azul oscuro como boulangerita, por tener menor concentración 51

Figura 25. Mapeo de distribución elemental de zinc, aquí se identifica fácilmente la esfalerita, sobre la cual están las sulfosales..... 51

Figura 26. Mapeo de distribución elemental de hierro, nuevamente aquí se puede observar que la esfalerita puede ser catalogada como marmatita o esfalerita ferriera. También se pueden observar algunos cristales de pirrotita, fácilmente identificables por ser las zonas con mayor concentración de este elemento. 51

Figura 27. Mapeo de distribución elemental de cobre, la distribución de este elemento sobre el mineral de zinc, denota la condición, que ya se ha mencionado, llamada enfermedad de la esfalerita. 52

Figura 28. Mapeo de distribución elemental de plata, este elemento se encuentra en cantidades muy pequeñas y las zonas donde existe mayor concentración de este son difícilmente apreciables, por lo cual se necesitó de un análisis puntual de esas zonas para identificar plenamente el mineral. 52

Figura 29. Imagen (BEI) de la muestra ESP-ZIM-13 tomada con microsonda electrónica en donde se pueden apreciar los minerales contenidos en ella. En la imagen se puede observar un campo donde se distingue la forma de algunos cristales en los cuales se llevaron a cabo los análisis cuantitativos por WDS de éstos, para obtener los porcentajes en peso de los elementos que los componen..... 53

Índice de Foto-Micrografías

Foto-micrografía 1. Campo de la muestra esp-zim13.océano de galena (gn) con reemplazamiento de sulfosales (sul) en forma de islas. Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.	67
Foto-micrografía 2. Campo de la muestra ESP-ZIM-07. Islas de galena (Gn) en contacto con esfalerita (Sph) con cristales de calcopirita (Cpy) y reemplazamiento de sulfosales (Sul). Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.	67
Foto-micrografía 3. Campo de la muestra ESP-ZIM13. Islas y continentes de pirrotita, inclusiones de granate (Gr) y pirita (Py). Contactos con galena (Gn) en forma de golfos y penínsulas. Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.....	68
Foto-micrografía 4. Campo de la muestra ESP-ZIM-07.Oceano de esfalerita (Sph) con cristales de calcopirita (Cpy) y de sulfosales (Sul), en sus bordes se observa cristal de tetraedrita (Tet). Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.	68
Foto-micrografía 5. Campo de la Muestra ESP-ZIM13. Se observa franja de pirrotita (Po) en contacto con galena (Gn), reemplazadas por minerales transparentes con inclusiones de sulfosales (Sul). Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.....	69
Foto-micrografía 6. Campo de la muestra ESP-ZIM13.Se observa un cristal de arsonopirita (Apy) al centro de la imagen junto con ella sulfosales (Sul). A las orillas se puede observar continentes de galena (Gn). Tomada a microscopio mineragráfico con luz paralela.....	69

Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción de muestras de mano.	70
Tabla 2. Claves de minerales.....	73
Tabla 3. Claves de las muestras y nivel procedente	73
Tabla 4. Descripciones mineragráficas	74
Tabla 5. Análisis cuantitativos de microsonda usados para el cálculo de las formulas de los minerales	77
Tabla 6. Resultados de análisis cuantitativos obtenidos con Microsonda Electrónica	78