



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y CÁLCULO DE RESERVAS DEL CUERPO
MARAVILLAS NIVEL 2200-2300, DE LA MINA LA NEGRA, MACONÍ,
MUNICIPIO DE CADEREYTA, EDO. QUERÉTARO.

T E S I S

Presentada por:
Nancy Anahí Ibáñez Martínez

Para obtener el título de:
Ingeniera Geóloga

Director de tesis:
Alfredo Victoria Morales



México, D.F., 2014.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| Resumen..... | 1 |
| Capítulo 1. Introducción..... | 2 |
| 1.1 Localización del área de estudio..... | 2 |
| 1.2 Antecedentes históricos..... | 4 |
| 1.2 Objetivo..... | 5 |
| 1.3 Metodología del trabajo..... | 5 |
| Capítulo 2. Marco Geológico..... | 8 |
| 2.1 Fisiografía..... | 8 |
| 2.2 Geología regional..... | 10 |
| 2.3 Geología local..... | 11 |
| 2.4 Geología Estructural..... | 16 |
| Capítulo 3. Yacimiento Mineral..... | 27 |
| 3.1 Cuerpo Maravillas..... | 33 |
| 3.1.1 Roca Encajonante..... | 33 |
| 3.1.2 Mineralogía económica..... | 37 |
| 3.1.3 Minerales transparentes..... | 44 |
| 3.1.4 Descripción y clasificación de los diques en el cuerpo Maravillas..... | 49 |
| 3.1.5 Asociación mineralógica..... | 53 |
| Capítulo 4. Evaluación de reservas..... | 55 |
| 4.1 Reservas probadas..... | 63 |
| 4.2 Reservas probables..... | 64 |
| 4.3 Reservas inferidas..... | 65 |
| Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones..... | 69 |
| Referencias Consultadas..... | 72 |
| Anexos | |
| A. Análisis petrográficos..... | 74 |
| B. Análisis mineragráficos..... | 83 |
| C. Graficas de energía dispersiva de rayos X de minerales analizados..... | 91 |
| D. Difractogramas de difracción de rayos X de muestras de “pedernal”..... | 94 |

Resumen

Se realizó un estudio de caracterización mineralógica al cuerpo Maravillas, donde se identificaron algunos sulfuros como la galena, esfalerita, calcopirita, arsenopirita, pirrotita y piritita. Se realizó además la evaluación de reservas que presenta este cuerpo mineralizado.

El cuerpo mineral Maravillas se localiza en la mina La Negra en el nivel 2200 msnm, la cual está ubicada en la parte centro-oriental del territorio mexicano, al NE del estado de Querétaro, se localiza en la Cuenca de Flexión de Maconí, el cual está ubicado en el Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental.

El cuerpo mineral Maravillas está emplazado en una secuencia de calizas del Cretácico, que pertenece a Facies La Negra de la Formación El Doctor. Durante la Orogenia Laramide estas rocas fueron sometidas a intensos esfuerzos dando origen a una serie de plegamientos regionales y fueron intrusionadas por cuerpos de composición ácida a intermedia, los cuales ocasionaron una serie de yacimientos tipo skarn a los que pertenece la mina La Negra..

Hoy en día con uso de la técnica de barrenación a diamante se pudo establecer una continuidad de la mineralización económica del cuerpo Maravillas. La principal extracción del cuerpo son concentrados de Cu, Zn, Pb y un poco de Ag.

I. Introducción

La unidad minera La Negra se encuentra en el estado de Querétaro, en donde se explota como minerales principales plomo y zinc, y como minerales secundarios cobre y plata. En el interior de la mina del nivel 2200 a 2300 msnm se localiza el cuerpo Maravillas.

La unidad minera pertenece a la empresa Aurcana Corporation, que entró en operación en el año 2006 y sigue laborando a la fecha. La unidad minera La negra es un depósito de skarn de metales base.

1.1.- Localización del área de estudio

La Unidad Minera la Negra se encuentra localizada al nororiente del Estado de Querétaro en el municipio de Cadereyta, al noreste del pequeño pueblo llamado Maconí (Figura 1). Se encuentra cerca del límite con el estado de Hidalgo, dicho límite en esta parte es el Río Moctezuma.

El acceso a la mina es por vía terrestre, saliendo de la Cd. De México se toma la autopista No. 57 México-Querétaro, hasta el entronque con la carretera federal No. 120, se llega al poblado de Vizarrón de Montes donde se toma el entronque con la carretera La Culata-San Joaquín, tomando la desviación a Maconí y se recorren 20 km para llegar a este lugar. De aquí se continúa por un camino de terracería de 5 kilómetros hasta la Unidad Minera La Negra.

La unidad se localiza aproximadamente a 7 kilómetros del Distrito Minero de Zimapán, Hidalgo, sin embargo no existe una vía de comunicación directa entre estas dos unidades mineras, ya que el relieve es muy accidentado provocando una dificultad en el paso y por las profundas gargantas formadas por el Río Moctezuma. Estos distritos mineros forman junto con otros yacimientos más pequeños como Santo Entierro, una zona de yacimientos tipo skarn de plomo-zinc.

La unidad minera se encuentra a una altitud de 2000 metros sobre el nivel del mar y el poblado de Maconí a una elevación aproximado de 1900 metros sobre el nivel del mar.

El cuerpo Maravillas se localiza al NE aproximadamente a 600 m de la entrada principal de la mina La Negra, alojándose en los niveles 2200 a 2400 msnm, para tener accesibilidad al cuerpo estudiado se introduce por una rampa que se encuentra en el nivel 2200.



Figura 1. La unidad minera La Negra, se encuentra ubicada en la parte nororiental del estado de Querétaro, en la delegación de Maconí del municipio de Cadereyta, estado de Querétaro.

1.2.-Antecedentes Históricos

Durante la época prehispánica, en lo que ahora es el distrito minero de San Joaquín el mineral que fue explotado era cinabrio. Durante el periodo colonial, se llegó a explotar Pb-Ag de las menas de óxido de plomo y también en menor cantidad Au de vetillas y yacimientos de placer, en cantidades muy pobres de producción. Lo complejo de sus minerales debe haber impedido su explotación comercial a gran escala.

A finales de la década de 1870 un pequeño grupo de mineros explotó Pb – Ag, fue explotado a pequeña escala; posteriormente las propiedades de La Negra pasaron a poder del Cónsul General de Bélgica en México, el Sr. Víctor Beurang. A su muerte, su hijo las vendió a los Srs. Oscar y Tomás Braniff a principios de 1900; la compañía minera Braniff trabajó las minas y una fundición en el Doctor, solo por un tiempo, ya que tuvieron que parar las operaciones por el movimiento revolucionario.

En 1950, la Cía., Minera Acoma, S. A., adquirió las propiedades y realizó exploración con magnetómetro y perforación de diamante, con resultados desfavorables. Lo que trajo como consecuencia que el proyecto fuera abandonado por la propia compañía. No solo esta compañía no tuvo éxito sino después la empresa minera Asarco Mexicana hizo exploraciones sin tener éxito. Como consecuencia, abandonaron las propiedades, las cuales fueron adquiridas por los Srs. Eloy Vallina y Antonio Guerrero y posteriormente el Grupo Peñoles adquirió la propiedad.

El departamento de Exploraciones de Peñoles desarrollo un exhaustivo programa geológico de exploración y barrenación a diamante; obteniendo resultados favorables; así descubrieron los cuerpos La Negra y Alacrán, distantes 500 metros.

En el 2006 Aurcana Corporation adquirió la propiedad y dio inicio a la producción comercial. La compañía recientemente ha anunciado planes para aumentar la producción. Aurcana, ha concluido con la rehabilitación, expansión y pruebas preliminares de molienda. Los trabajos de rehabilitación incluyeron la instalación de componentes nuevos del molino, actualización en los circuitos de flotación y los tanques de espesamiento, así como la ampliación de todo el molino para mover 1000 a 1500 toneladas por día

Al iniciar producciones en el año 2006 la mina contaban con un tonelaje de 1,178,357 anuales y una ley de Ag (125 g/t), Pb (0.71 %), Zn (2.40 %) y Cu (0.68%). ,

1.3.-Objetivos

El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización mineralógica del cuerpo Maravillas en los niveles 2200 a 2300 a partir de estudios petrográficos y mineragráficos para identificar los minerales presentes y sus relaciones texturales, los cuales fueron solicitados por la empresa Aurcana Corporation, para:

- 1.- Proponer una paragénesis del cuerpo Maravillas.
- 2.- Clasificar muestras cuerpos ígneos que se presentan como diques en el cuerpo Maravilla.
- 3.- Realizar un cálculo de reservas del cuerpo Maravillas, a principios del año 2012, para determinar el margen de utilidad con el que cuenta dicho cuerpo.

1.4.- Metodología de trabajo

Para realizar la caracterización mineralógica de las fases asociadas en el cuerpo Maravillas se efectuó un muestreo en los niveles internos de la mina, aprovechando las rampas que alojan al cuerpo Maravillas, donde se tuvo acceso del nivel 2200 al 2300 msnm. Se realizaron muestreos a cada 50 metros con cuña y marro en las tablas del túnel. Obteniendo un total de 12 muestras.

Las muestras fueron analizadas utilizando algunas de las siguientes técnicas:

1. *Petrología luz transmitida (petrográfico).*
2. *Petrología luz reflejada (mineragráfico).*
3. *Microscopio electrónico de barrido (SEM).*
4. *Difracción de rayos X (DRX).*

A continuación se presenta una tabla donde se enlista las muestras estudiadas y el tipo de análisis que se les realizó.

| No. | Clave | Tipo de Roca | Nivel (m.s.n.m) | Lugar de Extracción | Técnicas Empleadas | | | |
|-----|---------------------|----------------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------|-----|-----|
| | | | | | Petrología | Mineragrafía | SEM | DRX |
| 1 | M - 1 | Skarn de granate | 2200 | Tabla izquierda | X | | | X |
| 2 | M - 2 | Muestra Mineralizada | 2200 | Tabla izquierda | | X | | |
| 3 | M - 3 | Dique Andesita | 2205 | Tabla izquierda | X | | | |
| 4 | M - 7 | Muestra Mineralizada | 2210 | Tabla izquierda | | X | | |
| 5 | M - 8 | Roca encajonante | 2215 | Tabla derecha | X | | | X |
| 6 | M - 13 | Skarn de granate | 2235 | Tabla izquierda | X | | | |
| 7 | M - 15 | Muestra Mineralizada | 2250 | Tabla izquierda | | X | | |
| 8 | M - 22 | Roca encajonante | 2300 | Tabla izquierda | X | | | |
| 9 | M - 26 | Muestra Mineralizada | 2330 | Tabla derecha | | X | | |
| 10 | Dique Maravillas | Dique Maravillas | Superficie | | X X | | | |
| 11 | Skarn de andradita | Skarn de andradita | 2265 | | | | X | |
| 12 | Skarn de grosularia | Skarn de grosularia | 2280 | | | | X | |

Los estudios petrográficos y minerográficos se realizaron en la Facultad de Ingeniería, utilizando un microscopio Carl Zeiss , este estudio consistió en la descripción de las secciones delgadas por contenido mineral y textural, clasificando a la muestra por su comparación visual y porcentaje.

Se realizaron estudios de microscopio electrónico de barrido (SEM), estos estudios se realizaron en el Instituto de Geología de la UNAM. Este equipo proporciona una gran resolución y profundidad de campo y permite observar el material a grandes aumentos por medio de electrones secundarios emitidos desde la muestra o muy cerca de la superficie.

Las condiciones con las que trabajo el equipo JEOL – 6300 fueron las siguientes:

- 15 kV
- Corriente de 20 nA
- Se emplearon electrones retrodispersados y electrones secundarios para la obtención de las diferentes imágenes, indicando composiciones elementales y relaciones texturales entre los minerales presentes.

También se realizaron dos estudios de Difracción de rayos X a muestras seleccionadas del material conocido localmente como pedernal, se llevó a cabo con las muestras molidas sin secar. El equipo empleado para el análisis es un difractor SIEMENS D-500.

Para llevar a cabo el cálculo de reservas se utilizó el método de polígonos, el cual permite saber el tiempo de vida que tiene el cuerpo mineral. La información que se usó para el cálculo de reservar, fue con información de la exploración que la empresa ya tenía.

2. Marco Geológico

2.1 Fisiografía

La zona en la que se realizó el estudio está ubicada en la parte centro-oriental del territorio Mexicano, en la Cuenca de Flexión de Maconí, la cual se encuentra en el Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental (Souza, 1987), donde se tiene un relieve topográfico mayor a los 2000 msnm.

Los principales rasgos fisiográficos de la zona de estudio son: la Sierra Gorda, El banco calcáreo el Doctor y el río Moctezuma (que es el límite geográfico entre los estados de Querétaro e Hidalgo).

El distrito minero de Maconí, pertenece a la provincia de la Sierra Madre Oriental, la cual está limitada por las siguientes provincias fisiográficas: al oeste por la Llanura Costera del Golfo Norte, al este por la Mesa del Central, al sur por la provincia Eje Neovolcánico, al norte-oeste por la provincia Grandes Llanuras de Norteamérica y al norte-este por Sierras y Llanuras del Norte (Figura 2).

Las características geomorfológicas de la provincia corresponden al tipo de montañas altas, en una etapa de ciclo erosivo parecido a la madurez, ocasionada por el río Moctezuma que es una corriente superpuesta.

Pertenece a la subprovincia fisiográfica Casco Huasteco (INEGI, 2010), es una sierra plegada la cual se caracteriza por presentar rasgos de un casco mayor en toda su extensión y un fuerte grado de disección por la acción de los ríos importantes que fluyen en ella. Esta sierra se interrumpe por la presencia del Eje Neovolcánico Transversal. Esta subprovincia es una de las regiones cárstica más extensa del país, la cual está constituida por calizas. (Figura 2).



Figura 2. Mapa Fisiográfico de la República Mexicana, con subprovincias del estado de Querétaro, modificado de Mapa Provincias Fisiográficas de INEGI.

2.2 Geología Regional

La Sierra Madre Oriental, consiste de rocas sedimentarias que datan desde el Jurásico al Cenozoico; la mayor parte está constituida por calizas plegadas en anticlinales y sinclinales, que forman comúnmente estructuras alargadas; también está constituida por lutitas, margas, calizas.

En el Jurásico Superior-Cretácico Inferior está constituida por sedimentos terrígenos y calcáreos provenientes de una línea de costa cercana, los cuales pertenecen a la Formación Las Trancas (Figura 3).

En el Cretácico Inferior se acumularon rocas calcáreas, tanto de plataforma como de cuenca, en la zona centro y NW del área predominaba un banco calcáreo, que dio lugar a la Formación El Doctor; en tanto en el norte se depositaba, en aguas profundas (Carrillo, 1989).

En el Cretácico Superior los sedimentos terrígenos de la Formación Soyatal-Mezcala indican la retirada de los mares hacia el Golfo de México, evento ocasionado por la Orogenia Laramide que plegó el paquete sedimentario, para formar la Sierra Madre Oriental, con ejes axiales de rumbo NW-SE, (Carrillo, 1989).

A finales del Cretácico Superior y principios del Paleógeno se inicia una etapa de tectonismo activo en el que se retiran los mares (regresión) y se generan esfuerzos compresionales que pliegan y deforman las rocas calcáreas (Orogenia Laramide), (Carrillo, 1989).

Las estructuras resultantes conforman una serie de anticlinales y sinclinales de flancos amplios, con echados suaves y ejes con una orientación predominante NW-SE, a su vez estas rocas fueron alteradas y cortadas por rocas intrusivas, quedando como testigos de los eventos tectónicos desde principios del Cenozoico (Carrillo, 1989).

Durante la Orogenia Laramide del Cretácico-Paleógeno se producen intrusiones dioríticas y granodiorítica acompañadas de vulcanismo incipiente, así como también se produce una serie de regresión que origina la formación de bolsones y a su vez sedimentación clástica continental como la Formación El Morro y posteriormente la formación del vulcanismo del

Eje Neovolcánico de composición riolítica, dacítica y andesítica que persisten hasta el Plioceno (Carrillo, 1989).

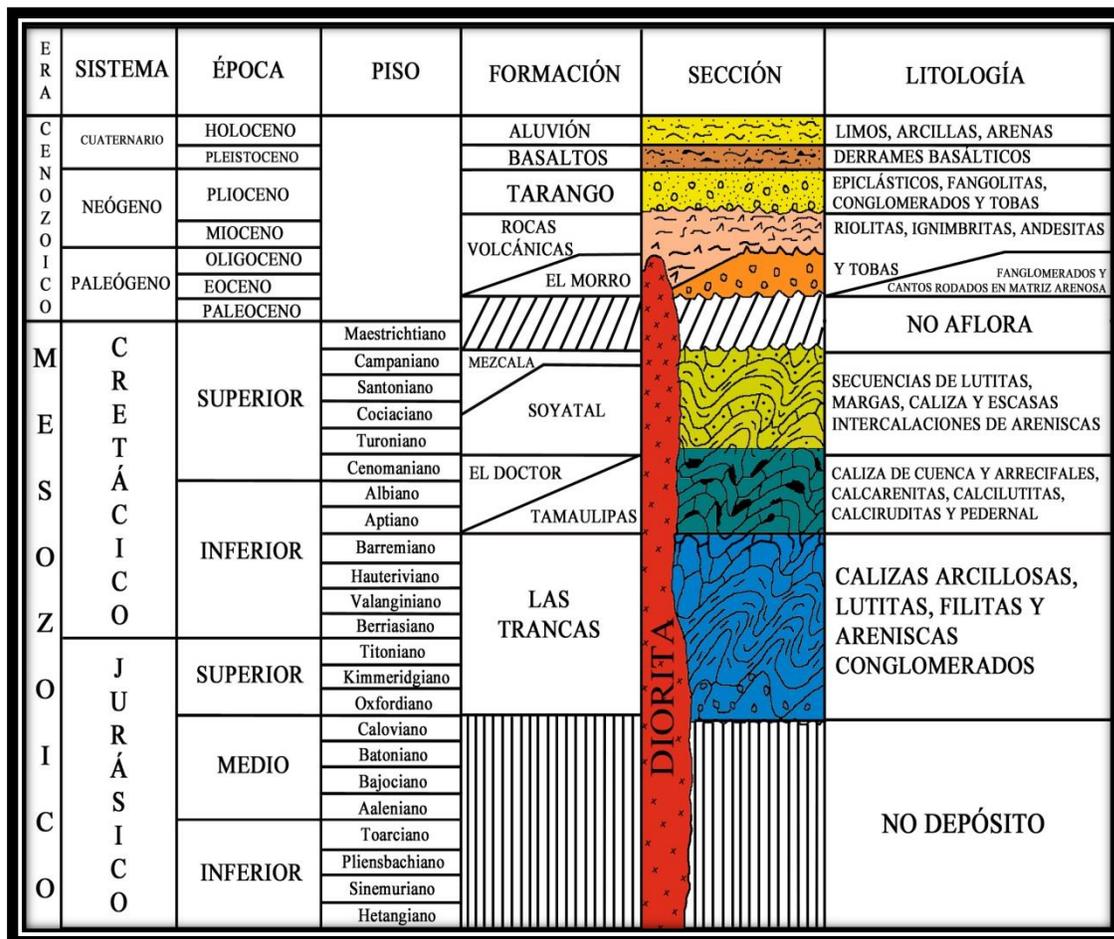


Figura 3. Estratigrafía regional del estado de Querétaro, Consejo de Recursos Minerales 1992.

2.3 Geología Local

Está representada por una secuencia de rocas sedimentarias del Mesozoico y rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario (Figura 4), a continuación se describen cada una de las unidades de roca que afloran en la zona de estudio, mencionando las características más relevantes de cada una de ellas, su relación estratigráfica, localización y edad.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación El Doctor

La formación El Doctor corresponde a un ambiente de depósito de plataforma de aguas someras, el cual está constituido por una potente secuencia de calizas la cual constituye la provincia geológica llamada plataforma El Doctor (Carrillo, 1981), de estratificación paralela, de textura mudstone–wackstone, con bandas y nódulos de pedernal, con intercalaciones delgadas de lutitas. La cual alcanza un espesor que va desde 150 a 1,500 metros. Descansa concordantemente sobre la Formación Trancas y subyace a la Formación Soyatal-Mezcala. (Figura 4.)

Su localidad tipo se ubica en el Municipio de Cadereyta, Querétaro. Esta secuencia carbonatada se ha dividido en cuatro facies, las cuales son correlacionables con igual número de formaciones características del Noreste de México, como la plataforma Valle-San Luis Potosí (Carrillo.1981).

I. Facies La Negra.

La Negra corresponde a un ambiente de plataforma y laguna (Carbonell, 1970), la cual consiste de calizas de color gris oscuro que intemperizan a un gris claro, su textura es de tipo mudstone, la estratificación es delgada con capas de 10 a 20 cm de espesor presenta además bandas de pedernal negro y en ocasiones de color blanco por un proceso de metasomatismo, que tienen de 1 a 10 cm de espesor, y están intercaladas con espesores delgados de lutitas rojizas.

Es la roca encajonante de los cuerpos mineralizados de la mina “La Negra”, la cual es una roca muy favorable; en otras localidades se conoce como Formación Cuesta del Cura. Es una secuencia distribuida en una extensión mayor a comparación de las otras facies con un espesor de aproximadamente 300 m. Ocupa dos zonas orientadas al NW.

II. Facies San Joaquín.

Se presenta en una forma de faja, que alcanza de 1 a 2 Km de ancho, se encuentra entre la facies La Negra, al NE y facies El Socavón al SW; conocida también como formación Tamaulipas Inferior. Es una caliza criptocristalina compacta de color gris, de estratificación gruesa en capas de 0.5 a 1 m y nódulos de pedernal negro y en ocasiones blanco. El

ambiente de depósito es de plataforma y laguna (Carbonell, 1970), semejante a la facies La Negra.

III. Facies Socavón.

Facies limitada por la facies San Joaquín al NE y la facies Cerro Ladrón al SW. Esta facies se originó del lado prearrecifal, la cual está constituida por calizas de color gris claro, su textura es wackestone – packstone, aunque en ocasiones se acompaña de brechas sedimentarias de textura más gruesa (packstone – grainstone), aparece dispuesta en capas estratificadas de 0.7 a 1.0 m de espesor. Se correlacionan crono y litoestratigráficamente con la Formación Tamabra.

El fracturamiento es incipiente en esta unidad, en algunas zonas se presenta rellenado por carbonato de calcio (CaCO_3), no se puede definir con exactitud la dirección del fracturamiento.

IV. Facies Cerro El Ladrón.

Secuencia de calizas de color gris claro, su textura es de tipo grainstone – boundstone, se presenta en bancos gruesos de color gris en varios tonos en un ambiente de laguna o postarrecife (Formación El Abra), tiene la particularidad de contener micro y macrofauna como rudistas y gasterópodos, los cuales están preservados en diversas etapas de fragmentación teniendo como evidencia clara un ambiente formacional de baja energía. El relieve abrupto del área es característico de sus afloramientos.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Soyatal-Mezcala

A la Formación El Doctor la sobreyace la Formación Soyatal del Turoniano y la Formación Mezcala de Santoniense (Simons y Mapes, 1957) que no afloran dentro de la mina. La litología de ésta formación corresponde a una secuencia marina repetida de tipo flysch, lo que indica un depósito en cuencas marginales de profundidad. Esta formación aflora principalmente en la Cuenca de Maconí, en San Joaquín y San Juan Tetla, el cual tiene un espesor total de 1,000 metros.

La Formación Soyatal está compuesta por una secuencia de lutitas calcáreas y calizas arcillosas de color gris oscuro, con estratificación de espesor de 0.3 a 1.0 metros. Ocasionalmente presentan bandas de calcita de color blanco y/o café claro. Las lutitas se encuentran sumamente plegadas presentando gran fisilidad y clivaje. Presenta cambios laterales y verticales, el cambio entre la Formación Soyatal y Mezcala es gradual. (Figura 4).

En la zona de transición se tiene una alternancia de calizas arcillosas gris oscuro interestratificadas con lutitas grises o rojizas. Esta unidad sobreyace en forma concordante a la Formación El Doctor. El cambio es gradual, existe un intervalo de transición en el cual se tiene una alternancia de calizas gris oscuro intercaladas con lutitas, delgadas bandas de pedernal, el cual va desapareciendo paulatinamente, disminuyendo las calizas y aumentando las lutitas, subyace en discordancia erosional a las rocas del Paleógeno-Neógeno.

PALEÓGENO

Conglomerado El Morro.

Su litología consiste básicamente de un conglomerado fluviolacustre de color rojo, con fragmentos no sólo de rocas sedimentarias como son calizas, areniscas y pedernal, sino también de rocas volcánicas de composición intermedia, está mal clasificada con algunas capas arenosas, con derrames intercalados de basalto y andesita, así como horizontes de toba. Su espesor es de 400 metros aunque varía en algunas localidades.

La Formación El Morro descansa con una discordancia angular sobre las Formaciones el Doctor y Soyatal. Se cree que ésta Formación se depositó en un ambiente continental y sobre un sistema de cuencas. Su edad va del Eoceno Superior al Oligoceno (Carrillo, 1989). Esta formación no aflora en la zona de la mina. (Figura 4).

Rocas Ígneas

El cuerpo intrusivo más grande que se localiza en el área es de composición granodiorítica, este cuerpo aflora en varias áreas y una de ellas es en zona de la mina La Negra, los afloramientos del intrusivo están orientados en un tren NW-SE.

El cuerpo intrusivo de naturaleza granodiorítica se considera como el que dio origen a la mineralización y se presenta en forma de tronco principal con dimensiones de 2 kilómetros

de longitud y 250 metros de ancho medio con ramificaciones en diques de menores dimensiones.

En diferentes partes de la misma intrusión de la granodiorita se encuentran también en el área en forma de stocks de cuarzodiorita y una masa pequeña de diorita. Al que se le ha obtenido una edad de 38.7 ± 0.8 millones de años (Souza- Quiroz 1987), También existen andesitas, dacitas y diques ríolíticos.

Los intrusivos que metamorfizarón las calizas de la facie La Negra de la Formación El Doctor, desarrollan una zona bien definida de skarn de grosularia y andradita, que se crearon al mismo tiempo los canales estructurales favorables para ser posteriormente mineralizados.

Se encuentran varios sistemas de diques de composición intermedia, algunos de los cuales se relacionan con los cuerpos mineralizados. Estos sistemas de diques se describen en el apartado de geología estructural, debido a que su emplazamiento tiene que ver con los sistemas de fallas y fractura.

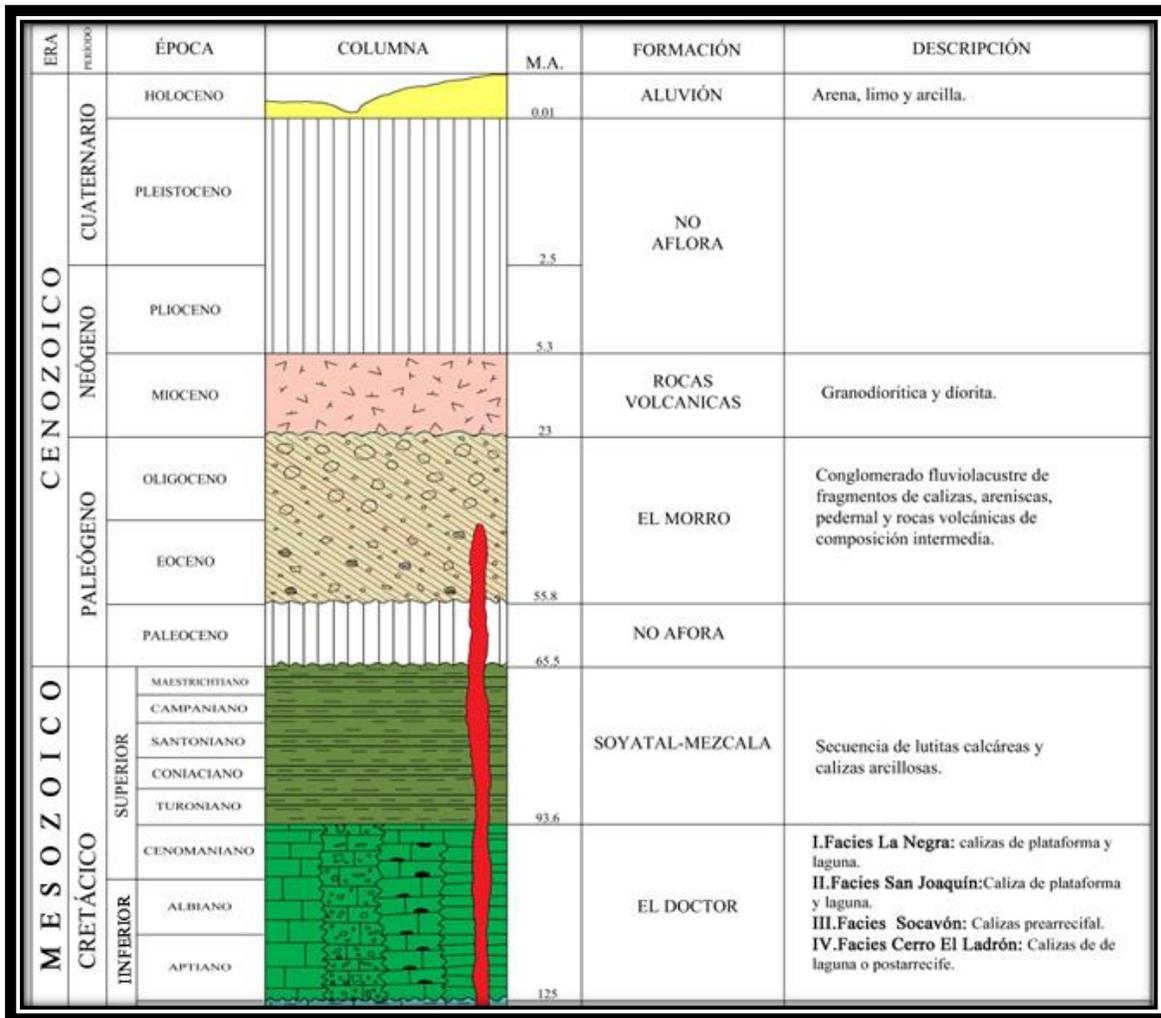


Figura 4. Estratigrafía local del distrito minero La Negra. Carbonell, 1970.

2.4 Geología Estructural

Las estructuras geológicas que se presentan en la región de acuerdo con Carrillo y Sutter (1982), son:

La principal estructura de la región es el anticlinal San Nicolás, que forma parte de la sierra de Querétaro en su parte central y cuyo rumbo general es NW-SE. Existen además una serie de grupos estructurales menores constituidos por cuerpos intrusivos que afloran en esta zona. El principal de éstos es el intrusivo La Negra, que adquiere la forma de un stock y los demás formados por diques, todos ellos provenientes de algún batolito emplazado a profundidad. Estos diques tienen un rumbo que concuerda con el de las estructuras

sedimentarias y que tal vez sean las causantes de la alineación de los depósitos minerales resultantes.

La región se caracteriza por presentar grandes anticlinales, sinclinales, fallamiento inverso con grandes cabalgaduras asociadas y fallamiento normal, que se forman durante la orogenia Laramide (Cretácico Superior- Paleógeno). Todas estas estructuras están orientadas con un rumbo NW-SE (Carrillo, 1990).

El estilo de deformación está controlado principalmente por la litología y el espesor litológico.

Las formaciones Las Trancas y El doctor (facies: La Negra, San Joaquín, Socavón y Cerro Ladrón), son de alta competencia estructural dado que responden a los esfuerzos compresionales con pliegues paralelos. La Formación Soyatal-Mezcala es mecánicamente incompetente y originó grandes cabalgaduras. La geología regional así como las principales estructuras que se encuentra cercanas o dentro del distrito son:

Cabalgadura de El Doctor

Esta estructura involucra a la facie Cerro Ladrón de la Formación El Doctor (Wilson, 1954), orientada de NW-SE con una inclinación de SW 24, que cabalga sobre las lutitas de la Formación Soyatal-Mezcala y presenta una longitud de 12 kilómetros.

Sinclinal de Maconí

Estructura poco apreciable por perder su flanco occidental por efecto de la cabalgadura de El Doctor, presenta un rumbo de NW-SE inclinando al NE, limitado por el anticlinorio El Piñón y al SW por la cabalgadura El Doctor.

El sinclinal de Maconí está constituido por la Formación Soyatal-Mezcala, las cuales se encuentran deformadas por los plegamientos recumbentes, principalmente por anticlinales fallados en su eje por fallas inversas que hacen que el espesor real de la formación se incremente.

Anticlinorio El Piñón

Tiene rumbo NW-SE, una anchura de 11 kilómetros y se localiza desde la mina La Negra hasta el rancho Las Moras. Esta limitado al SW por el sinclinal de Maconí y al NE por el sinclinal El aguacate. (Figura 5).

La geometría del anticlinorio es asimétrica, el flanco suroccidental tiene un buzamiento de 30° al SW, mientras que el flanco nororiental presenta una inclinación de aproximadamente 8° al NE. Cuenta con pliegues de segundo orden de hasta 800 metros en el flanco suroccidental y 200 metros en el techo y flanco nororiental (Suter, 1987).

Sobre éste se encuentra alineados una serie intrusivos de composición intermedia que van desde el distrito minero de Zimapán, Hidalgo, hasta el distrito minero de Santo Entierro, Querétaro, colindando ambos con el distrito minero de Maconí y su longitud es de 17 kilómetros. Figura 5.



Figura 5. Plano geológico del distrito minero Maconí, tomado de Consejo de Recursos Minerales 1992.

Fallamiento Normal

En la región existen varios sistemas de fallamiento y fracturamiento, el principal tiene un rumbo NW-SE al igual que el resto de las estructuras regionales. Este sistema es el más antiguo y debió de haber funcionado como guía para las intrusiones antes mencionadas.

El segundo sistema en importancia es de rumbo NE-SW, de menores dimensiones y más reciente que el anterior ya que lo intersecta y desplaza. Éste debe haberse originado por efecto de los intrusivos.

Existen además fallamientos radiales provocados por levantamientos dómicos como es el caso del área La Yegua, así como fallamiento en bloque que produce una topografía escalonada.

El área de la mina “La Negra” se encuentra en el flanco SW del anticlinorio El Piñón, que tiene un rumbo NW-SE al igual que el resto de las estructuras de carácter regional Figura 5. Este anticlinorio tiene una anchura de 11 kilómetros y cuenta con pliegues secundarios de hasta 800 metros en el flanco SW y de 200 metros en el techo y flanco NE (Palomino, 2004).

En el área, el plegamiento sigue el mismo patrón regional y únicamente donde se tiene la presencia de intrusivos y en zonas de falla el patrón de deformación se encuentra cambiado.

Durante los eventos mineralizantes o un poco anterior a ellos, es posible que hayan transcurrido fenómenos de plegamiento provocados por una intrusión diorítica en el área de “La Negra” a los cuales se relaciona la mineralización. El echado de los cuerpos minerales conocidos es muy similar al de las calizas; cualquier cambio observado en el echado de estas calizas es observado también en los cuerpos mineralizados, (Palomino,2004).

El rumbo general del depósito mineral es de N 15° W, con echado de 60° al SW, en concordancia con las capas de caliza.

Según la litología de la formación afectada se observan variaciones en cuanto al grado de plegamiento y fracturamiento. Dentro de la Formación El Doctor, los miembros La Negra y San Joaquín presentan plegamientos más intensos que el miembro Socavón, esto pudo ser debido a que podrían tener una mayor plasticidad que la otra, ya que la estratificación delgada así como los horizontes arcillosos intercalados dentro de estos miembros, debieron proporcionarles una mayor resistencia a los esfuerzos compresivos ocurridos durante la orogenia Laramide, respondieron ante éstos con plegamiento paralelo, (Palomino, 2004).

Dentro de las zonas de skarn se encuentran zonas con numerosos pliegues, los cuales deben de corresponder a las calizas y que lograron preservarse a pesar de los efectos causados por

las intrusiones y el metasomatismo. Las magnitudes de los pliegues observables en el área van desde centímetros hasta los 20 metros.

Todos los intrusivos presentes en el área guardan una marcada relación con estos sistemas de fallamiento-fracturamiento. Como se había mencionado anteriormente, los intrusivos que afloran desde Zimapán, Hidalgo hasta Santo Entierro, tienen un rumbo similar al del primer sistema de fallamiento, mientras que la relación de los intrusivos con el segundo sistema de fallamiento-fracturamiento, está dada por la morfología de los stocks, ya que su eje de mayor elongación tiene un rumbo NE-SW, (Palomino,2004).

2.4.5 Diques

Como se menciona anteriormente existen varios sistemas de diques de composición intermedia. Por la forma de emplazamiento y por su localización los sistemas de diques se dividen en tres zonas, las cuales se describen a continuación:

ZONA ORIENTAL. Esta zona está caracterizada por tener innumerables diques y sills con intercalaciones angostas e irregulares de skarn con grosularia o andradita, estos diques en su mayoría tienen un rumbo que va de N 15° W, pero se encuentra tan cercanos unos de otros que en ocasiones llegan a ponerse en contacto para más adelante separarse nuevamente lo que da la apariencia de ser pequeños ramales; este comportamiento errático en superficie se aclara a profundidad ya que en esta zona, se encuentra con información de interior de mina donde puede apreciarse que este enjambre de diques que se desprenden del stock de La Negra tiende a agruparse a medida que se alejan hacia el NW donde forma tres sistemas de diques con rumbos casi paralelos y conocidos como: La Dificultad, Esperanza y Silvia, los cuales están ubicados en las porciones, sur, centro y norte, respectivamente.

ZONA CENTRAL. A diferencia de la anterior se distingue por la clara definición en superficie o en interior de mina de los tres sistemas anteriores; las características de esos:

a. Sistema Dificultad

Se encuentra ubicado al alto del dique Maravillas, tiene su origen a partir de un desprendimiento de uno de los principales diques llamado Esperanza. Toma su nombre del cuerpo mineral Esperanza, ubicado en la zona de desprendimiento.

Este sistema posee en sus inicios un rumbo de N 71° W, comienza a flexionarse suavemente hacia el oeste hasta tomar un rumbo de N 80° W, el echado hacia el SW con 70° presenta escasas variaciones.

El sistema es conocido únicamente en interior de mina, ya que no llega a aflorar. Las dimensiones conocidas por obra directa o con barrenación son de aproximadamente 210 metros en la horizontal a rumbo y 300 metros en la vertical. Está compuesto en su inicio por un dique de aproximadamente 20 metros de espesor, que al avanzar hacia el NW se angosta y ramalea en diques menores de 10 metros, algunos de estos desprendimientos son cortados por el dique Maravillas, del cual se encuentra separado por una angosta zona de skarn menor a 2 metros, constituida de wollastonita y granate, que en ocasiones están en contacto; al alto de este sistema se encuentra una zona de skarn de granate wollastonita y spurrita de 25 a 30 metros de espesor, en las zonas donde el granate predomina existen pequeños cuerpos de sulfuros como La Dificultad y Santa Virginia.

b. Sistema Esperanza

Los intrusivos pertenecientes a este sistema se encuentran en una franja de 160 metros de ancho por 650 metros de largo, ubicada en la parte media de la zona central. La mayoría de los diques y sills que lo componen tienen su origen en un desprendimiento del stock de La Negra, al bajo de este desprendimiento se encuentra el cuerpo mineral Esperanza, del cual toma su nombre. El espesor de este dique es de 35 metros en sus orígenes, hasta 100 metros en la parte media y a medida que se aleja del stock hacia el NW, a rumbo tiende a ramalearse en diques menores hasta 30 metros de espesor.

Dentro de esta franja o sistema se encuentran otros diques con variaciones mineralógicas y texturales diferentes a los mencionados anteriormente; estos diques son angostos, menores de 10 metros, escasos y los afloramientos se encuentran aislados. El rumbo varía desde N 45° W en su nacimiento hasta un N 75° - 80° W en

su terminación, la cual ocurre cercana a una zona de falla de rumbo N 15° E ubicada a 150 metros del contacto con el stock de La Valenciana.

El echado de los diques al igual que en el sistema anterior es de 70° al SW. El skarn generado tanto al alto como al bajo es de mineralogía muy variada; predomina el granate al alto tiende a alcanzar hasta 90 metros de espesor mientras que el del bajo no es bien conocido pero se supone más angosto.

En la zona de granate se tienen cuerpos minerales como Esperanza, San Pedro, Santa Alejandra, etc.

c. Sistema Silvia

Se localiza en la porción norte de la zona central, este sistema se origina al igual que el sistema Esperanza de un dique principal con aproximadamente 40 metros de espesor y que al avanzar hacia el NW se ramalea en diques más angostos.

Se conocen poco las dimensiones, el rumbo y profundidad de este sistema ya que no se cuenta con desarrollo de obra y en superficie los afloramientos son escasos puesto que existe una gruesa capa de suelo vegetal, lo que hace difícil cuantificar con precisión las dimensiones, el espesor de los diques y zonas de skarn asociados a este sistema; sin embargo se infiere que la longitud a rumbo del sistema es de aproximadamente 600 metros y el espesor del dique principal es de 25 a 30 metros, además de que se ha descubierto la presencia de diques con composiciones y texturas diferentes a la del dique mayor.

Las zonas de skarn asociadas a este sistema están compuestas mineralógicamente por granate y en menor proporción wollastonita el ancho promedio de ésta se estima en 35 metros.

Cercanos a sus bordes se encuentran algunos cuerpos minerales como son: Silvia, Patriota, etc.

ZONA OCCIDENTAL: Esta zona aflora un pequeño stock de forma elipsoidal conocido como Valenciana, las dimensiones de éste son: 350 metros (en el eje mayor) en dirección de N 35° E y 140 (en el eje menor) con una dirección N 47° W. Está limitado en la parte sur por el dique aplítico Maravillas y en el extremo NE por una falla de rumbo N 15° E, el cual ésta limitada al sistema Esperanza.

Este stock posee algunas características que lo diferencian del resto de los demás intrusivos que afloran en el yacimiento, las cuales son:

- I. Presenta un pequeño centro o núcleo poco alterado con dimensiones de 90 x 170 metros, en el cual se encuentra una brecha cementados por una matriz de feldespatos, plagioclasas y cuarzo, originada probablemente por alguna etapa explosiva durante el emplazamiento del propio stock.*
- II. Un amplio halo de endoskarn, mayor que cualquiera de los generados por el resto de los intrusivos.*
- III. El exoskarn es de dimensiones reducidas comparado con el tamaño del stock. La mineralogía de éste es casi exclusivamente de wollastonita excepto en el extremo SE donde predomina el granate y algunas zonas angostas de spurrita.*
- IV. Los diques son escasos, angostos y de rumbo NE al diferencia del stock de La Negra que son de rumbo NW principalmente.*
- V. Existe un pequeño cuerpo de mineral en su extremo SW pero parece guardar más relación con el dique aplítico que con el stock. Figura 6.*

2.4.6 Dique Aplítico Maravillas

Este dique está relacionado al cuerpo mineral que se caracterizó. Este dique de composición granodiorítica fue considerado debido a su continuidad y a sus marcadas diferencias petrológicas con respecto al resto de los intrusivos y es conocido desde el distrito minero de

Zimapán (Palomino, 2004). Se encuentra emplazado en una falla regional la cual cruza toda el área en su porción sur.

Las dimensiones conocidas de este dique, en sentido horizontal son de varios kilómetros a rumbo y los espesores varían desde 1 metro hasta 20 metros; los afloramientos en el área son casi continuos a lo largo de 1,400 metros.

A nivel regional tiene un rumbo continuo hacia el N 45° - 50° W, pero presenta variaciones locales: entra al área por el oriente con una dirección de N 80° W la cual conserva hasta la parte media, donde pierde continuidad de afloramientos. Aparece nuevamente algunos metros adelante pero con un rumbo de N 45° W para luego desaparecer, resurge algunos metros al sur; conserva el último rumbo mencionado, hasta salir del área por su extremo suroccidental; se pierde a menos de 500 metros delante de este límite. El valor del buzamiento al igual que el rumbo es casi constante con un valor de 70° al SW y puede llegar a ser casi vertical, como se observa en el extremo SE.

El skarn asociado a este dique es angosto, menor a 2 metros, donde predomina la wollastonita y en menor proporción el granate, sin embargo, atraviesa zonas de skarn originadas por la intrusiones de composición intermedia en las cuales parece ser que sirvió de control de algunos cuerpos de mineral que funcionan como sello para la mineralización.

Este dique es el límite norte del sistema Dificultad y dado que existe entre estos dos un cierto paralelismo en cuanto a rumbo, sirve como guía al no aflorar este sistema.

Dentro del dique Maravillas es posible observar una angosta pero contigua zona de fractura, brechada y conservada lo que pudiera indicar que la actividad de estas fallas debió de continuar de la última etapa de intrusión. (Figura 6).

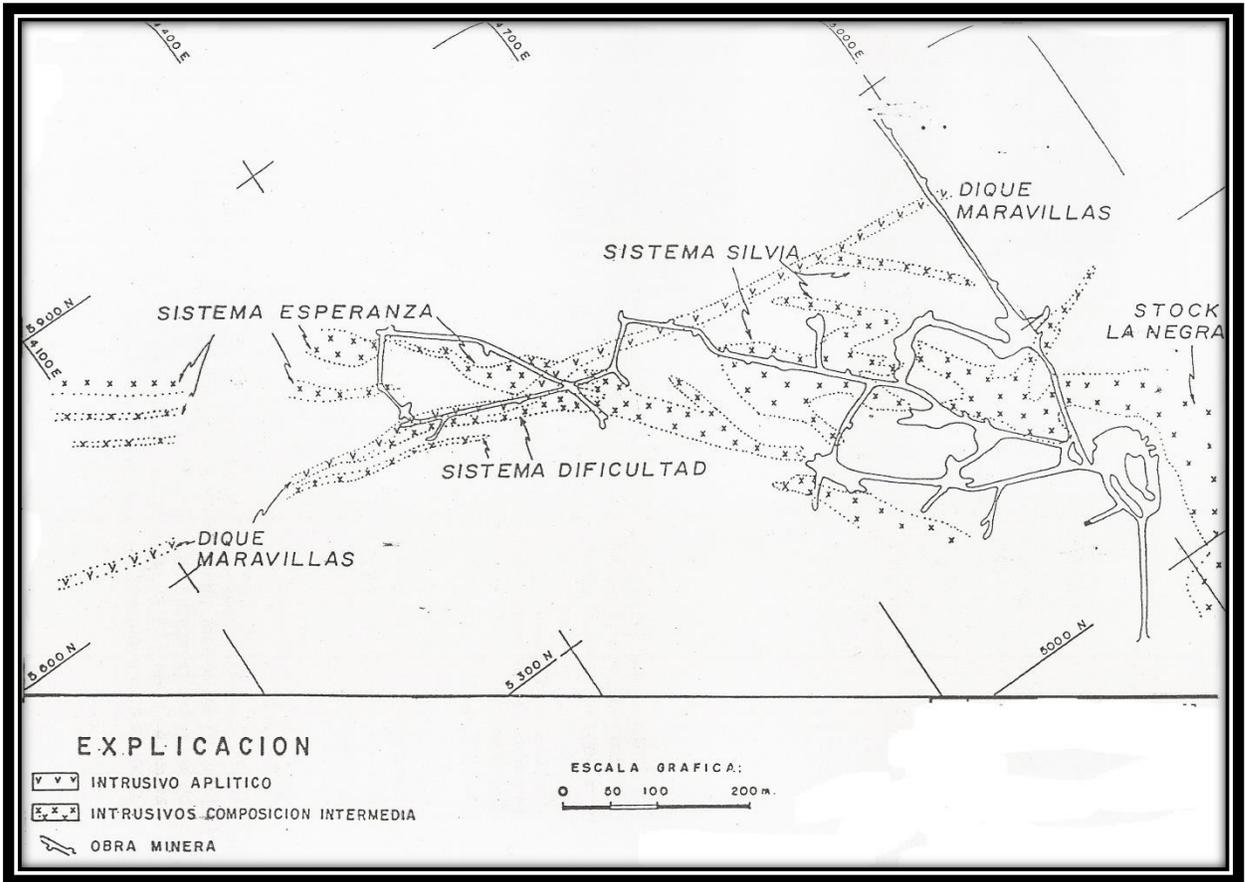


Figura 6. Plano de localización de los sistemas de diques que se encuentran dentro de la mina La Negra, modificado de Palomino, 2004.

3. Yacimiento Mineral

El yacimiento de la unidad minera La Negra corresponde con un yacimiento de tipo skarn retrógrado por estar afectado por soluciones hidrotermales, de metales base con algo de plata, siendo los principales valores el zinc y el cobre. Por las estructuras que contienen la mineralización se relaciona con los tipos Chimenea-Manto del Norte de México (Souza Jorge, 1986).

El depósito mineral de La Negra está asociado con un intrusivo de composición diorítica, con una edad de 38.7 ± 0.8 millones de años (Souza-Quiroz 1987), al cual se le puede adjudicar al depósito mineral de La Negra. Este intrusivo es el responsable de los efectos térmicos y metasomáticos que sufrió la roca encajonante, formado de esta manera, este yacimiento de típico remplazamiento metasomático. En la figura 7 se muestra el modelo idealizado de un yacimiento tipo skarn.

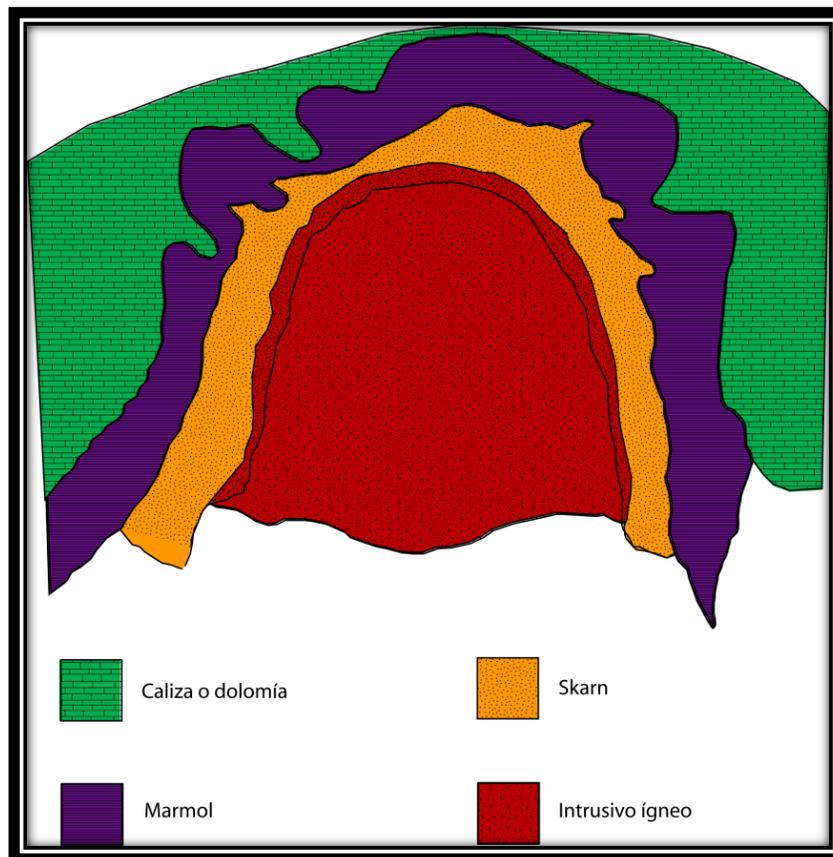


Figura 7. Modelo esquemático de un yacimiento de tipo Skarn (Sawkins, 1990).

El depósito mineral de La Negra se encuentra emplazado en el borde exterior de la zona de metasomatismo de contacto de las rocas calcáreas, los cuerpos mineralizados corresponden con un skarn de granate, remplazado por una con mineralización de zinc y cobre con valores de plata y, plomo, en forma de sulfuros, el plomo también se observa ocasionalmente como sulfosales.

En este yacimiento los cuerpos minerales corresponden a mantos y chimeneas de forma irregular y diferentes dimensiones. Algunos cuerpos de chimenea llegan alcanzar una altura de 400 metros, con longitudes que pueden ser superiores a 320 metros, el espesor varía de 8 a 60 metros; son cuerpos casi verticales, con inclinaciones de 60° a 85°, de los cuales tienden a desprenderse algunos mantos más pequeños.

Existe una serie de factores que influyeron en el emplazamiento de los cuerpos que constituyen depósito mineral son:

Estratigrafía

El control de mineralización en la estratigrafía consiste en que los cuerpos minerales se emplazaron preferentemente en las capas originalmente de caliza más porosas, cualquier cambio de echado notado en la caliza es también notado en el cuerpo mineralizado.

Una vez que ocurre la formación de los granates se incrementa notablemente la porosidad original de los estratos permitiéndoles ejercer un fuerte control en la mineralización de sulfuros, dicho control es eminentemente textural.

Por estas razones algunos cuerpos tienden a presentarse paralelos a la estratificación y en cierto grado están controlados por ella. (Souza, 1987).

Estructura

Estructuralmente, el depósito de La negra, está controlado por plegamientos de las capas de caliza. Este depósito está localizado en el flanco derecho de un pliegue de carácter local.

Algunos de los cuerpos minerales se ensanchan considerablemente hacia la zona de charnela de pliegues anticlinales secundarios locales y contrariamente se angostan notablemente en el punto de inflexión hacia el sinclinal correspondiente o en la flexión monoclin. (Souza, 1987).

Geoquímica

Las reacciones químicas que la roca encajonante sufrió al contacto del intrusivo fueron importantes en el emplazamiento del cuerpo de mineral, primordialmente tomándolas como una primera etapa de su formación, dando paso a la preparación del terreno a ser reemplazado. Los principales efectos originados por la intrusión fueron los de recristalización, recombinación y formación de nuevos minerales, así como cambio en su textura, haciendo la roca más permeable. (Souza, 1987).

También se involucran los niveles de depositación de la plata controlados por el paleorégimen de las aguas subterráneas sincrónicas a las soluciones mineralizantes e interviene la temperatura, salinidad y saturación de estas últimas. (Souza, 1987).

Textura

La textura de la roca influye mucho en este caso con las reacciones químicas llevadas a cabo durante la intrusión. Este factor textural controló el paso de las soluciones mineralizantes y posteriormente, su disposición en la zona delimitada por el contacto fallado. (Souza, 1987).

A continuación se describen algunos de los cuerpos minerales más importantes que se explotan en la unidad minera La Negra:

Cuerpo La Negra

Estructura mineralizada localizada al borde NW del stock de composición diorítica La Negra. La mineralización económica se encuentra en la parte media de una zona de skarn de grosularia y andradita, remplazado por sulfuros de zinc y plomo. El rumbo del depósito es NW 15°, con un echado promedio del cuerpo de 60° al SW, en concordancia con las capas de caliza. Los minerales con mayor abundancia son marmatita, pirrotita y cerusita; los minerales con menor abundancia son calcita y cuarzo. (Figura 8).

Cuerpo Alacrán

El cuerpo Alacrán se localiza a 670 metros al NE 40° del cuerpo La Negra y está asociado al borde del stock de diorita. La mineralización está localizada dentro de una zona de skarn de

grosularita–andradita y calcita, con calcopirita, trazas de galena, marmatita, pirrotita y arsenopirita. Este cuerpo mineralizado tiene un rumbo general de NW 75° SE, con un echado aproximado de 65° y un espesor de 15 metros. (Figura 8).

Cuerpo Cobriza

Se encuentra ubicado a unos 300 metros aproximadamente al NE del tiro general y está alineado con los cuerpos Mónica y Alacrán, sobre el borde norte del stock diorítico La Negra. La estructura se encuentra relacionada a pequeños diques de composición diorítica con rumbo NW, en este cuerpo disminuyen la marmatita y la galena, con el predominio de calcopirita. (Figura 8).

Cuerpo Cristo Rey

Se encuentra en el borde NE y NW del skarn de andradita, en contacto con la caliza. La mineralización está asociada a dos diques félsicos porfídicos con rumbo N 45° W, y los sulfuros están remplazando a los estratos de caliza, silicatos de andradita y en algunas partes dentro del dique. Como minerales principales se encuentran la marmatita, arsenopirita, pirrotita, galena, cuarzo y calcita. (Figura 8).

Cuerpo La Cruz

El cuerpo La Cruz se localiza a 50 metros al sur del cuerpo Cobriza, está asociado a un dique de composición diorítica. Corresponde a un skarn de andradita, grosularia y wollastonita, minerales con mayor abundancia de este cuerpo está constituida principalmente de marmatita, galena y calcopirita, con menor abundancia se observa calcita, cuarzo, smithsonita, montmorillonita. (Figura 8).

Cuerpo La Dificultad

Se localiza aproximadamente a unos 150 metros del cuerpo San Pedro, con una orientación al NW y está asociado al dique de composición diorítica. La mineralización está constituida por marmatita, calcopirita, y pirrotita principalmente asociados al skarn de grosularia con calcita. Al alto se observa la caliza y al bajo un endoskarn de andradita – wollastonita. (Figura 8).

Cuerpo Maravillas

Cuerpo mineral está asociado a un dique del mismo nombre, de composición aplítica y está ubicado al norte del cuerpo La Negra aproximadamente a 600 metros. La mineralización se aloja al alto y bajo del dique con caliza marmorizada, los minerales con mayor abundancia está constituida por arsenopirita, marmatita, calcopirita, pirrotita, galena y cuarzo; y con menor abundancia calcita, pirita. (Figura 8).

Cuerpo Mónica

Está ubicado a 500 metros al NE del tiro general. Se encuentra asociado a pequeños diques de composición diorítica de rumbo NW y NE, que son paralelos al este del stock La Negra, los sulfuros están alojados en el skarn de andradita y grosularia, los minerales de mayor abundancia son la marmatita, galena, pirrotita y calcopirita, los minerales con menor abundancia el cuarzo y la calcita. (Figura 8).

Cuerpo San Pedro

La estructura del cuerpo San Pedro está localizado aproximadamente a 75 metros al NW del cuerpo La Negra, corresponde a un manto con tendencia NW. La mineralización del cuerpo está constituida por marmatita, pirrotita, calcopirita, asociados a un skarn de andradita con calcita. (Figura 8).

Cuerpo Santa Blanca

Este cuerpo está localizado a unos 800 metros hacia el NW del cuerpo La Negra. El cuerpo está estructuralmente relacionado con el contacto del bajo de un dique de composición ácida. Está constituido por una zona de skarn de grosularita y un intrusivo silicificado, en los cuales se alojan los sulfuros de marmatita, calcopirita y pirrotita. (Figura 8).

Cuerpo Santa Esperanza

El cuerpo Santa Esperanza se ubica a 250 metros al NW del cuerpo La Negra y además se encuentra asociada al comportamiento del dique Esperanza. La mineralización está constituida por marmatita, calcopirita, tetraedrita asociados a pirrotita y arsenopirita, los cuales están alojados en un skarn de grosularita con calcita. (Figura 8).

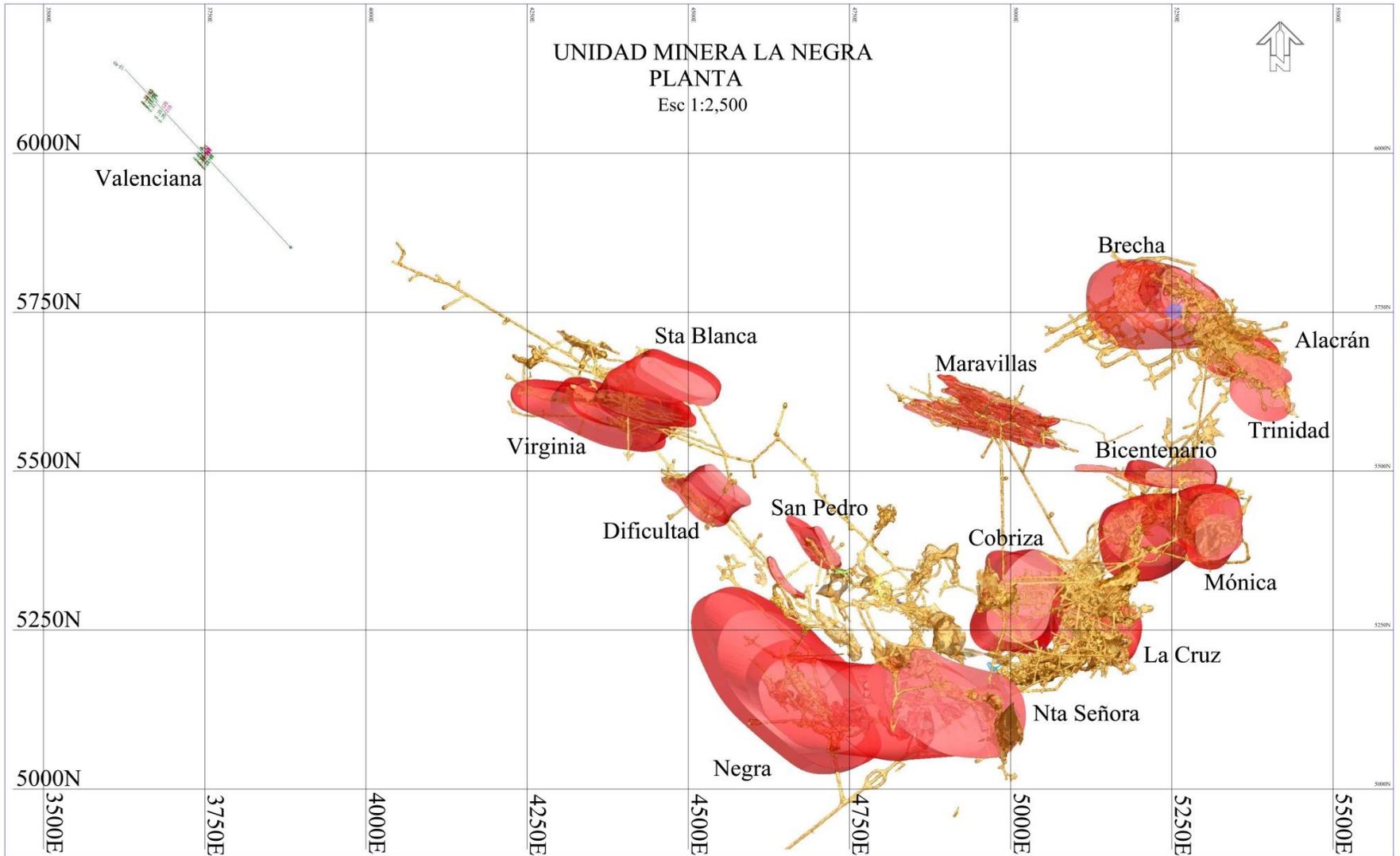


Figura 8. Plano vista en planta de los cuerpos mineralizados de la unidad minera La Negra. Escala 1 : 2,500. (Torres,2014)

3.1 CUERPO MARAVILLAS

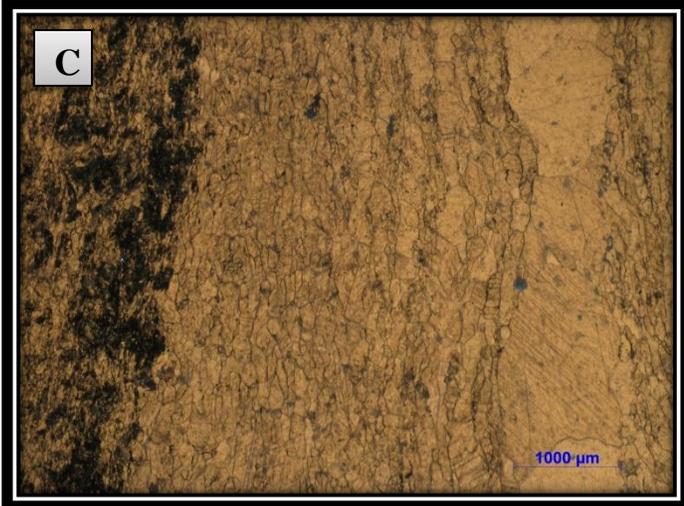
3.1.1 Roca Encajonante

Uno de los factores más importantes que favoreció este yacimiento es la roca encajonante que está compuesta de carbonato de calcio. La roca que se encuentra en el cuerpo Maravillas, pertenece a la facies La Negra de la Formación El Doctor, es una caliza recristalizada de color gris oscuro, con estratificaciones delgadas (de 10 a 20 cm aprox.) y con una textura brechada. La caliza recristalizada se pliega en diferentes grados y los ejes de las estructuras están orientados hacia el NW.

Estas rocas fueron deformadas durante la orogenia Larámide, presentando deformación estructural en toda la secuencia sedimentaria, con sistemas complejos de fallas y pliegues, que favoreció la mineralización de los metales base, dándoles espacio para su cristalización, formando mantos y chimeneas. Los mantos son paralelos a las capas de las calizas, esto se debe a que probablemente el flujo magmático le fue más factible circular paralelo a las capas de las calizas.

La roca encajonante observada en la parte baja del cuerpo Maravillas, en el nivel 2215 m.s.n.m. (muestra M-8), se observa una caliza de color gris oscuro intercalada con bandas de un mineral de color blanco que localmente le llaman pedernal, presenta una textura brechada. Está constituida por cristales de calcita (70%), granate (5%), minerales opacos (10%) y presenta un mineral de grano muy fino (15%), (debido al tamaño de grano se mandó a realizar un estudio de Difracción de Rayos X (DRX) en el Instituto de Geología de la UNAM), donde se encontraron asociados los siguientes minerales: wollastonita (CaSiO_3), cuspidina ($\text{Ca}_4\text{F}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), rankinita ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$), spurrita ($\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{CO}_3$) y larnita (Ca_2SiO_4); los cuales son silicatos de calcio de alta temperatura, presentando una textura brechada, con estas características se clasifico como una caliza recristalizada. (Fotografía 1).

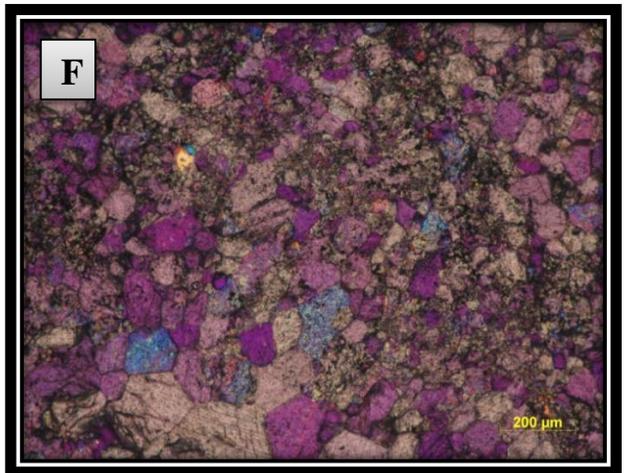
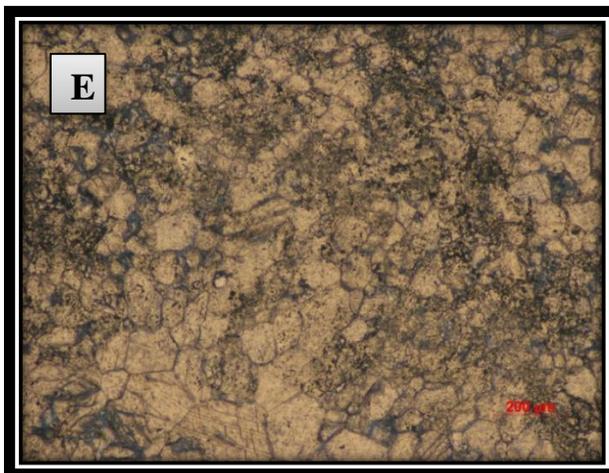
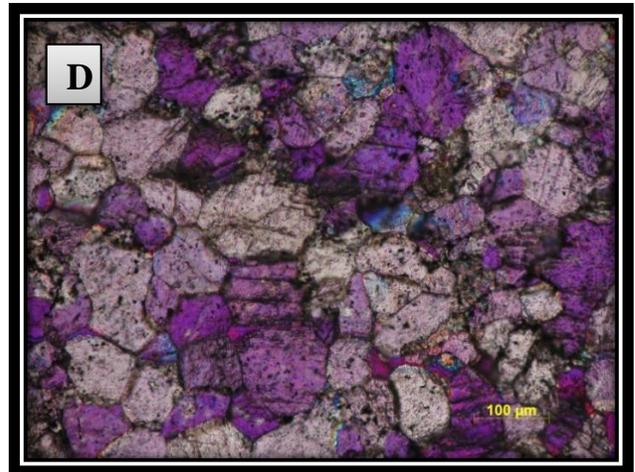
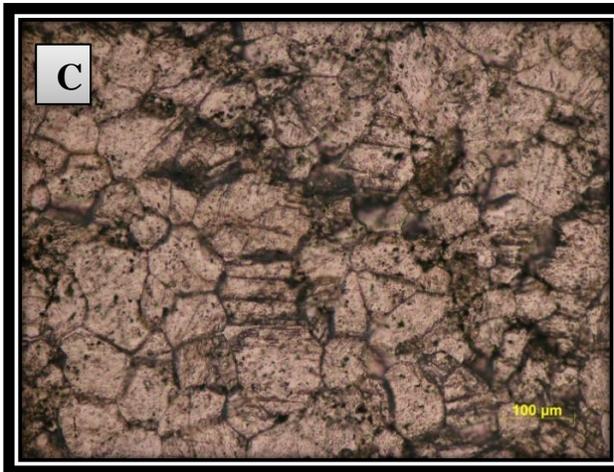
Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo A-3 y observar el análisis de DRX en el Anexo D-2.



Fotografía 1. A sitio donde se extrajo la muestra M-8; B muestra de mano de la caliza; C y D se puede apreciar una textura inequigranular, formada por cristales de calcita producto de una recrystalización (C campo observado con luz paralela y D campo observado con nicoles cruzados); E y F se puede observar un mosaico formado por un intercrecimiento de minerales de grano muy fino, identificado por DRX como wollastonita, cuspidina, rankinita, spurrita y larnita (E campo observado con luz paralela y F campo observado con nicoles cruzados).

En la parte superior del cuerpo Maravillas, en el nivel 2300 m.s.n.m, la roca encajonante (muestra M-22), se observa una caliza de color gris oscuro, se aprecian vetillas rellenas de calcita. Está constituida por cristales de calcita (90%), cuarzo (5%), minerales opacos (3%) y presenta un mineral sin identificar (2%), presenta una textura inequigranular-granoblástica, con estas características se clasifico como una caliza recristalizada. (Fotografía 2).

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo A-5.



Fotografía 2. A nivel 2300 donde se extrajo la muestra M-22; B muestra de mano de la caliza recrystalizada con textura brechada; C se puede apreciar un mosaico homogéneo de textura granoblástica formado por cristales de calcita, C campo observado con luz paralela y D campo observado con nicols cruzados y placa sensible al violeta; E y F se puede apreciar un mosaico no homogéneo de textura inequigranular formado por cristales de calcita, E campo tomado con en luz paralela y D campo tomado con nicols cruzados y placa sensible al violeta.

3.1.2 Mineralogía Económica

En el cuerpo Maravillas, los minerales de tipo económico que se han reportado corresponden a sulfuros, el cobre se encuentra en forma de calcopirita (CuFeS_2), el plomo se encuentra en forma de galena (PbS), el zinc aparece en forma de marmatita ($(\text{Zn, Fe})\text{S}$) y la plata se encuentra en forma de hessita (Ag_2Te). En este estudio se encontraron los mismos minerales con excepción del de plata que no fue posible identificarlo en las rocas estudiadas.

En la parte baja del cuerpo Maravillas, en el nivel 2200 (muestra M-2), la zona mineralizada presenta los siguientes minerales a simple vista: pirrotita, arsenopirita, calcopirita, wollastonita y granate; presentando una textura inequigranular. (Fotografía 3, A y B).

Está constituida por: pirrotita (40%), arsenopirita (25%), calcopirita (15%) y granate (dadas las formas que presentan y por los minerales observados en el ejemplar de mano) (20%); se observa una textura de reemplazamiento. (Fotografía 3, C y D).

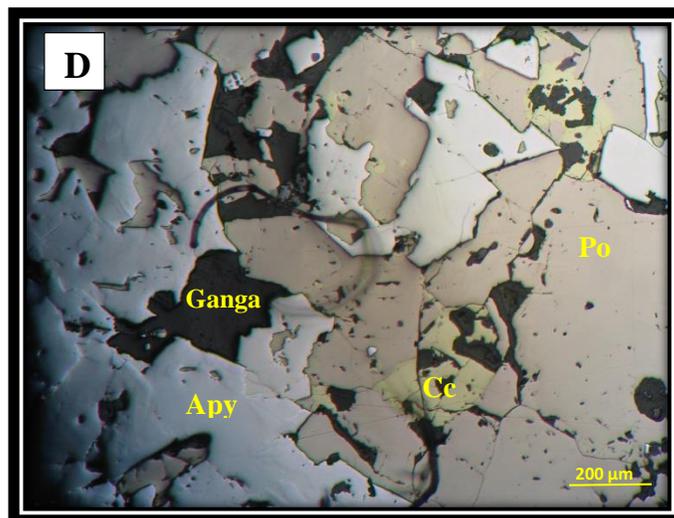
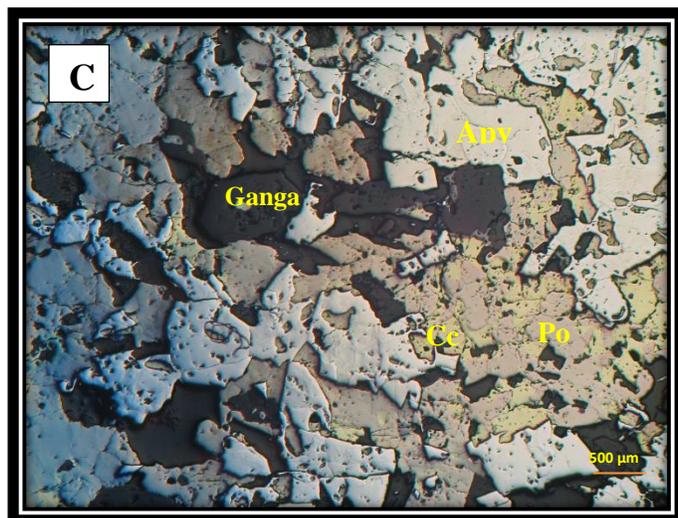
La pirrotita se observa como islas y continentes en el mosaico de sulfuros, en algunas partes presenta inclusiones de cristales euhedrales de sección rómbica de arsenopirita y minerales transparentes en intercrecimiento mutuo y en formas redondeadas. (Fotografía 3, C y D).

La arsenopirita se observa como mosaico de cristales euhedrales de sección rómbica con inclusiones rellenos por otros sulfuros y minerales transparentes, se observan en algunas partes inclusiones de islas de pirrotita y calcopirita en intercrecimiento mutuo y en formas redondeadas. (Fotografía 3, C y D).

La calcopirita se observa en dos tipos, una corresponde a islas en arsenopirita, la otra se encuentra asociada con la pirrotita y la arsenopirita, en los dos tipos se observa como islas de calcopirita y mineral transparente en intercrecimiento mutuo. (Fotografía 3, C y D).

Los minerales transparentes se observa que está en intercrecimiento mutuo en todos los minerales opacos. (Fotografía 3, C y D).

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo B-1.



Fotografía 3. A nivel 2200 localización de la muestra M-2; B muestra de mano de la roca mineralizada donde se observan pirrotita, arsenopirita, esfalerita, y calcopirita, incluidos en el skarn de wollastonita y granate. C Se puede observar un mosaico formado por islas y continentes de pirrotita (po), se puede observar islas de calcopirita (Cc) en la arsenopirita (Apy). D se observa un reemplazamiento de cristales euhedrales-subhedrales de la arsenopirita.

Siguiendo en la parte baja del cuerpo Maravillas, en el nivel 2210 (muestra M-7), en la zona mineralizada los minerales que se aprecian a simple vista son: pirrotita, pirita y esfalerita; los cuales presentan una textura inequigranular, (Fotografía 4, A y B).

Está constituida por cristales de pirrotita (25%), pirita (22%), esfalerita (13%), calcopirita (7%), galena (5%), marcasita (3%) y minerales transparentes (25%); se observa una textura de reemplazamiento, (Fotografía 4, C y D).

La pirrotita forma un mosaico que se observa como islas y continentes en un mosaico de sulfuros, en algunas partes presenta inclusiones de cristales anhedrales de pirita, calcopirita, galena y un mineral transparente, el mineral transparente está en intercrecimiento mutuo con algunos sulfuros y en algunas partes rellena vetillas. (Fotografía 4, C y D).

La pirita se encuentra asociada con la pirrotita en cristales anhedrales, se observa muy fracturada, en intercrecimiento mutuo con mineral transparente y en algunas partes presenta vetillas de mineral transparente. (Fotografía 4, C y D).

La esfalerita se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociada con la pirrotita y calcopirita, presenta intercrecimiento mutuo con cristales anhedrales de un mineral transparente, este último en algunas partes presenta forma de vetillas. (Fotografía 4, C y D).

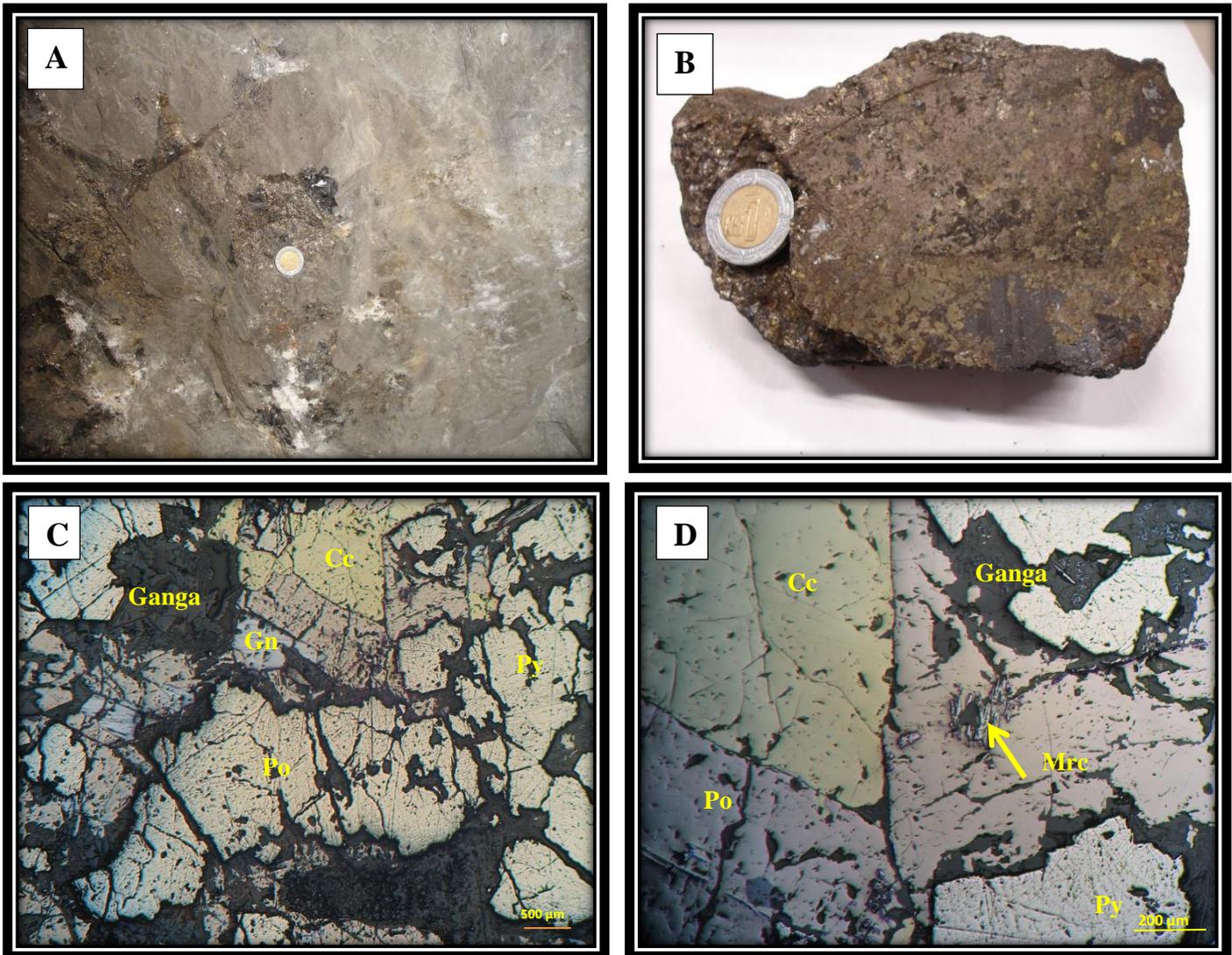
La calcopirita se presenta dos tipos, una donde se aprecia como islas en la esfalerita, la otra se encuentra asociada a la pirrotita y galena, en los dos tipos se presentan intercrecimiento de cristales anhedrales de mineral transparente. (Fotografía 4, C y D).

La galena se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociada a la pirrotita y se observan un intercrecimiento de un mineral transparente y en algunas partes presenta formas anhedrales. (Fotografía 4, C y D).

La marcasita se observa en cristales anhedrales, se encuentran asociados a la pirrotita y se observa un intercrecimiento de un mineral transparente el cual se observa en cristales anhedrales. (Fotografía 4, C y D).

Minerales transparentes se observan como islas, presenta un intercrecimiento mutuo en todos los sulfuros y algunas partes presentan forma de vetillas que brechan al mosaico de sulfuros. (Fotografía 4, C y D).

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo B-2.



Fotografía 4. A nivel 2210 localización de la muestra M-7; B muestra de mano de la roca mineralizada, se pueden apreciar pirrotita, pirita, esfalerita. C se observa un mosaico de pirrotita (Po) se aprecian cristales muy fracturados por mineral transparente, el intercrecimiento mutuo de la calcopirita (Cc) y de la galena (Gn). D se observa pequeños cristales anhedrales de marcasita (Mr) producto de la alteración de la pirrotita.

En la parte media del cuerpo mineral Maravillas, en el nivel 2250 (muestra M-15), la zona mineralizada presenta los siguientes minerales que se observan a simple vista, los cuales son: arsenopirita, esfalerita, calcopirita y minerales transparentes; presentando una textura inequigranular. (Fotografía 5, A y B).

Está constituida por: arsenopirita (35%), esfalerita (30%), calcopirita (10%), marcasita (5%), pirrotita (3%), galena (2%) y minerales transparentes (15%), se observa una textura de reemplazamiento. (Fotografía 5, C y D).

La arsenopirita se observa como islas y continentes en cristales euhedrales de sección rómbica formando un mosaico con los otros sulfuros, se encuentra asociada a la esfalerita, en algunas partes presenta inclusiones de cristales anhedrales de esfalerita, calcopirita y minerales transparentes. (Fotografía 5, C y D).

La esfalerita se observan en cristales anhedrales en el mosaico de sulfuros, se encuentra asociada a la arsenopirita, en algunas partes presenta inclusiones de cristales anhedrales de calcopirita y minerales transparentes en intercrecimiento en forma anhedrales y redondeadas. (Fotografía 5, C y D).

La calcopirita se observa en dos tipos, una en forma de inclusiones redondeadas en cristales de esfalerita y minerales transparentes, la otra se encuentra asociada con la pirrotita y marcasita, en los dos tipos se observa en intercrecimiento con un mineral transparente. (Fotografía 5, C y D).

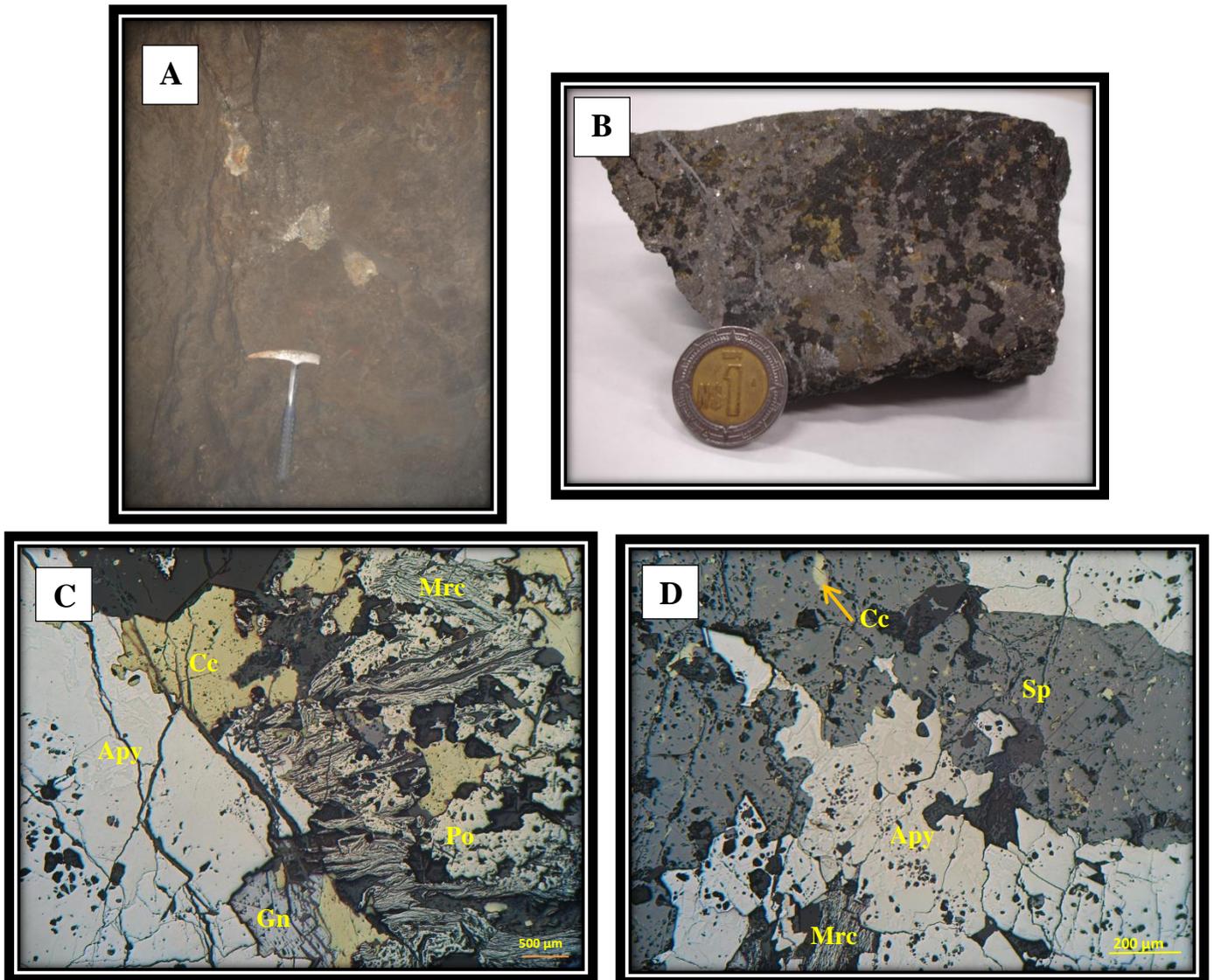
La marcasita se observan en cristales anhedrales, se presenta como un borde de reacción en algunas partes de la pirrotita, se observan inclusiones de cristales anhedrales de calcopirita y minerales transparentes en ocasiones en intercrecimiento mutuo en forma anhedral. (Fotografía 5, C y D).

La pirrotita se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociada a la marcasita producto de su alteración, se observan inclusiones de cristales anhedrales en intercrecimiento mutuo con mineral transparente. (Fotografía 5, C y D).

La galena se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociada a la calcopirita y se observan inclusiones de cristales anhedrales en intercrecimiento mutuo con mineral transparente. (Fotografía 5, C y D).

Mineral transparente se observa en cristales anhedrales, rellenando vetillas, en algunos casos estos cristales se observan en forma hexagonales (secciones de granate?) y radiales (silicatos de calcio?) en intercrecimiento mutuo con los sulfuros. (Fotografía 5, C y D).

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo B-3.



Fotografía 5. A nivel 2250 localización de la muestra M-15; B muestra de mano de la roca mineralizada, se pueden apreciar arsenopirita, esfalerita, calcopirita y minerales transparentes. C se observa cristales anhedrales de marcasita (Mr) la cual se encuentra como bordes de con la pirrotita (Po), el intercrecimiento mutuo de la calcopirita (Cc). D se observa un reemplazamiento del mosaico de cristales euhedrales-subhedrales de la arsenopirita (Apy) por esfalerita (Sp) y algunos minerales transparentes.

En la parte alta del cuerpo mineral Maravillas, en el nivel 2330 (muestra 26), la zona mineralizada presenta los siguientes minerales que se observan a simple vista, los cuales son: pirrotita, esfalerita, calcopirita y algunos minerales transparentes; presentando una textura inequigranular. (Figura 6, A y B).

Está constituida por cristales de: pirrotita (35%), esfalerita (20%), calcopirita (15%), arsenopirita (5%) y minerales transparentes (25%); se observa una textura de reemplazamiento. (Fotografía 6, C y D)

La pirrotita se observa como islas y continentes en el mosaico de sulfuros, está asociada con la calcopirita, se observa en algunas partes inclusiones de cristales euhedrales de sección rómbica de arsenopirita y minerales transparentes en intercrecimiento mutuo y en formas redondeadas. (Fotografía 6, C y D)

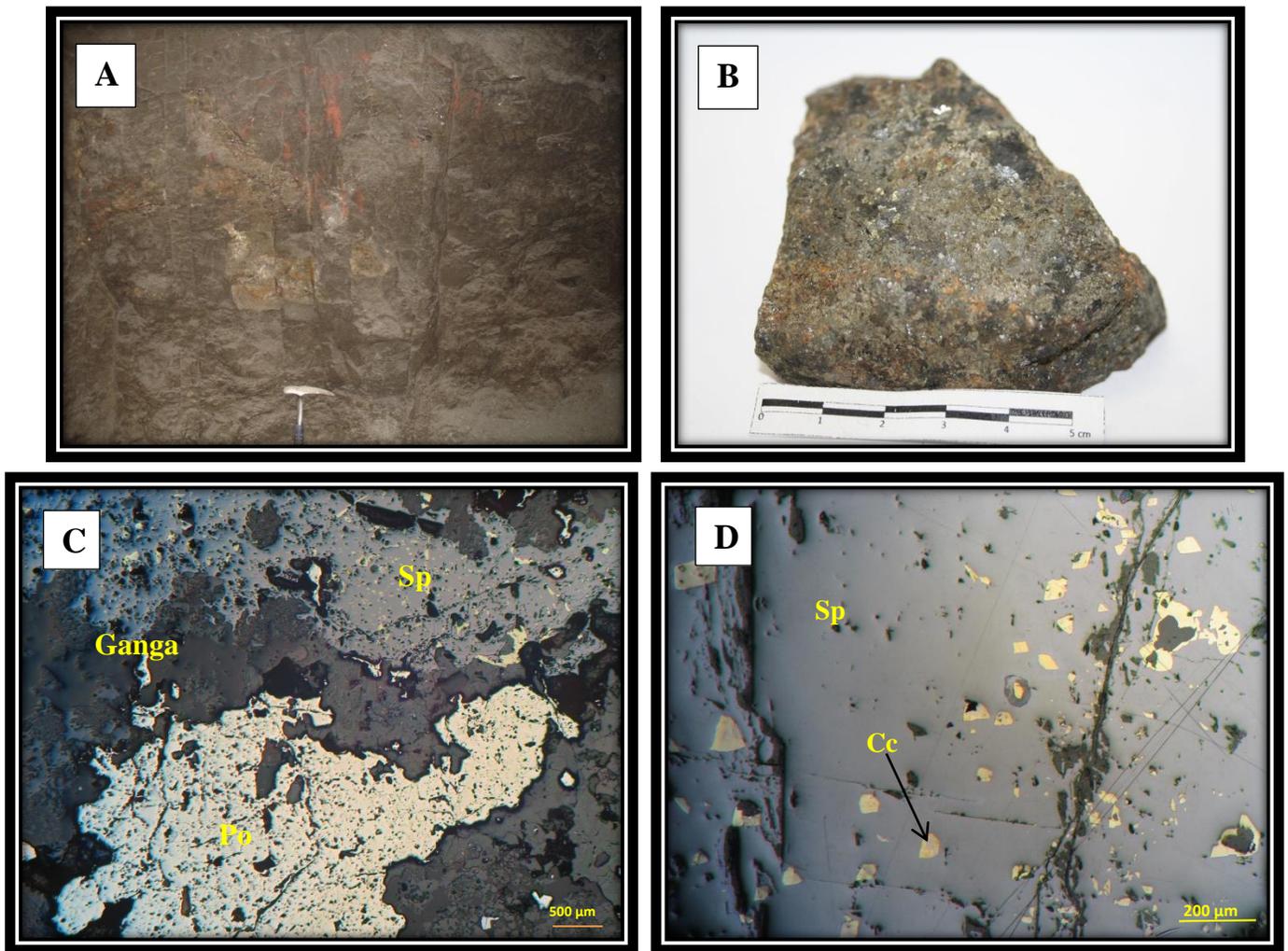
La esfalerita se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociada a la pirrotita, se observan inclusiones de cristales anhedrales de calcopirita y minerales transparentes en intercrecimiento mutuo. (Fotografía 6, C y D)

La calcopirita se observa en cristales anhedrales, se presenta en cristales anhedrales de esfalerita, pirrotita y minerales transparentes. (Fotografía 6, C y D)

La arsenopirita se observa en cristales subhedrales, se observa inclusiones de cristales anhedrales de minerales transparentes, también en intercrecimiento mutuo con el mineral transparente. (Fotografía 6, C y D)

Mineral transparente se observa en cristales anhedrales, presenta un intercrecimiento mutuo con todos los sulfuros y presentan formas redondeadas, en algunas partes se presenta como cristales de forma radial (silicatos de calcio?) y en cristales en forma hexagonales (secciones de granate?). (Fotografía 6, C y D)

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo B-4.



Fotografía 6. A nivel 2330 localización de la muestra M-26; B muestra de mano de la roca mineralizada, se pueden apreciar minerales como pirrotita, esfalerita, calcopirita y minerales transparentes. C se aprecian cristales anhedrales de esfalerita (Sp) y pirrotita (Po). D se observa pequeños cristales anhedrales de calcopirita (Cc) los cuales están siendo reemplazados por la esfalerita (Sp).

3.1.3 Minerales transparentes

Existen tres minerales de ganga con mayor abundancia, siendo la calcita la más abundante, seguida por granate y cuarzo, además en algunas zonas predomina la wollastonita, intercrecida con espurrita y otros silicatos de calcio asociados al proceso metasomático, que se identificaron en el estudio de difracción de rayos x. (Anexo D-1)

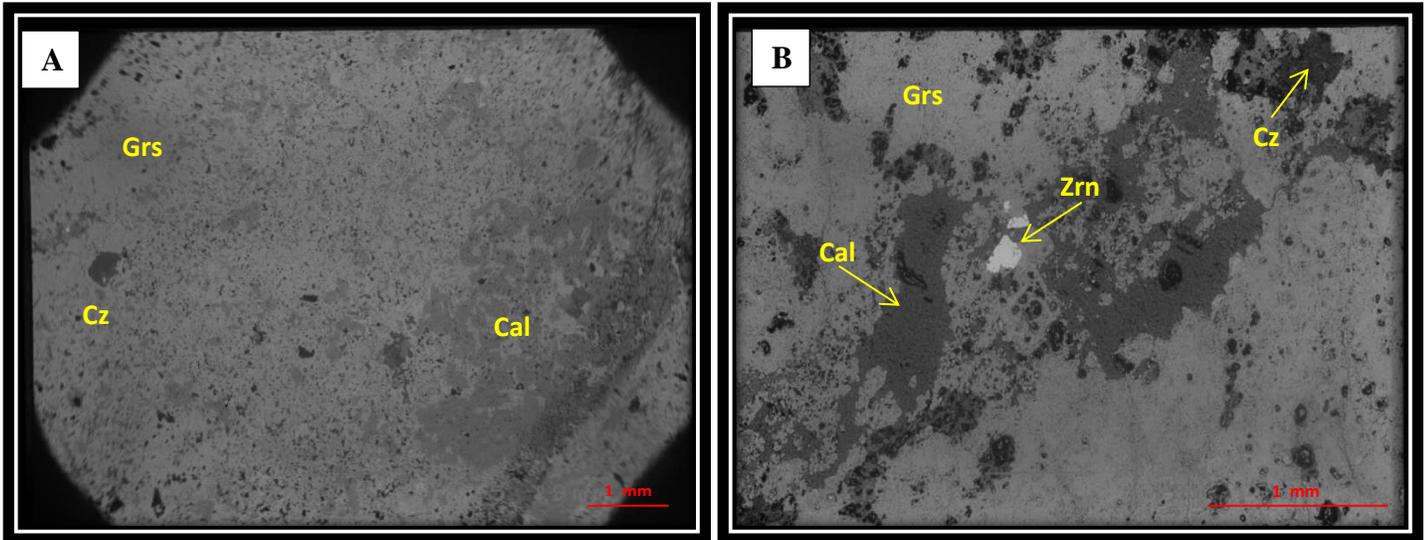
La calcita se encuentra como mineral esencial de la roca encajonante (Caliza y caliza recristalizada), también se observa rellenando vetillas, que se emplazan a través de las fracturas de la roca, en algunos casos ocasionándole un aspecto brechoide y también está formando un mosaico con los sulfuros.

El granate al igual que la calcita es un mineral muy abundante dentro del yacimiento, siendo el principal constituyente de los skarns encontrados en el cuerpo Maravillas y en otras partes del yacimiento. Debido a que el granate presenta distinto color y que con base en su color sirven como guías en la exploración, se decidió caracterizarlos para conocer a que fase mineral pertenecen, por lo que se hicieron estudios de Microscopía electrónica de barrido (MEB).

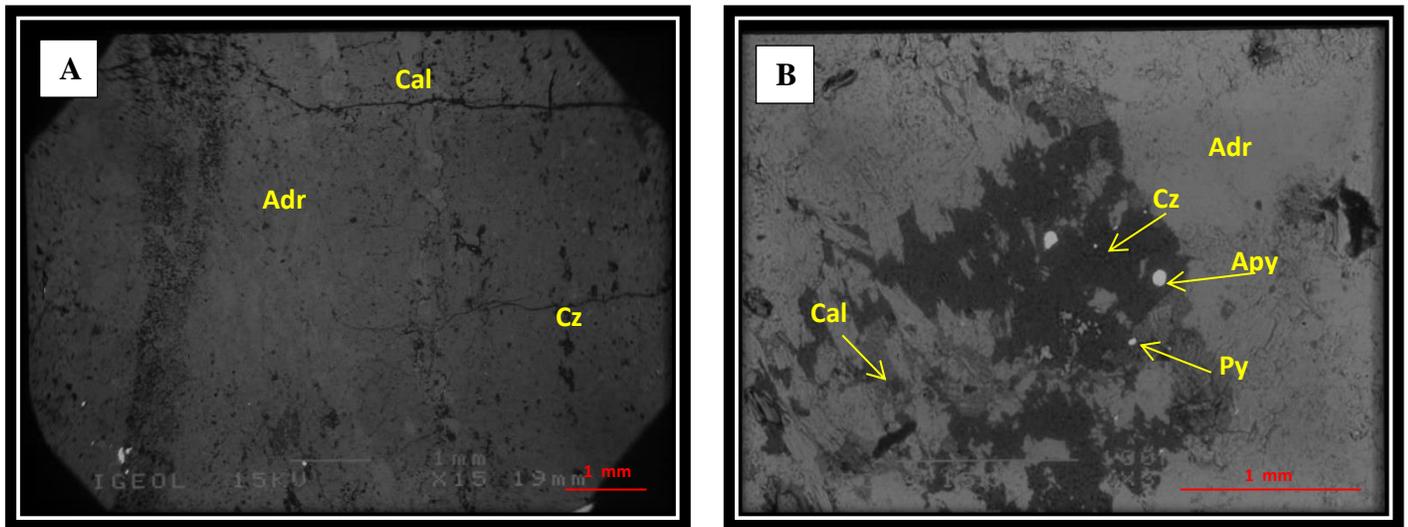
En el estudio al MEB se encontró que el granate de color verde corresponde a una grosularita (Anexo C-1) cuyo análisis de energía dispersiva dio como resultado una asociación mineralógica de cuarzo, calcita y circón. (Fotografía 7). Mientras que el granate de color café corresponde a una andradita (Anexo C-2) el cual esta asociación con calcita, cuarzo y arsenopirita en cristales de forma subhedrales. (Fotografía 8).

En la roca encajonante se observan bandas de color blanco, localmente se le conocen como pedernal, se observaron cristales finos lo cual no se pudo identificar en el microscopio por lo que se mandaron a realizar estudios de difracción de rayos x, indicando una asociación mineralógica de silicatos de calcio de alta temperatura.

El cuarzo se observa rellenando las vetillas, emplazadas en las fracturas de las rocas.



Fotografía 7. A imagen panorámica de la muestra a estudiar; B Se puede apreciar un mineral muy brillante en el centro de la fotografía, este mineral corresponde a un circón de forma subhedral, se puede observar un cuarzo de forma anhedral el cual esta de color gris oscuro, de color gris medio se observa una calcita y de color gris claro se aprecia un granate de grosularita. En la muestra también se encontraron minerales asociados como plagioclasas y diopsida.

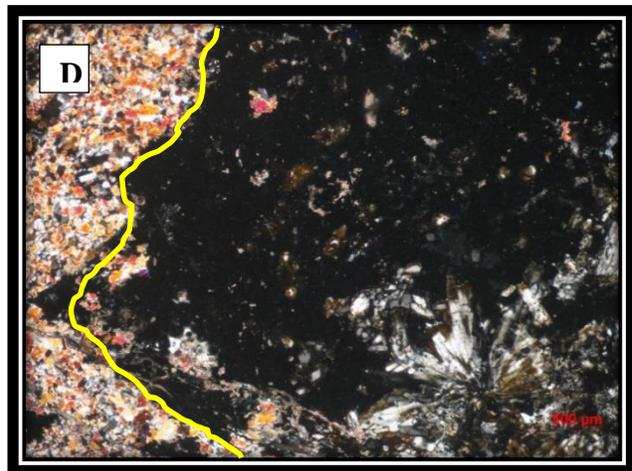
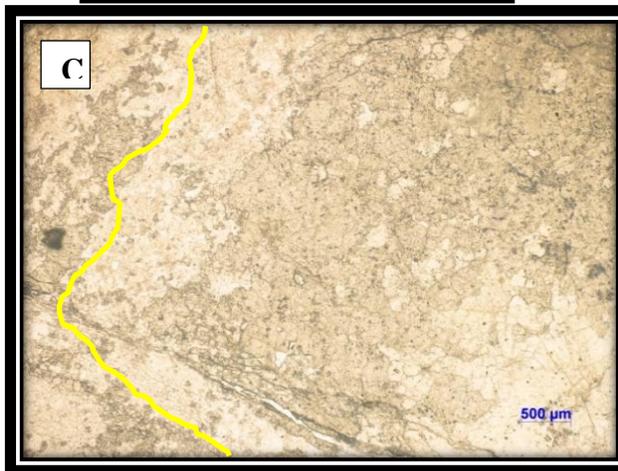


Fotografía 8. A imagen general de la muestra analizada; B se observa cristales brillantes de forma redondeada que corresponde a la arsenopirita, se observa un cristal brillante de forma anhedral de grano fino al cual corresponde a una pirita, de color gris oscuro se aprecian cristales anhedrales que corresponde a un cuarzo, de color gris medio se observa una calcita de forma subhedral y de gris claro se aprecia un granate andradita

En la parte baja del cuerpo Maravillas, nivel 2200 (muestra M-1), se localiza el skarn, donde se observan intercalaciones de bandas de color café que corresponden a granate, que alternan con bandas de color blanco que localmente se le conoce como pedernal, presentando una textura brechada. (Fotografía 9, A y B).

La banda café está constituida por cristales de: granate (40%), diópsida (20%), calcita (20%), wollastonita (15%) y opacos (5%), presenta una textura granoblástica. En la banda blanca se observan cristales de grano muy fino (debido al tamaño de grano, se mandó a realizar un estudio de DRX). Las bandas blancas localmente se le conoce como pedernal, con el estudio de DRX se obtuvieron los siguientes minerales: wollastonita (CaSiO_3), cuspidina ($\text{Ca}_4\text{F}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), scawtita ($\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}2\text{H}_2\text{O}\cdot\text{CO}_3$) y larnita (Ca_2SiO_4); que son silicatos de calcio formados por un metasomatismo de contacto a altas temperaturas; presenta una textura porfidoblástica. De acuerdo con sus características se clasifico a la roca como skarn de granate y wollastonita. (Fotografía 9).

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo A-1 y observar el análisis de DRX en el Anexo D-1.



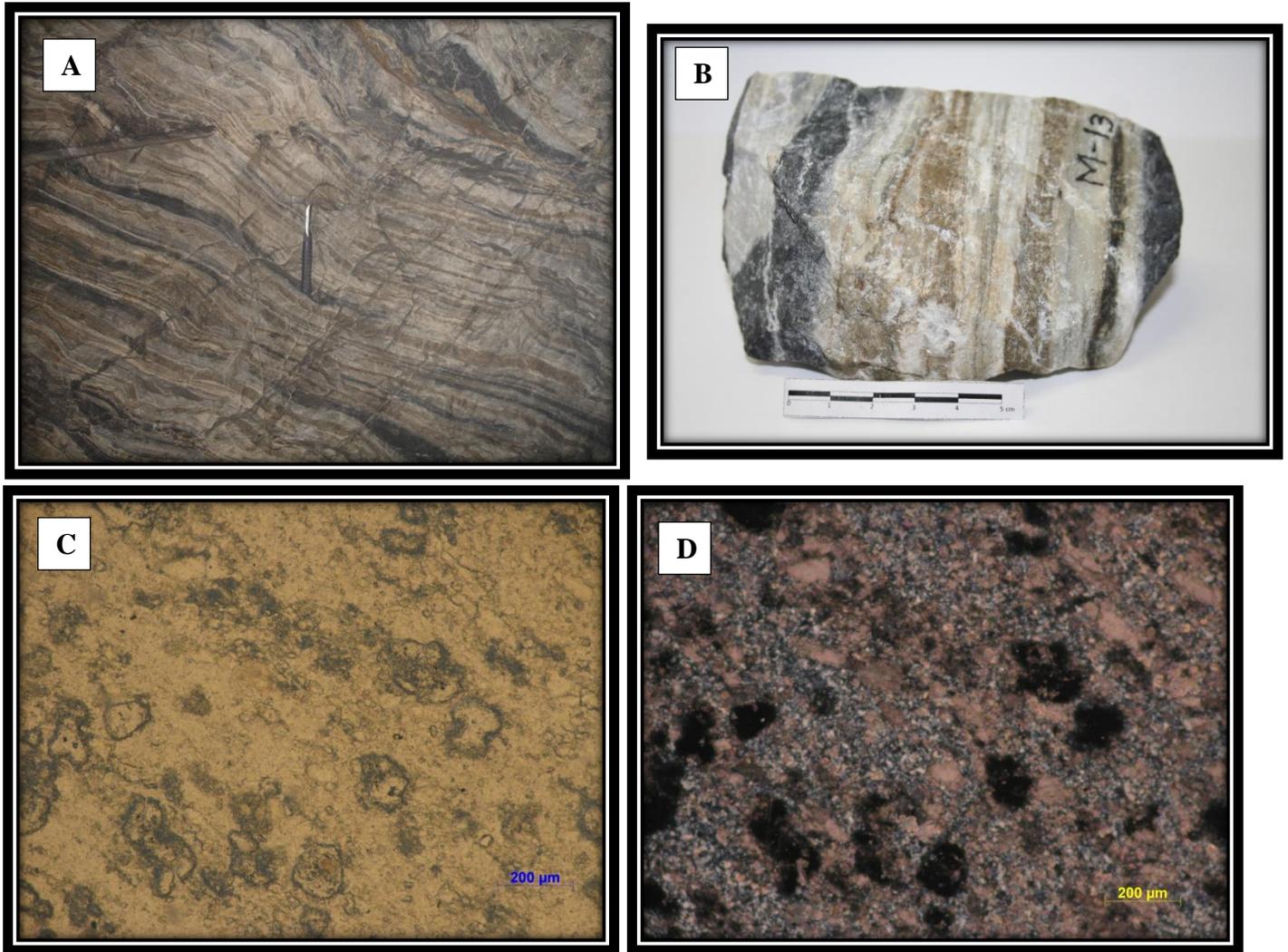
Fotografía 9. A sitio donde se extrajo la muestra M-1, se localiza el endoskarn; **B** muestra de mano, se observan banda de color café y blanco; **C** y **D** en la parte superior izquierda se aprecia una textura porfidoblástica compuesta por wollastonita, cuspidina, scawtita y larnita, en la parte central se observa una textura granoblástica; **C** campo observado con luz paralela y **D** campo observado con nicoles cruzados.

En la parte media del cuerpo Maravillas, en el nivel 2235 (muestra M-13), se localiza el skarn, donde se observan intercalaciones de bandas de color café, que alternan con bandas de color blanco y con bandas de color gris oscuro. (Fotografía 10, A y B).

Está constituida por cristales de: calcita (45%), granate (30%), cuarzo (15%), opacos (7%) y un mosaico formado por cristales de grano fino los cuales no se pueden identificar (3%). Se observan dos etapas de granate, la primera se observan en bandas en cristales anhedrales, mientras que en la segunda se observan de cristales redondeados de forma no homogénea. La calcita se observan tres etapas, la primera se observa en bandas con cristales anhedrales,

la segunda se observa una caliza no homogénea con cristales anhedrales a subhedrales y la tercera se observan rellenando vetillas con cristales euhdrales; presenta una textura granoblástica. De acuerdo con sus características se clasifico a la roca como skarn de granate y wollastonita. (Fotografía 10, C y D)

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo A-4.



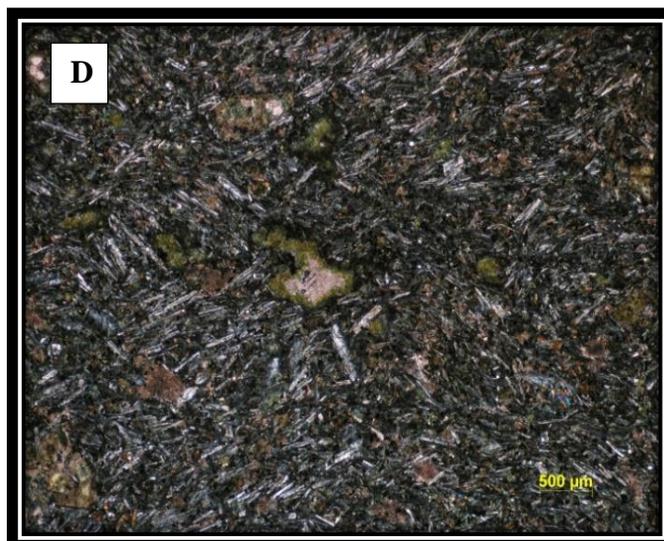
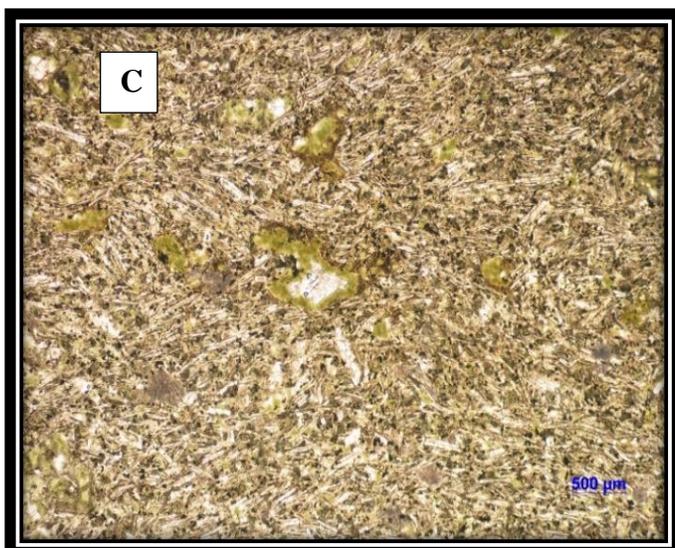
Fotografía 10. A sitio donde se extrajo la muestra M-13, se localiza en el endoskarn; B muestra de mano, se observan banda de color café, blanco y gris; C y D se observa una textura granoblástica, se pueden apreciar cristales de cuarzo de grano fino, granate de forma subredondeado y una caliza no homogénea, C campo observado con luz paralela y D campo observado con nicols cruzados.

3.1.4 Descripción y clasificación de los diques en el cuerpo Maravillas

En la parte baja del cuerpo Maravillas, en el nivel 2205 (muestra M-3), se localiza un dique de color negro, de textura afanítica, este dique está alojado en la caliza recristalizada, se encuentra casi vertical, con un espesor que varía de 60 - 40 cm. Fotografía 11, A y B.

Este dique está constituida por cristales de: plagioclasa (andesina 55%), clorita (15%), piroxeno (augita 15%), calcita (10%) y opacos (5%). En la clorita se observan parches de calcita como pseudomorfismo; se observan dos fases de la calcita, en la primera se aprecian cristales subangulos mientras que en la segunda se observa la calcita en la clorita. De acuerdo con su composición mineralógica esta muestra se corresponde a una andesita de augita, parcialmente cloritizada y carbonatada; se observa una textura microlítica. (Fotografía 11, C y D).

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo A-2.



Fotografía 11. A sitio donde se extrajo la muestra M-3 se observa el dique casi vertical, B muestra de mano, C y D se observa una textura microlítica, se pueden apreciar cristales de plagioclasa, clorita y calcita formando parches como remplazamiento de antiguos fenocristales., C campo observado con luz paralela y D campo observado con nicols cruzados.

Muestra Dique maravillas tiene gran importancia debido a que este dique favoreció la mineralización del cuerpo, el cual lleva el mismo nombre.

El dique Maravillas presenta dos tipos de roca, la primera pertenece a una diorita, macroscópicamente está constituida por cristales de plagioclasa y anfíbol; se observa una textura porfídica de grano medio. (Fotografía 12, A).

Está constituida por cristales de: plagioclasa (andesina 60%) se observan fenocristales de forma subhedrales, hornblenda (10%) en cristales anhedrales, biotita (13%) en cristales anhedrales, clorita (5) en cristales anhedrales, apatita (5) en cristales subhedrales, piroxeno

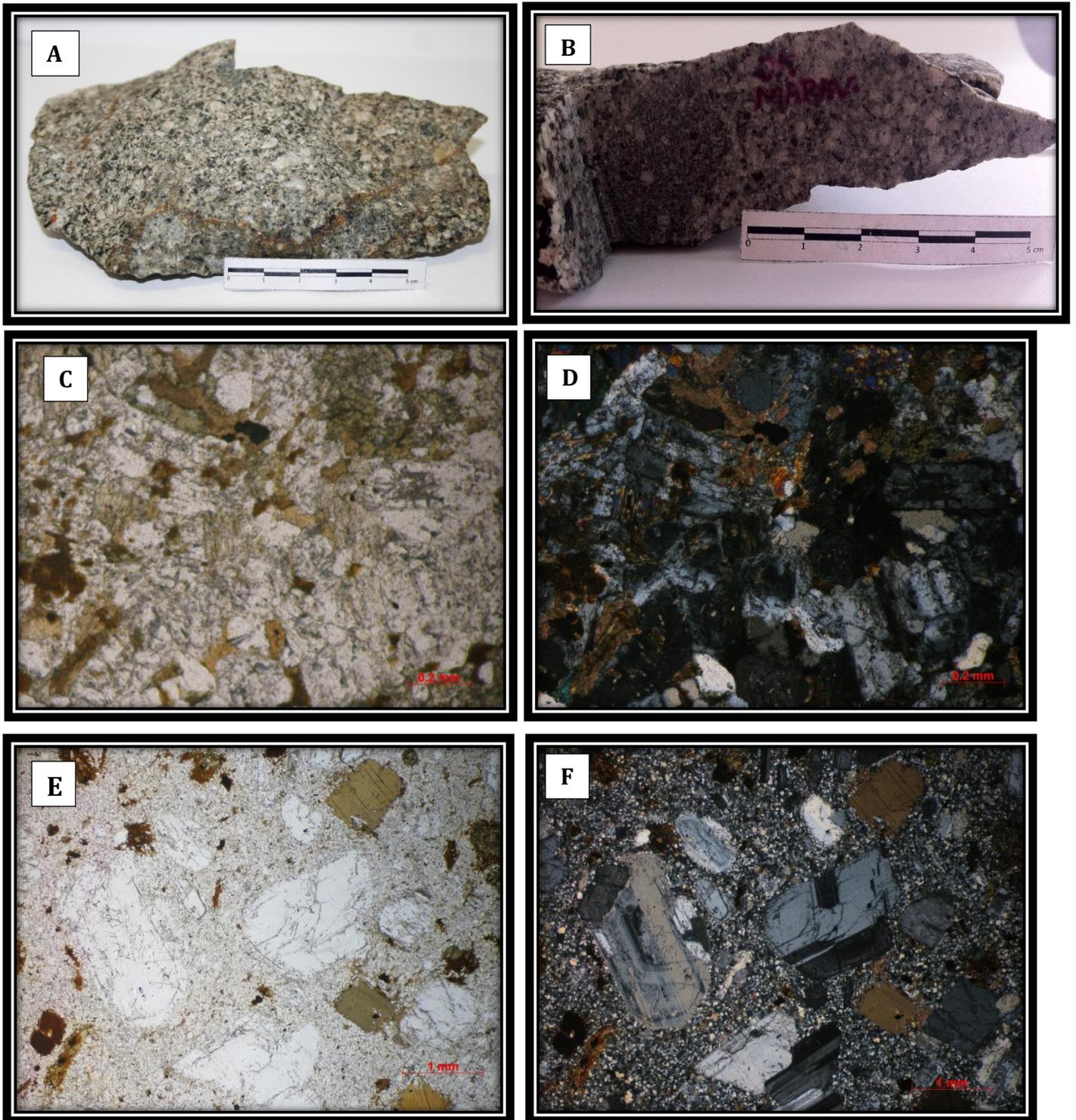
(5%) en cristales subhedrales y minerales opacos (2%) en subhedrales de sección cuadrada; se observa una textura holocristalina-equigranular. De acuerdo con su composición mineralógica esta muestra se corresponde a una diorita de hornblenda afectada parcialmente por cloritización. (Fotografía 12, C y D).

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo A-6.

La segunda roca pertenece a una granodiorita, macroscópicamente se aprecian fenocristales de plagioclasa y anfíbol; se observa una textura porfídica. (Fotografía 12, B).

Está constituida por cristales de: plagioclasa (andesina 40%) como fenocristales subhedrales de forma tabular, hornblenda (15%) como fenocristales anhedrales, biotita (10%) en cristales anhedrales, clorita (15%) en cristales anhedrales, cuarzo (15%) en cristales anhedrales a subhedrales, opacos (5%) en cristales subhedrales . Se puede apreciar una matriz de cristales de cuarzo redondos, de grano muy fino, en algunas zonas se puede observar un cuarzo de forma subhedral de grano medio; se observa una textura porfídica. De acuerdo con su composición mineralógica esta muestra se corresponde a un pórfido granodiorítico parcialmente cloritizado. (Fotografía 12, E y F).

Una descripción textural más detallada puede consultarse en el Anexo A-7.



Fotografía 12. A muestra de mano de la diorita; B muestra de mano de la granodiorita; C y D se una textura holocristalina-equigranular, se observan cristales de plagioclasas, hornblenda, biotita, clorita; E y F se aprecia una textura porfídica, se observan cristales de hornblenda, biotita, plagioclasa con una matriz de cuarzo de grano fino.

3.1.4 Asociación Mineralógica

La mineralogía del cuerpo Maravillas es muy compleja. Las rocas existentes antes de la mineralización pertenecen a una caliza de la Formación El Doctor facies La Negra y un intrusivo de composición diorítica.

Se observan tres etapas que ayudaron a la formación del cuerpo mineralizado Maravillas:

1.- Debido a los efectos térmicos y por la presión que sufrió la caliza ocasionada por el dique maravillas se originó la recristalización de la caliza.

2.- En la segunda etapa se originó debido al proceso metasomático, los fluidos emanados del intrusivo se combinaron con la caliza dando origen al skarn de granate y skarn de wollastonita.

Con base en los resultados a las texturas de los minerales del skarn, se pudo determinar la secuencia mineralógica.

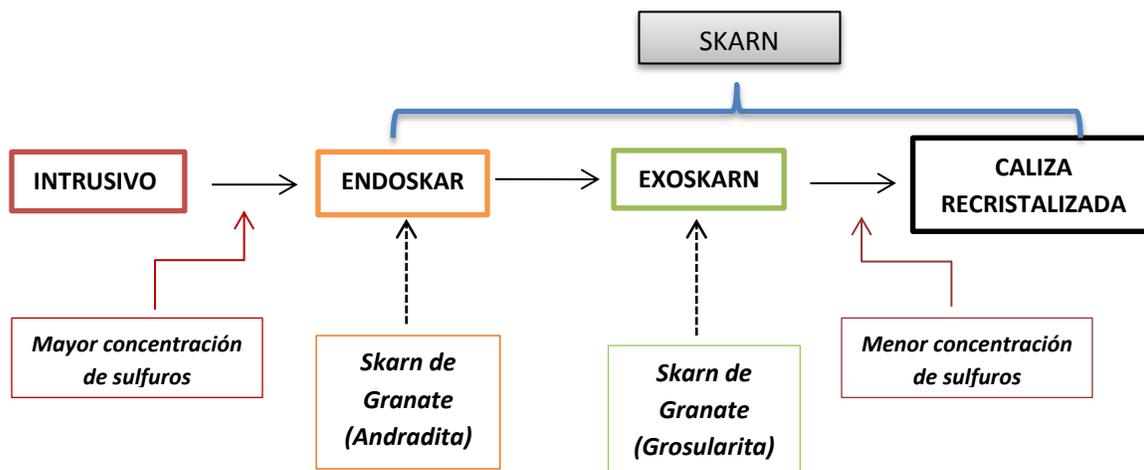
| | <i>Temprano</i> -----> <i>Tardío</i> |
|--|--------------------------------------|
| <i>Calcita</i> | - - - - - = = = = |
| <i>Cuarzo</i> | + + + + = = = = |
| <i>Granate</i> | + + + + |
| <i>Wollastonita</i> | + + + + |
| <i>Diópsida</i> | + + + + |
| <i>Asociación de silicatos de calcio</i> | + + + + |
| <i>Sulfuros</i> | = = = = |

Asociación mineralógica del cuerpo Maravillas. Formación del cuerpo Maravillas (- - -), formación del Skarn (+ + +), reemplazamiento de óxidos y sulfuros, y alteraciones hidrotermales (= = =).

3.- Estas dos etapas descritas, favorecieron el reemplazamiento de los sulfuros, consistió en la adición de fluidos que contienen los minerales metálicos y que al entrar en contacto con los silicatos de calcio los reemplazaron.

La mineralización de los sulfuros se encuentran restringidos por el Skarn de granate (grosularia-andradita) y por la calcita.

El zoneamiento que se presenta en el cuerpo se encuentra a partir del intrusivo hacia su alrededor, ya que se puede encontrar de la siguiente manera:



Esta distribución con frecuencia se puede observar incompleta o repetitiva, esto se debe a que alguno de los miembros del skarn pueden estar ausentes o presentes.

Con base a las texturas de los sulfuros, se pudo determinar la secuencia mineralógica en las que se encuentran.

| <i>Mineral</i> | <i>Etapa 1</i> | <i>Etapa 2</i> | <i>Etapa 3</i> | <i>Etapa 4</i> |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>Galena</i> | | --- | --- | --- |
| <i>Esfalerita</i> | | --- | --- | --- |
| <i>Calcopirita</i> | | --- | --- | --- |
| <i>Pirita</i> | | --- | --- | --- |
| <i>Pirrotita</i> | --- | | | |
| <i>Arsenopirita</i> | | --- | | |
| <i>Marcasita</i> | | --- | | |
| <i>Mineral transparente</i> | --- | --- | --- | --- |

4. Evaluación de Reservas

En el presente capítulo se explica el método empleado para la evaluación de reservas del cuerpo Maravillas del yacimiento minero, abarcando un conjunto de conceptos para tener el conocimiento necesario que se utilizara para entender el contexto en el cual se desarrolló el trabajo de la mina La Negra.

Se entiende por reserva de un yacimiento al volumen de un cuerpo mineralizado que será posible extraer, a lo largo de su vida útil.

Tienen como objetivo fundamental la mejor estimación de la ley y el tonelaje de los bloques de un cuerpo mineral así como determinar los errores probables de la estimación con cierto nivel de confianza.

La cantidad de reservas de un yacimiento, como uno de los factores principales que determinan su viabilidad económica, posee una gran influencia en la vida útil del yacimiento, su producción anual y la decisión final de construir la empresa minera.

Los distintos métodos de estimación de recursos que se emplean en la actualidad son definidos por los principios de interpretación empleados y las técnicas de interpolación espacial. Así, tenemos los métodos clásicos de cálculos desarrollados que se han utilizado desde los inicios de la minería hasta nuestros días y que se basan en procedimientos manuales y en donde los principales parámetros son estimados a partir de la media aritmética y la media ponderada.

La estimación de recursos mineros se puede dividir en dos partes:

- a) **Estimación global:** *interesa estimar la ley media y el tonelaje de todo el yacimiento (o de una zona grande S dentro del depósito), (Figura 9).*

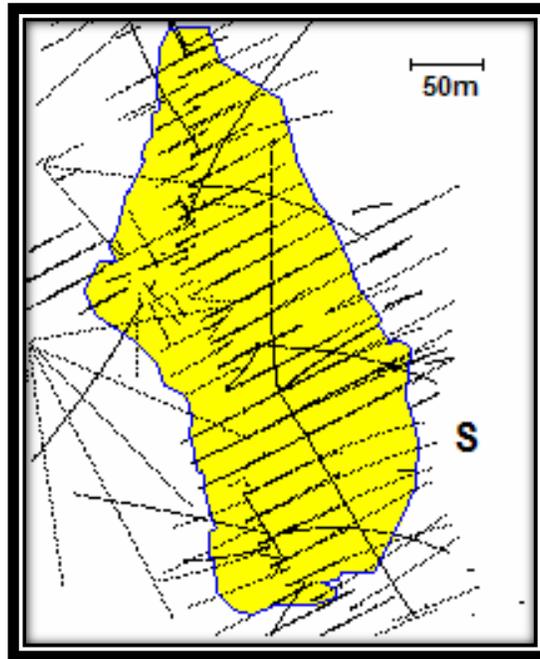


Figura 9. Zona 3D a estimar e información disponible.

b) **Estimación local:** Interesa estimar la ley media de unidades o bloques dentro de S, con el fin de localizar las zonas ricas y pobres dentro de esta zona S. (Figura 10).

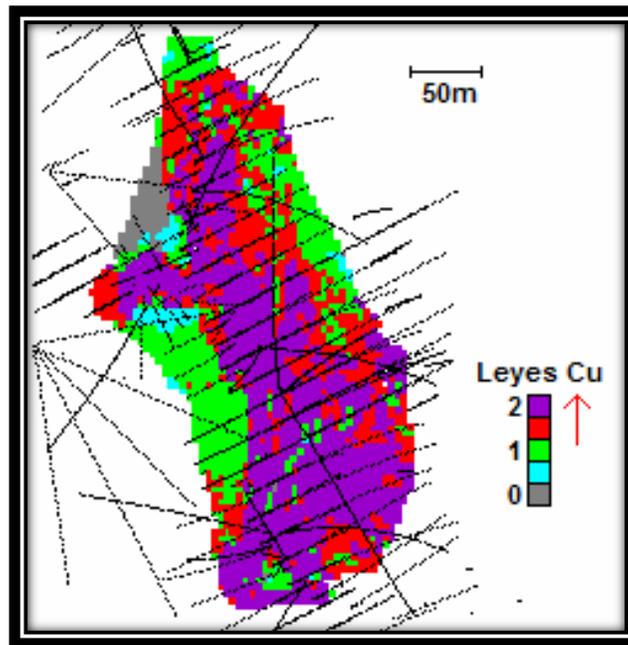


Figura 10: Estimación local con bloque unitario o unidad básica de cálculo.

La estimación global y local están relacionadas porque se pueden obtener valores globales al componer los valores locales de los bloques.

Clasificación de métodos para el cálculo de reservas.

Dependiendo del criterio que se emplee para subsistir o transformar el cuerpo explorado en bloques auxiliares y de la forma que se use para los cálculos numéricos de las variables, los métodos convencionales de estimación de reservas pueden ser clasificados dentro de cuatro grupos, además de dos métodos más modernos que involucran el uso de programas de cómputo especiales y técnicos altamente capacitados en estas disciplinas, quienes finalmente harán la interpretación de la información obtenida en campo.

La clasificación de los métodos de evaluación de reservas minerales es:

1. *Métodos convencionales (C. Constantine).*
2. *Métodos de factores y áreas de influencia.*
 - a) *Método analógico.*
 - b) *Método de bloques geológicos.*
3. *Métodos de bloques minables.*
4. *Métodos de secciones transversales.*
 - a) *Método estándar.*
 - b) *Método lineal.*
 - c) *Método de osolíneas.*
5. *Métodos analíticos (geométricos).*
 - a) *Método de triángulos.*
 - b) *Método de polígonos.*
6. *Métodos computarizados*
 - a) *Métodos estadísticos*
 - b) *Métodos geoestadísticos*

El método aplicado actualmente por la Compañía Minera Aurcana, corresponde al de los polígonos, para aplicarlo es necesario dividir gráficamente el cuerpo mineralizado en bloques de formas geométricas simples (prismas triangulares, prismas poligonales). Los factores para cada bloque se determinan directamente, se calculan valores aritméticos promedio o se emplean determinaciones semejantes.

El método de polígonos (también conocido como prismas poligonales, áreas de igual influencia o áreas de puntos más cercanos), está basado en el concepto de todas las variables determinadas para un cierto punto en un cuerpo mineral, se extienden hasta la mitad de la distancia de los puntos adyacentes que lo rodean, formando así un área de influencia.

El primer paso es elaborar un mapa que muestre una proyección horizontal del área, donde se vaciarán todos los datos disponibles, para después proseguir con la construcción de los polígonos. Estos se formarán, extendiendo la esfera de influencia de un barreno hasta la semidistancia del barreno adyacente, tomando como base una retícula triangular trazada en líneas rectas que unirán los vértices de cada polígono, representado por cada uno de los barrenos adyacentes y más cercanos entre sí. Cada polígono así formado representará una proyección horizontal o lo que es lo mismo, la base de un prisma imaginario con lados T_1 , T_2 , T_3 ... T_n iguales a los espesores del cuerpo mineral.

Para llegar a obtener un cálculo confiable, se divide el depósito en el mayor número posible de polígonos (siempre y cuando la información disponible lo permita), evitando el cruce de líneas.

El área de influencia entre barrenos se puede definir de dos formas.

1. *Por medio del trazo de bisectrices perpendiculares a las líneas de unión entre dos barrenos en su punto medio, (Figura 11).*

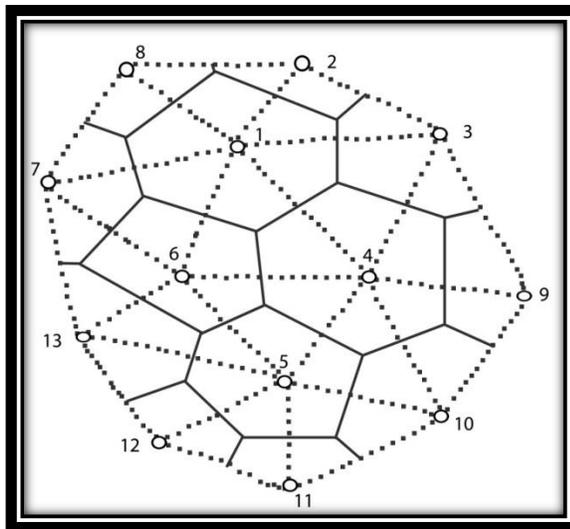


Figura11. Trazo de polígonos por bisectrices perpendiculares.

-
-
2. *Por medio de bisectrices angulares trazadas a partir de los ángulos formados por la retícula de los triángulos base, (Figura 12).*

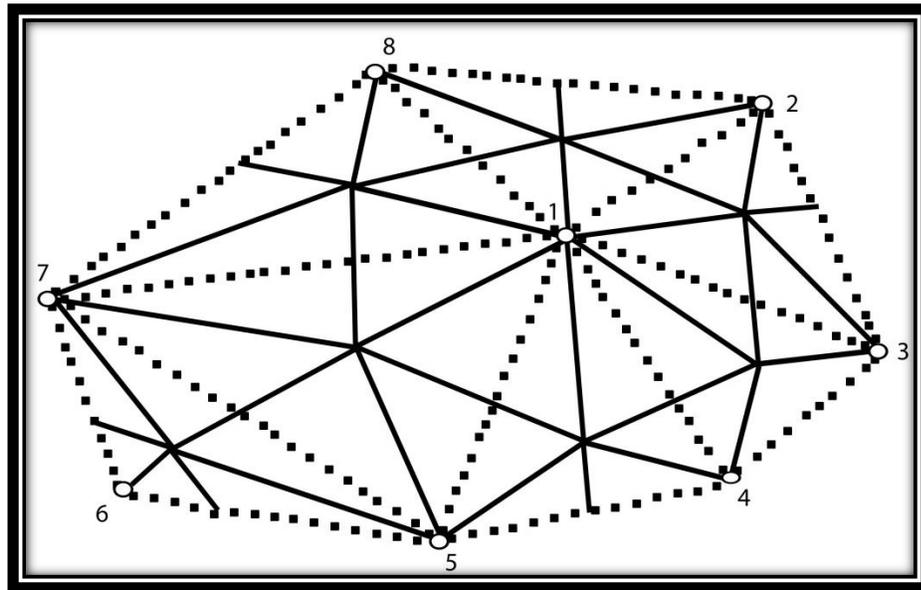


Figura 12. Trazo de polígonos por bisectrices angulares.

La primera técnica es reconocida como la más adecuada, confiable, efectiva y segura.

Los pasos para la aplicación del método de polígonos es la siguiente:

1. *Elaboración de planos y vaciado de datos.*
2. *Construcción de los polígonos a partir de una base triangular, siendo un ordenamiento definido.*
3. *Cálculo de las reservas de cada área o bloque, asumiendo que cada una de ellas estará afectada proporcionalmente por los datos de ley, densidad y magnitud del barreno conocido alrededor del cual se formó el área de influencias.*
4. *Agrupación de bloques con relación a leyes, anchos, confiabilidad, etc., para poder sumar las reservas de acuerdo con su categoría, en: probadas, probables e inferidas.*

En algunos casos los puntos de información están muy distantes entre sí o donde la continuidad de su confiabilidad sea dudosa, se podrán construir áreas de influencias alrededor de cada punto conocido mediante el uso de un “círculo de influencia”, cuyo diámetro estará dado en función del depósito, de la distancia y distribución de valores que se consideren “confiables”, en cuyo caso, los bloques tendrán formas cilíndricas en lugar de un prisma poligonal.

Métodos de exploración

Uno de los métodos principales que se realiza en la mina es la exploración mediante la barrenación de diamante en “forma de abanico”. Este método además de estudiar el yacimiento, sirve para localizar aquellas zonas donde posiblemente se encuentran alojados los cuerpos de mineralización económica.

Una vez recopilada la información, se selecciona una zona para explorar, para lo cual se selecciona un punto donde sea factible hacer 6 barrenaciones, de las más factibles en la mina son a 60°, 30°, a 0°, a -15°, a -30° y a -60°; la profundidad que llegan alcanzar es de 10 a 50 m, dependiendo el tipo de máquina de perforación (Figura 13). Se hace este tipo de selección para tener un mejor resultado para estudiar la mina y localizar pequeños lentes de cuerpo mineral económico que sea factible de extraer.

Una vez terminada la barrenación se estudia cada núcleo, analizando la zona económica, la cual recorta por la mitad al núcleo y la otra mitad se queda como testigo; posteriormente se mandan a laboratorio para saber si son zonas favorables para su extracción o no.

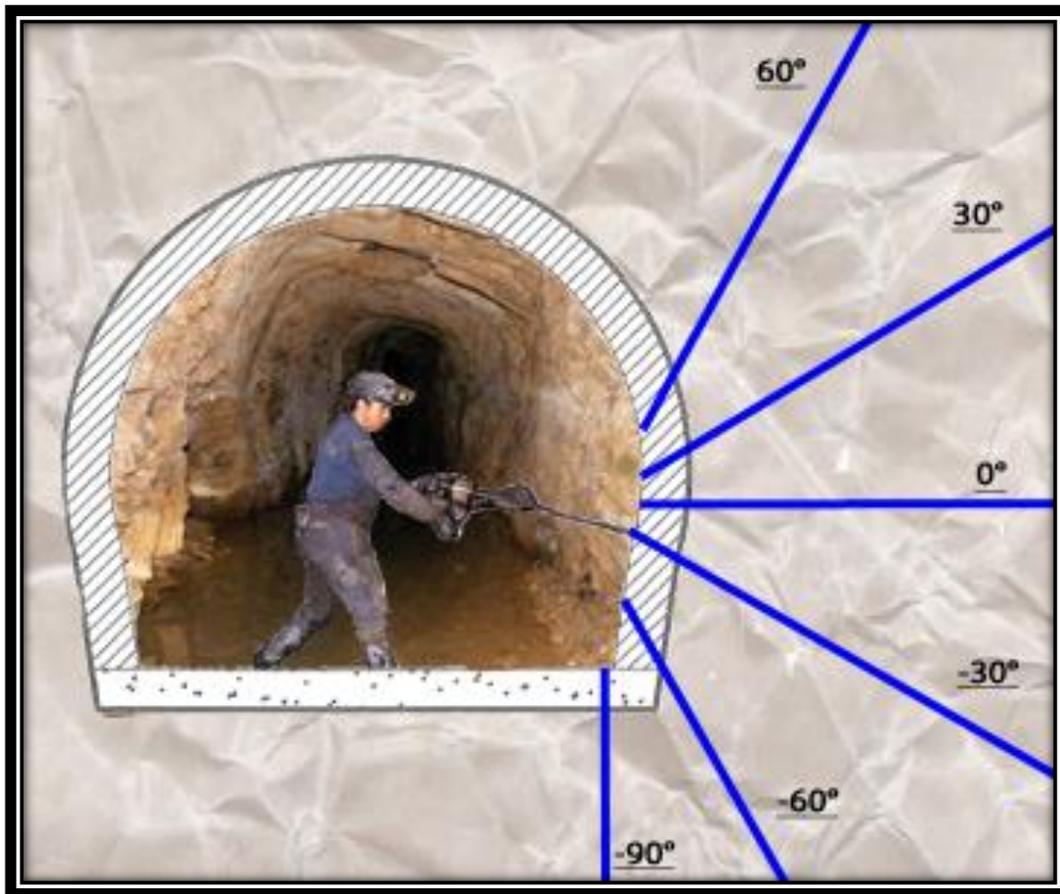


Figura 13. Método de perforación en “forma de abanico”.

Ya terminados los estudios, se analizan aquellas zonas donde la ley de porcentaje es favorable y se digitalizan esos resultados en AutoCAD, digitalizando la profundidad del barreno si se encontraron zonas de mineralización económica, las cuales se van resaltando de color rojo y anotando a un lado los datos que se obtuvieron en laboratorio, (Figura 14).

Otro método que se utiliza es el recorte a disco y se realiza en las tablas del tunel de las zonas de interes para extraer el mineral economico, el método consiste en cortar pequeñas muestras (entre 1 a 2 m de largo por 15 a 20 cm de ancho, de los cuales se cortan pequeños rectangulos de 15 x 10 cm), esta técnica solo se ocupa para rectificar si la zona elegida es factible de extraer.

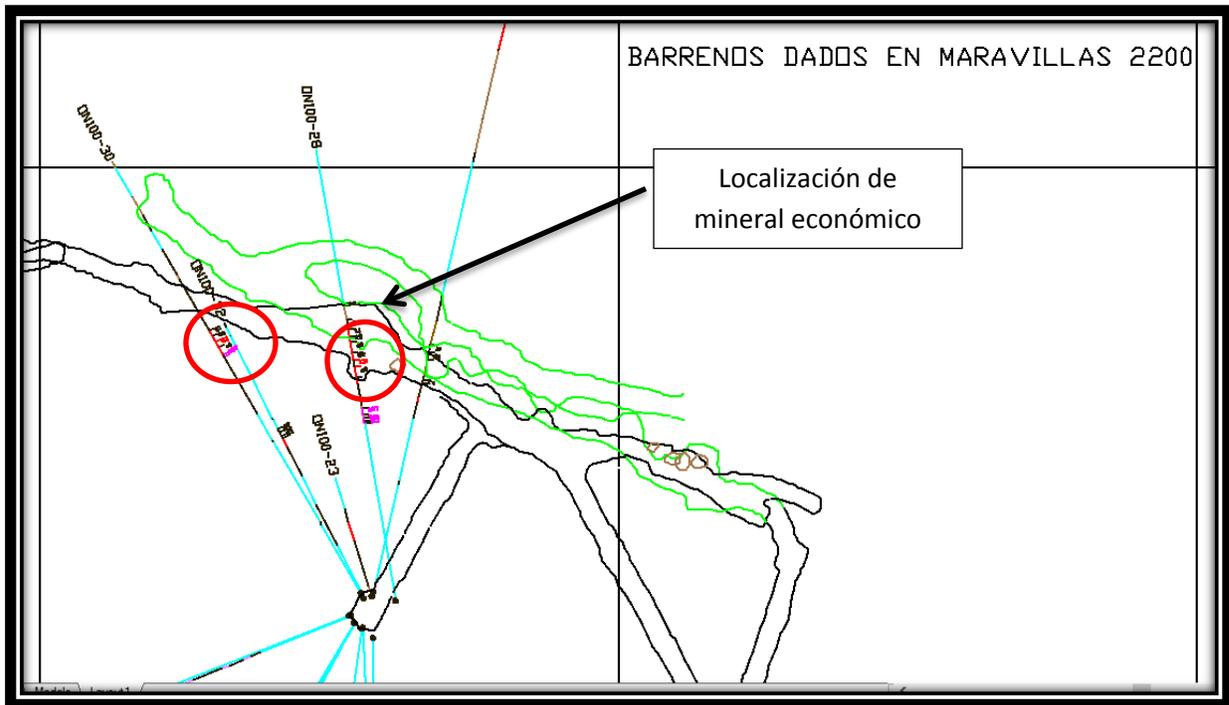


Figura 14. Digitalización de la ley de tonelaje de la barrenación.

El método de muestreo de voladura se basa en recolectar en forma aleatoria muestras de roca posteriores a la voladura, seleccionando trozos de roca de tamaño de 10x 10 cm como máximo. Aunque teóricamente no es confiable, se recomienda recolectar 50% mineral económico y el otro 50% de tepetate para tener un resultado promedio, para este método se recomienda recolectar muestras de 3 kg.

Para el método de esquirlas se toman los fragmentos de roca que ha dejado la barrenación, esta barrenación se hace con maquinaria llamada jumbos, por lo general se hacen perforaciones de forma vertical, esta perforación se realiza en cielo o piso. Se realiza este método cuando se encuentra mineral económicos en el cielo y continua en el siguiente nivel en el piso, preexistiendo una continuidad.

Estos tres métodos solo se utilizan para verificar si aun es economicamente favorable la extracción de mineral y para dar continuidad a cuerpos mineralizados.

Una vez recopilada toda la información se realizan los polígonos y cierran los sólidos en un programa llamado Surpac, generando bloques en 3D de los cuales se van clasificando al

tiempo de reservas probadas, probales e inferidas, para despues digitalizar todo un cuerpo en forma general, (Figura 15).

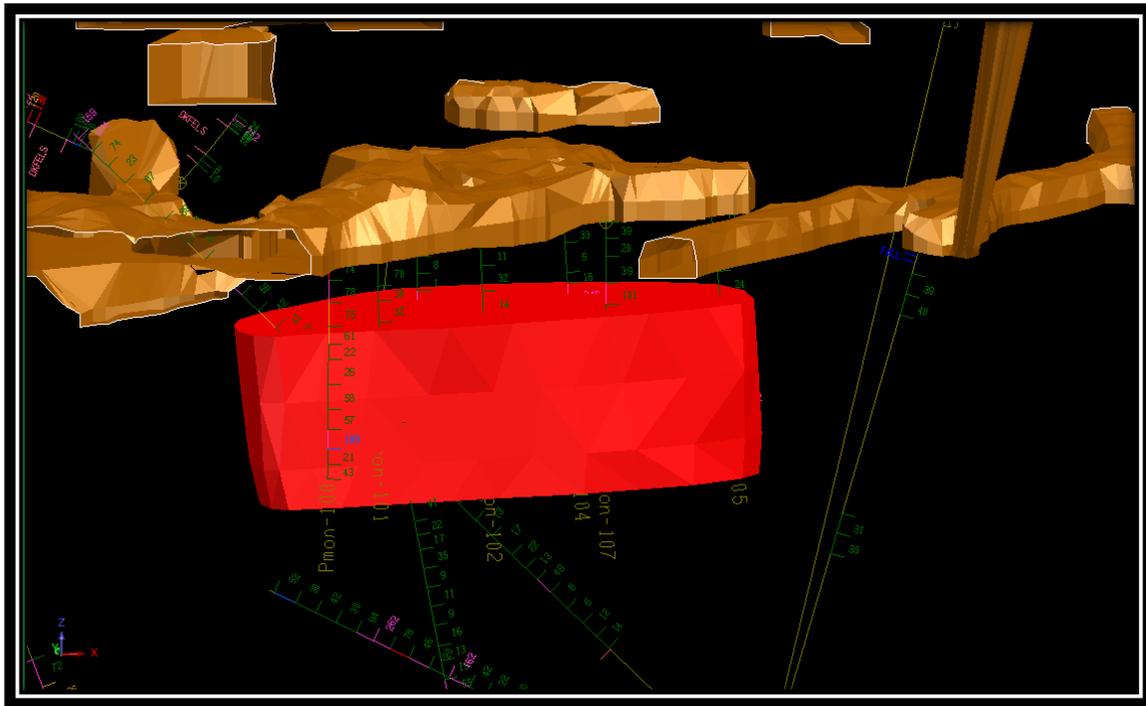


Figura 15. Digitalización de los bloques de resrvas.

4.1 Reservas Probadas

En esta etapa se realizan evaluaciones apropiadas, donde el recurso mineral pueda estimarse con alto nivel de confianza, su tonelaje, densidad, forma, características físicas, ley y contenido mineral. Se basa en exploración detallada y confiable, información sobre muestreo y pruebas obtenidas mediante técnicas apropiadas, de afloramientos, túneles, barrenación y zanjas, las cuales están ubicadas con suficiente cercanía para confirmar continuidad geológica y de leyes.

Esta categoría requiere un alto nivel de confianza en el entendimiento de la geología y controles del yacimiento, la confianza en la estimación es suficiente para permitir la aplicación apropiada de parámetros técnicos y económicos, y para permitir una evaluación de la viabilidad económica.

Una vez recopilada toda esta información, se agrega a Surpac para delimitar los cuerpos minerales, subdividiéndolo en diversos bloques de diferentes grados de confiabilidad.

Algunos elementos que debemos de tomar en cuenta para zonas primordiales para el cálculo de las reservas probables son los siguientes:

- *Aquellas reservas contenidas en cuerpos con producción comercial o donde se hallan realizado con éxito pruebas de producción.*
- *Las reservas contenidas en cuerpos delimitados estructuralmente y estratigráficamente favorables para su extracción.*
- *Las reservas contenidas en áreas adyacentes a las ya estudiadas cuando existe una razonable certeza de producción comercial.*
- *Los volúmenes producibles de áreas aun no estudiadas, situadas entre cuerpos conocidos, donde la condición geológica y de ingeniería indique continuidad.*

4.2 Reservas Probables

El cálculo de las reservas probables es aquella parte de un recurso cuyo tonelaje, morfología, características físicas, leyes y contenido mineral puede estimarse con un nivel de confianza medianamente razonable.

El estimado se basa en la información de exploración, muestreo y pruebas reunidas con técnicas apropiadas de lugares tales como afloramientos, túneles, barrenación y zanjas; no obstante los lugares están demasiados alejados o inadecuadamente espaciados para confirmar la continuidad geológica y de leyes, pero sí lo suficientemente cercanos para asumirlas. La confianza en el estimado resulta suficientemente alta como para aplicar parámetros técnicos y económicos para una posible evaluación de pre-factibilidad económica.

Algunos elementos principales que debemos de tomar en cuenta para zonas primordiales para el cálculo de las reservas probables son los siguientes:

-
-
- *Los volúmenes que podrían recuperarse de yacimientos que han sido atravesados por túneles en los cuales no se han efectuado pruebas de producción, y las características de los perfiles indican con razonable certeza la probabilidad de su existencia.*
 - *Los volúmenes estimados en estudios de geología, con menor certeza que en el caso de reservas probadas, podrían recuperarse de cuerpos probados si se aplicara procedimientos comprobados de recuperación suplementaria.*

4.3 Reservas Inferidas

El cálculo de las reservas inferidas parte de recurso cuyo tonelaje, leyes y contenidos minerales pueden estimarse con un bajo nivel de confianza, resulta inferido a partir de evidencias geológicas y/o leyes asumidas por muestras superficiales pero no verificadas en profundidad. La confianza en el estimado es insuficiente como para aplicar parámetros técnicos y económicos o realizar una evaluación económica de pre-factibilidad que merezca darse a conocer al público.

Algunos elementos principales que debemos de tomar en cuenta para zonas primordiales para el cálculo de las reservas inferidas son los siguientes:

- *Los volúmenes sustentados por pruebas de producción o formación que no pueden ser producidos debido a las condiciones económicas en el momento de la estimulación, pero que serían rentables al utilizar condiciones económicas futuras razonables.*
- *Los volúmenes que podrían existir en formaciones con perfiles de pozos o núcleos de formación con características que presentan un alto grado de incertidumbre.*
- *Los volúmenes que podrían existir en áreas donde la interpretación de la información geológica indica la existencia de una estructura mayor que la incluida dentro de los límites de reservas probadas y probables y donde las barrenaciones adicionales fueran del área probada o probable ofrece menor certeza de resultados positivos.*

- *Los volúmenes que podrían existir en segmentos fallados, adyacentes a cuerpos probados, donde existen dudas razonables sobre si ese segmento contiene volúmenes recuperables.*

Resultados Finales

Una vez delimitados todos los bloques que se encuentran en el cuerpo Maravillas se procede a calcular el volumen de cada bloque, posteriormente se realizan los cálculos de las reservas probadas, probables e inferidas, que a continuación se explicaran, (Figura 16).

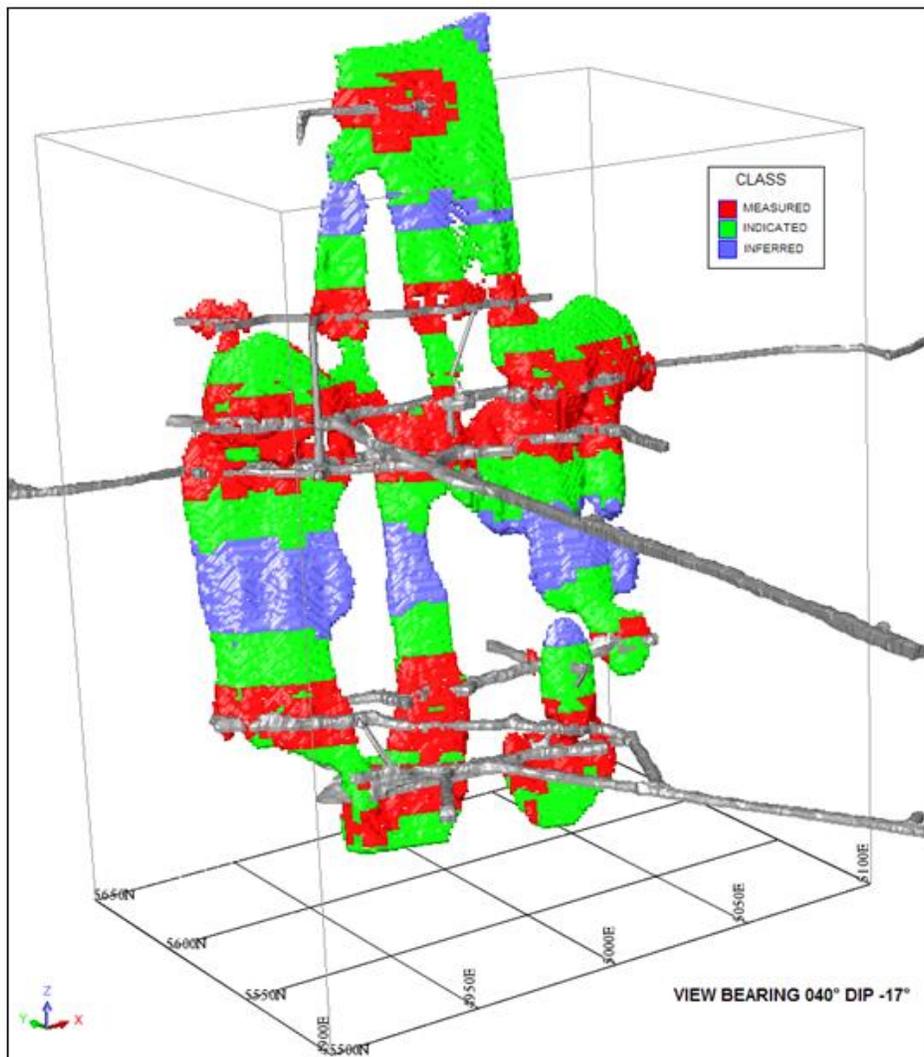


Figura 16. Imagen en 3D del cuerpo Maravillas, dividido por reservas probadas, probables e inferidas.

Para el cálculo de las reservas se deben de tomar en cuenta los siguientes valores:

Cálculo de valor de Mineral

Valores Unitarios

| | |
|----|-------|
| Ag | 0,40 |
| Pb | 0,00 |
| Zn | 5,25 |
| Cu | 43,76 |

Compensaciones a la

Ley

| | |
|--------------------------|------|
| Dilución | 0,00 |
| Factor de Castigo en ley | 1,00 |

Compensaciones al Tonelaje

| | |
|-------------------------------|---------|
| densidad | 3,626 |
| Factor de castigo en tonelaje | 100,00% |

Estos valores son importantes ya que con ellos se calcula cuanta reserva tiene nuestro cuerpo mineral. A continuación se pone un ejemplo para la evaluación:

- *Primero se calcula cuánto hay de mineral en cada bloque, realizando una tabla como la siguiente:*

| Cálculo de Reservas | | | | | | | |
|---------------------|---------|-----|------|------|------|-------|------|
| # Muestra | Ancho | Ag | Pb | Zn | Cu | Fe | As |
| Bloque 1 | 30.000 | 45 | 0,08 | 4,78 | 0,56 | 0,00 | 0,00 |
| Bloque 2 | 600.000 | 89 | 0,61 | 1,72 | 0,71 | 7,02 | 0,90 |
| Bloque 3 | 23.000 | 116 | 0,95 | 3,36 | 0,64 | 12,22 | 1,84 |

- *Una vez realizada nuestra tabla se calcula cuando hay en cada bloque realizando la siguiente formula:*

Valor Minimo

$$= [(\text{Contenido mineral (Ag, Pb, Zn, Cu)}) * (\text{Valor unitario de (Ag, Pb, Zn y Cu)})] * (1 - \text{disolucion}) * (\text{Factor de Castigo de ley})$$

$$\text{Bloque total} = [(\sum \text{Bloques}) * (\sum \text{Anchos})] / (\sum \text{Anchos})$$

Ejemplo:

Se ejemplificara el cálculo del bloque

$$\text{Valor M\u00ednimo} = [(45 * 0.40) + (0.08 * 0) + (4.78 * 5.25) + (0.56 * 43.76)] * (1 - 0) * (1) \\ = 67.80$$

$$\text{Bloque total de Ag} = \frac{[(30,000 * 45) + (600,000 * 89) * (23,000 * 116)]}{(30,000 + 600,000 + 23,000)} \\ = 88$$

| C\u00e1lculo de Reservas | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| # Muestra | Ancho | Ag | Pb | Zn | Cu | Fe | As | Valor Min |
| Bloque 1 | 30.000 | 45 | 0,08 | 4,78 | 0,56 | 0,00 | 0,00 | 67,80 |
| Bloque 2 | 600.000 | 89 | 0,61 | 1,72 | 0,71 | 7,02 | 0,90 | 75,93 |
| Bloque 3 | 23.000 | 116 | 0,95 | 3,36 | 0,64 | 12,22 | 1,84 | 92,69 |
| | | | | | | | | |
| Bloque total | 653.000 | 88 | 0,60 | 1,92 | 0,70 | 6,88 | 0,89 | 76,15 |

Por \u00faltimo se suman todos los bloques correspondientes a cada reserva, en donde se tiene un resultado final para cada reserva del cuerpo Maravillas, en las siguientes tablas se observan los datos finales de extracci\u00f3n:

| Reservas probadas TMS | Ag (g/t) | Pb (%) | Zn (%) | Cu (%) | Fe (%) | As (%) | Val_min US |
|-----------------------|----------|--------|---------|--------|--------|---------|-------------|
| 60.221 | 112,06 | 0,54 | 3,74023 | 0,7439 | 2,01 | 0,57269 | 190,8864769 |

| Reservas probables TMS | Ag (g/t) | Pb (%) | Zn (%) | Cu (%) | Fe (%) | As (%) | Val_min US |
|------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 90.093 | 116 | 0,58 | 3,72 | 0,75 | | | 194,7006 |

| Recurso inferido TMS | Ag (g/t) | Pb (%) | Zn (%) | Cu (%) | Fe (%) | As (%) | Val_min US |
|----------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 38.442 | 98,00 | 0,42 | 4 | 1 | | | 185,90 |

5. Conclusiones y Recomendaciones

- 1.- El cuerpo Maravillas contiene valores económicos de cobre, zinc, plomo y plata. En este estudio se encontró el cobre como calcopirita (CuFeS_2), zinc como esfalerita (ZnS), plomo como galena (PbS) y el mineral de plata no pudo ser identificado.
- 2.- Otros sulfuros presentes en orden de abundancia: pirrotita, arsenopirita, pirita y marcasita.
- 3.- Los minerales transparentes identificados en orden de abundancia son: calcita, granate, wollastonita, diópsido, otros silicatos de calcio y cuarzo.
- 4.- El cuerpo maravillas está constituido por caliza recristalizada, skarn de granate en partes con piroxeno en forma de bandas, skarn de wollastonita en forma de bandas y bandas de color blanco que se le conoce como “pedernal”.
- 5.- Se reconocieron dos tipos de granate por su color y su disposición estructural, los cuales se estudiaron por microscopio electrónico de barrido para determinar sus diferencias encontrándose que el granate de color verde corresponde con grosularita el cual constituye al exoskarn, el granate de color café corresponde con andradita y constituye al endoskarn.
- 6.- En el estudio petrográfico del pedernal no se pudieron identificar las fases minerales que lo constituyen debido a su tamaño tan pequeño, por lo que se realizó un estudio de difracción de rayos X, encontrando wollastonita, cuspidita ($\text{Ca}_4\text{F}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), larnita (Ca_2SiO_4), rankinita ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$), scawtita ($\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{CaCO}_3$) y spurrita ($\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{CO}_3$).
- 7.- En la parte baja del endoskarn se encuentra la mayor concentración de sulfuros mientras en el exoskarn se encuentran con baja concentración y se encuentran diseminados.

8.-El cuadro paragénetico propuesto para el cuerpo Maravillas con los datos obtenidos en este trabajo para los minerales transparentes es:

| | <i>Temprano</i> -----> <i>Tardío</i> |
|--|--------------------------------------|
| <i>Calcita</i> | - - - - - = = = = |
| <i>Cuarzo</i> | + + + + = = = = |
| <i>Granate</i> | + + + + |
| <i>Wollastonita</i> | + + + + |
| <i>Diópsida</i> | + + + + |
| <i>Asociación de silicatos de calcio</i> | + + + + |
| <i>Sulfuros</i> | = = = = |

9.- El cuadro paragénetico propuesto para los minerales identificados mediante estudios mineragráficos es:

| <i>Mineral</i> | <i>Etapa 1</i> | <i>Etapa 2</i> | <i>Etapa 3</i> | <i>Etapa 4</i> |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>Galena</i> | | - - - - - | - - - - - | |
| <i>Esfalerita</i> | | - - - - - | - - - - - | |
| <i>Calcopirita</i> | | - - - - - | - - - - - | |
| <i>Pirita</i> | | - - - - - | - - - - - | |
| <i>Pirrotita</i> | - - - - - | | | |
| <i>Arsenopirita</i> | | - - - - - | | |
| <i>Marcasita</i> | | - - - - - | | |
| <i>Mineral transparente</i> | - - - - - | - - - - - | - - - - - | - - - - - |

10.-La única roca ígnea que se encontró en el interior de la mina formando un dique casi vertical con un espesor de 40-60 cm, corresponde a una andesita de piroxeno parcialmente cloritizada.

11.- Las muestras de roca tomada en el exterior de la mina presenta dos litologías que están en contacto, una corresponde a una diorita de hornblenda parcialmente cloritizada y la segunda un pórfido granodiorítico parcialmente cloritizada

12.- Las reservas obtenidas mediante el método de los polígonos se observan en el cuadro siguiente:

| Reservas probadas TMS | Ag (g/t) | Pb (%) | Zn (%) | Cu (%) | Fe (%) | As (%) | Val_min US |
|-----------------------|----------|--------|---------|--------|--------|---------|-------------|
| 60.221 | 112,06 | 0,54 | 3,74023 | 0,7439 | 2,01 | 0,57269 | 190,8864769 |

Recomendaciones

1.- Se recomienda hacer un muestro en aquellas zonas donde se reportan buenas leyes de plata, para hacer un estudio mineragráfico con la finalidad de identificar las fases minerales que contiene la plata.

2.-Se recomienda utilizar métodos geoestadísticos para el cálculo de reservas, ya que nos arroja el mínimo error para una evaluación de reservas, el método de los polígonos posee varias desventajas, entre ellas se puede mencionar:

- *El sistema de los prismas no refleja correctamente la forma natural del yacimiento.*
- *Los resultados no son satisfactorios principalmente cuando los valores observados son valores extremos lo cual provoca que los errores de extensión del polígono sean muy elevados. Este error de estimación disminuye en la medida que aumenta la densidad de la red de exploración*

Referencias Consultadas

1. Alfaro, S. M. 2007. *Estimación de Recursos Mineros. Santiago, Chile. Disponible en línea: http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/ALFARO_Cours_00606.pdf*
2. Alwin, E.A. 1996. *Mineral deposit evaluation. A practical approach. Chapman y Hall, pp. 96-158.*
3. Carles, M. J., Proenza, A. J., Galí, S. y Llovet, X. 2010. *Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 62, N° 1, pp. 1-23.*
4. Camprubí, A., Gonzalez, P.E., Levresse, G., Tritlla, J y Carrillo, C.A. 2003. *Depósitos epitemales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. N°1, pp. 10-18.*
5. Camprubí, A. y Albinson, T. 2006. *Depositos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. N°1, pp. 27-8.*
6. Carbonell, M., Zamora, S. y Langenscheidt, A. (1970) *Minería Prehispánica en la Sierra Gorda de Querétaro. Secretaría del Patrimonio Nacional.*
7. Suter, M, 1987. *Structural traverse across the Sierra Madre Oriental fold thrust belt in east-central México: Geological Society of America, Bulletin, Vol. 98, pp 249-264.*
8. Carrillo, M.M. 1981. *Contribución al estudio geológico del macizo calcáreo El Doctor, Querétaro. UNAM. Instituto de Geología Vol. 5 pp. 25-29.*
9. Carrillo, M.M. y Suter, M. 1982. *Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro. Sociedad Geológica Mexicana, Libro Guía de la excursión geológica a la región de Zimapán, pp. 1-20.*
10. Carrillo, M.M. 1989. *Estratigrafía y tectónica de la parte centrooriental del estado de Querétaro. UNAM. Instituto de Geología, Vol. 8 N° 2, pp. 188-193.*
11. Carrillo, M.M. 1990. *Geometría estructural de la Sierra Madre Oriental entre Peñamiller y Jalapan, estado de Querétaro. UNAM. Instituto de Geología Vol. 9 pp. 62-70.*

-
-
12. Consejo de Recursos Minerales (Coremi), 1992. *Monografía Geologico-Minera del Estado de Querétaro: México, Secretaria de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales.*
 13. Diaz, D.L.M. 1985. *Las rocas metamórficas de contacto en el cerro Mazahua, Michoacán, México. Boletín Sociedad Mexicana de Mineralogía, A.C., Vol. 1, N° 1., pp 17-31.*
 14. Eguiluz, S., Aranda, M., y Marrett, R. 2000. *Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 53. pp 1-26.*
 15. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2010. *Provincias fisiográficas. <http://www.inegi.org.mx/>*
 16. Mendoza, R.C., y Silva, R.G. 2001. *Tectonosomas del Cretácico Superior en la región de Zimapán Hidalgo, México. UNAM.*
 17. Ordóñez, C.J. *Minas Mexicanas. American Institute of mining metallurgical and petroleum engineers. Tomo II, pp. 73-88.*
 18. Palomino, H. V. 2004. *Continuidad de la mineralización del cuerpo Alacrán, en los niveles inferiores al nivel 2000, de la mina La Negra, Maconí, Municipio de Cadereyta, Edo. Querétaro (Tesis).*
 19. Pérez, N. y Fernández, N. 2007. *Plantas del estado de Querétaro, México con potencial para uso ornamental. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, pp. 83-115.*
 20. Sawkins, F., 1990. *Metal Deposits in relation to plate tectonics. Springer Verlag, 2nd rev. and enl. Ed.*
 21. Souza Quiroz, Noguez Alcántara, Carrasco Sánchez, 1987. *La Negra: Minas Mexicanas, Tomo 3, Sección México, pp.73.88.*
 22. Torres, E., 2014. *Plano de localización de cuerpos mineralizados en la mina La Negra.*
 23. Wilson, B.W., Hernández, P. y Meave, T.E. 1955. *Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del Estado de Querétaro. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 18 N° 1, pp. 1-10.*

ANEXO A

Análisis Petrográficos



Muestra: M-1

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|--|
| Color: | Bandas de color café intercaladas con bandas de color blanco |
| Textura: | Bandeada y en algunas partes brechada |
| Minerales Observables: | Granate, calcita y wollastonita |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|---------------------------------|
| Textura: | Granoblástica- porfidoblástica. |
|----------|---------------------------------|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-----------------------------------|------------|-----------------|--|
| Granate | 34 | Grueso | Se observa cristales de forma anhedral los cuales forman un mosaico. Figura 21, C y D |
| Diópsida | 17 | Medio | Se observan un mosaico de cristales anhedrales, los cuales están asociados con el granate y calcita. Figura 21, C y D |
| Calcita | 17 | Medio | Se observa cristales de forma anhedral, los cuales forman un mosaico, se encuentran asociados con el granate y la wollastonita. Figura 21, C y D |
| Wollastonita | 13 | Grueso-Medio | Se observa un mosaico de cristales de forma radial, los cuales se encuentran intercrecidos con una banda asociada a los silicatos de calcio. Figura 21 |
| Asociación de silicatos de calcio | 15 | Finos | Se observan cristales anhedrales, los cuales está compuesta por wollastonita, cuspidina, scawtita y larnita. Figura 21, C y D |
| Opacos | 4 | Finos | Se observan cristales anhedrales. Se aprecian dispersos sobre toda la muestra. Figura 21, C y D |

Clasificación: Skarn de granate y wollastonita



Muestra: M-3

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Color: Negro

Textura: Afanítica

Minerales Observables: No se observan



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura: Microlítica.

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|---------------------|------------|-----------------|--|
| Plagioclasa (An 50) | 55 | Medio | Se observan cristales de forma euhedrales de sección rectangular alargada (listones), los cuales forman un mosaico. Figura 23 |
| Clorita | 15 | Medio | Se aprecia como cristales que forman parches en ocasiones intercrecida con calcita, incluidos en el mosaico de plagioclasa como alteración de fenocristales de minerales máficos. Figura 23. |
| Augita | 15 | Fino | Se aprecian cristales de forma anhedral, se observa un ligero enrejado típico de los piroxenos. Figura 23 |
| Calcita 1 | 7 | Medio | Se observan cristales anhedrales formando un mosaico de grano medio, que se aprecian como parches intercrecidos con clorita. Figura 23 |
| Calcita 2 | 3 | Fino | Se observan cristales muy finos formando parches subangulosos. Figura 23 |
| Opacos | 5 | Medio | Se aprecian cristales de forma anhedral. Estos se encuentran dispersos sobre toda la muestra. Figura 23 |

CLASIFICACIÓN: Andesita de augita parcialmente cloritizada y carbonatada



Muestra: M-8

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|---|
| Color: | Presenta un color gris oscuro y en las fracturas se encuentran rellenas de un mineral de color blanco |
| Textura: | Brechada |
| Minerales Observables: | Fragmentos angulosos de caliza recristalizada, cementada por calcita y cortada por vetillas de calcita. |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|---|
| Textura: | Brechoide, los fragmentos presentan una textura granoblástica |
|----------|---|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-----------------------------------|------------|-----------------|--|
| Calcita | 65 | Medio-Grueso | Se aprecian formando un mosaico con cristales ligeramente orientados en los fragmentos angulosos de roca. Se observa cristales de grano medio que forman un mosaico que reemplaza a los fragmentos Figura 9. |
| Calcita 2 | 5 | Grueso | Mosaico de grano medio, se observa relleno de vetillas. Figura 9 |
| Asociación de silicatos de calcio | 15 | Fino | Se observan cristales anhedrales redondeados, se aprecian en bandas. Figura 9. |
| Opacos | 10 | Medio | Se observan cristales anhedrales redondeados. Estos minerales se aprecian con más abundancia cerca del granate. Figura 9 |
| Granate | 5 | Medio | Se aprecian algunos cristales de forma anhedrales (parcialmente angulosos), se observa que está reemplazando a la calcita. Figura 9 |

CLASIFICACIÓN: Brecha formada por fragmentos de caliza recristalizada



Muestra: M-13

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|--|
| Color: | Bandas de color café intercaladas con bandas de color blanco y bandas de color gris oscuro |
| Textura: | Bandeada |
| Minerales Observables: | Granate y caliza |
| | |
| | |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|---------------|
| Textura: | Granoblástica |
|----------|---------------|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-------------|------------|-----------------|--|
| Calcita 1 | 20 | Fino | Se observa un mosaico de grano fino de forma anhedral. Figura 22 |
| Calcita 2 | 15 | Medio | Se observa una calcita de forma anhedral, formando un mosaico. Figura 22 |
| Calcita 3 | 10 | Grueso | Se observa como un mosaico de grano medio, se encuentra rellenando vetillas. Figura 22 |
| Granate 1 | 20 | Grueso – Medio | Se observan formando un mosaico de cristales anhedrales, los cuales están asociados a la calcita. Figura 22 |
| Granate 2 | 10 | Medio | Se observan cristales redondeados de forma no homogénea los cuales forman un mosaico los cuales estan asociados con la caliza 2. Figura 22 |
| Cuarzo | 15 | Medio | Se observan un mosaico de cristales anhedrales, de grano medio. Figura 22 |

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|----------------------------|-------------------|------------------------|---|
| Opacos | 7 | Fino | Se observan cristales anhedrales redondeados. Estos minerales se aprecian con más abundancia cerca del granate. Figura 22 |
| Minerales no identificados | 3 | Fino | Se observan cristales anhedrales, los cuales no se pudieron identificar por su tamaño fino. Figura 22 |

Clasificación: *Skarn de granate*



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de ingeniería

Análisis Petrográfico Anexo A-5



Muestra: M-22

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|---|
| Color: | Se observa un color gris oscuro y en las fracturas se encuentran rellenas por un mineral de color blanco. |
| Textura: | Brechada |
| Minerales Observables: | Calcita |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|---|
| Textura: | Brechoide, los fragmentos presentan una textura granoblástica |
|----------|---|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|---------------------------|------------|-----------------|--|
| Calcita | 90 | Medio-Grueso | Se aprecian cristales subhedrales a anhedrales. Se observan un proceso de recristalización ya que se observa en algunos cristales con un tamaño de grano desarrollado. Figura 10 |
| Cuarzo | 5 | Medio | Se observan cristales de forma subhedrales, formando un mosaico que rellenan las fracturas. Figura 10 |
| Opacos 1 | 2 | Medio | Se observan algunos cristales euhedral, estos minerales se aprecian junto al cuarzo. Figura 10. |
| Opacos 2 | 1 | Medio | Se observan cristales muy finos diseminados dentro de la calcita. Figura 10. |
| Minerales sin identificar | 2 | Fino | Se aprecian cristales anhedrales, estos minerales se pueden apreciar junto a la calcita. Figura 10. |

CLASIFICACIÓN: Caliza Recristalizada



Muestra: Dique Maravillas

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Color: Negro y blanco

Textura: Fanerítica

Minerales Observables: Plagioclasa y feldespatos



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura: Holocristalina-Equi granular

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|----------------------|------------|-----------------|---|
| Plagioclasas (An 50) | 60 | Grueso | Se observan cristales de forma subhedral tabulares, los cuales forman un mosaico, algunos cristales se observan zoneados. Figura 24 |
| Hornblenda | 10 | Medio | Se aprecia cristales de forma anhedral, los cuales forman un mosaico, se encuentran asociados a la biotita. Figura 24 |
| Biotita | 13 | Medio | Se aprecian cristales de forma anhedral, los cuales forman un mosaico, debido a su alteración se encuentran asociados con la clorita. Figura 24 |
| Clorita | 5 | Medio | Se observan cristales anhedrales, los cuales se encuentra reemplazando a la biotita. Figura 24 |
| Piroxeno | 5 | Medio | Se observan cristales subhedrales, se puede apreciar un ligero enrejado típico de los piroxenos. Figura 24 |
| Apatita | 5 | Medio | Se observan cristales subhedrales, Figura 24 |
| Opacos | 2 | Medio | Se aprecian cristales de forma subhedral, los cuales se encuentran dispersos sobre la muestra |

CLASIFICACIÓN: Diorita de hornblenda parcialmente cloritizada



Muestra: Dique Maravillas

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|------------------------|
| Color: | Blanco y negro |
| Textura: | Porfídica |
| Minerales Observables: | Plagioclasas y anfíbol |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|-----------|
| Textura: | Porfídica |
|----------|-----------|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|---------------------|------------|-----------------|--|
| Plagioclasa (An 50) | 40 | Grueso | Se observan fenocristales de forma subhedral tabulares, los cuales forman un mosaico. Figura 24 |
| Hornblenda | 15 | Medio | Se observan fenocristales anhedrales, están asociados con la biotita, los cuales forman un mosaico Figura 24. |
| Clorita | 15 | Medio | Se observan un mosaico de cristales anhedrales, los cuales se encuentra como bordes en debido a que está alterando la biotita. Figura 24 |
| Cuarzo | 15 | Fino-Medio | El cuarzo se observa como un mosaico de cristales anhedrales de forma redondeados, se encuentra como matriz y en algunos casos se aprecian de grano medio. Figura 24 |
| Biotita | 10 | Medio | Se aprecian cristales anhedrales, se encuentra asociada con la clorita, debido a que se está alterando. Figura 24 |
| Opacos | 5 | Fino | Se aprecian cristales de forma subhedral, los cuales se encuentran dispersos sobre la muestra |

CLASIFICACIÓN: Pórfido granodiorítico parcialmente cloritizado

ANEXO B

Análisis Mineragráficos



Muestra: M-2

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|---|
| Color: | Amarillo opaco, amarillo, gris, gris oscuro |
| Textura: | Inequigranular |
| Minerales Observables: | Pirrotita, calcopirita, arsenopirita esfalerita y wollastonita |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|-----------------|
| Textura: | Reemplazamiento |
|----------|-----------------|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-------------------------|------------|-----------------|---|
| Pirrotita | 40 | Grueso | Se observa como islas y continentes en un mosaico de sulfuros, de cristales anhedral, se observa secciones rómbicas de arsenopirita y minerales transparentes. Figura 12. |
| Arsenopirita | 25 | Medio | Se observa un mosaico de sulfuros, se observan cristales euhedrales con inclusiones rellenos por sulfuros y minerales transparentes. Figura 12. |
| Calcopirita | 10 | Medio | Se observa como islas en la arsenopirita, en forma de cristales anhedrales. Figura 12. |
| Calcopirita | 5 | Fino | Se observa asociado con la pirrotita y la arsenopirita de cristales subhedrales. Figura 12 |
| Minerales transparentes | 20 | Medio-Grueso | Se presentan en un intercrecimiento mutuo en todos los sulfuros. Figura 12. |



Muestra: M-7

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|--|
| Color: | Amarillo, amarillo opaco, amarillo pálido, gris y gris oscuro. |
| Textura: | Inequigranular |
| Minerales Observables: | Calcopirita, pirrotita, pirita, arsenopirita y esfalerita. |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|-----------------|
| Textura: | Reemplazamiento |
|----------|-----------------|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-------------|------------|-----------------|---|
| Pirrotita | 25 | Grueso | Se observa como islas y continentes en un mosaico de sulfuros, presenta inclusiones de cristales anhedrales de pirita, calcopirita, galena y minerales transparentes. Figura 14 |
| Pirita | 22 | Grueso | Se observa asociados con la pirrotita, se aprecia muy fracturada, en algunas partes se observan vetillas rellenas de mineral transparente. Figura 14. |
| Esfalerita | 13 | Medio | Se observa asociados con la pirrotita y la calcopirita. Figura 14 |
| Calcopirita | 7 | Medio | Se aprecia como islas en cristales anhedrales, se encuentra asociada a la esfalerita. Figura 14 |
| Calcopirita | 2 | Fino | Se observa asociada con la pirrotita y galena. Figura 14 |
| Galena | 5 | Fino | Se observa en cristales anhedrales, asociada a la pirrotita. Figura 14 |

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-------------------------|-------------------|------------------------|---|
| Marcasita | 3 | Medio | Se observan cristales anhedrales, se encuentran asociados a la pirrotita. Figura 14 |
| Minerales transparentes | 2 | Medio | Se observan como islas, presenta un intercrecimiento mutuo con los sulfuros y algunas partes presenta forma de vetillas que brechan al mosaico de sulfuros. |



Muestra: M-15

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|---|
| Color: | Gris, amarillo opaco, gris oscuro |
| | Amarillo |
| Textura: | Inequigranular |
| Minerales Observables: | Arsenopirita, pirrotita, esfalerita, calcopirita. |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|-----------------|
| Textura: | Reemplazamiento |
|----------|-----------------|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|--------------|------------|-----------------|--|
| Arsenopirita | 35 | Grueso | Se observa como islas y continentes en cristales euhedrales en el mosaico de sulfuros, se encuentra asociada a la esfalerita, presenta inclusiones de esfalerita y calcopirita Figura 16 |
| Esfalerita | 30 | Grueso | Se observan en cristales anhedrales en el mosaico de sulfuros, se encuentra asociada a la arsenopirita, en algunas partes presenta inclusiones de cristales anhedrales de calcopirita y minerales transparentes. |
| Calcopirita | 7 | Medio | Se observa en forma de inclusiones redondeadas en cristales de esfalerita y minerales transparentes. Figura 16 |
| Calcopirita | 3 | Fino | Se observa cristales anhedrales se encuentra asociada con la pirrotita y marcasita. Figura 16 |
| Marcasita | 5 | Fino | Se observan en cristales anhedrales, se presenta como un borde de reacción de la pirrotita, se observan inclusiones de cristales anhedrales de calcopirita y minerales transparentes. |

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-------------------------|-------------------|------------------------|---|
| Pirrotita | 3 | Fino | Se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociada a la marcasita producto de su alteración. Figura 16 |
| Galena | 2 | Fino | Se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociada a la calcopirita. Figura 16 |
| Minerales Transparentes | 15 | Grueso-Medio | Se observa en cristales anhedrales, relleno de vetillas en algunos casos estos cristales se observan en forma hexagonal y radial. Figura 16 |



Muestra: M-26

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

| | |
|------------------------|--|
| Color: | Amarillo opaco, amarillo, gris gris oscuro. |
| Textura: | Inequigranular |
| Minerales Observables: | Pirrotita, calcopirita, arsenopirita Esfalerita |



DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

| | |
|----------|-----------------|
| Textura: | Reemplazamiento |
|----------|-----------------|

MINERALOGÍA

| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-------------|------------|-----------------|--|
| Pirrotita | 35 | Grueso | Se observa como islas y continentes en el mosaico de sulfuros está asociada con la calcopirita y mineral transparente. Figura 18 |
| Esfalerita | 20 | Grueso | Se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociado a la pirrotita, se observan inclusiones de cristales anhedrales de calcopirita y minerales trasparentes. Figura 18 |
| Calcopirita | 10 | Medio | Se observa en cristales anhedrales, se aprecian inclusiones de cristales anhedrales de esfalerita, pirrotita y minerales transparentes. Figura 18 |
| Calcopirita | 5 | Fino | Se observa en cristales anhedrales, se encuentra asociado a la arsenopirita y se. Figura 18 |

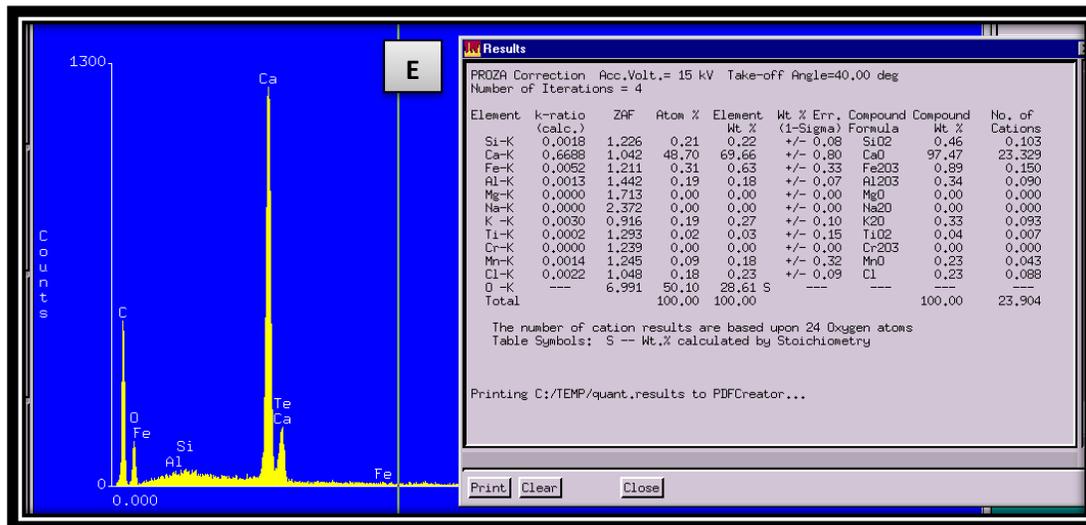
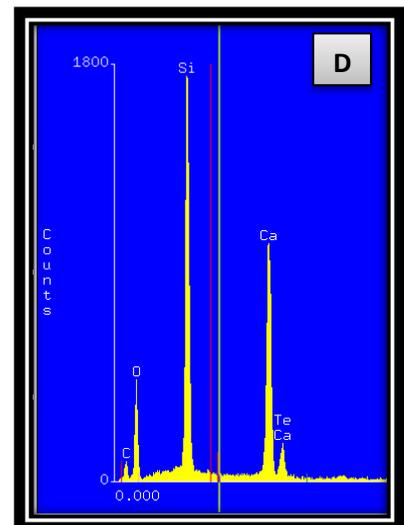
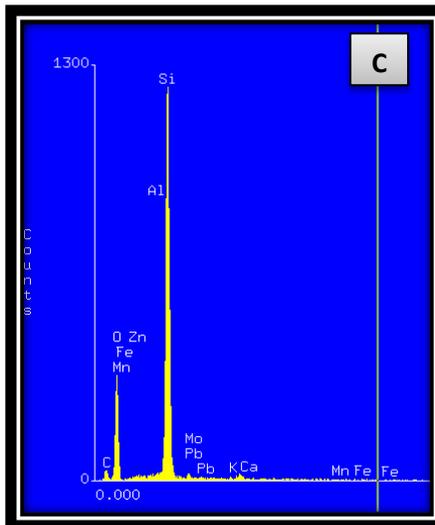
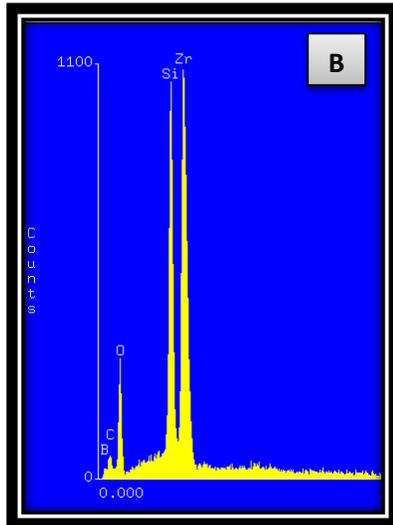
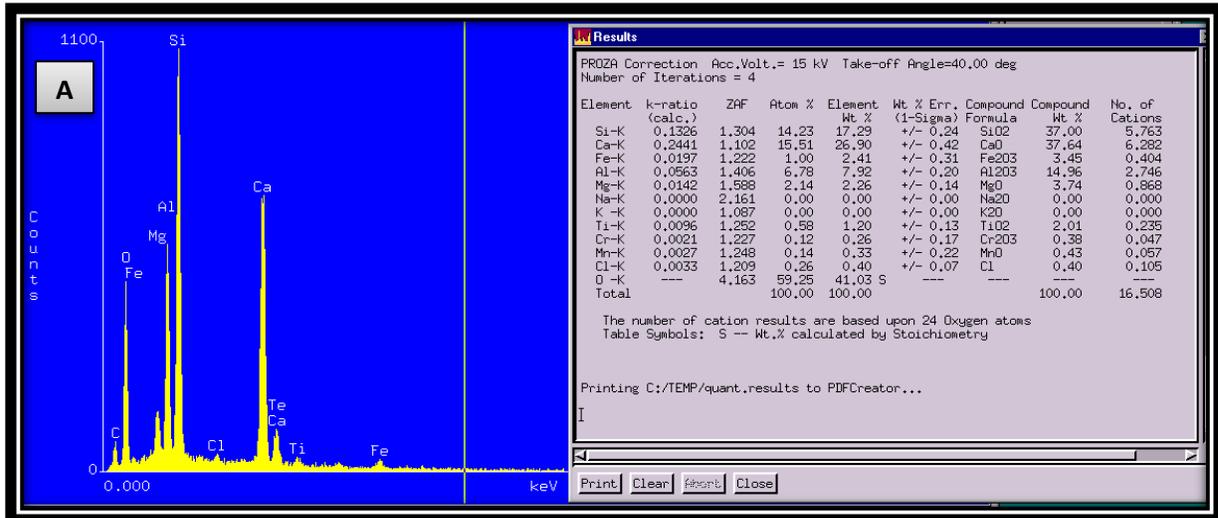
| Componentes | Visual (%) | Tamaño de grano | Relaciones Texturales |
|-------------------------|-------------------|------------------------|---|
| Arsenopirita | 5 | Medio | Se observa en cristales subhedrales, se observa inclusiones de cristales anhedrales de minerales transparentes. Figura 18 |
| Minerales Transparentes | 25 | Grueso-Medio | Se observa en cristales anhedrales, presenta un intercrecimiento mutuo con los sulfuros y presenta formas redondeadas, en algunas partes se presenta como cristales en forma radial y cristales en forma hexagonales. Figura 18 |

ANEXO C

Graficas de energía dispersiva
de rayos X de minerales
analizados

Anexo C-1

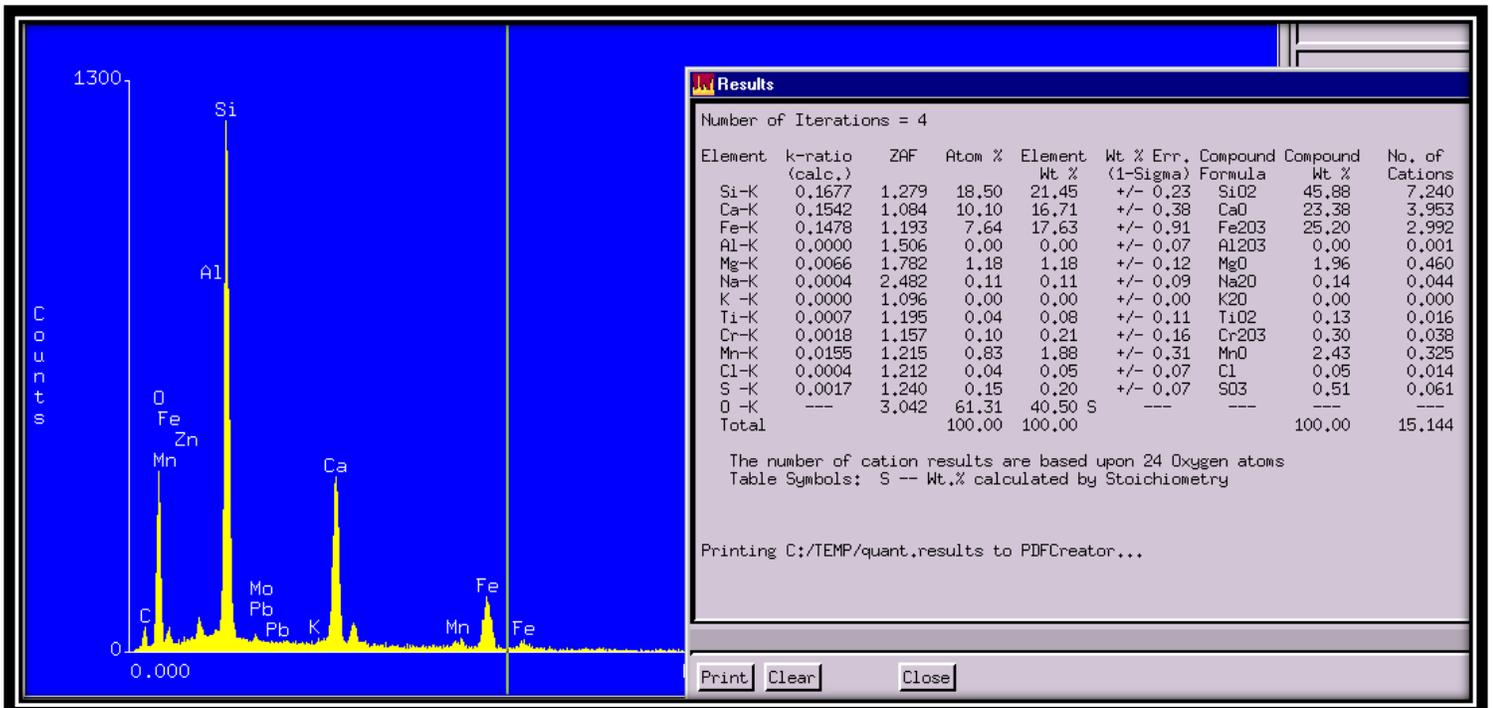
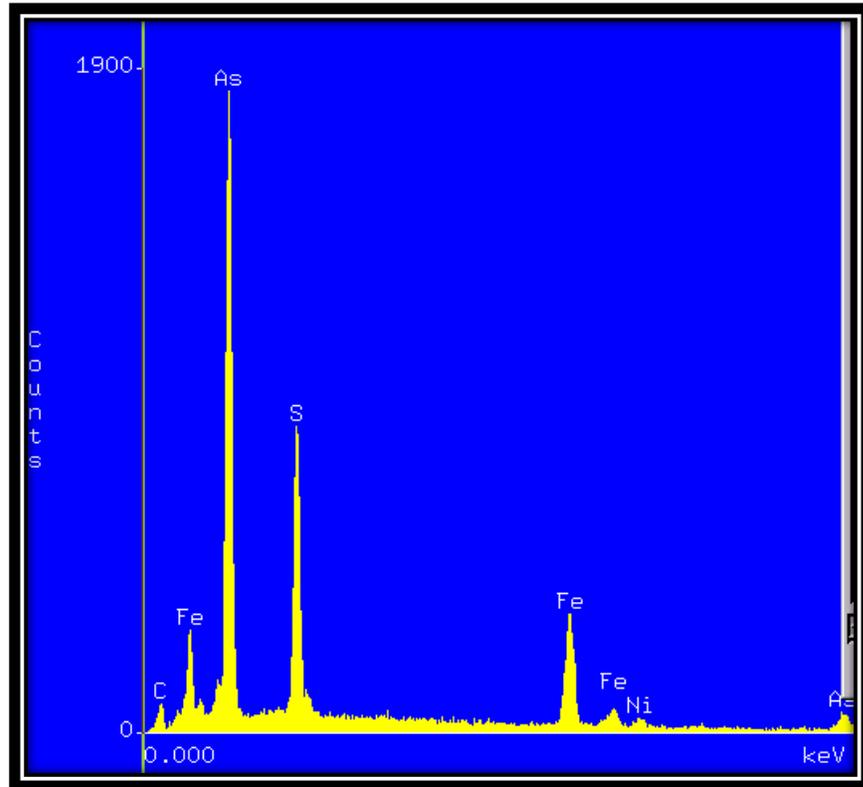
Granate de grosularita y minerales asociados.



Espectros de elementos químicos en análisis semicuantitativos en donde se puede apreciar la diferencia en la composición de los minerales. Lamina A muestra granate de grosularita; B mineral de zircón; C elementos químicos del cuarzo, D elementos químicos de la diópsida; E elementos químicos de la calcita.

Anexo C-2

Granate de andradita y minerales asociados.



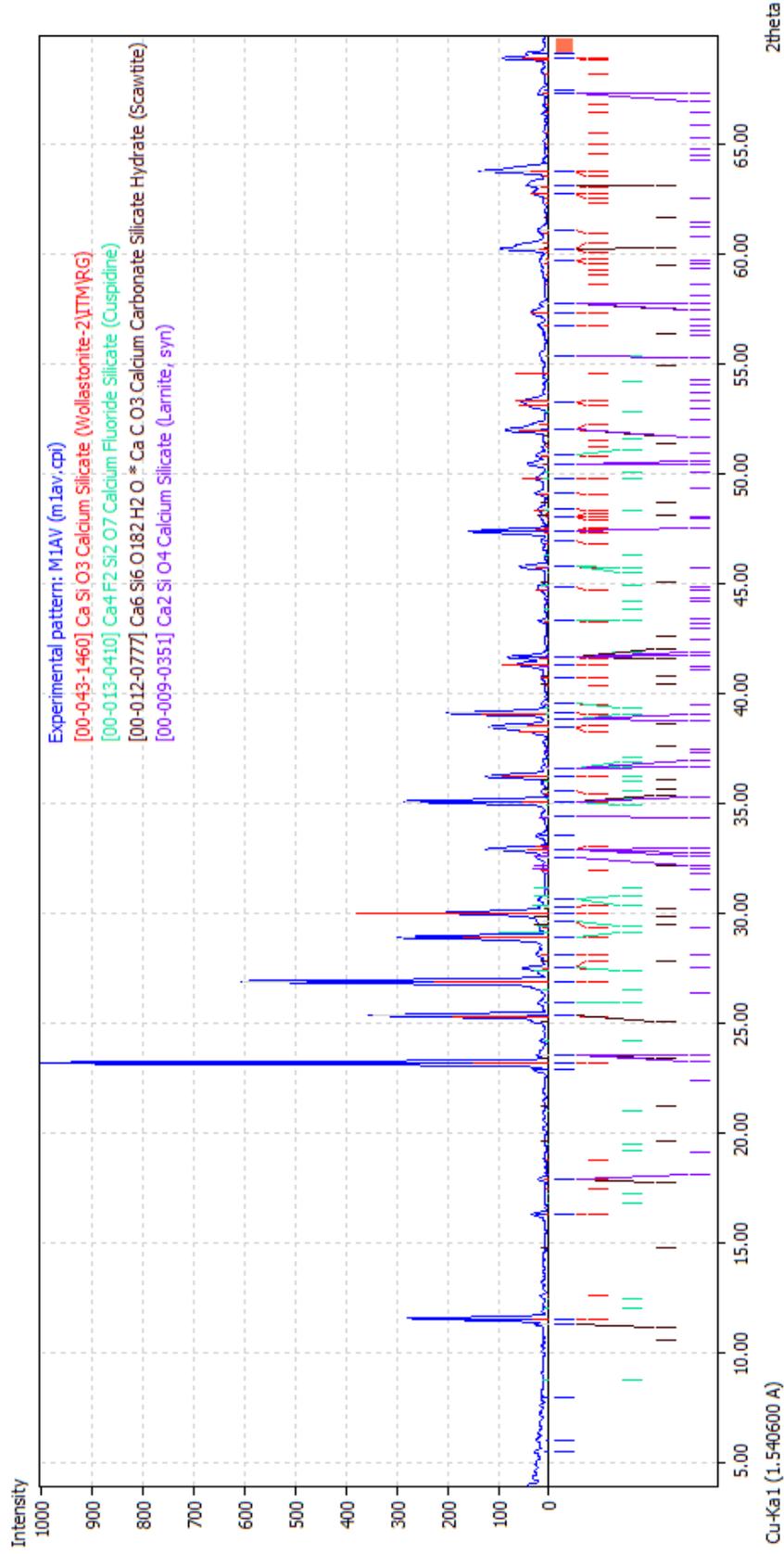
Espectros de elementos químicos en análisis. Lamina A muestra elementos químicos de la arsenopirita; B muestra elementos químicos del granate Andradita

ANEXO D

Difractogramas de Difracción de Rayos X

Anexo D- 1

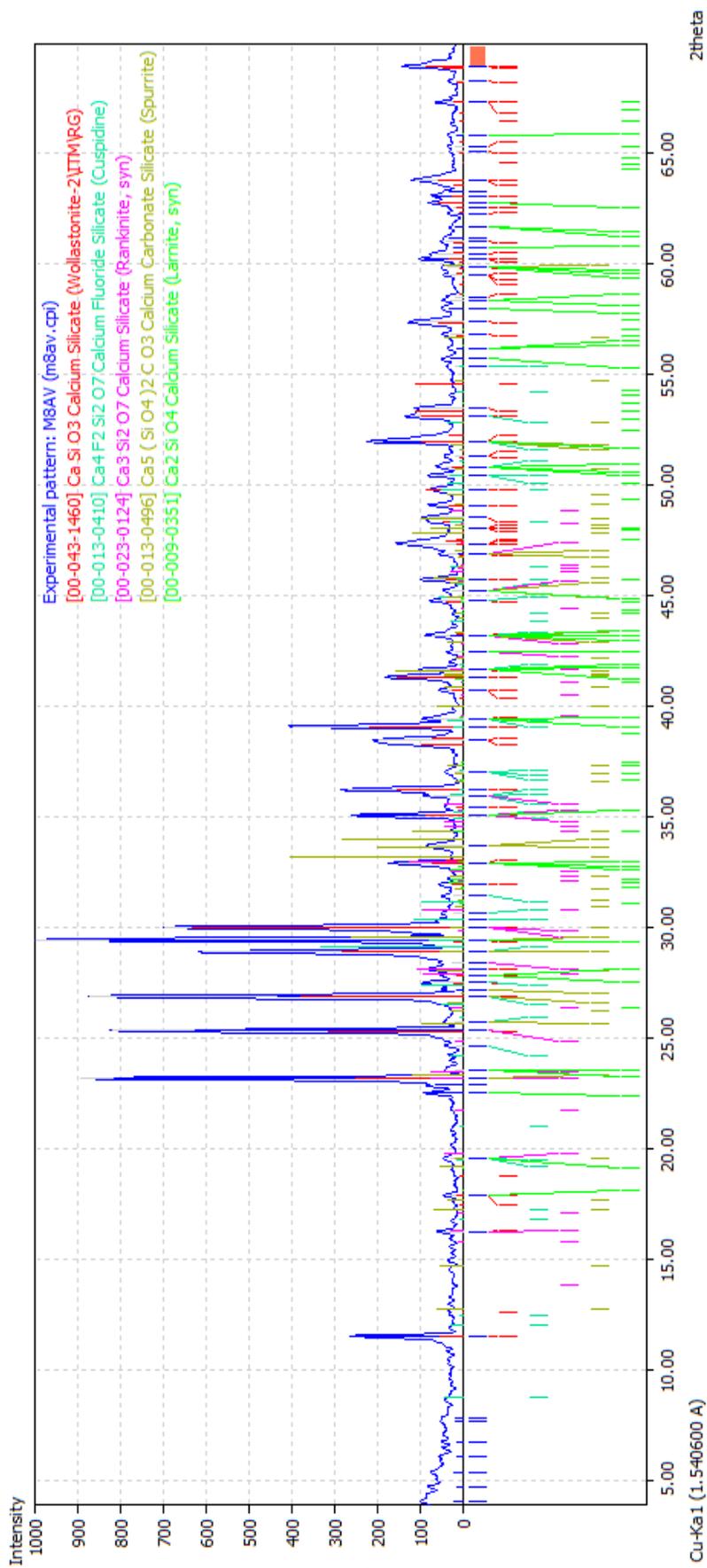
MUESTRA M - 1



Muestra 1. Resultados obtenidos en el estudio de difracción de rayos x, el cual se observa la presencia de los minerales de wollastonita, cuspidina, scawtita y larnita.

Anexo D-2

MUESTRA M-8



Muestra 8. Resultados obtenidos en el estudio de difracción de rayos x, el cual se observa la presencia de los minerales de wollastonita, cuspidina, rankinita, spurrita y larnita.