



VERDAD NACIONAL.
 AYER Y HOY
 MEXICO

7
 24

FACULTAD DE INGENIERIA
 DIRECCION
 60-I-083

SR. JOSE JUAN FLORES MARTINEZ
 Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M. en C. María Guadalupe Villaseñor Cabral, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geólogo:

PARAGENESIS DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS DEL AREA EL CARRIZAL
 ZIMAPAN, HIDALGO

- I INTRODUCCION
- II MARCO GEOGRAFICO
- III GEOLOGIA GENERAL
- IV YACIMIENTOS MINERALES
- V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA
- APENDICES Y PLANOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Ciudad Universitaria, a 16 de noviembre de 1993

EL DIRECTOR

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gg*t*

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Agradecimientos:

A mi mamá Juanita gracias.

A mis hermanos Luis Manuel, Claudia y Verónica

Por el apoyo que me han brindado.

A mi esposa Nancy Isabel por todo lo que nos espera.

A mis abuelos Baldomero y Cristina con los que siempre cuento.

Para todos y cada uno de mis compañeros con los que he compartido momentos inolvidables, buenos y malos. Cuyos recuerdos nos identifican y unen para seguir adelante.

A mi alma mater, Facultad de Ingeniería de la UNAM, por la oportunidad que nos da para realizarnos como profesionistas.

Un reconocimiento para los profesores que nos brindan todas sus enseñanzas, especialmente para:

Ing. Alfredo Victoria Morales

Ing. Roberto Uribe Afif

M. en C. Guadalupe Villaseñor Cabral

Ing. Carlos Garza González Vélez

Dr. Salvador Rodríguez Sánchez

Por sus consejos, comentarios y apoyo que me han brindado.

A los ingenieros de la Unidad Minera El Monte, de la compañía Fresnillo S.A. de C.V.

Ing. Francisco Javier Flores

Ing. Jorge Souza Quiroz

Ing. Jorge López Alanís

Por todas las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.

Noviembre de 1996.

PARAGÉNESIS DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS DEL ÁREA EL CARRIZAL ZIMAPÁN, HIDALGO

I. INTRODUCCIÓN

- I.1. Generalidades**
- I.2. Objetivo**
- I.3. Estudios previos**
- I.4. Método de trabajo**

II. MARCO GEOGRÁFICO

- II.1. Localización y vías de acceso**
- II.2. Fisiografía**
- II.3. Geomorfología**
- II.4. Hidrografía**

III. GEOLOGÍA REGIONAL

- III.1. Estratigrafía**
- III.2. Geología estructural**
- III.3. Geología histórica**

IV. YACIMIENTOS MINERALES

- IV.1. Generalidades**
- IV.2. Descripción del yacimiento**
 - IV.2.1. Litología**
 - IV.2.2. Forma de los depósitos**
- IV.3. Caracterización mineralógica**
- IV.4. Estudio paragenético**
- IV.5. Descripción de minerales y texturas encontradas**
- IV.6. Metalurgia**

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APÉNDICES Y PLANOS

I. INTRODUCCIÓN

I.1. GENERALIDADES

Los recursos minerales de México son considerables y constituyen un aporte importante en el desarrollo económico de diversas regiones del país. Es pues, de suma importancia tener un conocimiento profundo de dichos recursos para obtener el mayor aprovechamiento de ellos.

La primera fase de la investigación de un depósito mineral consiste en conocer con el mejor detalle posible, las especies minerales que lo forman, así como la composición química de dichas especies tanto en el contenido de sus componentes mayores como el de otros elementos menores que se encuentran en sus estructuras. Asimismo, es necesario realizar estudios paragenéticos que servirán como herramienta para establecer, junto con criterios estructurales, de inclusiones fluidas, isotópicos y otros, la historia geológica del yacimiento y así poder planear mejor la exploración y explotación del mismo.

La palabra paragénesis del griego "nacido antes de" ha tenido controversia al usarse para referirse a lo que es un estudio paragenético. Para los europeos, la paragénesis representa las asociaciones texturales y la secuencia en que se originaron los minerales que constituyen el yacimiento, formados al mismo tiempo y bajo ciertas condiciones de equilibrio. Para los estadounidenses, constituye la asociación individual correspondiente a una sola etapa de los minerales de mena y de ganga que constituyen el yacimiento (Guilbert 1986). Este trabajo pretende establecer las etapas de mineralización y el orden de formación de los minerales de mena y de ganga con base en sus relaciones texturales.

Por otro lado, el conocimiento detallado de los minerales que contendrán los elementos de interés y sus relaciones texturales es de gran ayuda para establecer los métodos de beneficio más adecuados permitiendo así una explotación óptima del yacimiento. La determinación de las características mineralógicas del yacimiento puede ser una gran ayuda para la extracción y explotación de los yacimientos, pues mediante estos estudios se pueden seleccionar con mayor certeza las zonas con mejores leyes dentro del yacimiento, así como las zonas en donde será más fácil hacer la separación de los minerales de mena, optimizando los métodos de beneficio, por lo que se obtienen concentrados con un mínimo de elementos contaminantes (elementos no deseados en los concentrados de mineral que son castigados por los compradores de éstos).

No existe un método estándar para efectuar un estudio paragenético, puesto que cada depósito es único; sin embargo, dichos estudios deben incluir una descripción in situ del yacimiento, tanto de afloramientos superficiales como de obras mineras, así como una descripción detallada de los minerales y de las relaciones texturales que existen entre las entidades mineralógicas presentes dentro del yacimiento; estas descripciones se deben realizar en muestras de mano, láminas delgadas y superficies pulidas.

Lo más difícil en tales estudios es recolectar las muestras a estudiar, pues éstas se deben tomar en un número limitado y deben ser representativas de las características que presente el yacimiento.

Por todo lo anterior, la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Geología preocupados por un conocimiento más amplio de los diferentes depósitos que se tienen en el país, emprende investigaciones como la que se propone en el presente estudio.

I.2. OBJETIVO

El propósito del presente trabajo es estudiar la paragénesis del área El Carrizal en los cuerpos mineralizados de la mina Animas: chimenea las Animas, Santa Elena, y en la mina Lomo de Toro: cuerpo Santa Fe y cuerpo San Carlos, identificando todos los minerales y las texturas que presentan. Para establecer una hipótesis con respecto al origen de dichos depósitos así como ser una herramienta para planear los procesos de metalurgia del mismo.

I.3. ESTUDIOS PREVIOS

Existen varios trabajos y tesis sobre el distrito minero de Zimapán como son:

- Mapes y Simons (1957), describe ampliamente la geología, geografía, litología y yacimientos de la zona.
- Carrillo y Suter (1982), analizan la geología histórica y estructural de la región.
- Segerstrom (1962), estudia la geología del área.
- Morín en Minas de México (1986), describe los depósitos económicos del distrito.
- García y Querol en Geología Económica de México (1985), igualmente describen los depósitos económicos del área del Carrizal y del Monte del distrito minero de Zimapán. etc.

Como se observa en estos trabajos se describen detalladamente la geología de la zona, el tipo de yacimiento, la forma de los cuerpos, etc., pero en ninguno de ellos se presenta un estudio paragenético detallado, de ahí surge la necesidad de realizar este trabajo.

I.4. MÉTODO DE TRABAJO

Trabajo de campo

- Se hizo la descripción en superficie de todas las rocas presentes en el área del Carrizal para identificar y observar las estructuras que presenta la litología.
- Levantamiento geológico a detalle en las inmediaciones de la mina Las Animas para la elaboración de mapas y secciones geológicas.
- Muestreo detallado de las rocas del área en superficie para clasificar la roca encajonante de la mineralización y su posterior observación bajo el microscopio petrográfico.
- Descripción de los diferentes cuerpos mineralizados de las minas Animas y Lomo de Toro para determinar las estructuras que presentan.
- Muestreo detallado de los diferentes cuerpos mineralizados que conforman las minas Animas y Lomo de Toro para su descripción bajo el microscopio mineragráfico.
- Descripción de barrenos de prospección que realizó la compañía Peñoles con longitudes de 120 m en la mina Lomo de Toro a partir del nivel 1 del cuerpo Santa Fe.

Laboratorio

Se describieron un total de 53 muestras de ellas, 21 fueron tomadas en superficie y corresponden a la roca encajonante y a pequeños cuerpos intrusivos que se asocian al cuerpo intrusivo mayor (Tronco del Carrizal) y 32 se obtuvieron de las obras mineras de las minas Animas, Lomo de Toro y de los barrenos de exploración.

- Estudio megascópico y en microscopio estereoscópico de todo el material
- Microscopía de luz reflejada
- Microscopía de luz transmitida
- Estudios en microscopio electrónico JEOL 35C con analizador de energía dispersiva de rayos x marca Tracor.
- Estudios de difracción de rayos x en equipo Philips PW-1300 y en equipo Siemens
- Estudios de microsonda electrónica, Cameca SX- 50 automatizada

II. MARCO GEOGRÁFICO

II.1. LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El distrito minero de Zimapán se encuentra al NW del estado de Hidalgo. Se localiza a 160 km al noreste de la Ciudad de México. Sus coordenadas geográficas son $20^{\circ}47'40''$ latitud norte y $99^{\circ}26'50''$ de longitud oeste. Queda comprendido entre las cartas topográfico - geológicas F14-C58 y F14-C68 editadas por INEGI a escala 1:50,000.

Las vías de acceso a Zimapán son la carretera Federal México - Laredo, Núm. 85 en el km 207 y la autopista México - Querétaro hasta el km. 56, luego por la desviación a Tula y de allí hasta entroncar con la carretera México - Laredo. (fig. 1)

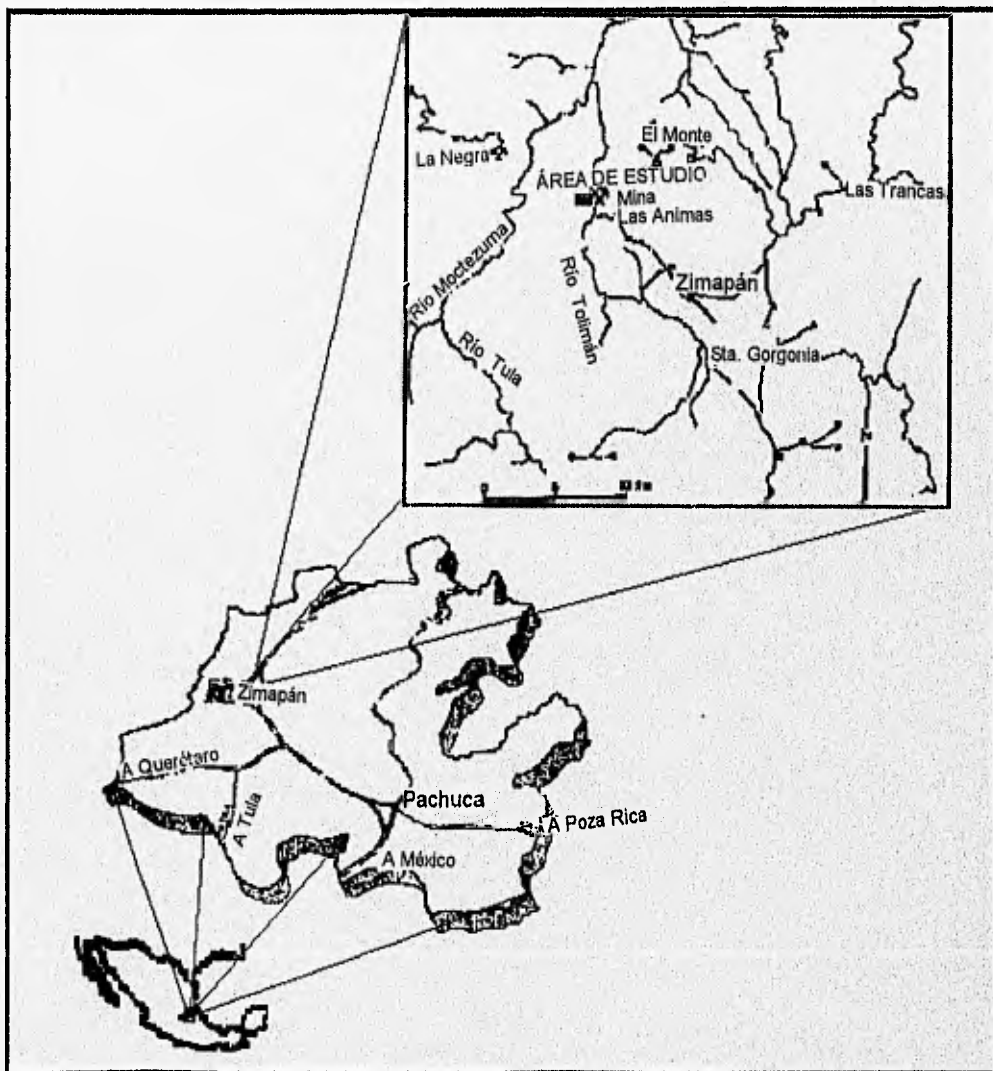


Figura 1 -Localización.

El Distrito cuenta con cuatro áreas mineras las cuales son: El Carrizal, El Monte, La Luz - La Cruz y San Pascual - Santa Gorgonia. El presente trabajo se enfocará al estudio paragenético de la zona de El Carrizal que comprende las minas Lomo de Toro y Las Animas.

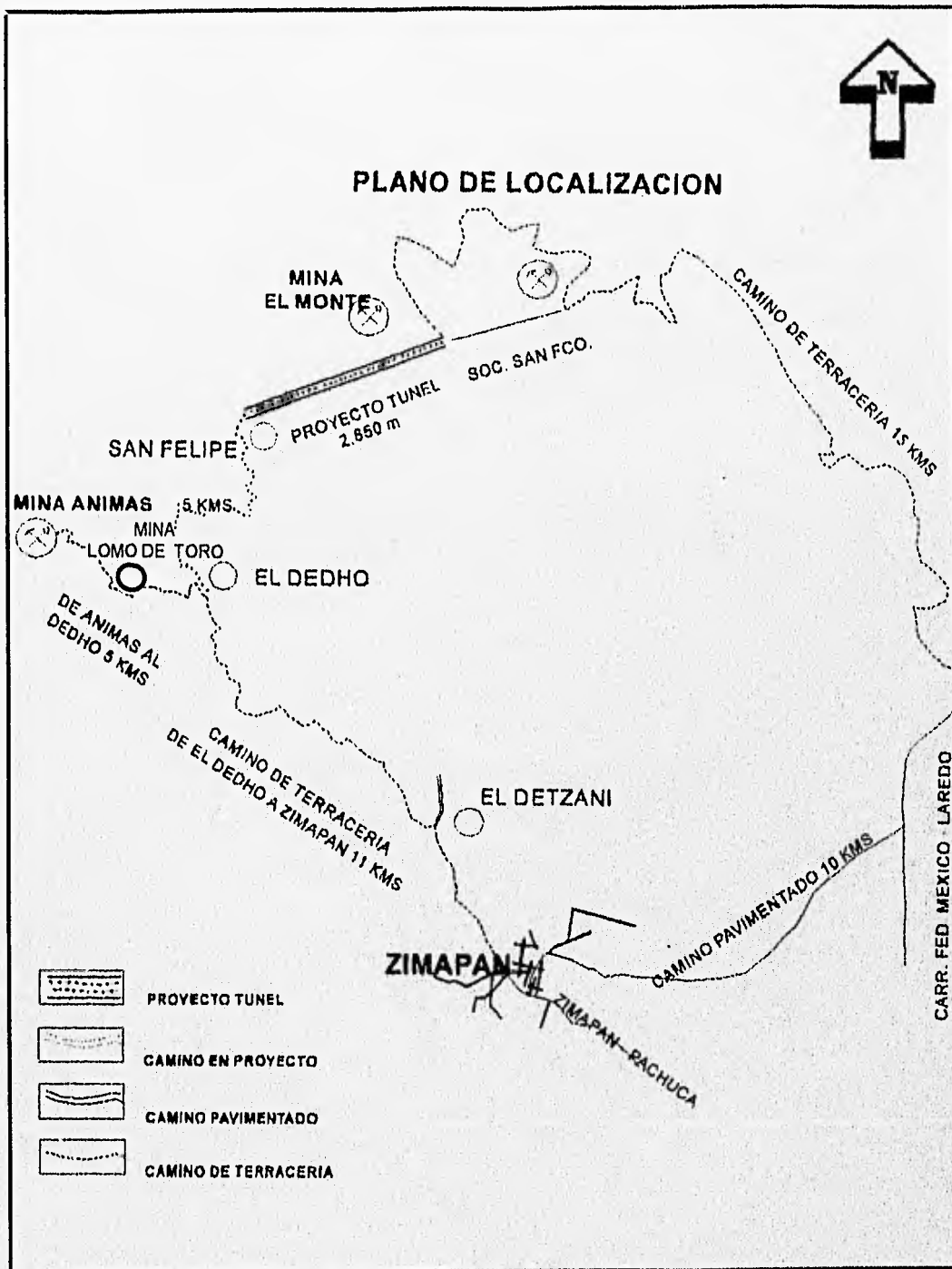
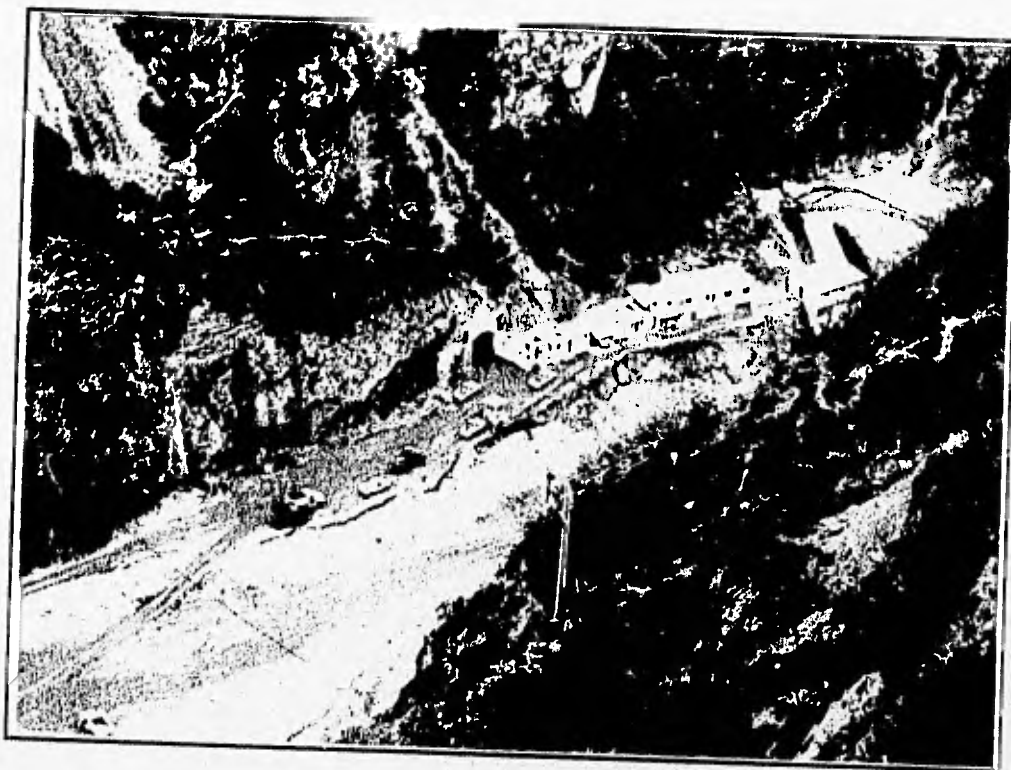


Figura 2 - Acceso a la zona del Carrizal.



Panorámica de la Mina Animas

La zona minera del Carrizal se encuentra localizada a 7 km al N 40° W de Zimapán y se llega a ella por un camino de terracería bastante sinuoso. Figura 2

II.2. FISIOGRAFÍA

Ubicación Geográfica: El distrito minero de Zimapán, se encuentra situado en las coordenadas $20^{\circ} 47' 40''$ de Latitud norte y $99^{\circ} 26' 50''$ de longitud oeste. Tiene una altitud media de 1900 m sobre el nivel del mar.

El área se encuentra delimitada por las siguientes provincias fisiográficas:

- a) Los límites Orientales de la "Mesa Central Mexicana".
- b) Los límites Occidentales de la "Sierra Madre Oriental".

Dentro de esta porción se localizan rasgos sobresalientes de tercer orden, tales como: el río Moctezuma, el río Tolimán, el abanico aluvial de Zimapán y la Sierra de El Monte.

De menor importancia se tienen localmente rasgos fisiográficos de cuarto orden, tales como El Poljé de el Monte, Las terrazas y los conos aluviales, los depósitos de talud, los conos volcánicos, los flujos de lava, etc.

Fisiográficamente el distrito minero de Zimapán presenta una topografía muy abrupta, tiene un relieve de sierras predominante, en el cual dadas las características y su historial geológico, se presentan modelados por disolución (poljés, dolinas y uvales), modelados cóncavos y modelados abarrancados.

II.3. GEOMORFOLOGÍA

El área estudiada desde un punto de vista geomorfológico, es altamente compleja. Dentro de ella se distinguen las siguientes estructuras:

El abanico aluvial de Zimapán, cuyas características lo hacen resaltar dentro del marco geológico del distrito minero. Es la única porción de pendiente suave que tiende a la horizontalidad. Su drenaje es de tipo dicotómico, el cual nace en las estructuras calcáreas situadas al NW de la Ciudad de Zimapán. Este abanico se extiende con su eje mayor orientado al NE-SW y con un eje menor orientado en dirección NW-SE

Las estructuras que predominan a lo largo y ancho del área de estudio son las extensas áreas que han sido plegadas intensamente, en muchos de los casos con recumbencias notorias y con fallamientos intensos, por lo cual se hacen conspicuas.

Estas áreas plegadas marcan lineamientos regionales, cuyos ejes corren en dirección NW-SE. Los fenómenos tectónicos que han afectado al distrito minero, han ocasionado la formación de las siguientes estructuras:

- a) Estructuras en rocas estratificadas: Son las que predominan en la región y se encuentran representadas por una serie de anticlinales y sinclinales, tales como el sinclinal de Lomo de Toro, el anticlinal de el Xodhé, el anticlinal de Puerto Ángel y el anticlinal de El Monte.
- b) Estructuras Masivas: Estas estructuras están representadas por afloramientos relativamente pequeños, de intrusivos cuarzo-monzoníticos, tales como el intrusivo de El Carrizal. Estas áreas son escarpadas e intensamente falladas y fracturadas.
- c) Estructuras Combinadas: Las áreas de El Carrizal y la de El Monte, son ejemplo típico de este tipo de estructuras geomorfológicas. En ambas zonas se localizan los contactos de estructuras masivas y estructuras estratificadas.
- d) Estructuras Volcánicas: Estas se localizan al Oriente del área estudiada. Aquí se pueden observar los tipos de formas volcánicas conocidas, tales como conos volcánicos (algunos ya erosionados), mesetas lávicas en forma de digitaciones, etc.

II.4. HIDROGRAFÍA

El principal rasgo hidrológico lo constituye el río Tolimán que es un afluente del Moctezuma, de régimen intermitente. Las principales corrientes forman parte de la Cuenca del Río Pánuco y ellas son el río Moctezuma y el río Tolimán, ambas tienen una orientación NE-SW. Estos dos ríos corren sobre lineamientos de fallas regionales.

El drenaje principal del distrito es de tipo enrejado. El control de las escurrentías está dado por las condiciones tectónicas que prevalecen en el área presentándose combinaciones de patrones de tipo radial, dendrítico y subparalelo.



Río Tolimán. principal rasgo hidrológico de la zona.

III. GEOLOGÍA GENERAL

Las rocas del distrito minero de Zimapán están constituidas principalmente por rocas sedimentarias carbonatadas y rocas ígneas que varían en edad desde fines del Jurásico al Reciente; han sido estudiadas por Mapes y Simons (1957). Solamente en las rocas Mesozoicas se encontraron fósiles, motivo por el cual las edades de las formaciones superiores fueron deducidas indirectamente.

Las rocas sedimentarias están representadas por calizas, lutitas, menores cantidades de limolitas y areniscas de edad Mesozoica. Los espesores de estas rocas son difíciles de conocer debido a la intensa deformación que presenta la zona.

Las rocas ígneas están representadas por cuerpos intrusivos como troncos, diques, sills y algunas rocas volcánicas emplazadas durante el Terciario. Siguiendo los contactos de los cuerpos intrusivos se han formado algunas rocas metasomáticas, tales como hornfels y skarns, igualmente se presentan procesos metamórficos de silicificación y marmolitización.

Las rocas más recientes las constituyen los depósitos lacustres, depósitos de terraza y aluvión.

III.1. ESTRATIGRAFÍA

SISTEMA JURÁSICO

Formación Las Trancas **(Jurásico Superior)**

Las rocas más antiguas se ubican en el extremo noreste del distrito y están constituidas por una alternancia de lutitas, limolitas y calizas en ocasiones con pedernal, así como menores cantidades de grauvacas y areniscas. Son las rocas más antiguas de la región y fueron designadas como formación por Segerstrom (1962) la localidad tipo de la formación se encuentra en la localidad Las Trancas, Hidalgo ubicada al NE del distrito.

La formación consta principalmente de una alternancia de calizas y lutitas, las capas de lutitas son de color negro que presentan fisilidad, contiene además clastos de caliza, de color gris oscuro. La caliza es de color gris a gris oscuro con estratos medios a gruesos. Esta formación presenta cambios de facies, en la zona poniente contiene rocas detríticas con fragmentos piroclásticos y algunas lavas.

Hacia el oriente los tamaños de los detritos disminuye y se hace calcárea (Carrillo y Suter, 1982). Esta formación ya en la zona está representada en su base por una arcosa de color gris verdoso y grauvacas de color gris continuando con una alternancia de grauvacas lutíticas amarillas interestratificadas con calizas de color gris oscuro que presenta estratos de 10 a 60 cm.

Se encuentra fuertemente deformada presentando pliegues anticlinales y sinclinales así como un fracturamiento con orientación preferencial NS y EW.

La edad de estas rocas se deduce por fósiles, principalmente por amonitas (Fries, Humphrey, Maldonado , Segerstrom, Imlay en Carrillo y Suter, 1982). Humphrey notó la presencia de *Mazapillites* en la localidad; este género de amonitas es característico de la parte superior del piso Kimmeridgiano del Jurásico Superior (en Mapes y Simons, 1957).

Esta formación subyace en concordancia de bajo de la caliza del Cretácico Inferior (Formación El Doctor). El desarrollo máximo de esta formación se encuentra aguas abajo del río Tolimán, principiando aproximadamente a tres kilómetros al norte de la mina Los Balcones, en donde se midió un espesor de 800 m (Segerstrom 1962).

SISTEMA CRETÁCICO

Formaciones El Doctor, Tamaulipas y El Abra **(Cretácico Inferior)**

Las rocas del Cretácico Inferior son las segundas en antigüedad de las unidades litológicas. Usando la nomenclatura de Carrasco (1970, en Carrillo y Suter, 1982), la Formación Tamaulipas correspondería a las facies de cuenca, La Tamabra para las facies de talud y El Doctor y El Abra para las facies de plataforma. Por sus características la zona pertenece a las facies de cuenca que corresponde a la formación Tamaulipas (por definirse).

Los afloramientos de las rocas del Cretácico Inferior son muy buenos en toda el área, y consta de una caliza de color gris oscuro. La caliza es muy resistente a la erosión y se erosiona en formas características, dando lugar a pendientes muy empinadas. La mayoría de los picos altos en el distrito están constituidos por calizas del Cretácico Inferior, incluyendo el Cerro de San Nicolás, en la sierra, que es el punto más alto del área.

La litología consiste de calizas de color gris en estratos de 10 a 30 cm con intercalaciones de lentes de pedernal de color negro, estos lentes en la barranca del Tolimán son tan persistentes que llegan a tener varios metros de longitud y dan una apariencia de ser intercalaciones de pedernal y caliza. Cerca de las zonas mineralizadas el pedernal adquiere un color blanco.

El pedernal, que varía en color entre gris oscuro y negro, es un constituyente muy abundante de las calizas del Cretácico Inferior y muy raramente puede encontrarse una sección que sume unas cuantas decenas de metros sin pedernal.

En la zona se pueden observar igualmente intercalaciones de calizas masivas de plataforma y de posible origen arrecifal, su relación con las calizas de cuenca (las cuales son muy fácil de reconocer por su alto contenido de pedernal) no es claro debido a la intensa deformación de la zona.

En las zonas mineras de El Monte y El Carrizal representa la roca encajonante de la mineralización.

Espesor:

El espesor de la formación es muy difícil de estimar pues existe un intenso plegamiento lo que ocasiona una repetición de los horizontes.

El espesor máximo expuesto en la barranca es aproximadamente de 1170 m (Mapes y Simons, 1957), pero esta cantidad es seguramente excesiva para el espesor verdadero, ya que no se tomó en cuenta que las capas están repetidas por plegamientos isoclinales y por numerosas inversiones medianas del echado predominante, que es sur - suroeste.

Edad:

La edad de la formación está hecha con base en microfósiles los cuales le asignan una edad Aptiano - Cenomaniano (En Excursión Geológica a la región de Zimapán, Carrillo y Suter, 1982).

Relaciones Estratigráficas:

Esta formación descansa concordantemente sobre la formación Las Trancas y está cubierta concordantemente por las rocas del Cretácico Superior (Formación Soyatal) aunque en algunas zonas está cubierta discordantemente por el fanglomerado El Morro, rocas volcánicas y aluvión reciente.

Formación Soyatal **(Cretácico Superior)**

Esta formación se encuentra aflorando en las porciones NW y NE del distrito. La litología de esta formación corresponde a una secuencia marina de tipo flysch y consiste de una alternancia de lutitas de color amarillo con calizas micríticas de color negro y margas.

Los estratos de lutitas y calizas presentan un echado aproximado de 55° W. La litología de la formación varía lateralmente con frecuencia, siendo en algunos lugares más calcárea y en otros más pelítica.

Igualmente los estratos de esta formación se caracterizan por numerosos pliegues sinsedimentarios y estructuras nodulares, causados por ruptura y flujo de los sedimentos.

Las exposiciones de las capas del Cretácico Superior son muy buenas en todos los lugares en donde afloran aún cuando muchas de las laderas de poca pendiente están cubiertas por caliche. Las áreas en donde afloran estos estratos están caracterizadas, generalmente, por pendientes suaves y formas topográficas redondeadas.

Espesor:

Los estratos del Cretácico Superior se encuentran muy plegados por lo que se le ha calculado que su espesor es de aproximadamente de 1000 m en la zona de Tolimán aunque en algunas zonas alcanza los 1200 m (Simons y Mapes, 1957).

Relaciones Estratigráficas:

La Formación Soyatal descansa sobre la Formación El doctor en forma concordante en el anticlinal de Puerto Ángel los estratos delgados de caliza con pedernal se transforman hacia arriba, gradualmente en caliza arcillosa con intercalaciones de estratos de lutita sin pedernal. Por otra parte, la formación Soyatal subyace discordantemente a varias rocas de edad terciaria y cuaternaria, incluyendo el fanglomerado El Morro, rocas volcánicas, depósitos de terraza y aluviones.

En la zona de Santa Gorgonia las rocas del Cretácico Superior han sido afectadas por metasomatismo debido a que esta formación ha sido intrusionada por la roca monzonítica; está tan afectada que se presenta como un hornfels verde cuya estratificación ha sido completamente borrada. La silicificación es igualmente un proceso de gran extensión dentro de la formación.

Edad:

La edad de las capas del Cretácico Superior aflorantes en el distrito de Zimapán se han datado con base a nanoplancton por M. Kiyokawa (Carrillo y Suter, 1982) los cuales le dan una edad de Turoniano Tardío al Campaniano.

SISTEMA TERCIARIO

Fanglomerado El Morro

Esta formación representa a un conglomerado pluvio - lacustre muy bien consolidado que es muy resistente a la erosión, motivo por el cual, forma laderas de fuertes pendientes y numerosos cantiles.

Esta formación fue definida por Mapes y Simons en 1956 y consiste de una roca de color rojo, gris-rojizo o gris, compuesta casi en su totalidad por guijas y pedregones de caliza gris, caliza parda y rocas volcánicas, mal clasificada, con formas que varían de angulosas a subangulosas.

La mayoría de los fragmentos tienen tamaños que varían de 2 a 20 cm; algunos cantos rodados alcanzan tamaños de 45 a 50 cm.

La matriz está constituida principalmente por fragmentos de caliza, arena y en menor escala, cuarzo, feldespatos y granos de mica; sin embargo, en algunos lugares el cuarzo es más abundante.

Espesor:

El fanglomerado El Morro varía en espesor desde unos cuantos metros hasta alcanzar unos 400 m aproximadamente; en general esta variación en espesor es gradual tanto a lo largo del rumbo como del echado, pero ocasionalmente existen variaciones abruptas (Simons y Mapes, 1957).

Relaciones Estratigráficas:

Los dos afloramientos más grandes del fanglomerado El Morro descansan discordantemente sobre las calizas del Cretácico Inferior. La discordancia angular entre esta formación y las rocas cretácicas es a menudo cerca de 90° .

Encima del fanglomerado El Morro y con interdigitaciones locales, se encuentra una formación de un espesor considerable, constituida por una secuencia de lavas andesíticas, basálticas y en menor cantidad por sus tobas correspondientes.

El fanglomerado se halla atravesado por numerosas fracturas esencialmente verticales, muy próximas unas a las otras, y por vetillas de calcita con rumbos que oscilan de 30 a 45° NW.

Las intrusiones de monzonita han producido un intenso metamorfismo en el fanglomerado en la zona del río Tolimán entre el cerro de la Nopalera y el cerro del Arcabuz. Los efectos metamórficos incluyen su decoloración del rojo al gris o al gris amarillento, recristalización de la matriz calcárea a un mármol impuro, desarrollo de diminutos granates de color amarillo verdoso en los fragmentos de caliza gris pura, y la transformación a hornfels de los fragmentos de caliza sílica o arcillosa.

Condiciones de depósito:

La marcada discordancia angular entre el fanglomerado El Morro y las rocas Mesozoicas sobre las que descansa, indica que antes del depósito del fanglomerado, las rocas Mesozoicas fueron afectadas por intenso plegamiento y erosión.

La abundancia de fragmentos similares a la caliza del Cretácico Superior, indica que la mayor parte del fanglomerado El Morro fue derivada de esta formación; sin embargo, en los lugares en los que este fanglomerado descansa sobre caliza del Cretácico Inferior, la evidencia de su fuente no es tan clara, pero la total falta de fragmentos de caliza con pedernal indica, cuando menos, que la mayor parte de los fragmentos no fueron derivados de las calizas con pedernal del Cretácico inferior. La mejor interpretación del fanglomerado El Morro es tal vez la de un conglomerado depositado en una cuenca, a lo largo del escarpado flanco nor-oriental de una región más elevada que el resto.

Hacia el final del depósito de este fanglomerado, la actividad volcánica principió en la cuenca y los dos procesos operaron simultáneamente por un período corto, antes de que el vulcanismo fuera el principal fenómeno.

Edad:

La edad del fanglomerado El Morro se desconoce, pero por su posición estratigráfica está fechado como Eoceno - Oligoceno.

Rocas Volcánicas Las Espinas

Las rocas volcánicas Las Espinas afloran en el lado oriental del distrito en la zona de Santa Gorgonia - San Pascual, estas rocas fueron definidas por Mapes y Simons en 1956.

Litología:

Las rocas volcánicas Las Espinas están constituidas por derrames y aglomerados que varían en composición desde la tita cuarcífera a andesita de piroxeno y andesita de olivino a basaltos de olivino sin o con hiperstena, aunque las andesitas constituyen la mayor parte de la formación. Las lavas forman la mayor parte del conjunto, habiendo tobas y aglomerados que son abundantes cerca de la base de la sección volcánica. Un constituyente menor de la secuencia es la obsidiana negra. La mayoría de las corrientes de lava son muy delgadas, variando en espesor de 1 a 4 metros, pero unas cuantas de ellas, tal como la que cubre la parte superior del Cerro de La Estancia, alcanzan un espesor de 100 más metros.

Sus afloramientos son buenos en el área del Cerro de Las Espinas; la mayor parte de la roca está cubierta por aluviones y suelos. En general, son fácilmente erosionables, motivo por el cual el terreno volcánico está caracterizado por formas topográficas redondeadas.

La mayor parte de las tierras de cultivo en los alrededores de Zimapán se localizan en terrenos de origen volcánico, siendo prácticamente las rocas volcánicas las únicas que han desarrollado tierras para esta labor.

Espesor:

Las rocas volcánicas Las Espinas varían en espesor, desde unos cuantos centímetros hasta 250 metros en el Cerro de Las Espinas, 370 metros en el Cerro de La Estancia y 375 metros en el Cerro Grande (Simons y Mapes, 1957).

Relaciones Estratigráficas:

Estas rocas descansan en concordancia sobre el fanglomerado El Morro, en las cercanías del Cerro de Las Espinas y al noroeste, oeste y suroeste de Zimapán, hasta el Cerro del Potrero.

En la región sureste del distrito, muy extensas áreas de rocas volcánicas Las Espinas se hallan cubiertas discordantemente por aluvión y depósitos de terraza cuaternarios. En los alrededores de Zimapán, las rocas volcánicas se hallan cubiertas discordantemente por el fanglomerado Zimapán.

Edad:

Las rocas volcánicas Las Espinas descansan concordantemente sobre el fanglomerado El Morro, presentándose en algunos lugares interdigitaciones entre las dos formaciones. Es muy probable que pertenezcan al final del Oligoceno y del Mioceno por correlación estratigráfica.

SISTEMA CUATERNARIO

Fanglomerado Zimapán **(Pleistoceno)**

El valle entre Zimapán y la Sierra de El Monte está ocupado por un abanico aluvial cubierto por caliche. El abanico está casi enteramente formado por guijas y pedregones de caliza del Cretácico Inferior, que varían en forma de angulosos a subangulosos, con un espesor máximo de 15 metros. Fue definido por Mapes y Simons en 1956.

Este abanico se encuentra, a través de todo su espesor, bien cementado por caliche. Actualmente el abanico está siendo disectado por arroyos intermitentes, los cuales han cortado en él, barrancas hasta de 15 metros de profundidad. En la base de este abanico nacen algunos manantiales que son utilizados para el riego; el más grande de estos manantiales se localiza en la parte noreste de Zimapán.

Fanglomerado Daxhí **(Pleistoceno)**

Definido por Mapes y Simons en 1956 es un depósito aluvial muy similar al fanglomerado Zimapán cubre la ladera nor-oriental del Cerro de Daxhí. Está constituido totalmente por fragmentos angulosos de caliza del Cretácico Inferior, en tamaños hasta de un metro de diámetro, cementados por caliche; su máximo espesor es de varios metros. Se halla considerablemente disectado por erosión muy reciente, a tal grado que en la actualidad está conservado solamente en los lomos de las colinas formadas por barrancas muy recientes.

Depósitos de terraza **(Recientes)**

Los depósitos de terraza están mejor desarrollados a lo largo del curso superior del río Tolimán y sus tributarios. Parecen existir dos grupos bien definidos de terrazas que persisten hasta un punto del río situado aproximadamente enfrente del Cerro de La Nopalera, en donde el cañón del río se angosta impidiendo así la formación de terrazas.

Algunos remanentes de terrazas a niveles mucho más altos ocurren al este, al sur y al suroeste de Zimapán; estas terrazas más antiguas se encuentran a 12 ó 13 metros arriba del actual nivel del valle. Una de estas terrazas de alto nivel y algunas de 1 metro se encuentran en el cauce de la Barranca Seca.

Las terrazas de poca elevación a lo largo del río Tolimán son utilizadas para la agricultura en pequeña escala, ya que ellas pueden regarse fácilmente.

Depósitos aluviales **(Recientes)**

Los depósitos aluviales se encuentran ampliamente distribuidos en el valle de Zimapán y en los diversos tributarios del río Tolimán.

La mayor parte del aluvión se encuentra en la cuenca situada en las cabeceras del río Tolimán y sus principales tributarios; en algunos lugares alcanza un espesor máximo de 10 a 12 metros. En todos los lugares en donde afloran, los depósitos aluviales están siendo disectados en la actualidad. Muchas de las principales barrancas que desagüan en la ladera sur de la Sierra de El Monte, estuvieron en el pasado rellenas por aluvión con espesores de algunos metros.

Remanentes de este aluvión se encuentran en la actualidad en forma de manchones a lo largo de las paredes de estas barrancas.

Rocas intrusivas

Las rocas intrusivas están representadas en la zona por el tronco del río Tolimán de composición monzonítica que aflora en la barranca de El Carrizal, el cual está acompañado por diques y sills de tamaños menores que presentan composiciones que varían de granodiorita a monzonita. Tiene una edad terciaria (Eoceno a Oligoceno). Regionalmente estos cuerpos intrusivos emplazados en las rocas plegadas de la Sierra Madre Oriental han sido considerados como evidencia de un plutonismo sinorogénico (De Cserna, 1956 en Villaseñor, 1987).

Tal magmatismo puede presentarse en la etapa tardía de la orogenia, cuando cesaron los esfuerzos compresivos o algún tiempo después de ello, como lo atestigua el hecho de que el tronco del Carrizal corte los pliegues de las rocas mesozoicas. Esto ha sido apoyado por determinaciones isotópicas tendientes a determinar la edad de los cuerpos intrusivos, tanto en el distrito de Zimapán como en sus alrededores.

Con las muestras que se tomaron de los cuerpos intrusivos en Zimapán se obtuvieron edades de 62.2 m.a. por el método Rb/Sr (González-Caver et al. 1985 en Villaseñor et al, 1987) Tomando en cuenta que los skarn que contienen tungsteno, como los del área del Monte que se fecharon en Zimapán (González-Caver y Jaimes-Martínez, 1986 en Villaseñor, 1987) corresponden a profundidades mayores que la de los skarn que no lo contienen o lo tienen en muy pequeñas cantidades, se sugiere por lo tanto que el tronco del Carrizal puede ser de una edad del Eoceno Temprano a Medio y no necesariamente corresponder al Paleoceno. Otras dataciones de cuerpos intrusivos como el de La Encarnación situada a pocos kilómetros al noreste de Zimapán dieron entre 50 y 40 m.a de antigüedad (M. Kiyokawa, en Carrillo y Suter, 1982), igualmente en la zona de La Negra Gaytan (1957) reportó una edad de 38.7 m.a. para cuerpos intrusivos similares al tronco del Carrizal.

III.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La Geología Estructural en este distrito, es bastante compleja; el estilo de deformación está controlado por la litología y espesor de las rocas sedimentarias que fueron depositadas antes de la orogenia Laramide. Así mismo, existe un fuerte contraste en la competencia mecánica de cada una de estas formaciones, lo que provoca una gran variedad de plegamientos y fracturamientos debidos a un esfuerzo principal que actuó con una orientación ENE-WSW (Carrillo y Suter, 1982) a finales del Cretácico, provocando que estas estructuras presenten generalmente un rumbo con dirección N-NW.

Una estructura mayor en forma de anticlinorio se encuentra entre el área del Carrizal y El Monte, conocido con el nombre de anticlinal de Puerto Ángel, orientado en dirección N-SE, con flancos buzando hacia el NE-SW.

El anticlinal de Puerto Ángel forma el cerro más alto al noreste de El Detzani. En su extremo suroeste el anticlinal es asimétrico; su flanco noreste es prácticamente vertical, mientras que su flanco suroeste buza hacia el suroeste. Hacia la parte noroeste del cerro de Juaxidó este pliegue pasa a uno isoclinal recostado y ya no puede ser reconocido más al noroeste.

Entre el Detzani y el Cerro de Juaxidó la cresta del anticlinal está ocupada por una caliza masiva fosilífera. El anticlinal buza al sureste con un ángulo pequeño y desaparece cerca del Detzani.

Otra estructura de este tipo la constituye el anticlinorio de El Piñón que tiene una anchura de 11 km, está delimitado por los sinclinales de Maconí, en el surponiente, y de El Aguacate en el norponiente. Su flanco suroccidental está formado por una serie de pliegues tipo chevron con ejes subhorizontales. Tanto el techo como el flanco nororiental del anticlinorio consisten de varios sinclinales y anticlinales internos de superficies axiales subverticales.

Las estructuras en la caliza del Cretácico Inferior presentan pliegues de tipo chevron, de rodilla y en zigzag esto se puede ver muy bien en la formación El Doctor, sobre el río Tolimán aproximadamente a 1 km al norte de la mina Las Animas.

Lo anterior se aprecia en las siguientes fotografías tomadas en el río Tolimán.



Deformación intensa en la caliza estratificada



Pliegues en la caliza estratificada sobre la terracería que conduce a la zona del Carrizal



Pliegues tipo rodilla sobre el Río Tolimán (Aguas abajo de la mina Animas).

Como consecuencia de los esfuerzos tectónicos a que estuvo sometida el área durante la Orogenia Laramide (finales del Cretácico, principios del Terciario) se formaron sistemas de fallas y fracturas de magnitud variable, las que se han clasificado en dos grupos, según la época en que se formaron, siendo unas originadas antes de la mineralización (fallas y fracturas pre-minerales); y otras originadas después de los eventos mineralizantes (fallas y fracturas post-minerales).

Existen fallas mayores de carácter regional como La Cabalgadura El Doctor que involucra a las formaciones El Doctor y Soyatal, su traza tiene una dirección SE y es conocida desde Daxhí, en el suroriente, hasta la cañada de El Ángel, en el norponiente (Carrillo y Suter, 1982). Otras fallas de carácter local son las del Malacate, San Pedro, La Estancia y Mui.

La falla del Malacate es de tipo normal y buza 65° - 70° al soroeste, a lo largo de la mayor parte de su extensión en que cruza al río Tolimán buza 45° en dirección al sur.

La falla de San Pedro es de tipo inversa con buzamiento de 70° al noroeste. La falla Estancia es de tipo normal con rumbo de $N30^{\circ}W$ presentando un salto de falla de cerca de 90 m. La falla Mui tiene una orientación norte-noroeste y llega a desplazar a la del Malacate horizontalmente hasta en 1200 m.

Las fallas y fracturas más comunes que se formaron antes de la mineralización presentan en general un rumbo N-SE, aunque existen otras con rumbo E-W; estas se caracterizan por encontrarse rellenas de los mismos minerales que conforman los depósitos de rendimiento económico, como son los minerales de Pb, Zn y Cu, así como los minerales de ganga, como son pirita, arsenopirita, fluorita, cuarzo y calcita; su presencia no es extraordinaria si se considera que estas fallas y fracturas fueron las conductoras de los fluidos mineralizantes y en algunos casos en ellas se encuentran emplazados numerosos cuerpos intrusivos en forma de diques y sills (Mapes y Simons).

Estudios recientes hechos por investigadores irlandeses (1994, comun. personal), han demostrado que gran cantidad de los minerales anteriormente citados, se encuentran al bajo de diques buzantes (en el área de El Carrizal, estos diques son clasificados como monzoníticos).

Ninguna falla de este tipo afecta estructuralmente a los cuerpos mineralizados, es decir, cuando se les encuentra juntos, no se observa que estén desplazando a alguno de los cuerpos.

En numerosas ocasiones, a pesar de todo, pueden confundirse algunas fallas de este tipo con aquéllas totalmente posteriores a los eventos mineralizantes si no se les trata con la debida precaución.

En cuanto a las fracturas originadas después de la mineralización es posible afirmar que en su mayoría son normales y con rumbo general NE-SW, pudiendo fácilmente identificárseles, en primer lugar, porque causan desplazamientos en los cuerpos mineralizados y no se observa ninguna traza de minerales primarios, aunque existen cavidades rellenas de óxidos de Fe, Mn y otras veces de calcita secundaria y arcilla roja.

En el área minera de El Carrizal, estas fallas presentan un rumbo general SW 55° y echados de 60 a 70° al SE, con desplazamientos hasta de 30 metros en dirección de su rumbo. (Mapes y Simons 1957).

III.3. GEOLOGÍA HISTÓRICA

Los elementos paleogeográficos que existían durante el Mesozoico en el Oriente de México constituyeron factores que controlaron el tipo de sedimentación y de deformaciones tectónicas existentes en la zona, encontrándose entre las principales:

- a) La Cuenca de México.
- b) La Plataforma Valles - San Luis Potosí.
- c) La Península o Isla de Coahuila.
- d) La Península o Archipiélago de Tamaulipas.
- e) El Antiguo Golfo de México.

Intervienen en la región de estudio, la Cuenca de México y la Plataforma Valles - San Luis Potosí.

La Plataforma Valles - San Luis Potosí se encuentra ubicada en la parte centro oriental de la Planicie Mexicana o Mesa Central, además de una porción de la Sierra Madre Oriental.

La Cuenca de México se localiza en la parte central de la Planicie Mexicana.

No se han encontrado hasta el momento afloramientos de rocas con una edad que vaya más allá del Jurásico Superior, periodo en el cual comienza una transgresión marina, resultado de la apertura del Golfo de México. Esta transgresión no cubre en su totalidad a la Plataforma Valles - San Luis Potosí, dando origen a depósitos de sedimentos pelágico - calcáreos que se acumulan en las cuencas (Formación Tamán con localidad tipo al SE de Tamazunchale, S.L.P.).

A finales del Jurásico Superior y principios del Cretácico, los sedimentos detríticos cubren a la secuencia calcárea, surgiendo además en el poniente una actividad volcánica responsable del depósito de una secuencia vulcano-sedimentaria, que según Carrillo y Suter (1982) pudiera constituir parte de una cuenca post-arco (Formación Las Trancas).

En los límites de la plataforma se desarrollan franjas arrecifales, franqueadas por depósitos post y pre-arrecifales (Aptiano-Cenomaniano), separadas de la plataforma por una cuenca denominada "Zimapán", aún no definida. En ella se depositan facies de plataforma, talud y cuenca.

En el Cretácico Superior los mares comienzan su retirada hacia el oriente. A finales del Mesozoico se manifiestan las primeras pulsaciones de la Orogenia Laramide que dura entre 75 y 50 M.A. manifestándose con el depósito de sedimentos tipo flysch (lutitas y margas interestratificadas con calizas), producto del levantamiento de las tierras positivas, dando como consecuencia un aumento del material clástico.

El máximo período de deformación orogénico (finales del Maestrichiano y principios del Paleoceno) ocasiona deformaciones compresionales intensas, llegando a formar algunas cabalgaduras, como por ejemplo, la cabalgadura de El Doctor. Las tierras emergidas sufren una intensa erosión dando origen a clastos gruesos (sedimentos fluvio lacustres de tipo mollasse) producto de la denudación de rocas mesozoicas.

Desde el Paleoceno, y en condiciones sinorogénicas tardías, se emplazan cuerpos intrusivos asociados a la mineralización, los cuales aprovechan las zonas de debilidad producidas por plegamiento y fracturamiento de las rocas mesozoicas preexistentes.

Los eventos tectónicos más importantes en la región son:

- a) Un período de fallamiento normal de edad Jurásico Inferior - Cretácico Superior.
- b) La Orogenia Laramide, período en el cual se desarrollan los grandes pliegues y cabalgaduras durante el Paleoceno - Eoceno Temprano, y además el emplazamiento de los cuerpos intrusivos. Las estructuras son controladas por la litología, espesor de las rocas sedimentarias del cretácico así como de la competencia de éstas.
- c) Un período en el que se desarrollan fosas tectónicas como la de El Cobrecito, produciéndose fallas que desplazan a la Cobijadura de Jiliapan (estas fallas se localizan aproximadamente a 30 km al NE de Zimapán).
- d) Una fase compresiva menor, posterior al depósito de la Formación Las Espinas, dando lugar a pliegues suaves en la Formación Las Espinas con dirección semejante a la de los pliegues laramídicos (NW-SE).
- e) Un período de fallamiento normal que forma sierras y cuencas produciendo basaltos de fisura que llegan a formar mesas.

Con base en las deformaciones existentes (sobre todo el tipo de plegamientos dúctiles en las calizas de la Formación El Doctor), Carrillo y Suter (1982) postulan la necesidad de la existencia de grandes cabalgaduras, que hayan desplazado grandes espesores de sedimentos.

En la tabla No 1 se presenta un resumen sobre la geología histórica de la región.

TABLA 1
RESUMEN DE LA GEOLOGÍA HISTÓRICA

CUATERNARIO	<p>Diseción de los depósitos aluviales, disolución del caliche.</p> <p>Erosión, depósitos aluviales, formación del caliche.</p> <p>Depósito de los fanglomerados Zimapán y Daxlí.</p>
TERCIARIO	<p>Erosión por el río Tolimán, superposición de las rocas cretácicas, levantamiento a lo largo del lado noreste de la falla Malacate.</p> <p>Depósito de la mena por los procesos de reemplazamiento y relleno de las fracturas.</p> <p>Metamorfismo de la caliza del cretácico inferior a taclita, y las del cretácico superior y el fanglomerado El Morro a hornfels.</p> <p>Intrusión de las rocas monzoníticas y sus diques asociados.</p> <p>Depósito de las rocas volcánicas Las Espinas: lavas andesíticas y basálticas, unas cuantas corrientes de latita cuarcífera y dacita, pocas tobas y aglomerados.</p> <p>Depósito del fanglomerado El Morro. La fuente fueron las tierras altas del suroeste donde afloraban las rocas del Cretácico Superior.</p> <p>Erosión prolongada, reducción de la superficie, después del plegamiento, a una de poco relieve.</p> <p>Plegamiento: pliegues recostados o recumbentes isoclinales, algunos abiertos, fallas pequeñas de empuje desde el suroeste.</p>
CRETÁCICO	<p>Regresión marina, depósito de formaciones terrígenas.</p> <p>Desarrollo de dos plataformas carbonatadas separadas por una cuenca intracratónica con el consecuente depósito de calizas y arrecifes calcáreos.</p>
JURÁSICO	<p>Depósito de calizas, areniscas y lutitas producto de una transgresión marina.</p>

IV. YACIMIENTOS MINERALES

IV.1. GENERALIDADES

El distrito minero de Zimapán se encuentra localizado al sur del cinturón de Pliegues y Cabalgaduras del Noreste de México, en el cual existen numerosos depósitos con características comunes, siendo la principal una de ellas el hecho de que se encuentran alojados en rocas carbonatadas dentro de limitados intervalos estratigráficos de edad Cretácica en general. (fig. 3)

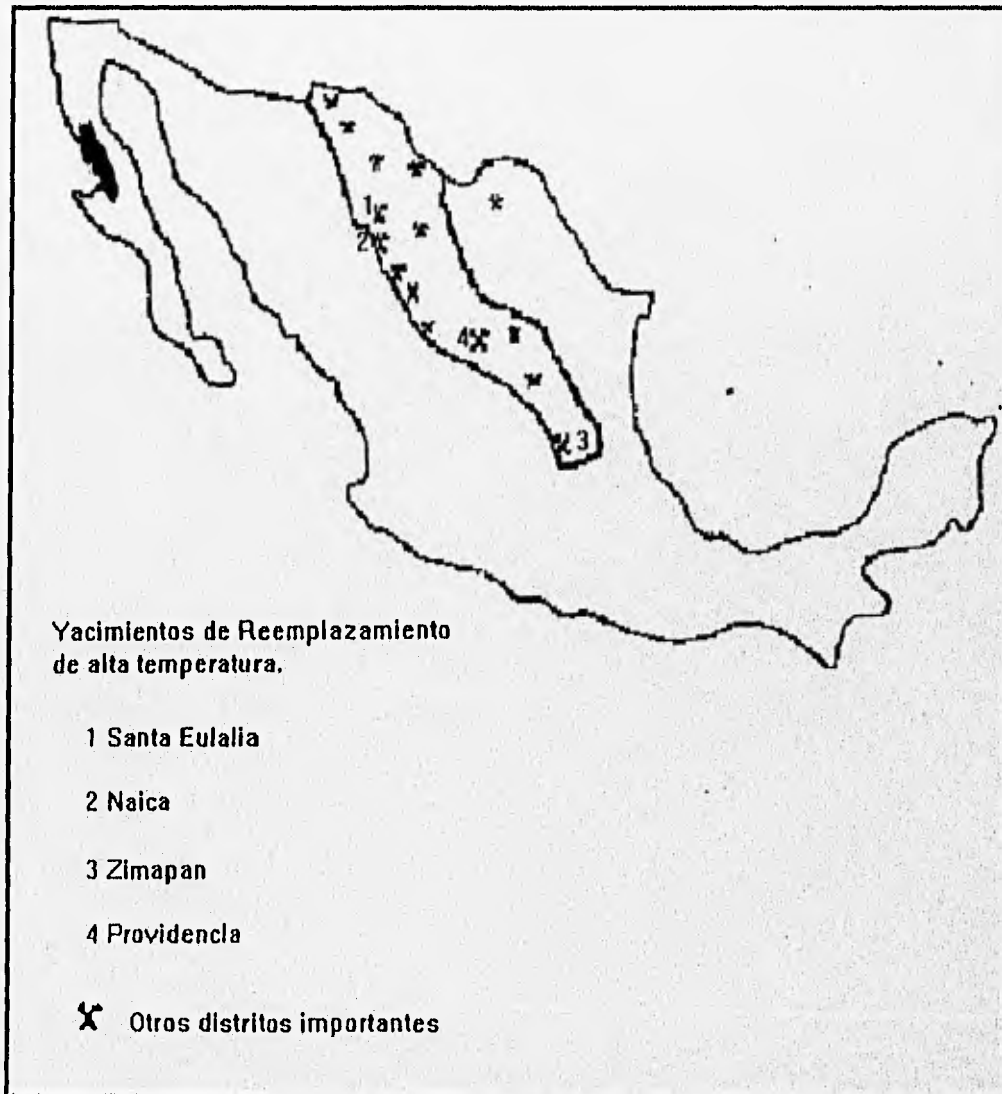


Figura 3 - Yacimientos de alta temperatura en calizas (tomada de Megaw et. al., 1988).

Megaw et al (1988) realizaron estudios sobre toda esta serie de depósitos cuya distribución geológica y geográfica se encuentra en una franja de 1600 km de longitud que inicia precisamente en Zimapán, Hidalgo hasta San Pedro Corralitos, Chihuahua y que podría continuarse al suroeste de Nuevo México y sureste de Arizona (Titley y Megaw 1985 en Megaw et al, 1988). Casi todos los depósitos se encuentran cerca de los límites de la Sierra Madre Occidental, por tanto las rocas volcánicas del terciario medio están presentes en casi todos los distritos. Por otro lado, se tiene en la mayoría de ellos diversos cuerpos intrusivos ya sea en forma de troncos, sills, diques, etc. que tienen minaralización tipo skarn tanto en intrusivo como en carbonatos. (Fig. 4)

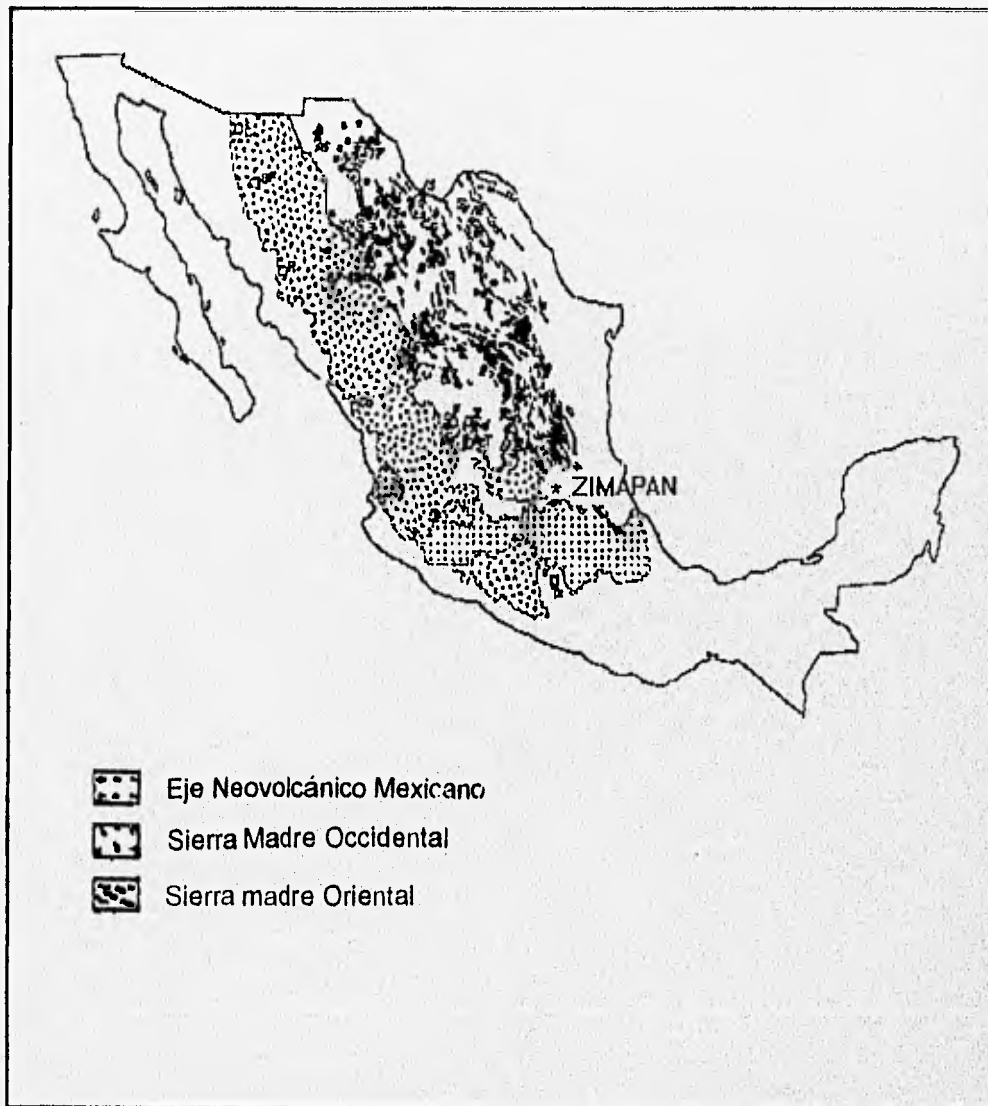


Figura 4

En todos los distritos, la roca encajonante consiste de un paquete de rocas mesozoicas que representan una transgresión marina que depositó estas rocas durante la inundación del basamento pre-meditriásico por un mar Jurásico-Cretácico (López Ramos, 1979, en Megaw et al, 1988). La irregularidad del terreno interconectó ambientes de plataforma, arrecifes y cuencas.

La depositación típica en esas cuencas consistió de lechos rojos, con evaporitas, seguidas por una serie de lutitas y facies carbonatadas (Smith, 1981, en Megaw et al, 1988). Estos depósitos exceden frecuentemente los 3000 m de espesor y consisten generalmente de secciones monótonas de calizas de cuenca y plataforma con algo de dolomitas. Posteriormente, este paquete de rocas fue deformado durante la orogenia Laramide a principios del Terciario (Campa, 1985, en Megaw et al, 1988).

Los depósitos se presentan en forma de mantos, chimeneas y vetas en las zonas de reemplazamiento, mientras que en el skarn se encuentra en forma de lentes o diseminados. Cada uno de estos tipos de yacimiento pueden existir separadamente, pero es muy común que gradúen composicional y morfológicamente a algún otro a través de distancias verticales y horizontales de algunos cientos de metros a varios kilómetros. La mena de estos yacimientos consiste de sulfuros de plomo, zinc y cobre con variables cantidades de hierro en forma de magnetita, que se presentan fundamentalmente en forma masiva, así como plata dentro de sulfosales. Los principales minerales de ganga son carbonatos, cuarzo y calcosilicatos. La porción superior de los yacimientos en muchos distritos se oxida fuertemente, encontrando minerales de hierro como goethita-limonita, hematita, smithsonita (Estos minerales fueron identificados en la zona de mineral oxidado de la mina Lomo de Toro, Mapes y Simons, 1957), etc. Estas zonas de oxidación se han utilizado en muchos depósitos como guía de mineralización.

Este tipo de depósitos fue clasificado por Megaw et al (1988) como yacimientos de alta temperatura ($> 200^{\circ}\text{C}$) en carbonatos. Los datos de inclusiones fluidas e isótopos estables que se hicieron en varios distritos de la región arrojaron temperaturas de 200° a 500°C , además en todos los distritos la mineralización fue formada por soluciones con más de 5% equivalentes de NaCl; los datos de estudios isotópicos mostraron una fuerte mezcla de fluidos hidrotermales y meteóricos (Haynes y Kesler, 1988). Esta clasificación de Megaw abarca los dos conceptos tradicionales que se habían utilizado para nombrar a este tipo de yacimientos como de reemplazamiento en calizas (Prescott 1926) y depósitos distales de plomo-zinc en zonas de skarn (Einaudi et al 1981).

Un factor muy importante para la formación de este tipo de yacimientos es la porosidad y la permeabilidad de la roca encajonante. Maxwell y Verrall (1953) en Megaw et al (1988) demostraron que al calentarse la caliza aumenta su porosidad y por lo tanto existe un incremento considerable en la permeabilidad.

Ellos realizaron un experimento que consistió en calentar la caliza a temperaturas de 100 a 700°C , con una presión de confinamiento del orden de los 700 bares (2 a 4 km de profundidad), se dio una expansión en la estructura del carbonato que provocó un incremento en la porosidad de 2 a 4 órdenes de magnitud.

Los autores concluyeron que un mecanismo que podría controlar y afectar fuertemente la morfología del yacimiento es un incremento considerable de la permeabilidad de la roca encajonante.

El calor conductivo transferido de una roca ígnea a una roca carbonatada podría provocar una zona con permeabilidad incrementada inmediatamente adyacente al cuerpo intrusivo.

En aquéllos sistemas caracterizados por un control de fracturamiento, el movimiento de gases y fluidos con altas temperaturas debidos a pérdida de calor convectivo podría igualmente incrementar la porosidad de la roca por la cual está circulando, provocando también halos de roca más permeable lo cual favorece el reemplazamiento de la roca por los fluidos mineralizantes.

Otra característica es el tipo de alteración, la cual está aparentemente mejor desarrollada en el contacto stock - skarn y es menor dentro de las chimeneas, diques y contactos sills - skarn. Los contactos con el tronco muestran comunmente grandes áreas de marmolitización y silicificación alrededor de las intrusiones y menos frecuentemente en los alrededores de los yacimientos. Esta intensa recristalización de carbonatos puede extenderse por varios metros o limitarse a un delgado halo alrededor del tronco (Tripplett 1952 en Megaw et al, 1988). La alteración alrededor de mantos, chimeneas, diques, sills y skarn se limita generalmente a estrechas orillas de recristalización y silicificación de la caliza. Los cuerpos mineralizados están constituidos por una mezcla de sulfuros como son: esfalerita, galena y calcopirita (> 65 %), con una ganga dominada por carbonatos, sulfuros como la pirita, pirrotita, arsenopirita, además se puede encontrar fluorita, cuarzo y pequeñas cantidades de calcosilicatos (< 5 %).

La relación espacial de óxidos de manganeso, que en ocasiones rellenan pequeñas fracturas cercanas al intrusivo, indica un ascenso y migración de los fluidos mineralizantes (Megaw 1986 en Megaw et al, 1988). Se interpreta que los fluidos mineralizantes migran vertical y horizontalmente a lo largo de esas estructuras interconectadas (Prescott 1926) y reaccionan con la roca encajonante.

Específicamente, para el yacimiento de Zimapán, su origen se debe al emplazamiento de un cuerpo intrusivo (tronco) monzonítico, acompañado por diques y sills de composición que varía de monzonítica a granodiorítica.

La mineralización se encuentra principalmente alojada en mantos emplazados en forma subhorizontal, con formas tabulares elongadas, y en chimeneas que son cuerpos verticales o levemente inclinados de formas tabulares, que pueden ser concordantes o discordantes a la roca encajonante.

Cabe hacer notar que llega a existir un cambio gradual composicional y morfológico dentro de los yacimientos. Las chimeneas en Zimapán muestran una transición mineralógica hacia las orillas de los cuerpos de sulfuros a zonas de skarn, principalmente cerca del intrusivo central. Este cambio puede observarse muy bien en la mina Las Animas en donde existe un cambio gradual de la zona de skarn a la chimenea.

La mineralización ya dentro del skarn consiste de mezclas de silicatos de Ca, Fe, Mg, Mn, con o sin importantes cantidades de sulfuros; éstos ocurren en el skarn en forma diseminada, en forma de reemplazamiento, relleno de fracturas y en menor proporción como vetillas de sulfuros.

También existe mineralización en forma diseminada en los diques y sills, principalmente al bajo de estas estructuras.

Los minerales presentan una variación y zoneamiento espacial en abundancia. Por ejemplo, la esfalerita es más abundante en las chimeneas predominando sobre la galena, contrariamente la galena excede a la esfalerita en los mantos (Tripplett, 1952, Maldonado y Megaw, 1983 en Megaw et al 1988). La calcopirita y arsenopirita ocurren principalmente en niveles profundos, cerca del skarn o cerca de la intrusión mineral, mientras que las sulfosales de plomo y plata son más comunes en las periferias de los cuerpos.

EDAD DE LA MINERALIZACIÓN

La edad de la mineralización en los distritos que se encuentran en esta franja, localizada en los límites entre la Sierra Madre Oriental y la Occidental, es del Terciario Medio poco después de la principal deformación de las rocas Cretácicas (orogenia Laramide). En ellos las dataciones por el método de K / Ar en rocas intrusivas relacionadas al proceso de mineralización se encuentran en un rango de 46.6 a 25.9 millones de años (Clark et. al. 1979, Damon et. al. 1981, Ruiz y Barton 1985, Megaw datos sin pub. En Megaw (1988), ya que los cuerpos minerales, no muestran ninguna evidencia de haber participado en la deformación principal debida a la orogenia Laramide. Mientras que en los yacimientos en forma de veta que se encuentran al suroeste del área y que no están relacionados con los cuerpos intrusivos mayores, la mineralización es posterior al fanglomerado El Morro y a las rocas volcánicas de Las Espinas, ya que las vetas están encajonadas en cada una de estas formaciones.

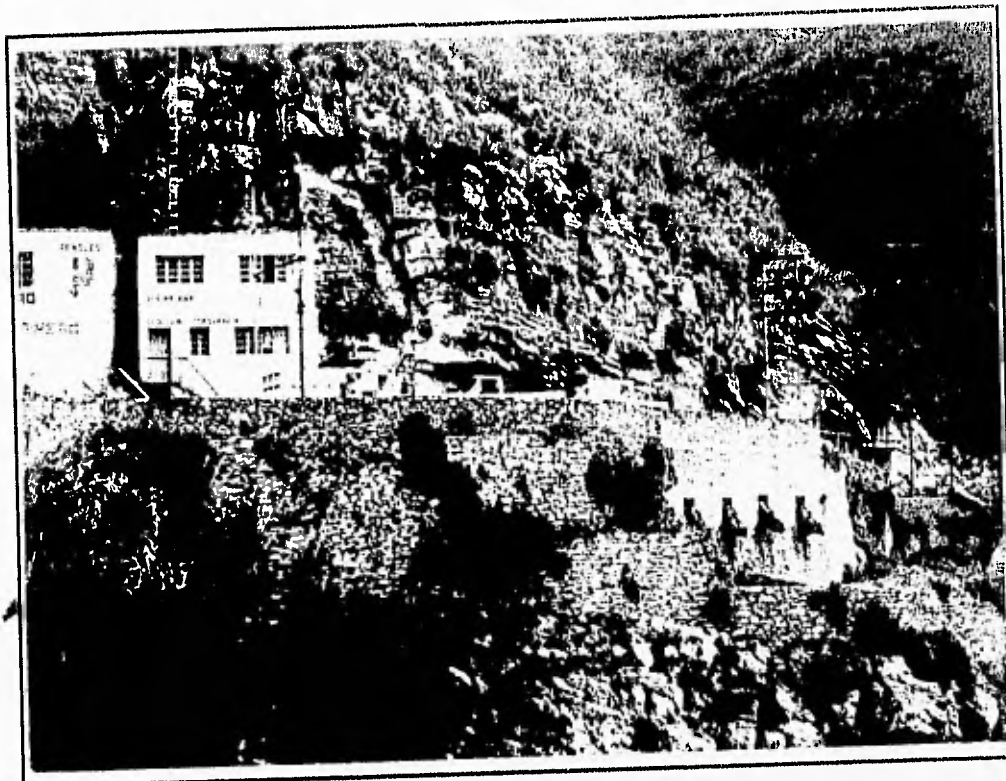
No existe ninguna prueba directa de que la mineralización fuera contemporánea o por lo menos casi contemporánea en todas las zonas mineras, pero su proximidad en espacio, la relación genética de los yacimientos minerales de todas las zonas a cuerpos de roca intrusiva similar, indica que la mineralización en todo el distrito es contemporánea; aunque hubo varias etapas de mineralización. La edad del fanglomerado El Morro, es probablemente del Oligoceno por correlación estratigráfica y la de las rocas volcánicas es tal vez del Mioceno, consecuentemente la edad de la mineralización podría ser de fines del Mioceno a principios del Plioceno.

IV.2. DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO

Los yacimientos minerales de El Carrizal están localizados en el sinclinal recostado de La Paz - Vaquero (Morin-Martínez et al. 1986) que forma parte del anticlinorio San Rafael que a su vez forma parte del anticlinorio El Piñón. El área está muy fracturada y sigue el sistema regional paralelo a los pliegues. Dentro de esta zona se presenta la siguiente litología.



Vista panorámica de la mina Animas



Mina Lomo de Toro



Panorámica de la mina Lomo de Toro



Antiguas obras mineras de la mina Lomo de Toro.

IV.2.1. LITOLOGÍA

CALIZA DEL CRETÁCICO INFERIOR

La secuencia del Cretácico Inferior constituye la roca encajonante de la mineralización; existe una discrepancia en llamar a esta formación El Doctor o Tamaulipas, sin embargo, en la zona del Carrizal el pedernal es muy abundante, lo que indica que se trata de las facies de cuenca la cual corresponde a la Formación Tamaulipas según la nomenclatura de Carrasco, 1970, (Carrillo y Suter, 1982). La Formación está constituida por calizas de color gris a gris oscuro de textura mudstone a wackestone que se presenta en forma masiva y estratificada (estratos de 20 a 50 cm de espesor) con nódulos de pedernal negro, el cual forma bandas muy continuas de varios metros de largo y anchos hasta de 15 cm, la caliza se encuentra muy plegada presentando pliegues de tipo chevron, echelón, de rodilla y recostados, forma pequeños karsts en donde se han desarrollado estalactitas y estalagmitas, todo esto se aprecia muy bien a unos 700 m al norte de la mina Las Animas. Cerca de las zona mineralizada la caliza se encuentra recristalizada y en ocasiones completamente reemplazada por silicatos, igualmente cerca de estas zonas el pedernal adquiere un color blanco.

Descripción de la Caliza

Megascópica:

Roca de color gris oscuro al fresco; se observa más oscura al fresco; de textura mudstone a wackstone.

Microscópica:

Roca constituida por un mosaico homogéneo de micrita con algunos parches de espatita, la cual también se presenta en forma de vetillas; contiene un porcentaje del 5 al 10 % de aloquímicos (bioclastos : foraminíferos).

Clasificación: Micrita fosilífera

(Por su contenido de foraminíferos y debido a que contiene abundante pedernal interbandeado este tipo de calizas corresponde a una facies de cuenca).

ROCAS INTRUSIVAS

La zona central del Carrizal se encuentra intrusionada por un tronco de composición cuarzomonzonítico conocido como Intrusivo Carrizal; la roca presenta un color rojizo al intemperismo y blanco al fresco con índice de color leucocrático, de textura porfírica que tiene una traza elíptica cuyos ejes miden 1.5 km por 0.250 km con una orientación NE - SW con numerosos diques y sills de composición cuarzomonzonítica a diorítica que presentan una orientación NE - SW paralelos a la elongación del tronco principal.

La forma del tronco principal es de un cono truncado que se ensancha hacia abajo con respaldos de echado general de 82° en direcciones opuestas.

Los diques principales son: El Tiro, La Paz, 514, Balcones, Promontorio, Arcángel, Las Animas y San Felipe todos ellos en general emplazados en forma casi vertical con espesores de hasta 15 m; entre los sills el principal se denomina Grecia seguido de otros más pequeños que se encuentran emplazados casi horizontalmente o con echados de bajo ángulo (García y Querol, 1988). Estos cuerpos son de color blanco a amarillento al intemperismo y blancos al fresco, con textura porfírica a afanítica están constituidos principalmente por plagioclasas de composición intermedia y feldespato potásico, con minerales secundarios y accesorios como cuarzo, diopsida, tremolita-actinolita, epidota y minerales opacos diseminados, los porcentajes de estos minerales varían dando clasificaciones de cuarzomonzonitas a monzodioritas.

El Intrusivo Carrizal presenta una fuerte alteración limonítica la cual le da una tonalidad rojiza al intemperismo, sericitica y piritización. Así mismo los diques y sills presentan alteraciones como cloritización, epidotización y serpentización.

Descripción del Intrusivo Carrizal

Macroscópica

Roca de color rojo al intemperismo y gris claro al fresco presenta una textura porfírica con fenocristales de feldespato en una matriz igualmente de feldespato; se observan algunas zonas muy oxidadas (óxidos de hierro). Presenta vetillas de calcita y de sulfuros, estos se encuentran también en forma diseminada.

Microscópica:

Roca de textura porfírica formada por un mosaico de fenocristales de ortoclasa y plagioclasa intermedia en una matriz igualmente de feldespato, algunos fenocristales presentan bordes de alteración a sericitica y minerales opacos. La mineralogía observada fue la siguiente:

Min. Esenciales

Oligoclasa-andesina 45%
Ortoclasa 40%
Cuarzo 5%

Min. Secundarios

Anfiboles 2%
Clorita 2%
Minerales opacos 3%
Sericita 3%

Clasificación: Cuarzomonzonita

ROCAS METASOMÁTICAS

Las rocas metasomáticas están representadas por un skarn producto del emplazamiento de los cuerpos intrusivos; la roca es de un color verdoso al intemperismo y al fresco, con textura porfidoblástica, con una matriz microcristalina.

Su mineralogía consiste de wollastonita, diopsida, plagioclasas, feldespato potásico, clorita, epidota, tremolita, granate (andradita) y vesubianita. Su mejor expresión se tiene al alto del cuerpo intrusivo Carrizal, en donde llega a tener hasta 80 m de extensión siendo en esta parte la roca encajonante de la mineralización. Alrededor de los pequeños diques sólo alcanzan unos cuantos mm de extensión.

La mineralogía consiste de granate, calcita, wollastonita, diópsida, epidota, clorita, cuarzo y minerales opacos. El exoskarn se localiza alrededor del cuerpo intrusivo principal, adquiriendo mayor consistencia y espesor cuando está encajonado por diques, estos diques suelen contener mineralización diseminada principalmente al bajo de su estructura.

Descripción de Rocas Metasomáticas

Macroscópica:

Roca de color verde al fresco, gris verdosa al intemperismo. Presenta una textura xenomórfica y un bandeamiento de color blanco que al parecer es de feldespatos. Muestra algunas vetillas de calcita y sulfuros diseminados.

Microscópica:

Roca de textura xenomórfica en la cual se observó la siguiente mineralogía:

Minerales esenciales

Plagioclasas 35%
Ortoclasa 12%
Min. Maficos (px. y anf.) 10%
Cuarzo 6%
Andradita 7%

Minerales accesorios

Wollastonita 10%
Clorita 5%
Epidota 3%
Calcita 5%
Minerales opacos 5%
Vesubianita 2%

Clasificación: Skarn

Este tipo de rocas afloran en halos alrededor de los cuerpos intrusivos, en los cuerpos menores como diques y sills en ocasiones se limita solo a algunos milímetros o incluso no existe; es en el tronco del Carrizal en donde alcanza su mayor desarrollo, principalmente al alto de la estructura y es en esta zona donde ocurre la mineralización de tipo reemplazamiento.

ROCAS METAMÓRFICAS

Están representadas por mármoles de color blanco a gris, son producto del metamorfismo de contacto de la roca caliza, son la expresión de las condiciones de presión y temperatura a las que estuvieron sometidas estas rocas al momento del emplazamiento de los cuerpos intrusivos, están constituidas por un mosaico de cristales de calcita cuyos tamaños van de 0.5 a 3 mm.

Entre las minas de Lomo de Toro y Balcones, el proceso metamórfico debido al emplazamiento de diques ha transformado algunas capas de pedernal a una roca compuestas de granate verde, con algo de wollastonita; esta última se desarrolla principalmente entre los contactos del pedernal y la caliza.

Las zonas en las que afloran y su posición dentro de la zona de estas rocas se aprecia en el plano geológico y en la sección del apéndice 1

IV.2.2. FORMA DE LOS DEPÓSITOS

MINA LAS ANIMAS

Esta mina, descrita por García y Querol (1988), presenta varios cuerpos en forma de mantos y chimeneas, cuya roca encajonante es la caliza y son sensiblemente paralelas a los cuerpos intrusivos; el buzamiento general de las chimeneas es al NE, están constituidos por una mineralogía de sulfuros en forma masiva de plomo y zinc con algo de plata en forma de sulfosales muy diseminadas; igualmente existe algo de reemplazamiento dentro del skarn formado por sulfuros en forma diseminada entre los silicatos, en esta mina, el cuerpo más importante lo representa la chimenea Las Animas, seguida de la chimenea Santa Elena, ambas presentan características muy similares.

La chimenea Animas tiene forma irregular entre la superficie y el nivel -22; de éste al nivel -140 se comporta con mayor regularidad, presentando una sección elíptica alargada, cuyos ejes miden 100 y 25 m, respectivamente, con una altura aproximada de 120 m. Se encuentra en el límite entre un dique de monzonita (dique del Tiro) con el tronco de El Carrizal de composición semejante, en el extremo de una zona de skarn que alcanza hasta 80 m de espesor. La roca encajonante está constituida en su parte sur por calizas masivas de la formación Tamaulipas Superior y en su parte norte por el skarn, el buzamiento de las chimeneas es de 60° - 80° al noreste. Su tamaño es muy variable con secciones horizontales de 24 hasta 2000 m² y extensión vertical hasta 250 m. Estas chimeneas están constituidas por sulfuros que se presentan en forma fanerítica de grano grueso a fino. Se caracterizan por tener un alto contenido de Fe hacia sus extremos, evidenciado por la presencia de pirrotita, pirita y algo de magnetita. El resto de la mineralogía la componen esfalerita, galena, calcopirita, sulfosales de plomo y antimonio en ocasiones con plata. La chimenea Las Animas tiene una longitud máxima de 100 m de diámetro a una profundidad de 343 m. A los 243 m se ramifica hacia arriba en varias estructuras en forma de mantos y vetas. A los 433 m se acuña para terminar en el contacto con el exoskarn del intrusivo Carrizal. Los espesores de la mena en la chimenea las Animas muestra claramente la forma elíptica de la chimenea. La ley promedio de la chimenea es 225 ppm Ag, 3.54 % Pb, 4.84 % Zn y 0.21 % Cu.

Los mantos son la segunda expresión de la mineralización en la mina, todos ellos presentan formas tabulares, a lo largo de estratos calcáreos y en ocasiones dentro del skarn, el más importante de ellos es el manto 455, de forma cilíndrica de 20 x 40 m buzando hacia el SW, es paralelo a otros cuerpos estratiformes emplazados dentro de exoskarn. Los sulfuros presentes son esfalerita, calcopirita y pirita. La ley de este mineral es de 145 ppm Ag, 0.58 % de Pb, 1.55 % de Zn y 0.46 % de Cu por tonelada con una producción de 20,000 T/M.

Por último las vetas conforman un sistema de rumbo NW - SE con extensiones de hasta 55 m. Se encuentran alojadas tanto en la caliza masiva como en la estratificada, siempre nacen del cuerpo ígneo principal (Tronco Carrizal) y se acuñan a medida que se alejan de él. Son cuerpos muy irregulares en su mineralogía en todas direcciones lo que dificulta su minado.

En general las vetas son las estructuras mineralizadas más jóvenes pues son posteriores a los mantos, chimeneas y diques ígneos, a los cuales enriquecen en sus intersecciones. Su mineralogía es pirita, galena de grano fino; todos ellos distribuidos en forma de crustificación a lo largo de la estructura, las principales vetas de la mina Animas Son 401, 412 y 413. La ley general de estas vetas es de 179 ppm Ag, 2.21 % Pb, 4.17 % Zn y 0.45 % Cu.

Por su potencial y ley la chimenea Las Animas fué el cuerpo más importante de la zona, productora de plomo, zinc, plata, cobre, (Antimonio y Tungsteno); su explotación se realiza por el método de subniveles para las chimeneas y para los mantos y vetas se utiliza el de tumbe sobre carga.

MINA LOMO DE TORO

A diferencia de la mina Animas, Lomo de Toro se encuentra más alejada del cuerpo intrusivo principal (Tronco Carrizal) y de la zona de skarn. Los depósitos minerales de esta mina representan un depósito de reemplazamiento en calizas. Los cuerpos mineralizados se encuentran alojados dentro de la caliza del Cretácico Inferior, principalmente dentro de la caliza masiva siguiendo el contacto entre la caliza masiva y la estratificada; así mismo, sigue el estilo de deformación de la zona. Los mantos son la principal expresión de los cuerpos mineralizados, aunque se llegan a presentar pequeñas chimeneas; estos cuerpos están constituidos por sulfuros "masivos" de esfalerita y galena con inclusiones de pirita, calcopirita y pirrotita principalmente, hacia los bordes de los cuerpos, presentan una textura de bandeamiento; con bandas intercaladas de 30 a 40 cm de espesor entre estos minerales. Dentro de esta mina los principales cuerpos son San Carlos, Horizonte 1 y 2 y Santa Fe.

Las reservas de la unidad en la zona del Carrizal (minas Las Animas y Lomo de Toro) se incrementaron en 500,900 de 1994 a 1995, colocándose las reservas totales en 1,746,900, de ellas 1,223,600 son probadas y el resto son probables, la ley del mineral es de 184 ppm Ag, 5.07 % Pb, 10.95 % Zn y 0.03 % Cu (comun. personal Cia. Fresnillo, S.A. de C.V.).

IV.3. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

Para este trabajo se estudió tanto material de la roca encajonante como de mena. Se realizó un muestreo detallado de cada uno de los diferentes tipos de roca en superficie y en las obras mineras. La localización de estas rocas se observa en el plano geológico del apéndice 1.

Primeramente las muestras fueron descritas en un microscopio estereoscópico y se escogió algunas de ellas para preparar las láminas delgadas y superficies pulidas.

Las láminas delgadas fueron estudiadas en el microscopio petrográfico, (luz transmitida) identificando los minerales con base en sus propiedades ópticas. Para ello se utilizaron las tablas mineralógicas del Kerr (1959) y Heinrich (1965).

Las superficies pulidas fueron estudiadas en el microscopio mineralográfico. (luz reflejada), la observación de las muestras se realizó con objetivos de inmersión, al igual que con luz transmitida los minerales se identifican mediante las diferentes propiedades que presentan a la luz. Para este trabajo se utilizó la bibliografía mineralógica de Spry y Gedlinske (1987) y Ramdohr (1980).

Asimismo, las superficies pulidas fueron estudiadas por técnicas de análisis microanalíticos que son esenciales para este tipo de estudios, ya que existen minerales que presentan propiedades ópticas muy parecidas entre sí o que tienen tamaños muy pequeños lo cual hace muy difícil su identificación por los métodos convencionales; adicionalmente este tipo de estudios microanalíticos proporcionan la composición química de los minerales con lo cual se puede saber la cantidad exacta del metal de interés contenida en el mineral y calcular la fórmula del mismo.

Las técnicas microanalíticas utilizadas en este estudio son: microscopio electrónico de barrido y microsonda electrónica.

El microscopio electrónico de barrido con el que se trabajó es un Jeol 35C que tiene acoplado un analizador de rayos x por energía dispersiva marca TRACOR que se encuentra en el Instituto de Geología de la UNAM. En este equipo se observó algunas de las muestras y se llevó a cabo análisis semi-cuantitativos. Las condiciones de operación fueron 20 keV de voltaje y 20 nA de corriente. El tiempo de conteo fue de 100 segundos.

La microsonda electrónica utilizada fue una CAMECA SX-50 del departamento de Geología y Geofísica de la Universidad de Utah en Salt Lake City; siendo las condiciones de operación 20 keV de voltaje y 20 nA de corriente; el tamaño de haz de electrones varió de 1 micrometro a 5 micrometros, utilizando, patrones metales, minerales sintéticos y minerales naturales. En ella se hicieron análisis cuantitativos de algunos minerales de campos seleccionados. (M.G. Villaseñor comunicación personal).

Algunos datos obtenidos se aprecian en la tabla No 2.

TABLA 2
ANÁLISIS POR MICROSONDA ELECTRONICA

ANÁLISIS

MINERAL	Cu	Ag	Pb	Sb	S	Total
MENEGHINITA	1.17	0.0	59.63	19.25	17.21	97.37
BOULANGERITA	0.0	0.01	55.39	24.84	18.28	98.59
GALENA		0.98	86.79	0.42	13.09	

FORMULA

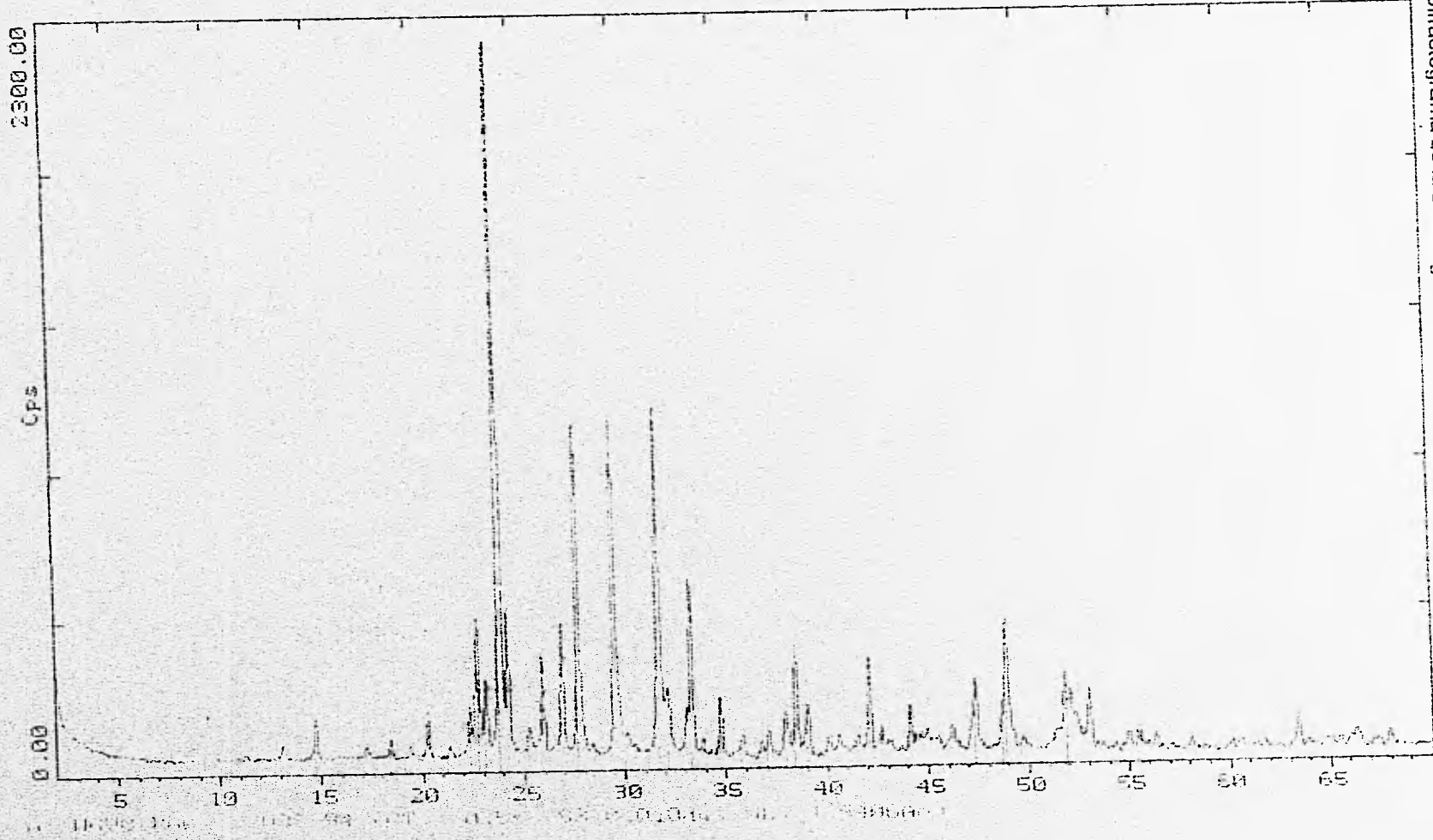
	Cu	Ag	Pb	Sb	S
MENEGHINITA	0.89	0.0	12.89	7.08	24.06
BOULANGERITA			6.12	3.82	10.94

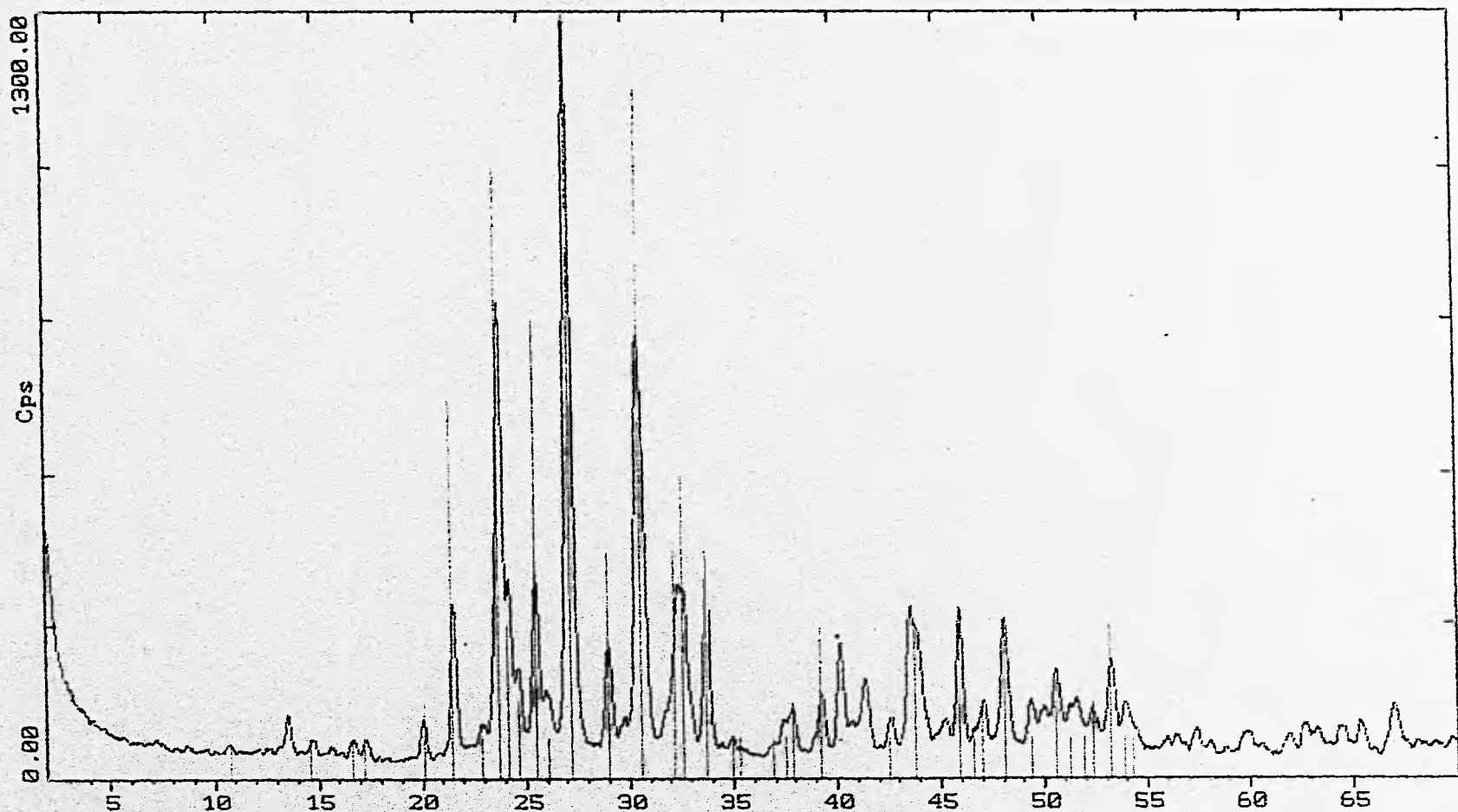
MICROSONDA CAMEBAX 50 AUTOMATIZADA

Por otro lado, varias muestras fueron analizadas por difracción de rayos X para identificar adecuadamente algunas sulfosales que debido a su pequeño tamaño no pudieron ser identificadas en el microscopio minerográfico, se utilizó el difractómetro del Instituto de Geología (Philips PW-1300) y el del Instituto de Materiales (Siemens). Este método consiste en preparar una muestra molida y someterla a un haz de rayos X, los cuales son difractados por el material cristalino. El espectro producido es como una huella digital de los minerales contenidos en la muestra, pues la difracción permite medir exactamente los planos cristalinos de los minerales, por medio de la ecuación de Bragg $n\lambda = 2 d \text{ sen } \theta$.

A continuación se presentan los difractogramas y los resultados del análisis químico hecho en microsonda de la boulangerita y de la meneghinita.

Difraclograma de la Boulangerita





A:\HELEN194.RAW STA.ELENA 1-94 (CT: 0.5s, SS:0.010dg, WL: 1.5406Ao, TC : Room)
CT: 0.5s, SS: 0.010dg, WL: 1.5406Ao, TC: Room

Basándose en cada una de las técnicas de estudio mineralógico anteriores, los minerales identificados en la zona del Carrizal se presentan en las tablas 3 y 4; y su distribución en las muestras seleccionadas, en la tabla No 5.

TABLA 3
Minerales de: Zonas de skarn (S), intrusivos (I), rocas metamórficas (M) y calizas (C)

<u>MINERAL</u>	<u>FORMULA IDEAL</u>	<u>TIPO DE ROCA</u>
Wollastonita	CaSiO_3	S
Andradita (Granate)	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2^{+3}(\text{SiO}_4)_3$	S
Diopsida	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	S, I
Vesuvianita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	S
Epidota	$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	S
Clorita	$\text{M}_{5-6}(\text{Al,Si})_2\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ M= Mg, Fe ⁺² , Ni, Mn, Fe ⁺³ , Al, Cr, Li	S
Calcita	CaCO_3	S, C
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	S, I
Danburita	$\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	S
Siderita	FeCO_3	C
Apatita	$\text{A}_5(\text{XO}_4)_3(\text{F,OH,CL})$ A= Ca, Sr, Pb, Na, Ce, Y X= P, As, V, Si	I, S
Fluorita	CaF_2	S
Plagioclasas	$(\text{Na}_2, \text{Ca})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	S, I
Cuarzo	SiO_2	S, I
Feldespato Potásico	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	I
Serpentina	$\text{A}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ A= Mg, Fe ⁺² , Ni	S
Dolimita	MgCO_3	C

TABLA 4

Minerales identificados en los cuerpos mineralizados de las minas Las Animas (cuerpos: Chimenea Las Animas y Santa Elena) Lomo de Toro (cuerpo Santa Fe y cuerpo San Carlos). Su contenido en las muestras de interés se presenta en la tabla No 5.

<u>MINERAL</u>	<u>ABREVIATURA</u>	<u>FORMULA IDEAL</u>	<u>* IMPUREZAS</u>
Esfalerita	Sph	ZnS	Fe, Mn, Cd, Ga, In, Hg, Tl
Galena	Gal	PbS	Se, Te, Ag, Sb, Bi
Pirita	Py	FeS ₂	Cu, Zn, Ag, Au
Calcopirita	Cpy	CuFeS ₂	
Pirrotita	Pr	FeS	Ni, Co, Mn
Arsenopirita	Aspy	FeAsS	Ni, Co, Sb
Marcasita	Mar	FeS ₂	
+Freibergita	Fre	(Ag,Cu) ₁₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃	
+Tetrahedrita	Tet	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	
+Tenantita	Ten	(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃	
+Matildita	Mat	AgBiS ₂	
Boulangerita	Bou	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁	
+Meneghinita	Men	CuPb ₁₃ Sb ₇ S ₂₄	
Bornita	Bor	Cu ₅ FeS ₄	
+Estanita	Sta	Cu ₂ FeSnS ₄	Ag, Zn
+Bournonita	Bur	PbCuSbS ₃	

<u>MINERAL</u>	<u>ABREVIATURA</u>	<u>FORMULA IDEAL</u>	<u>* IMPUREZAS</u>
+Hessita	Hes	Ag ₂ Te	
Magnetita	Mag	Fe ²⁺ Fe ₂ ³⁺ O ₄	
+ Mins. de Bismuto	Bis		

Las fórmulas químicas de los minerales fueron tomadas del Glosario de especies minerales de Fleisher y Mandarino (1995).

+ Minerales identificados en microsonda y/o difracción de rayos X.

* Aniones o cationes que en ocasiones entran como trazas en la formula original del mineral.

Las asociaciones y texturas que presentan cada uno de estos minerales se describe en el capítulo IV.5.

TABLA 5
CONTENIDO MINERALÓGICO DE LAS MUESTRAS DE INTERES

Mina	No de Muestra	Loc.	Sph	Gal	Py	Cpy	Pr	Aspy	Mar	Fre	Tet	Bon	Mat	Ten	Men	Sta	Bor	Mag	Bis	Hes	Bur
ANIMAS CHIMENEA LAS ANIMAS	6375	1	*	*	*	*	*	*													
	6376	1	*	*	*	*				*	*	*	**	*					*		
	6377	1	*	*	*			*				*									
	6380	1					*								*						
	6387	1	*	*	*	*	*			*	*			*							
	6389	1	*	*	*	*					*				*						
	CUERPO SANTA ELENA	13 - JF	2	*	*	*	*	*	*			*	*								
M. G.		2	*	*	*						*										
M. CH.		2	*	*	*						*										
SE - 238		2	*	*	*	*	*			*	*					*	*	*		*	
7 - Z - 91		2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			*		*	*		*	
S - 21 - 92		2	*	*	*		*			*	*						*				
S - 22 - 92A1		*	*	*	*	*	*	*		*	*										
S - 23 - 92		3	*	*	*		*	*	*						*						
S - 28 - 92		7	*	*	*	*	*														
LOMO DE TORO		No 5	5	*	*	*	*	*							*						
	No 7	5	*	*	*	*															
	No 9	5	*	*	*	*															
	No 10	5	*	*		*	*											*			
CUERPO SANTA FE	1 - JF	6	*	*	*		*			*	*										*
	4 - JF	6	*	*	*	*					*										
	7 - JF	6	*	*	*	*	*				*										
	9 - JF	6	*	*	*	*													*		
CUERPO SAN CARLOS	14 - JF	4	*	*	*	*	*														
	15 - JF	4	*	*	*	*	*		*	*				*					*		*
	16 - JF	4	*	*	*	*	*		*										*		*
	17 - JF	4	*	*	*	*	*				*										

La ubicación de éstas muestras se presenta en el plano geológico del nivel -360 del apéndice 1.

IV.4. ESTUDIO PARAGENÉTICO

Los criterios que se utilizaron, según Craig (1981), Ineson (1989) y Guilbert (1986), para interpretar la secuencia paragenética son:

FORMA DE LOS CRISTALES

La forma de los cristales puede usarse para interpretar la secuencia paragenética; en general los cristales con formas euhedrales (Idiomórficos) se interpretan como que han crecido libremente en un espacio abierto y son los primeros en formarse. Generalmente, los que presentan formas subhedrales con caras cóncavas se forman después; sin embargo tal interpretación debe usarse con precaución, pues pueden existir varias etapas de cristalización o relleno de espacios que igualmente pueden dar lugar a cristales euhedrales de etapas posteriores a la primera. Ejemplos de estos minerales son: fluorita, galena, esfalerita, cuarzo, casiterita y covelita.

La forma de estos minerales subhedrales y anhedrales pueden dar indicios de generaciones de minerales posteriores. Los cristales con límites convexos se interpretaron como que se formaron antes que los que tienen límites cóncavos. La piritita y arsenopiritita son dos excepciones a esta "regla" pues suelen presentarse frecuentemente en formas euhedrales en todas las etapas.

COMPLEJOS RELICTOS PSEUDOMORFOS

Un mineral puede formarse con formas euhedrales o subeuhedrales en las primeras etapas de la secuencia paragenética, pero subsecuentemente ser corroído, reemplazado o pseudomorfeado por otras fases minerales dificultando así su interpretación en la secuencia de eventos paragenéticos.

En tales casos, estructuras relictas pueden ayudar para la interpretación; por ejemplo en la textura de mares e islas, se interpreta que la fase reemplazada posee límites cóncavos y puede permanecer como islas residuales dentro de un mar de la última fase.

LIMITES ENTRE GRANOS ADYACENTES

Los límites entre dos o más fases mineralógicas pueden indicar grados de penetración de una fase en otra siendo una posterior a la anterior, un ejemplo de este criterio se tiene en los límites engolfados, bahías y penínsulas que presentan las muestras de Zimapán . En este criterio las penínsulas son primero y las bahías después, este criterio junto con el de reemplazamiento es muy usado en sistemas en donde existen varias etapas mineralizantes.

BANDEAMIENTO

Este tipo de textura se presenta semejando un proceso sedimentario y ello puede indicar que en el depósito hubo cambios en la composición de los fluidos mineralizantes. En esta textura las bandas exteriores o las más cercanas de la roca encajonante se formaron primero que las bandas interiores o alejadas a la roca encajonante. Este criterio es muy usado en los yacimientos de vetas. En Zimapán se presenta en los bordes de algunos cuerpos donde se supone hubo un relleno de espacios preexistentes.

ZONEAMIENTO DE CRECIMIENTO

Una misma fase mineral puede mostrar zonas de crecimiento, las cuales pueden apreciarse en cristales individuales o através de los diferentes zonas del yacimiento, observándose como bandas de color dentro de un mismo cristal, o como cambios de color de un mismo mineral en diferentes zonas del yacimiento, indicando que el ambiente tuvo cambios durante su formación.

El entendimiento de este zoneamiento puede sustentarse en un estudio de elementos traza dentro de uno o varios minerales.

RELACIONES DE CRUCE - CORTE

Este es posiblemente uno de los aspectos más importantes para erigir una secuencia paragenética, pues es de las más fáciles de observar. Si una entidad corta a otra, ésta debe ser más joven que aquella a la que corta. Tales características pueden ser una vetilla, una microfalla (rellena o vacía) o aun darse entre entidades minerales.

EXSOLUCIÓN

Intercrecimientos de exsolución proveen una mejor evidencia de que tuvo lugar una depositación simultánea o que ocurrieron procesos de reemplazamiento. Si el enfriamiento de los fluidos mineralizantes fue muy lento pudo haberse llevado a cabo una separación y segregación de los minerales precipitados. Esto tiene lugar si la concentración del soluto fue baja pudiendo ocurrir como delgadas fibras o en pequeñas inclusiones tipo emulsión en los límites o contornos de los minerales anfitrión.

REEMPLAZAMIENTO

Si un mineral es carcomido, reemplazado o alterado éste debió formarse antes del mineral que lo está alterando o reemplazando.

Texturas de reemplazamiento y procesos de intemperismo pueden iniciarse en las superficies de los cristales y en fracturas que puedan tener éstos, representando sitios en donde puede iniciarse la depositación de nuevos minerales.

Texturalmente el mineral que reemplaza posee límites convexos mientras que el mineral reemplazado posee límites cóncavos. En algunos casos se pueden presentar remanentes de la fase primaria mostrando una textura de "isla" o residuos del primer mineral en una matriz de la última fase en formarse. Cuando existe un reemplazamiento total la sucesión de eventos es muy difícil de determinar.

ESTABILIDAD DE MINERALES

De acuerdo a observaciones en otros yacimientos y a experimentos en laboratorio de estabilidad de minerales se ha encontrado por ejemplo que la calcopirita se forma antes que la esfalerita y ésta a su vez antes que algunas galenas; igualmente en esta secuencia las últimas en formarse son las sulfosales de plomo y plata, dejando al final los elementos nativos como la plata y el oro.

Sin embargo, debido a los cambios graduales en los fluidos mineralizantes, cambios en las condiciones físico-químicas y a diferentes etapas de mineralización, diferentes minerales se forman en los diferentes niveles del depósito, mientras un mineral comienza a depositarse bajo ciertas condiciones en un nivel, en otro se forman diferentes minerales bajo diferentes condiciones.

Así la depositación de minerales comúnmente traslapa la depositación de otros, tanto en espacio como en tiempo. Cambios leves en las condiciones físico-químicas de los fluidos mineralizantes puede alterar el curso normal de depositación.

La paragénesis en un sistema de múltiples pulsaciones como los es el yacimiento de Zimapán es muy difícil de establecer y debe hacerse con sumo cuidado, tomando en cuenta cada uno de los criterios antes mencionados.

IV.5. DESCRIPCIÓN DE MINERALES Y TEXTURAS

Las texturas y asociaciones de los diferentes minerales que constituyen los cuerpos mineralizados se cumplen para ambas minas, únicamente las sulfosales de plomo y los minerales de plata fueron más abundantes en los cuerpos de la mina Las Animas. Estas texturas observadas bajo el microscopio mineragráfico son:

ESFALERITA

Representa la mena de zinc, encontrándose generalmente en forma masiva con cristales de formas subhedrales a anhedrales intercrecida con la galena o en forma pura. En los límites de los cuerpos de sulfuros "masivos" se presenta en bandas alternándose rítmicamente con bandas de pirita en textura que semeja un depósito sedimentario.

Asimismo contiene inclusiones de los demás minerales del yacimiento principalmente de galena, pirita, calcopirita y pirrotita con los cuales muestra una textura de islas y continentes en un mar de esfalerita. El proceso inverso también se observa en donde islas o continentes de esfalerita se encuentran en un mar de galena. Entre ellos se presenta límites engolfados y de penínsulas que evidencian varios procesos de depositación de minerales (Fotos 1, 2 y 3 del apéndice 2).

Igualmente muestra inclusiones en forma de emulsiones y amibas de pirita y calcopirita (Fotos 4, 5 y 6 del apéndice 2) que en ocasiones siguen líneas de cruce de la esfalerita, estas inclusiones suelen concentrarse más hacia los bordes de los cristales de esfalerita. Otras inclusiones en forma de amibas y de menor tamaño que las anteriores son las de sulfosales de plata, bismuto y plomo, éstas se alojan en los contactos de galena y esfalerita y aun dentro de la esfalerita.

Los contactos de la esfalerita se presentan en forma de golfos y penínsulas, carcomiendo a la galena, pirita y calcopirita. Lo que indica un reemplazamiento de la esfalerita por los otros minerales, principalmente con la galena y la pirita. El proceso inverso también se observa. (Foto No. 7 del apéndice 2)

En los bordes de los cuerpos mineralizados la esfalerita se encuentra muy brechada debido a la introducción de minerales transparentes, principalmente cuarzo que llega a presentarse incluido en la esfalerita en formas hexagonales o formando vetillas, estas últimas también pueden ser de pirita o calcopirita (Fotos 8 y 9 del apéndice 2)

Forma mosaicos equigranulares con la galena y minerales transparentes (Foto 10 del apéndice 2).

Dentro de el skarn y al bajo de estructuras como diques y sills se presenta en forma diseminada.

Se le observan algunas zonas con reflexiones internas muy rojas y en otras con colores pardos y amarillos, todas ellas se encuentran intercrecidas junto a las que presentan inclusiones. La tabla número 6 presenta la composición química de esferitas de las minas Animas y de Lomo de Toro

Tabla No 6

Composición química de la esferita por microsonda electrónica.

Muestra	Zn	Fe	Cu	Mn	Cd	Hg	S	Suma
6377	58.77	7.38	0.12	0.54	0.47	0.07	33.69	101.06
6377	55.91	10.59	0.00	0.26	0.55	0.00	33.60	100.63
6377	56.14	6.78	0.00	0.49	0.38	0.00	33.93	100.72
Promedio	56.90	9.18	0.02	0.40	0.51	0.01	33.60	100.63

Muestra	Zn	Fe	Cu	Mn	Cd	Hg	S	Suma
M.CH.	59.13	6.80	0.00	0.42	0.64	0.03	33.84	100.66
M.CH.	58.71	7.13	0.09	0.23	0.74	0.20	33.94	101.05
M.CH.	58.60	6.78	0.00	0.48	0.67	0.00	33.81	100.34
Promedio	58.72	6.95	0.03	0.40	0.68	0.07	33.70	100.55

Muestra	Zn	Fe	Cu	Mn	Cd	Hg	S	Suma
16-JF	56.84	9.91	0.00	0.08	0.59	0.11	33.20	100.74
16-JF	57.18	10.31	0.05	0.05	0.56	0.01	33.36	101.53
16-JF	56.25	10.42	0.00	0.06	0.57	0.07	33.40	100.70
Promedio	56.61	10.18	0.01	0.07	0.57	0.07	33.40	100.90

Muestra	Zn	Fe	Cu	Mn	Cd	Hg	S	Suma
14-JF	64.57	1.57	0.05	0.55	0.53	0.09	33.04	100.41
14-JF	64.30	1.59	0.06	0.51	0.63	0.00	33.16	100.25
14-JF	64.99	1.98	0.00	0.32	0.67	0.10	32.90	100.95
Promedio	64.60	1.73	0.03	0.44	0.61	0.05	33.04	100.50

GALENA

La galena representa la principal mena de plomo y es el segundo mineral en abundancia, se presenta en forma masiva formando un mosaico con cristales euhedrales a subhedrales.

Presenta inclusiones en forma de islas y continentes con la esfalerita, pirita, calcopirita, pirrotita así como sulfosales de plomo y plata, estas últimas también en forma de amibas. Las inclusiones de sulfosales se presentan generalmente cerca de los contactos con la esfalerita, en ocasiones sobre la misma línea de contacto o dentro de la propia galena. Se presenta también como islas y continentes dentro de un mar de esfalerita, igualmente pueden encontrarse como inclusiones o en los bordes de los sulfuros de hierro.

Se observa reemplazando o en crecimiento mutuo con la esfalerita, pirita, calcopirita y pirrotita, el proceso inverso también existe (Fotos 11, 12 y 13 del apéndice 2) presentando inclusiones y vetillas de minerales transparentes.

En algunas zonas se encuentra muy deformada lo cual es claramente evidenciado por la forma de su crucero, también en ocasiones se encuentra brechada por la introducción de minerales transparentes.

Dentro del skarn y al bajo de las estructuras (diques y sills) se presenta en forma diseminada en cristales subhedrales.

PIRITA

Es el tercer mineral en orden de abundancia, representa la principal ganga del yacimiento, ocurre generalmente en cristales euhedrales a subhedrales. Es mucho más abundante en los límites de los cuerpos en donde se encuentra en forma masiva o como bandas que se alternan rítmicamente con los demás sulfuros principalmente con la esfalerita y galena.

Se encuentra igualmente en forma de inclusiones dentro de la galena y esfalerita en formas euhedrales presentando texturas de caries o atolón debido al reemplazamiento por el otro mineral (Fotos 14, 15, 16 y 17 del apéndice 2), también se presenta en forma de pequeñas amibas que en ocasiones siguen direcciones de crucero de la esfalerita o de la galena.

A su vez puede contener inclusiones de esfalerita, galena, calcopirita, pirrotita, minerales transparentes e incluso en raras ocasiones sulfosales de plomo y plata.

Intercrecida con la marcasita reemplaza a la pirrotita (Foto No 18 del apéndice 2).

Es carcomida por la galena, esfalerita y minerales transparentes o viceversa, evidenciando varias etapas de mineralización.

También llega a presentarse como vetillas que cortan a galenas y esfaleritas.

Fuera de los sulfuros "masivos" se encuentra diseminada en la zona de skarn y al bajo de estructuras de diques y sills y aún en la caliza.

CALCOPIRITA

Representa la mena de cobre aunque su cantidad es mínima. Generalmente ocurre como inclusiones en los demás sulfuros en formas de islas, continentes y emulsión, junto con la pirita sigue direcciones de cruceo o se concentra en los bordes de los cristales de esfalerita. También llega a formar aglomerados intercrecida con la pirrotita, galena y esfalerita (Fotos 19 y 20 del apéndice 2).

Puede estar diseminada en formas subeuhedrales a anhedrales, o como vetillas en esfalerita y galena. También se encuentra bordeándolas en formas anhedrales, y con límites difusos con la pirita.

Por sus relaciones con los demás minerales parecen dos eventos de calcopirita uno contemporáneo a la pirrotita y otro como inclusiones en los demás minerales.

Fuera de los sulfuros "masivos" se presenta en forma diseminada dentro del skarn y al bajo de estructuras como diques y sills y aún en la roca encajonante (calizas).

PIRROTITA

Es otro mineral de ganga de hierro, se presenta generalmente como inclusiones en los sulfuros principales, en crecimiento mutuo o reemplazando a los demás minerales y algunas veces formando aglomerados de cristales monoclinicos (Fotos 21 y 22 del apéndice 2), muestra contactos engolfados y difusos con los demás minerales.

Existen algunos mosaicos de cristales de pirrotita con inclusiones de pirita, galena, calcopirita y minerales transparentes.

Está reemplazada por un intercrecimiento de marcasita y pirita (Foto 23 del apéndice 2).

Es carcomida por galena y esfalerita, el proceso contrario también se presenta. En la mina las Animas se encontró en formas hexagonales y monoclinicas, estas fueron comprobadas por difracción de rayos X (M.G. Villaseñor et .al. 1987).

ARSENOPIRITA

Cristales subhedrales a anhedrales carcomidos por los sulfuros principales. Se le encuentra intercrecida con esfalerita, calcopirita, pirrotita y galena, en ocasiones reemplazando a la pirita.

También se presenta en cristales euhedrales incluidos en la galena.

MARCASITA

Se presenta reemplazando cristales de pirrotita intercrecida en ocasiones con la pirita (Fotos 24, 25, y 26 del apéndice 2).

SULFOSALES DE PLOMO

Se presentan en formas aciculares y prismáticas, encontrándose ocasionalmente en forma masiva, comunmente se observan en los contactos engolfados entre la galena y la esfalerita en formas alargadas o siguiendo la línea de contacto.

También se encuentran incluidas en galena y esfalerita, ocasionalmente en la ganga (pirita y pirrotitas) en formas de pequeñas amibas se lograron identificar: boulangerita y meneghinita. (Fotos 27, 28 y 29 del apéndice 2).

SULFOSALES DE PLATA

Se presentan como inclusiones en forma de amibas en galena y esfalerita, ocasionalmente en pirita y pirrotita son muy pequeñas y al igual que las sulfosales de plomo se les encuentra en los contactos engolfados entre la galena y esfalerita pero muy frecuentemente sobre la misma línea de contacto. Se les ha llegado a encontrar en forma masiva en cuerpos de pequeñas dimensiones. Ocasionalmente forma pequeñas drusas en cavidades dentro de los sulfuros en una matriz de cuarzo o calcita, de ellas se lograron identificar: freibergita, tetrahedrita, tenantita. También son conocidas como sulfosales de cobre con cantidades variables de arsénico y antimonio. (Fotos 30, 31, 32, 33, 34 y 35 del apéndice 2).

Las sulfosales de plomo y plata se les encontró en mayor cantidad y tamaño dentro de la chimenea Las Animas.

OTROS MINERALES

En el estudio mineragráfico se observaron diminutos cristales que no pudieron ser identificados por este método por lo que se realizó un estudio por microsonda encontrándose los siguientes minerales: Hesstita, estanita y minerales de bismuto, al igual que las sulfosales de plomo y plata, estos minerales se encuentran incluidos en la galena y esfalerita.

MINERALES TRANSPARENTES

Los minerales transparentes conforman la roca encajonante del yacimiento, como son la caliza, los cuerpos intrusivos y el skarn en donde muestran texturas euhedrales a subhedrales, porfíricas y gráficas (tabla No X) , llegan a presentarse intercrecidos, en forma de vetillas y en ocasiones reemplazando a los sulfuros "masivos", en otras ocasiones y principalmente en los bordes de los cuerpos, al depositarse, brechan a los sulfuros "masivos".

Se les encuentra como inclusiones en formas euhedrales a subhedrales dentro de la esfalerita y galena, en esta última presentan texturas de flama (Fotos 36, 37, 38 y 39 del apéndice 2). Los minerales que conforman estas inclusiones en los sulfuros son cuarzo, calcita y fluorita.

Dentro de los cuerpos masivos se observa cómo algunos sulfuros reemplazan a granates.

En base a las relaciones texturales entre los minerales anteriormente descritos se propone la siguiente hipótesis de paragénesis, la cual se observa en la tabla No 7.

TABLA 7

Tabla paragenética propuesta para el depósito del área del Carrizal; minas Lomo de Toro y Las Animas.

Esfalerita				
Galena				
Pirita				
Calcopirita				
Pirrotita				
Arsenopirita				
Marcasita				
Freibergita				
Tetraedrita				
Boulangerita				
Matildita				
Tenanita				
Meneginita				
Estanita				
Hesita				
Min. De Bismuto				
Óxido de Hierro				
Bornita				
Min. Transp.				

IV.6 METALURGIA

El conocimiento de la mineralogía y sus relaciones es esencial al momento de tomar decisiones para el beneficio del yacimiento; los diferentes minerales portadores de los metales de interés pueden responder diferentemente si se usa un sólo agente recobrannte, de ahí la importancia de su correcta identificación. El proceso de extraer los metales económicos de los minerales aprovechando sus propiedades físicas y/o químicas, es una rama de la metalurgia. En la mayoría de los casos los pasos a seguir en un proceso de beneficio son :

- Quebrar y moler el material.
- Separación física de los minerales portadores de los metales de interés; además ésta etapa puede tener o no un proceso químico.
- Tostado (Roasting) aplicado a muchos minerales que ocurren en formas difíciles de separar por procesos físicos o químicos convencionales.
- Separación química incluyendo hidrometalurgia y pirometalurgia para extraer el metal de interés de los minerales que lo portan.
- Recolecta de soluciones y refinado para remover impurezas y producir metal con un alto grado de pureza.

El primer paso en la extracción del metal incluye el rompimiento y la pulverización de la mena para reducirla a partículas más finas, estos procesos son básicos y requieren un gran gasto en los rubros sobre adquisición de equipo pesado, energía, operación y mantenimiento. Mecánicamente esta etapa es extremadamente baja en eficiencia. Por ejemplo, si se separa zinc como concentrado de esfalerita, es posible por técnicas apropiadas en tamaño de grano, eliminar la mayoría del hierro transportado por otros minerales como la pirita, pirrotita, calcopirita, marcasita, etc. un grano grueso provee una liberación parcial dando como resultado pobres recuperaciones, un grano fino puede hacer incosteable la operación. Desde estas primeras etapas los estudios paragenéticos toman una gran importancia y pueden resolver problemas, aumentando en un buen porcentaje la eficiencia y por ende disminución en los costos de producción.

La separación física o beneficio representa la etapa donde la mena es separada de la ganga; durante esta etapa se aprovechan las propiedades físicas, químicas, magnéticas y eléctricas de los minerales de interés. Los estudios paragenéticos son de gran ayuda pues es con base en ellos que se deben elegir las mejores zonas a explotar dentro del yacimiento haciendo una planeación de la extracción tomando en cuenta otros parámetros como son; las dimensiones del yacimiento, leyes dentro de él, los costos de producción, los precios de los metales, etc.

En el siguiente paso del beneficio que consiste en separar el metal de sus minerales portadores, un estudio paragenético es necesario para escoger la cantidad y los tipos de lixiviantes adecuados para los distintos minerales portadores, pues cada mineral puede reaccionar diferente a estos productos, de esta manera se tendrá una liberación eficiente disminuyendo así los gastos ocasionados por reactivos.

Asimismo, se pueden disminuir considerablemente las impurezas en cada uno de los concentrados de mineral.

La plata, por ejemplo, es uno de los metales más complicados para su beneficio, ya que este elemento se ha reportado en cerca de 100 especies minerales en los cuales la plata es un constituyente principal y existen otros muchos en donde es un componente menor.

Usualmente se pueden identificar 5 o 6 minerales de plata dentro del mismo yacimiento (Gasparini 1984 y Gasparini 1993) en estos casos la concentración del mineral puede necesitar más de un agente lixiviante para su recuperación óptima .

En ocasiones estos minerales portadores tienen tamaños tan pequeños que al observarse bajo el microscopio minerográfico presentan propiedades ópticas muy similares o difíciles de apreciar, en especial en la mena de Zimapán, se identificaron los siguientes minerales de plata apoyándonos en técnicas microanalíticas y de composición química: Tetrahedrita-freibergita, tenantita, matildita, hessita, etc. Al conocer la composición química del mineral portador se sabe la cantidad exacta del metal en el mineral; para la plata, ésta puede ocurrir en las sulfosales de cobre con porcentajes del 0 al 34%, igualmente estos estudios dan información acerca de los elementos contaminantes esperados al final del concentrado, cada uno de estos minerales puede reaccionar diferente a los productos lixiviantes, de ahí la importancia de identificarlos correctamente. La identificación de las sulfosales presentes es una herramienta para tomar la decisión de si el metal es concentrado o se deja en las colas ya que su contenido de plata va del 1% hasta el 33% (M.G. Villaseñor comunicación personal), elegir el o los reactivos para su concentración óptima.

Sólo el 15 al 25% de la producción de plata en el mundo se extrae de depósitos explotados primeramente por plata. El restante 75 a 85% se recupera como subproducto en yacimientos de oro y de varios metales base. Cuando se encuentra en los concentrados de plomo, como es el caso de Zimapán, la plata puede ser recuperada más tarde por electrólisis o por métodos químicos. Si se va en las colas, un estudio microanalítico de ellas puede justificar cambios en la estrategia de beneficio, como son realizar una molienda más fina combinada con la utilización de un agente capaz de flotar todos los minerales de plata o cambios en los agentes lixiviantes para producir un concentrado de plata. El bajo valor de este metal en el mercado no justifica siempre los grandes gastos que se realizan para su explotación.

En especial la tetrahedrita, que es el mineral de plata más abundante en Zimapán, presenta un problema metalúrgico ya que varía ampliamente en su contenido de plata, el tamaño de grano y sus relaciones texturales con los demás minerales del depósito varían ampliamente. El tamaño de los granos es el principal problema en la metalurgia de la plata debido a que estos minerales ocurren entrampados en los granos de otros minerales de donde es muy difícil separarlos, como es el caso de las exoluciones y emulsiones que se presentan en el depósito de Zimapán; al tratar de separarlos se tiene que llegar a una molienda muy fina del material lo que encarece el proceso de beneficio; así mismo la cantidad de plata en estos cuerpos es relativamente baja lo que no siempre justifica su extracción.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en el trabajo de campo y las observaciones de los geólogos de la unidad minera se establece que los cuerpos mineralizados tienen una probable relación con las rocas intrusivas de la zona y se presentan de diversas formas. Asimismo, las relaciones de campo permiten establecer diversas etapas de mineralización.

En la mina las Animas una parte corresponde claramente a una zona de skarn donde la mineralización se encuentra alojada en lo que corresponde a la zona de endoskarn, la cual se localiza hacia los bordes del tronco El Carrizal, viene luego la mineralización en forma de chimeneas y mantos que se encuentra reemplazando a las calizas y que se presenta en forma masiva; en estos cuerpos se encuentran numerosas sulfosales de plomo y antimonio así como algo de bismuto. También se observan varias vetas. En la actualidad casi toda esta zona ha sido minada.

En la mina Lomo de Toro los cuerpos se presentan principalmente como reemplazamientos en las calizas, en donde los cuerpos se han alojado en el contacto de una caliza masiva y una estratificada; estos cuerpos presentan una mineralogía más simple que los cuerpos de la mina Las Animas, aunque algunas muestras presentan también numerosos minerales. La parte que se está minando por el momento ha incrementado sus valores de plata y empiezan a aparecer más sulfosales de plata.

En ambas minas se observan numerosos minerales con tamaño de grano sumamente pequeño los cuales no fue posible identificar al microscopio mineragráfico y fue necesario hacerlo con microsonda electrónica. presentándose los resultados en la tabla No 4 del capítulo IV .

Los criterios texturales descritos en el capítulo IV permiten establecer hasta cuatro diferentes etapas evidenciadas por los arreglos texturales entre minerales, aunque pueden existir más. Debido a que la esfalerita es probablemente la guía mineralógica más utilizada, para tratar de interpretar los procesos de depositación en aquellos yacimientos donde existe interacción de fenómenos, como es el caso de Zimapán, se observó con sumo detalle sus parámetros texturales así como sus relaciones con otros minerales para definir las distintas etapas.

En cuanto a sus parámetros texturales se observó principalmente el tipo de inclusiones que presentaba, las cuales fueron de diversos minerales y de diversas formas que podemos referirnos de la siguiente manera:

-Abundantes inclusiones de pirita y calcopirita, las cuales se presentan principalmente en los bordes, presentando texturas tipo emulsión. En el interior de los cristales estas mismas inclusiones son de tamaño más grande y están más espaciadas, en ocasiones siguen también direcciones de crucero de la esfalerita.

-Muy pocas inclusiones, presentándose muy limpia formando cristales subhedrales a euhedrales.

-Inclusiones de diversos minerales, entre los que se presentan sulfosales de plomo y de plata, las cuales se presentan cerca de los límites con la galena y con menor frecuencia en el interior de los cristales en forma de amibas y aciculares.

Las inclusiones de calcopirita en las esfaleritas es un fenómeno muy extendido; éste ha sido interpretado de numerosas maneras, entre las que tenemos la explicación de Ramdohr (1980), como una exsolución, hasta las presentadas por Barton y Bethke (1987), que las definen como "enfermedad de la calcopirita" y establecen diversos procesos por las que se pudieron haber formado, destacando el proceso de reemplazamiento y el de epitaxis. Asimismo establecen que las zonas con numerosas inclusiones de calcopirita y pirita, pueden deberse al alto contenido de hierro en las esfaleritas lo que puede indicar una mayor temperatura. Por otro lado las zonas con escasas inclusiones podrían indicar esfaleritas de menor temperatura y probablemente con menor contenido de hierro. Los análisis de microsonda practicados a varias esfaleritas del depósito muestran contenidos de hierro muy variados(tabla No 6 del capítulo IV.), por lo que podemos inferir diferentes temperaturas de formación aunque estos datos no siempre pueden utilizarse como geotermómetros.

En sus relaciones con los demás minerales tenemos:

- Esfalerita fanerítica que se presenta en forma "masiva" sin relacionarse con los demás minerales.
- Esfalerita intercrecida con galena, en donde existen reemplazamientos de unos a otros, lo cual es evidenciado por sus relaciones de corte-cruce, texturas de golfos y penínsulas y texturas de mares e islas.
- Esfalerita reemplazando a zonas con abundantes minerales de hierro como son pirita, calcopirita y aún magnetita, el proceso contrario también se observa. Asimismo, estas mismas relaciones se observaron en la galena, la cual presenta texturas características de un reemplazamiento bastante complejo.

Existen además minerales que nos indican cambios en los fluidos mineralizantes; por ejemplo, la presencia de la pirrotita y la marcasita nos indica un aumento en el contenido de azufre en el sistema. Lo cual es una evidencia más de que las condiciones físico-químicas de los fluidos mineralizantes van cambiando conforme se realiza éste y/o existen varias etapas mineralizantes con características diferentes al anterior.

CONCLUSIONES

El yacimiento de Zimapán representa un depósito de múltiples pulsaciones lo cual está evidenciado en los arreglos texturales que presentan las diferentes fases minerales que lo constituyen.

El exceso de plata reportado en Zimapán en el concentrado de plomo; se debe a pequeñas inclusiones de sulfosales que contienen plata encontradas en la galena, de las cuales fueron identificadas con precisión (por métodos microanalíticos y de composición mineralógica) la tetrahedrita-fribergita, matildita y hessita. Asimismo es probable que la plata se encuentre alojada dentro de la red cristalina de la galena.

Debido al tamaño de grano de los minerales portadores de plata (1 a 3 micras) y a sus relaciones texturales, el tratar de separar éstos, daría como resultado un proceso metalúrgico muy caro, por el tamaño tan pequeño al que tendría que hacerse la molienda del mineral, y a un concentrado de mala calidad. Además estos minerales se encuentran en muy bajo porcentaje.

El contenido de hierro en la esfalerita presenta un comportamiento muy irregular presentando conjuntamente esfaleritas con bajo contenido y esfaleritas con alto contenido de hierro. Como se observa en los análisis de esfalerita hechos en la microsonda (tabla No 6 del capítulo IV). El grado óptimo de concentrado de zinc puede llevar hasta un 15 % de hierro, Gasparini (1993).

La realización de estudios paragenéticos, son una herramienta importante para este tipo de depósitos ya que aportan información valiosa para el mejor aprovechamiento del mismo y son la base para análisis posteriores que van enfocados hacia problemas más específicos.

RECOMENDACIONES

Los tamaños tan diminutos de algunas fases minerales obligan en este tipo de estudios de echar mano de técnicas microanalíticas y de difracción de rayos X, para poder identificar las fases mineralógicas a fin de establecer su contenido de metal económico, así como reconocer las sustancias que son castigadas en los concentrados del mineral, o por lo contrario, identificar elementos que pueden aumentar el precio del concentrado. Para el caso de Zimapán es recomendable hacer este tipo de estudios en la esfalerita ya que este mineral puede contener varios metales de interés, aumentando consecuentemente su valor comercial.

Se deben de establecer las diferentes zonas de esfalerita en los cuerpos y seleccionar aquellas partes con menores cantidades de inclusiones a fin de establecer una planeación de la explotación y disminuir el contenido de hierro en el concentrado de zinc.

BIBLIOGRAFÍA

- Barton P. B., Jr., Bethke P. M., 1987, Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology; American Mineralogist, U.S.A., vol. 72, pp. 451-467.

- Carrillo Martínez M. y Suter Max, 1982, Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro; en libro-guía de la excursión Geológica a la región de Zimapán, Sociedad Geológica Mexicana, pp 1 - 26.

- Craig J.R. and Vaughan D. J., 1981, Ore Microscopy and Petrography; John Wiley and Sons Inc. New York, U.S.A., 406 p.

- Einaudi M.T., Meinert L.D. and Newberry R.J., 1981, Skarn Deposits; Economic Geology, 75th anniv. Vol., pp 317-391.

- Fleisher Michael and Mandarino J.A., 1995, Glossary of Mineral Species; The Mineralogical Record Inc., Seventh edition, Tucson U.S. A., 280 p.

- García G. G. y Querol S. F., 1988, Descripción de algunos yacimientos del distrito Zimapán, Zimapán Hidalgo; en Geología Económica de México de Salas P.G., Fondo de Cultura Económica, México D.F., pp 383 - 400.

- Gasparrini Claudia, 1984, The mineralogy of Silver and its Significance in Metal Extraction; CIM Bulletin, volume 77, No 866, pp 99-110.

- Gasparrini Claudia, 1993, Gold And Other Precious Metals, from ore to market; South Sea International Press Ltd., Hong Kong, p .

- Guilbert J. M. And Park C.F. Jr, 1986, The Geology of Ore Deposits; by M.H. Freeman and Company, 985 p.

- Haynes F.M. and Kesler S.E., 1988, Compositions and Sources of Mineralizing Fluids for Chimney and Manto Limestone-Replacement Ores in México; Economic Geology, USA, vol. 83, pp. 1985-1992.

- Heinrich E.W., 1965, Identificación Microscópica de los Minerales; URMO, S.A. de C.V., Ediciones Bilbao, 456 p.

- Industrias Peñoles S.A. de C.V., 1991, Libreto Guía de la Unidad Zimapán; Grupo minas, Cía. Fresnillo, S.A. de C.V.

- Ineson P. R., 1989, Introduction to Practical Ore Microscopy; Longman earth science series, copublished in the E.U. with John Wiley and sons, Inc. New York U.S.A., 180 p.

- Kerr P., 1959, Optical Mineralogy; McGraw Hill, Inc., fourth edition, 492 p.

- Megaw P.D.M., Ruiz J. and Titley S.R., 1988, High-Temperature, Carbonated hosted Ag-Pb-Zn (Cu). Deposits of Northern México; Economic Geology, v. 83, p.p. 1856-1885.

- Morín Martínez, J, 1986, Distrito Minero de Zimapán; en Minas Mexicanas, Tomo 2, editor: Jorge E. Ordoñez, Society of Economic Geologist, pp 127 - 142.

- Muñoz Marguerite et Moëlo Yves, 1982, Étude paragenétique de la minéralisation sulfurée complexe (Sb-Pb-Zn...) de Bournac (Hérault, France); Bull Minéral 105, pp 625-632.

- Park and McDiarmid, 1975, Ore Deposits; Freeman and Company, San Francisco USA., third edition.

- Prescott B., 1926, Underlying Principles of The Limestone Replacement Deposits of The Mexican Province; Eng. Mining jour., v.122, pp 246-253 and 289-296.

- Ramdohr Paul, 1980, The Ore Minerals and Their Intergrowths; Second edition, volume 2, Pergamon Press, International Series in Earth Sciences, 1205 p.

- Segerstrom, Kenneth, 1962, Geology of south-central Hidalgo and north-eastern Mexico, Mexico. U.S. Geol. Survey, Bull. 1104-C, p 87-162.

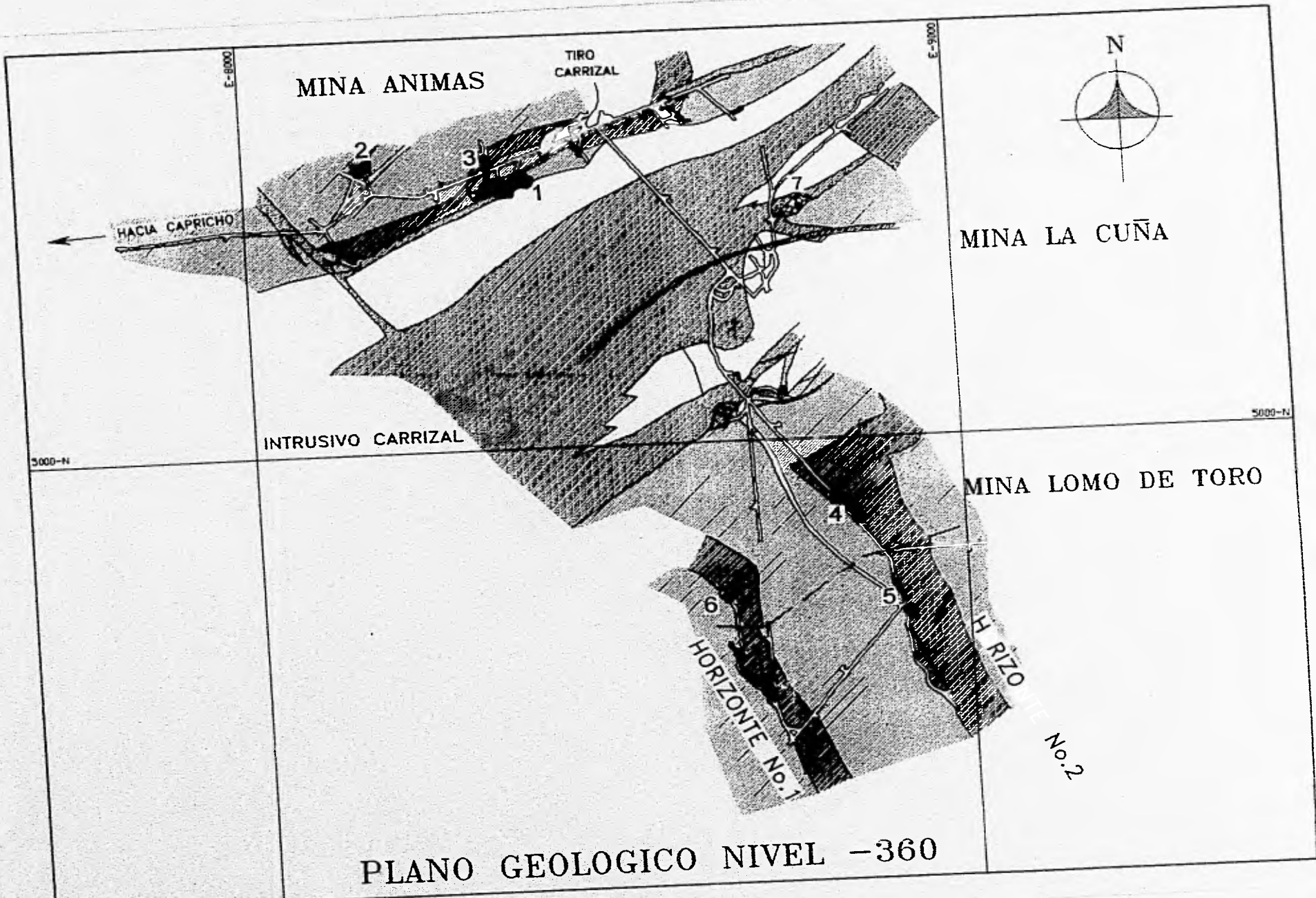
- Simons F.S. y Mapes, 1957, Geología y Yacimientos Minerales del Distrito Minero de Zimapán, Estado de Hidalgo; Instituto Nacional para la investigación de recursos minerales, boletín 40, México D.F., 282 p.

- Spry P.G. and Gedlinske B.L., 1987, Tables for the Determination of Common Opaque Minerals; Economic Geology, Department of Earth Sciences, Iowa State University, U.S.A.

- Villaseñor Cabral M.G., Gómez C.J.A., Medina de la P., J.L. Condlife, Erik y Lozano Santa Cruz R., 1987, Boulangerita de la chimenea Las Animas, Zimapán, Estado de Hidalgo; Mineralogía y metalogenia: Boletín de Mineralogía 3, pp. 1-30.

- Wuensch B.J., Prewitt C.T., Scott S.D., Craig J.R., Barton P.B., 1974, Sulfide Mineralogy Short Course Notes; Volume 1, Mineralogical Society of America, 121 p.

APÉNDICE 1
PLANOS Y SECCIONES




PLANO GEOLOGICO NIVEL -360

SECCION GEOLOGICA TRANSVERSAL MINA LOMO DE TORO


Elev. 1500 m.s.n.m.



 HORNFELS

 SKARN

 CALIZA MASIVA

 CALIZA ESTRATIFICADA

 MONZONITA

 MINERAL OXIDADO

 SULFUROS

 OBRA MINERA

0 40 100 200
METROS

APÉNDICE 2
MINERAGRAFÍA



Foto No. 1 Reemplazamiento de galena por esfalerita, esta última con inclusiones de calcopirita.



Foto No. 2 Reemplazamiento de esfalerita por galena, presentando la textura de golfos y penínsulas: la esfalerita muestra inclusiones de calcopirita.



Foto No. 3 Reemplazamiento de galena por esfalerita, aquí la esfalerita presenta muy pocas inclusiones . textura de bahías y golfos.

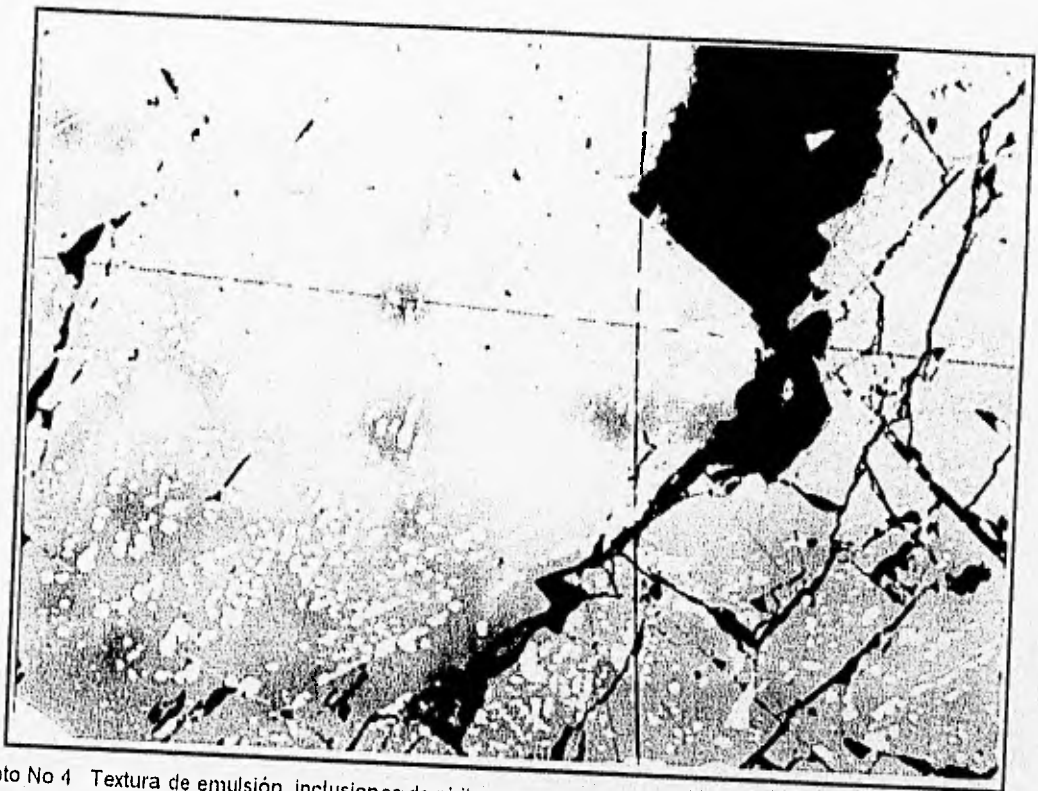


Foto No 4 Textura de emulsión. inclusiones de pirita y calcopirita dentro de la esfalerita, en ocasiones siguiendo líneas de crucero, minerales transparentes que brechan a la esfalerita.

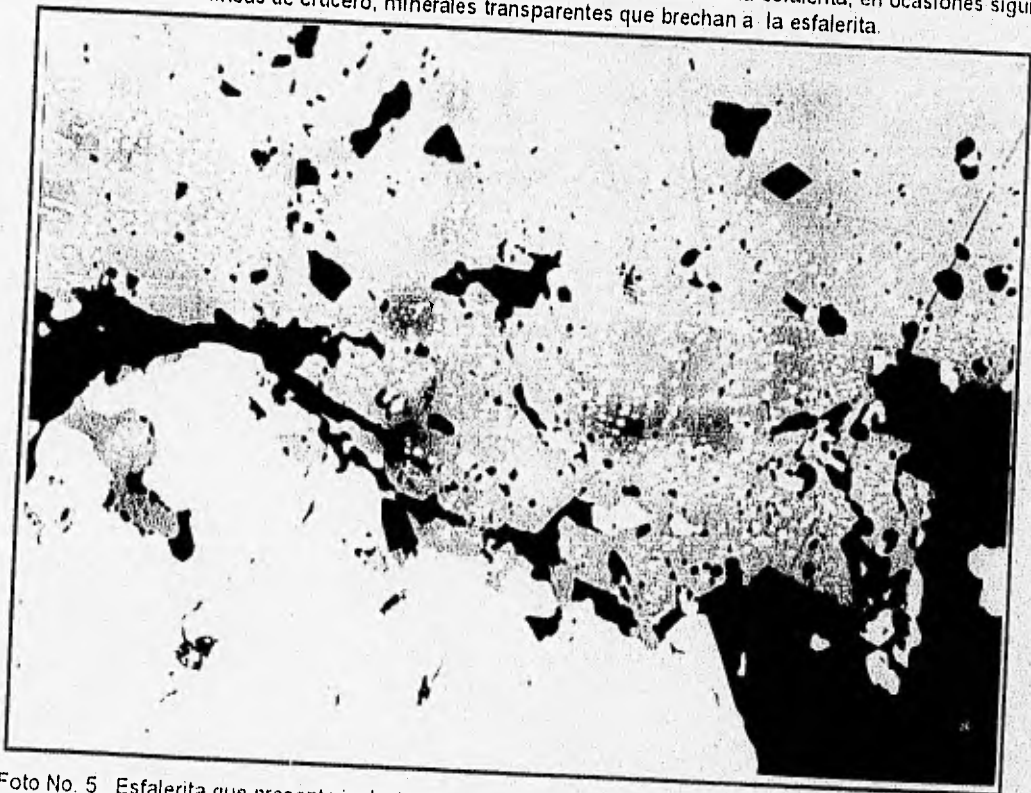


Foto No. 5 Esfalerita que presenta inclusiones tipo emulsión en sus bordes de pirita, también se presentan inclusiones más pequeñas de galena y minerales transparentes

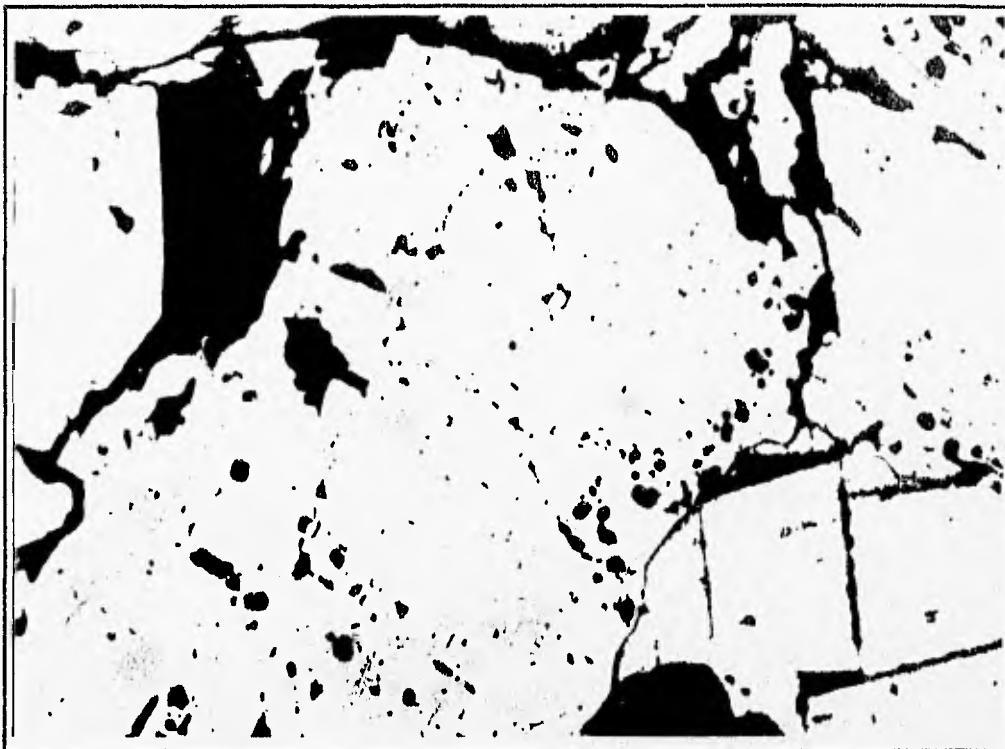


Foto No 6 Esfalerita con inclusiones de pirita tipo emulsión, introducción de minerales transparentes que brechan a los sulfuros.



Foto No 7 Galena reemplazando a la esfalerita. texturas de golfos y penínsulas, mares e islas. En ellas las islas crecieron primero y los mares después.

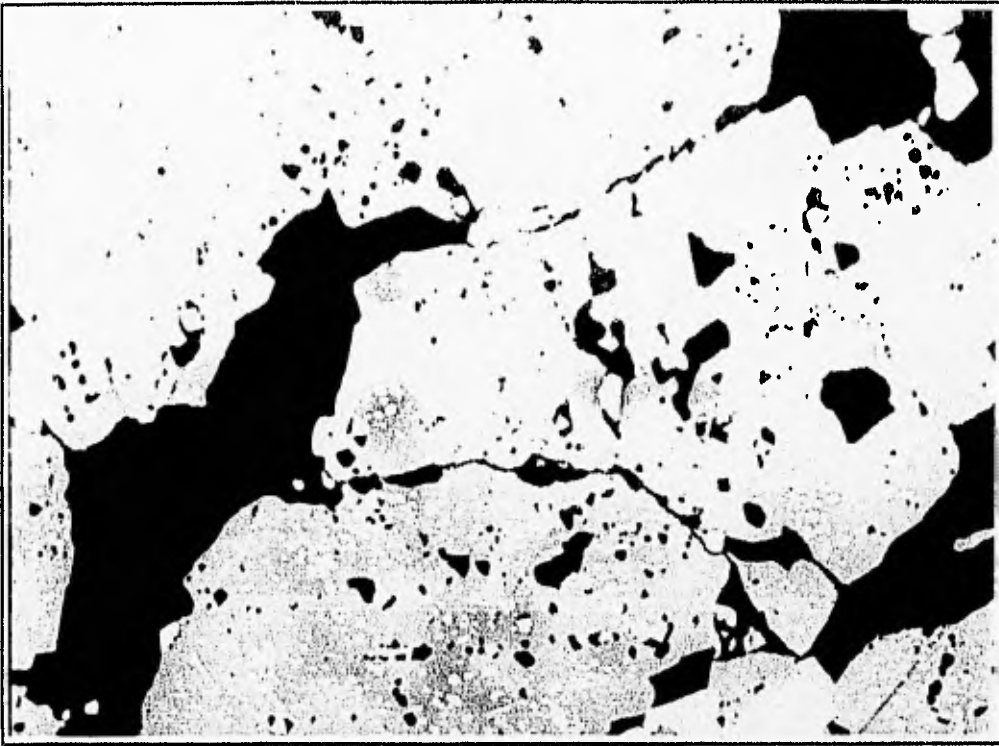


Foto No. 8 Esfalerita con inclusiones tipo emulsión de pirita y calcopirita reemplazada por minerales transparentes.

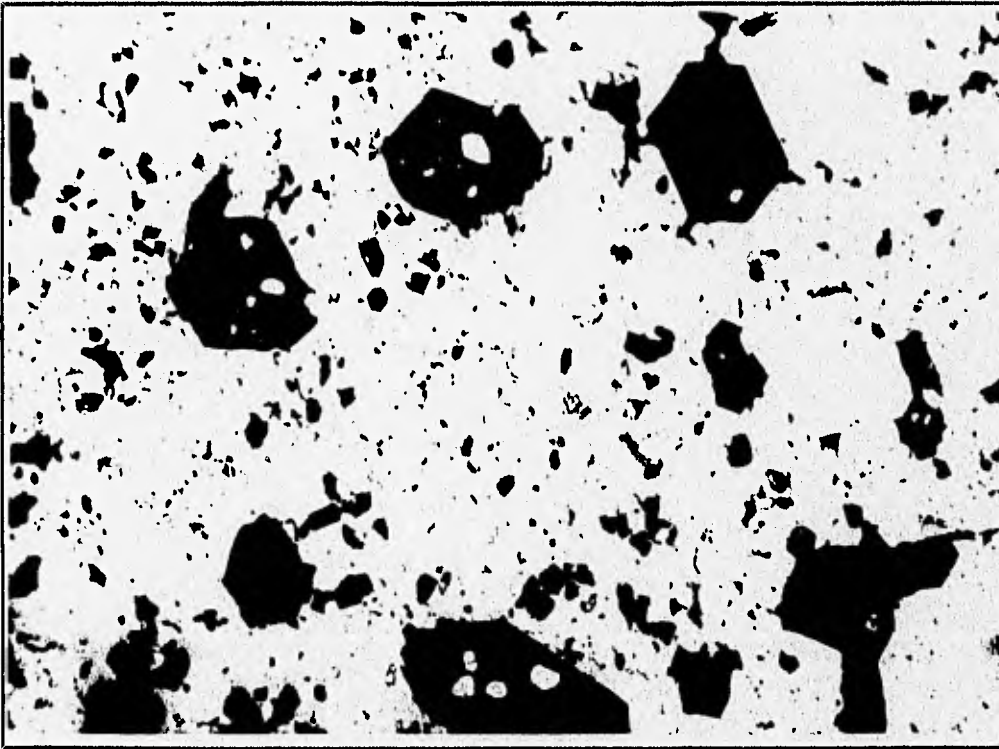


Foto No. 9 Minerales transparentes en formas euédrales incluidos en esfalerita.

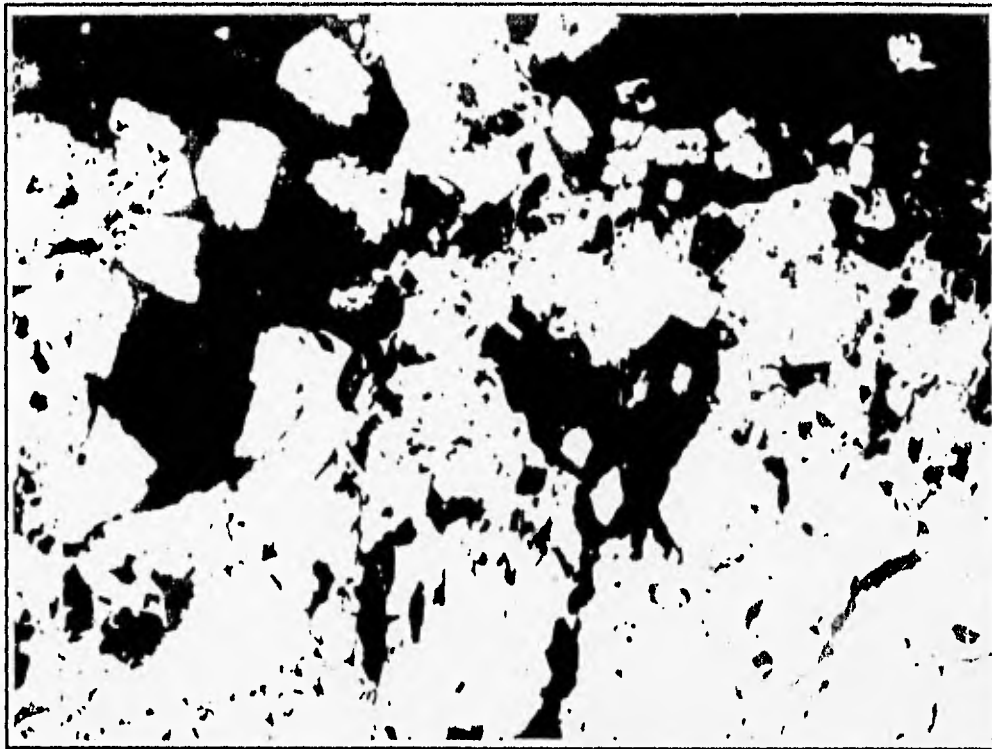


Foto No. 10 Intercrecimiento de esfalerita, pirita y galena remplazados por minerales transparentes.



Foto No. 11 Galena intercrecida con esfalerita reemplazadas por pirrotita y minerales transparentes.

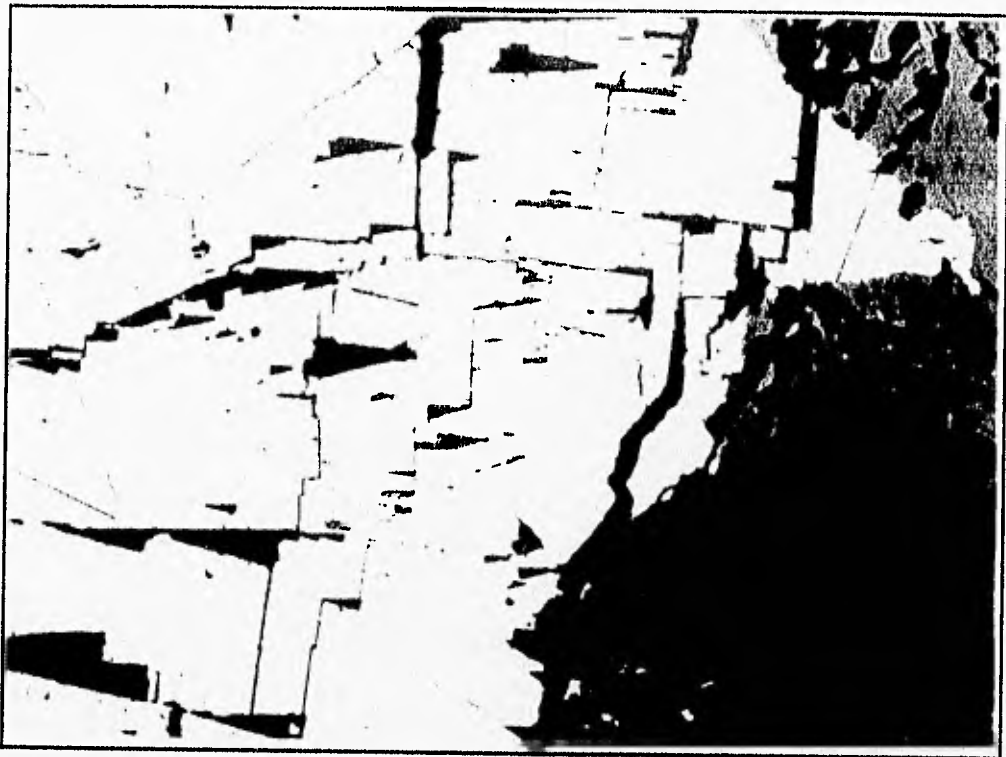


Foto No. 12 Galena con inclusiones de pirita euhedral.



Foto No. 13 Galena reemplazada por esfalerita esta última con inclusiones de calcopirita , pirita emplazada en el contacto de la galena y esfalerita.

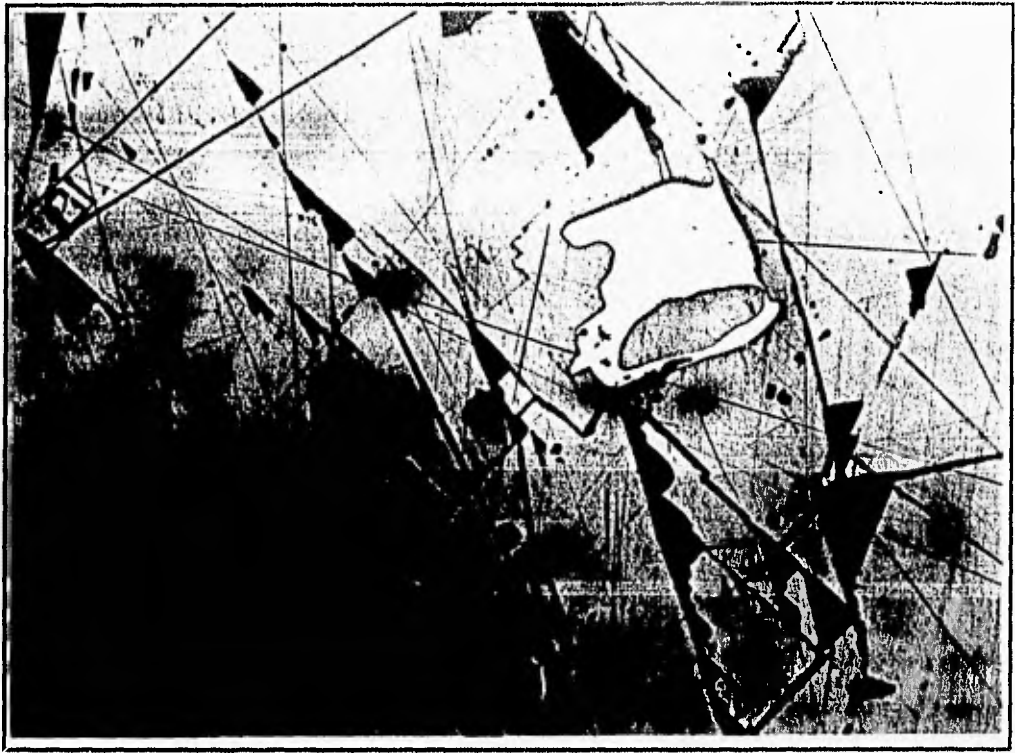


Foto No. 14 Pirita reemplazada por galena, presentan la textura de atolón.



Foto No. 15 Pirita reemplazando a la esfalerita, esta última presenta reflexiones internas muy rojas.

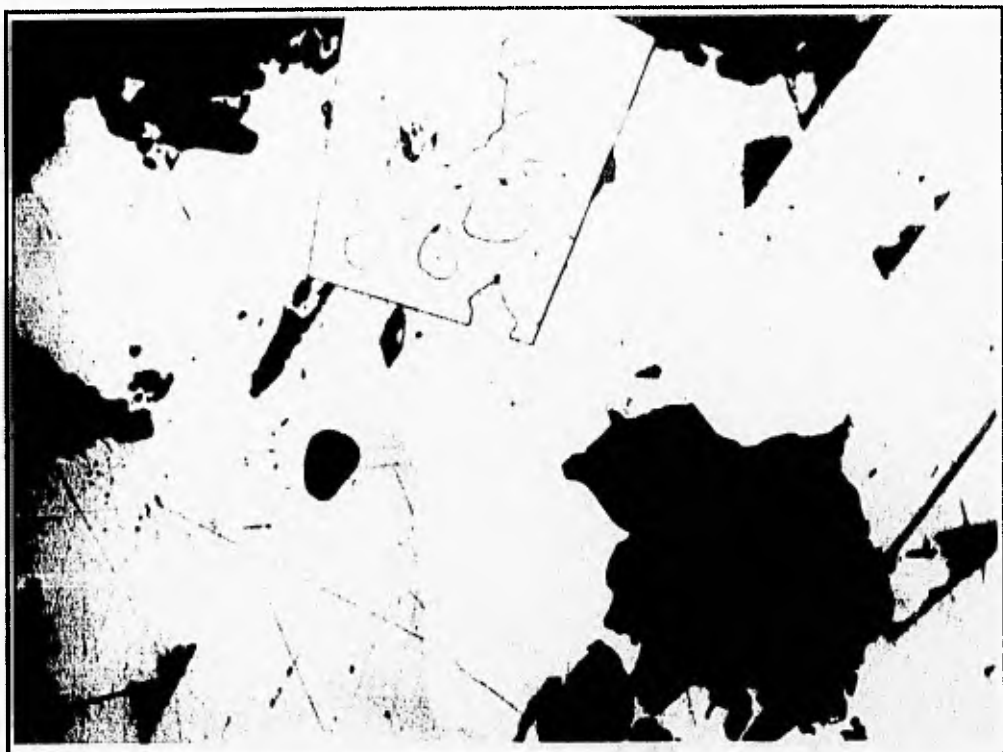


Foto No. 16 Pirita presentando textura de caries, remplazada por un intercrecimiento de galena calcopirita.

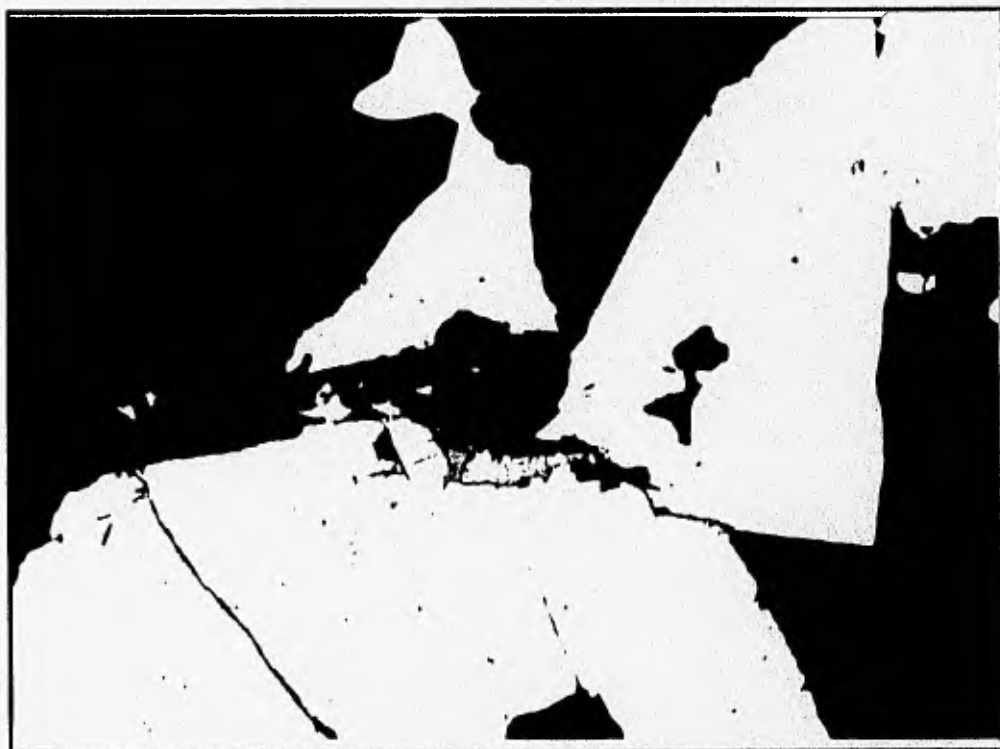


Foto No. 17 Pirita reemplazando a los sulfuros de plomo y zinc. Tetrahedrita en el borde de la pirita.



Foto No. 18 Reemplazamiento de pirita por pirrotita y esfalerita, sulfosales emplazadas en el contacto de la pirita y la esfalerita, Intercrecimiento pirita- marcasita reemplazando a la pirrotita monoclinica.



Foto No. 19 Mar de calcopirita reemplazando a islas de galena.



Foto No. 20 Intercrecimiento de calcopirita y pirrotita con algo de arsenopirita.



Foto No. 21 Intercrecimiento de pirrotita monoclinica - galena, resto de esfalerita la cual presenta inclusiones de sulfosales de plata (emplazadas en el contacto esfalerita- pirrotita y mineral transparente).

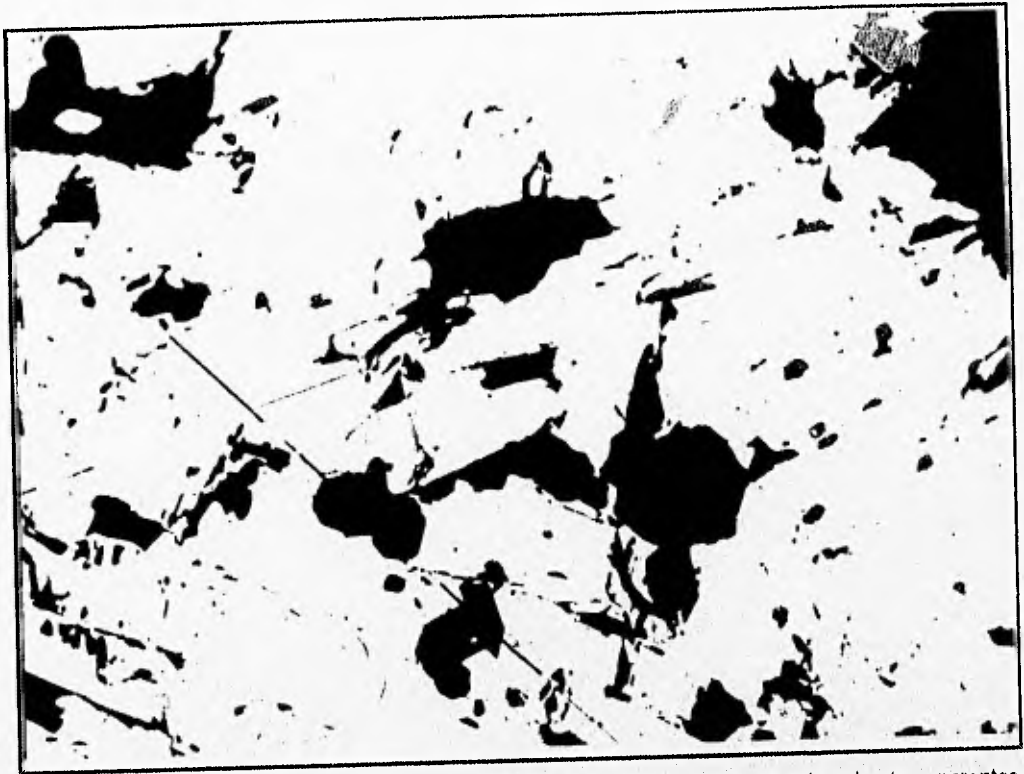


Foto No. 22 Galena reemplazando a la pirrotita , esta última intercrecida con minerales transparentes.



Foto No 23 Reemplazamiento de Pirita- marcasita por pirrotita monoclinica.



Foto. 24 Marcasita- pirita reemplazando a la pirrotita.

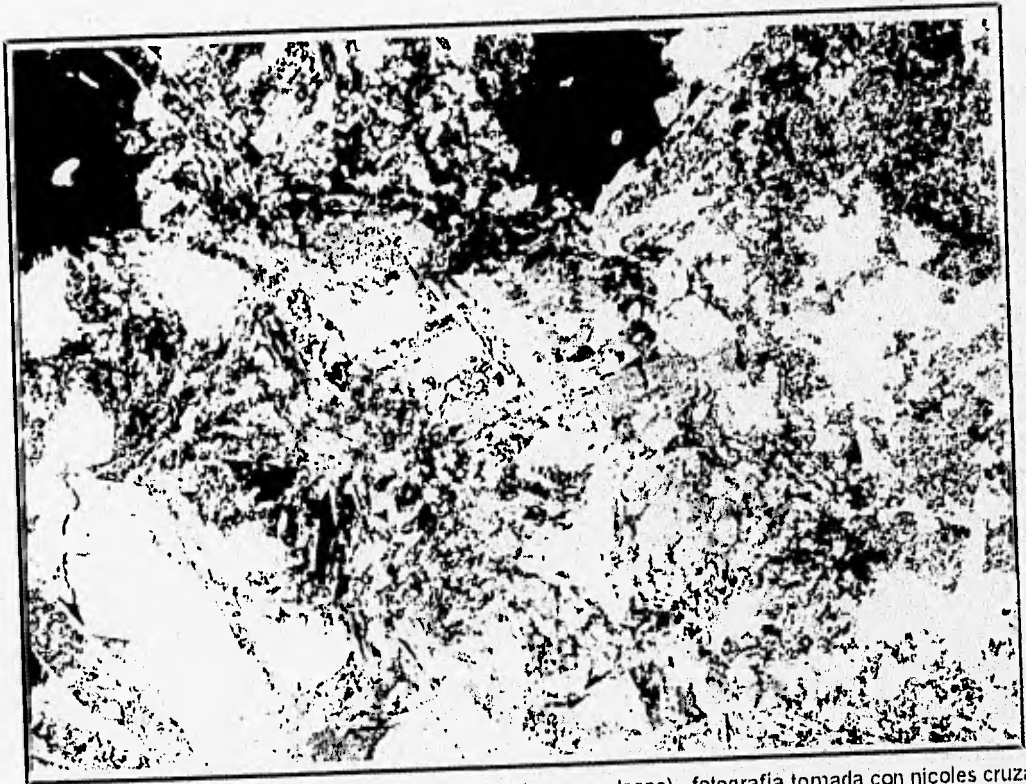


Foto No. 25 Marcasita alterando a la pirrotita (Coloraciones verdosas), fotografía tomada con nicoles cruzados.



Foto No. 26 Marcasita alterando a la pirrotita, fotografia tomada con nicoles cruzados.



Foto No. 27 Sulfosales de plomo creciendo entre la galena y calcopirita.



Foto No. 28 Sulfosales de plomo y plata (boulangerita, tetrahedrita freibergita) incluidas en la galena



Foto No. 29 Reemplazamiento de galena por calcopirita, inclusiones de sulfosales de plata en la galena, pirita reemplazando a la galena.



Foto No. 30 Tetrahedrita emplazada en el contacto entre la galena y la esfalerita.



Foto No. 31 Intercrecimiento de galena - esfalerita y pirita. tetrahedrita incluida en la esfalerita y en la galena.



Foto No 32 Sulfosales de plata emplazadas en el contacto entre la galena y la esfalerita, y otra emplazada en los bordes de una pirita la cual está incluida en la galena.



Foto No. 33 Sulfosales de plata bordeadas por dos puntos de pirita incluidas en la galena, intercrecimiento de galena-pirrotita.



Foto No 34 Estanita y tetrahedrita emplazada en el contacto galena - esfalerita.



Foto No. 35 Freibergita incluida en galena, está a su vez incluida en pirita y por ultimo remplazada por la esfalerita.



Foto No. 36 Textura de flama. introducción de minerales transparentes en la galena. pirita euهدral remplazando a la galena.

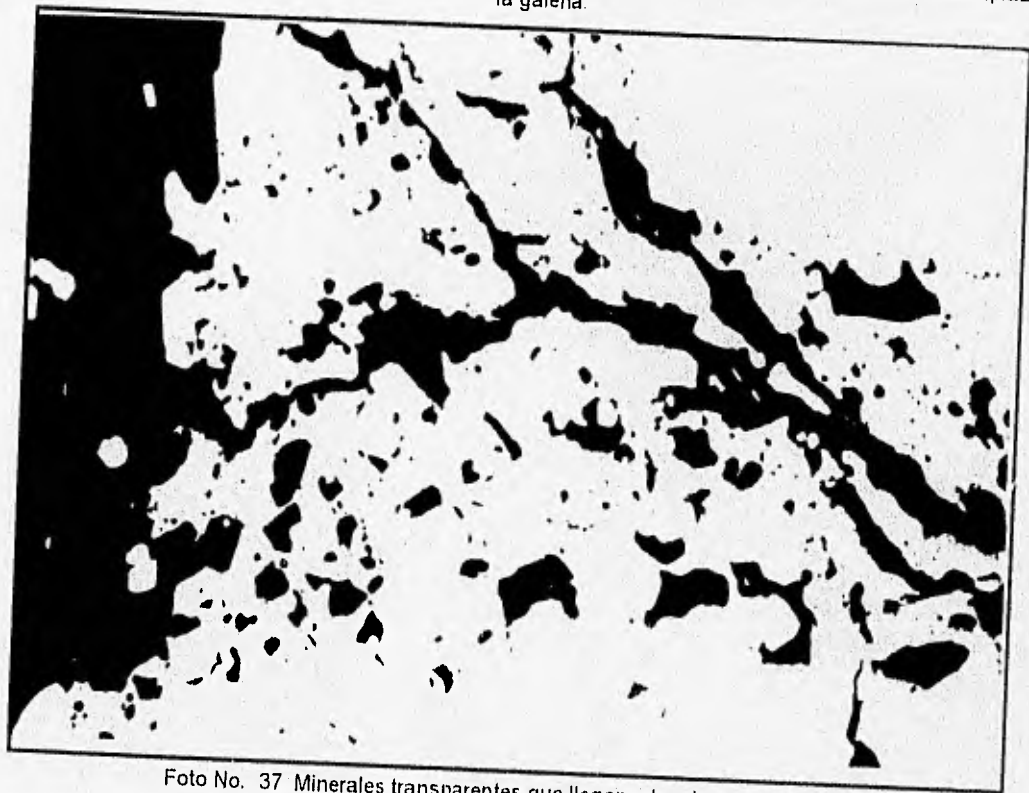


Foto No. 37 Minerales transparentes que llegan a brechar a los sulfuros.

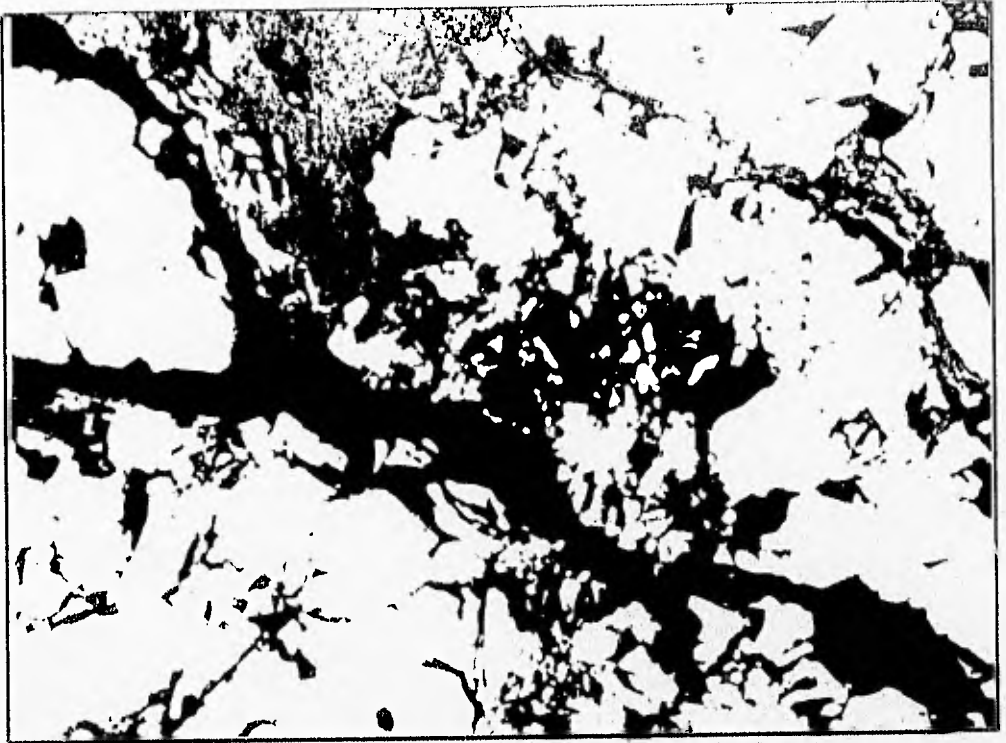


Foto No. 38 Minerales transparentes que brechan a los sulfuros.



Foto No. 39 Sulfuros reemplazados por minerales transparentes.