

# **Algunas consideraciones mineralógicas sobre las menas del distrito minero de El Oro-Tlalpujahua**

**Mikhail Ostrooumov,<sup>1</sup> Jorge Bustamante García<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Depto. de Geología y Mineralogía, IIM, UMSNH, <sup>2</sup> Servicio Geológico Mexicano.**

**Resumen.** El objetivo de este trabajo es el de caracterizar la mineralogía general y de interés económico de las menas de los depósitos epitermales auroargentíferos que están localizados en el distrito minero de El Oro-Tlalpujahua (Michoacán, México). Se realizaron una serie de observaciones en el interior de algunas minas y se colectaron muestras para desarrollar diferentes análisis: mineragráficos, difracción y fluorescencia de Rayos X, espectroscopía Raman e infrarroja, microscopía electrónica de barrido y estudio de inclusiones fluidas. En las muestras analizadas fueron encontradas las siguientes especies hipogénicas: oro nativo, plata nativa, argentita, calcopirita, pirita, arsenopirita, pirrotita, galena, esfalerita, tetraedrita-freibergita-tenantita, bornita, boulangerita, magnetita y una serie de seleniuros y telururos raros de plata y oro. Entre los minerales de enriquecimiento secundario se observaron oro nativo, plata nativa, proustita-pirargirita, polibasita y hematita. Los resultados aquí expuestos aportan nuevos datos a la mineralogía de mena de los yacimientos de este distrito, permiten llevar a cabo su interpretación genética y establecer las zonas más favorables para la prospección minera.

## INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de oro y plata principales y más productivos del Estado de Michoacán son de un origen epitermal, típico de media y baja temperaturas (González y Torres, 1988; Ostrooumov y Corona, 2000; Monografía, 2008). En todos los casos se presentan asociaciones de una serie de sulfuros polimetálicos de Ag-Pb-Zn-Au-Cu. Del mismo modo, a partir de los datos analizados de los yacimientos hidrotermales con asociaciones de sulfuros polimetálicos, éstos pueden ser divididos en tres tipos principales (Tabla 1): a) los yacimientos mesotermiales de la Sierra Madre del Sur, con minas tipo como **El Arenoso, Cerro Bola, El Ahijadero y Arroyo Seco**. Estos yacimientos están relacionados a un magmatismo Eoceno-Oligoceno y muestran concentraciones muy bajas de oro y plata (p.ej. 200g/ton de Ag); sin embargo, las localidades y manifestaciones de mineralización son muy abundantes en toda la región; b) los yacimientos de la región noreste de Michoacán, donde resaltan por su importancia las minas de **Tlalpujahuá y Angangueo** (800-1200g/ton de Ag), así como un posible subgrupo con concentraciones menores de este metal, en la región de Tzitzio-Otzumatlán -Tuzantla (hasta 150g/ton de Ag).

Entre estos yacimientos hidrotermales polimetálicos llaman la atención los yacimientos de la región noreste de Michoacán, donde resaltan por su importancia las minas del distrito minero de el Oro-Tlalpujahuá que forman parte de una amplia y larga franja continua que se desarrolló durante el terciario medio (~40-20 Ma) y que se extiende desde los límites de los Estados de Guerrero y Oaxaca hasta los Estados de Nayarit y Zacatecas. Debido a la extensión de esta franja, México ha sido considerado como una verdadera “anomalía argentífera” en el mundo (Megaw, 1997). Las razones de este particular enriquecimiento de plata en la corteza continental han sido explicadas por las variaciones composicionales de magmatismo y el volcanismo relacionado con un proceso tectónico de migración-regresión de la paleotrinchera Pacífica de Norteamérica (Damon et al., 1981).

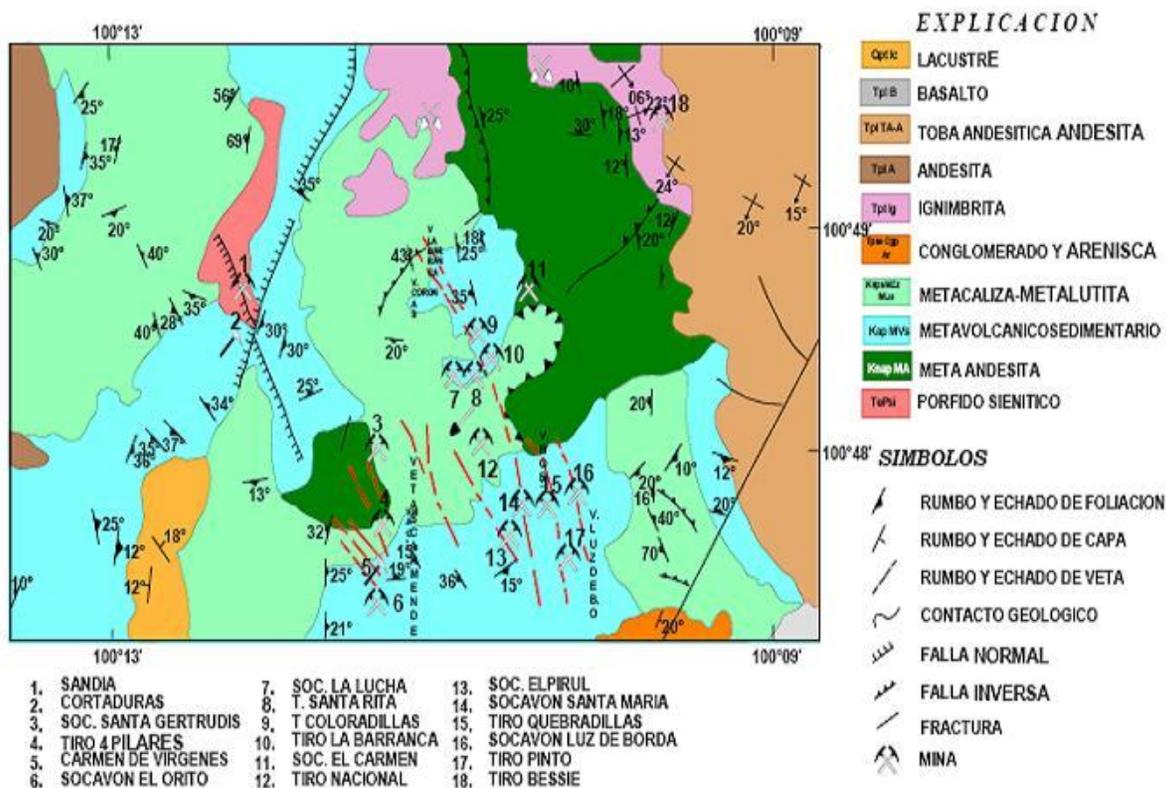
Recientemente, el Servicio Geológico Mexicano ha reeditado la Monografía Geológico-Minera Estatal (CRM 2008). En esta publicación fueron descritas las principales características de las regiones mineralizadas del Estado, señalando sus cualidades geográficas y económicas. Sin embargo, en este trabajo no fue realizado un estudio mineralógico detallado de los yacimientos minerales concretos que se ubican en diferentes franjas metalogenéticas y en particular, los yacimientos epitermales con altas concentraciones de Au/Ag mencionadas anteriormente por Ostrooumov y Corona (2000). Por eso, los objetivos principales de esta investigación son los siguientes:

1. Caracterizar los rasgos mineralógico-geoquímicos y paragenéticos, así como también la mineralogía de interés económico de los yacimientos hidrotermales de origen volcanogénico de baja temperatura (distrito minero El Oro -Tlalpujahua).
2. Obtener la información completa sobre los yacimientos estudiados: distribuciones de mineralización económica, zonalidad mineralógica lateral y vertical, nuevas áreas prospectivas.

### **Ambiente Geológico**

En el Estado de Michoacán existe un importante paquete de rocas que tienen una historia geológica que va desde el Triásico hasta el Reciente es decir comprenden un rango de tiempo geológico que va desde 215 Millones de años hasta el presente. Se distinguen las siguientes unidades geológicas principales: Terreno Guerrero (Dominio Cordillerano), Secuencia de traslape, secuencias de arcos volcánicos del Mioceno, Cinturón volcánico mexicano.

Los yacimientos auroargentíferos de baja temperatura se encuentran en la secuencia del arco volcánico miocénico (Figura 1). Se trata de una secuencia de vulcanismo andesítico que se desarrolla aún con una distribución NW-SE con intercalaciones importantes de rocas piroclásticas de tipo ignimbritas o bien secuencias sedimentarias evidenciando una fuerte erosión de los arcos volcánicos continentales.



**Figura 1. Geología del distrito minero El Oro-Tlalpujahua (Monografía, 2008).**

Las rocas que afloran en el distrito minero El Oro -Tlalpujahua están representadas, de las más antiguas a las más jóvenes, por una secuencia volcanosedimentaria del cretácico inferior levemente metamorfizada, constituida por pizarras negras con excelente foliación, interestratificada con arenisca tipo gravavaca, marga, lutita filítica y delgados horizontes de caliza (Figura 1). En la base de la secuencia hay horizontes tobáceos y material volcánico ligeramente metamorfizado. Las rocas de esta secuencia tienen un gran significado, puesto que encajonan al 90% de las estructuras mineralizadas y representan el mayor control tectonoestratigráfico de los yacimientos en el área. En base a sus características litológicas algunos autores han sugerido una edad Neocomiano Superior o la han correlacionado a la "Secuencia Arcelia-Otzoloapan" del Cretácico Inferior.

Las rocas volcanosedimentarias están cubiertas de manera discordante, hacia el centro-sur del área, por una unidad conglomerática polimíctica, de color rojizo, correlacionable a la Formación

Balsas. Hacia el noreste, entre los poblados de Tlalpujahua y El Oro, lavas dacíticas y andesíticas, e ingnimbritas con abundantes fenocristales de plagioclasas y fragmentos líticos de varios centímetros de tamaño, yacen discordantemente sobre la secuencia metamorfizada. Estas rocas ácidas postminerales cubren una buena parte de las estructuras mineralizadas al oriente del distrito y se les infiere una edad probable del Pleistoceno (Pasquare et al., 1991).

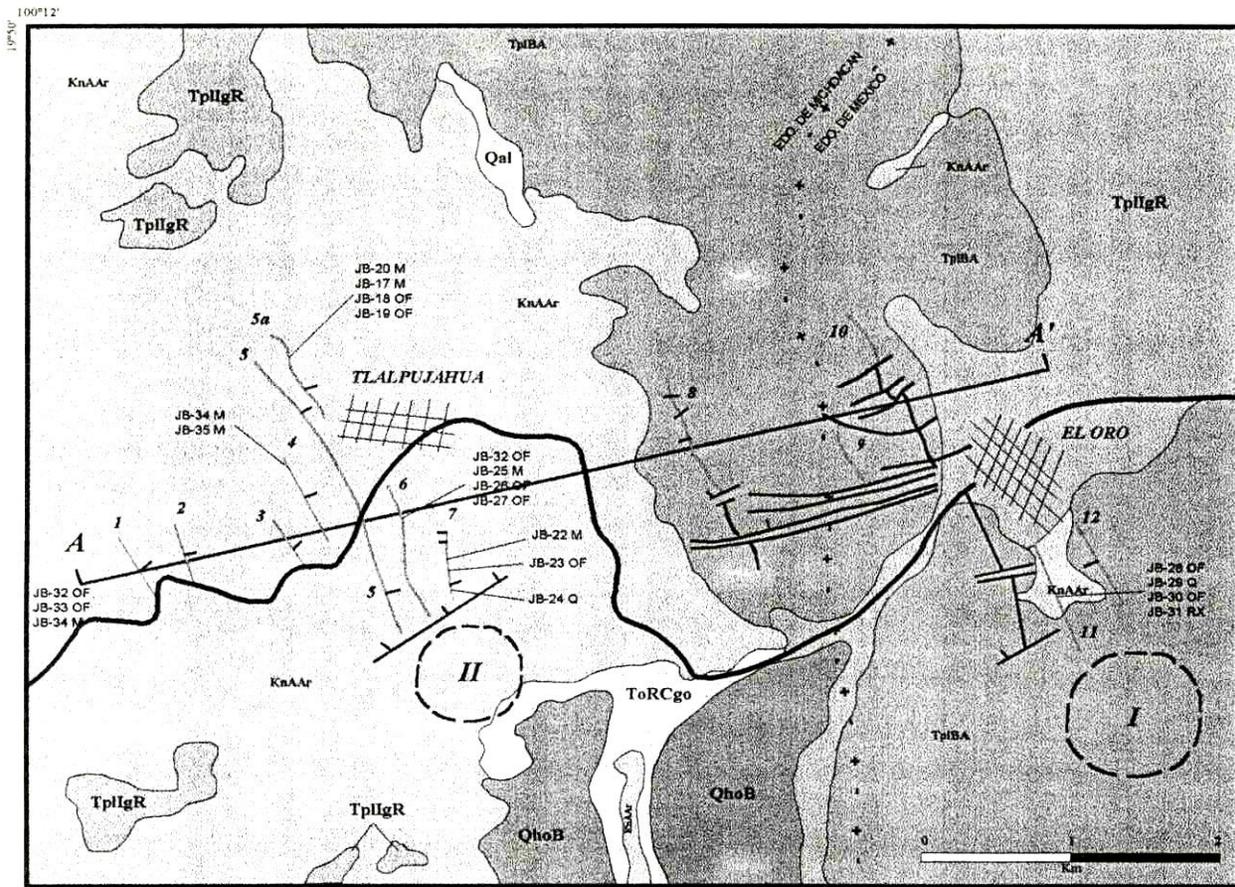
En el interior de algunas minas se han reportado diques andesíticos que atraviesan a la pizarra y que podrían interpretarse "como diques alimentadores de las lavas submarinas de la secuencia volcanosedimentaria". En las minas Coronas y El Pirul existen intrusiones de pórfido andesítico y diques riolíticos, emplazados probablemente al mismo tiempo que la mineralización.

La preparación tectónica se manifiesta mediante dos anticlinales y sinclinales, con rumbo promedio de sus ejes de 30° NW, lo que coincide con la orientación general de las vetas, lo que podría indicar que la mineralización se emplazó en las fracturas originadas al terminar los esfuerzos de compresión que produjeron el plegamiento en la secuencia. Posteriormente por nuevos esfuerzos tectónicos se conformó un sistema de fallas N 60° E con echados de 60° a 80° al NW y SE que dislocaron los cuerpos mineralizados en mayor o menor grado. Según los últimos datos geológicos esta área se llama la secuencia del arco volcanico mioceno (12-21 Ma).

### **Yacimientos Minerales**

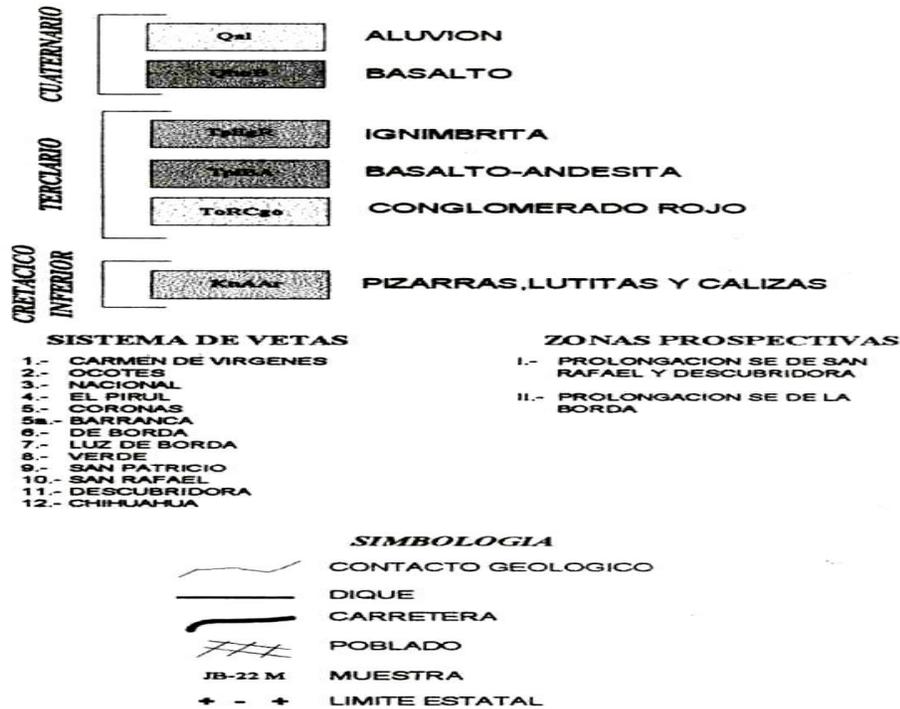
La mineralización en el área de El Oro-Tlalpujahua se localiza en los límites entre los estados de Michoacán y México y se extiende desde la población de El Oro al este, hasta la localidad de San Francisco de los Reyes, al poniente de Tlalpujahua, y desde Tlacotepec al norte hasta La Mesa al sur, conformando una franja de aproximadamente 40 km<sup>2</sup>. En el distrito se conocen más de 30 vetas, de longitudes y espesores variables (Figura 2). Entre ellas más importantes son las siguientes: Carmen de Virgenes, Ocotes, Nacional, El Pirul, Coronas, Barranca, De Borda, Luz de

Borda, Verde, San Patricio, San Rafael, Descubridora.



A'

Figura 2. Distribución de las vetas en el distrito minero de El Oro-Tlalpujahua.



## Forma y Dimensiones

Las estructuras mineralizadas tienden a presentar forma tabular, con un rumbo general N 10°-30° W y echados variables 70°-90° tanto al NE (sector Tlalpujahuá) como al SW (Sector El Oro). Los espesores varían de 0.5 m., como en la veta La Barranca, hasta 20-33 m. en la veta Verde. Se sabe, también, que en algunos niveles la veta San Rafael alcanzó 70 m. de espesor. La longitud conocida de las vetas es también variable: desde 160 m. hasta 3500 m.

La mineralización en algunas vetas ha sido explorada y explotada a profundidades considerables, como sucede en la veta Verde donde alcanzó 460 m. Sin embargo, se ha observado que con la profundidad los valores de oro disminuyen paulatinamente, concentrándose más ricamente en los niveles intermedios y superiores de los yacimientos, en un diapasón vertical de 150-200 m.

## Alteraciones y roca encajonante

La mayor parte de las vetas del distrito encajonan en la secuencia plegada de pizarra

interestratificada con lutita negra y delgados horizontes de caliza (Figura 1). En pocas ocasiones como en las vetas Coronas y El Pirul del sector Tlalpujahuá y en algunos niveles inferiores de la veta San Rafael en el sector El Oro, las vetas encajonan parcialmente en pórfido andesítico y diques riolíticos que se emplazaron probablemente un poco antes de la mineralización por las zonas previas de debilidad tectónica.

La principal alteración relacionada a los procesos hidrotermales hipogénicos es la silicificación que constituye el cuerpo principal de las vetas y que se manifiesta más pobremente en un halo de unos cuantos metros dentro de la roca encajonante, conformando vetillas delgadas de cuarzo y recristalización a sílice de algunos minerales de las rocas, como sucede en el nivel -50 de la veta La Barranca y en el socavón principal de la Luz de Borda. A veces es posible advertir un aumento de carbonato de calcio dentro de la silicificación, como se observó en el socavón El Consuelo de la veta Descubridora, donde mediante estudios de difracción de rayos X se estableció la presencia predominante de calcita, acompañada de cuarzo y montmorillonita. Una oxidación conspicua se observa inmediatamente al norte del poblado de Tlalpujahuá en un área aproximada de 1 km<sup>2</sup>, donde a profundidad se emplazaron las vetas Coronas, La Borda y Temascales. Está constituida por limonita, hematita y en menor grado, fragmentos de cuarzo. Esta oxidación ha sido producida por los procesos supergénicos acaecidos en los niveles superiores de las estructuras mencionadas. El cuarzo en la zona supergénica de las vetas se presenta celular y sacaroide, con manchitas esponjosas y finos hilillos de óxidos. En las vetas donde aparecen rocas volcánicas y pórfido andesítico, se desarrollan halos irregulares de propilitización, constituidos por pirita diseminada, clorita, calcita y minerales arcillosos.

## **TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS**

Durante las actividades de campo del presente trabajo se recopilaron muestras para análisis minerográficos, espectroscópicos y de microsonda electrónica, en diversas vetas de los sectores

Tlalpujahua (La Barranca, sistema Coronas, La Borda, La Luz de Borda, El Pirul) y El Oro (la veta Descubridora) con el fin de contrastar y complementar la información que existía. Con el objetivo de determinar las principales características mineralógicas y geoquímicas de las menas estudiadas se utilizaron las siguientes técnicas analíticas:

a) Los estudios mineragráficos se realizaron sobre superficies pulidas de fragmentos seleccionados de mena los cuales fueron analizados a través del microscopio de polarización con luz reflejada (OLYMPUS BX 40). Estas investigaciones fueron realizadas con el fin de obtener la información sobre las asociaciones texturales y mineralógicas de los minerales presentes. Los campos microscópicos o áreas de interés fueron seleccionados, marcados y luego analizados por microscopio electrónico de barrido;

b) difracción de rayos X (difractómetro Siemens 5000, con radiación monocromática de  $\text{Cu K}\alpha$ ,  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ , con 30 kV y 25 mA, con una constante de tiempo 0.6-1.0 s y una constante de paso angular de 0.02 grados  $2\Theta$ ); Los diagramas obtenidos fueron analizados utilizando el programa DIFRACPLUS, que permite determinar las posiciones de los máximos de Bragg y las fases que constituyen las muestras estudiadas.

c) obtención de imágenes y análisis químicos cualitativos puntuales en microscopio electrónico de barrido (MEB, modelo JSM 64000, marca JEOL, con un alcance de 300000 aumentos, Spot Size de  $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  A y a 35 kV, con microanálisis por espectrometría de dispersión de energía de rayos X - EDS).

d) Espectroscopía Raman. Los espectros Raman fueron obtenidos con ayuda de un espectrómetro Raman Brüker RFS 100 instalado en el Laboratorio de Física Cristalina del Instituto de Materiales de Nantes, Universidad de Nantes (Francia). Las condiciones del registro son las siguientes: intervalo del registro  $= 100-4000 \text{ cm}^{-1}$ ; láser Nd/YAG con una potencia 360

mW y una longitud de onda de  $\lambda=1064$  nm; acumulación de 1000 espectros; resolución espectral de 2 a  $4.0 \text{ cm}^{-1}$ . Todos los espectros se obtuvieron en condiciones analíticas idénticas, por lo tanto, las intensidades de las bandas pueden ser directamente comparadas entre un espectro y otro. Todas las medidas fueron hechas a temperatura ambiente. Algunas muestras fueron analizadas con un espectrómetro Raman T64000 Jobin Yvon equipado de un láser de argón con una longitud de onda ( $\lambda=514$  nm) en la región visible. El montaje de las muestras permitió registrar los espectros tanto en la configuración macroscópica como en la configuración microscópica. La superficie estudiada varía entonces de  $1 \text{ mm}^2$  en configuración macroscópica a  $10 \text{ }\mu\text{m}^2$  bajo microscopio. Los espectros fueron comparados y presentados con la ayuda del programa GRAMS II.

Todos los equipos analíticos que se utilizaron en esta investigación se ubican en el Instituto de Materiales Jean Rouxel de la Universidad de Nantes, Francia.

## **RESULTADOS**

### **Microscopía óptica**

El material de ganga de todas estas vetas está constituido por cuarzo con tonalidades grises y ocre y en menor proporción calcita que intercrece con el cuarzo en venas y cavidades. En algunos sectores se observa diseminación pobre de pirita y textura bandeada del cuarzo con fino hilos oscuros de sulfuro. Arriba del nivel -50 de la veta la Barranca y el socavón de Luz de Borda el cuarzo presenta textura celular y sacaróide, con manchas y vetillas ocre de limonita que evidencian pertenencia a la zona supergénica. En general el aspecto de la ganga de estas estructuras es semejante a la descrita por los autores antes mencionados para las vetas la Verde y San Rafael, en el sector El Oro, cuyos socavones son ahora inaccesibles.

Por lo que se refiere a los minerales de mena, las muestras analizadas nos reportan las

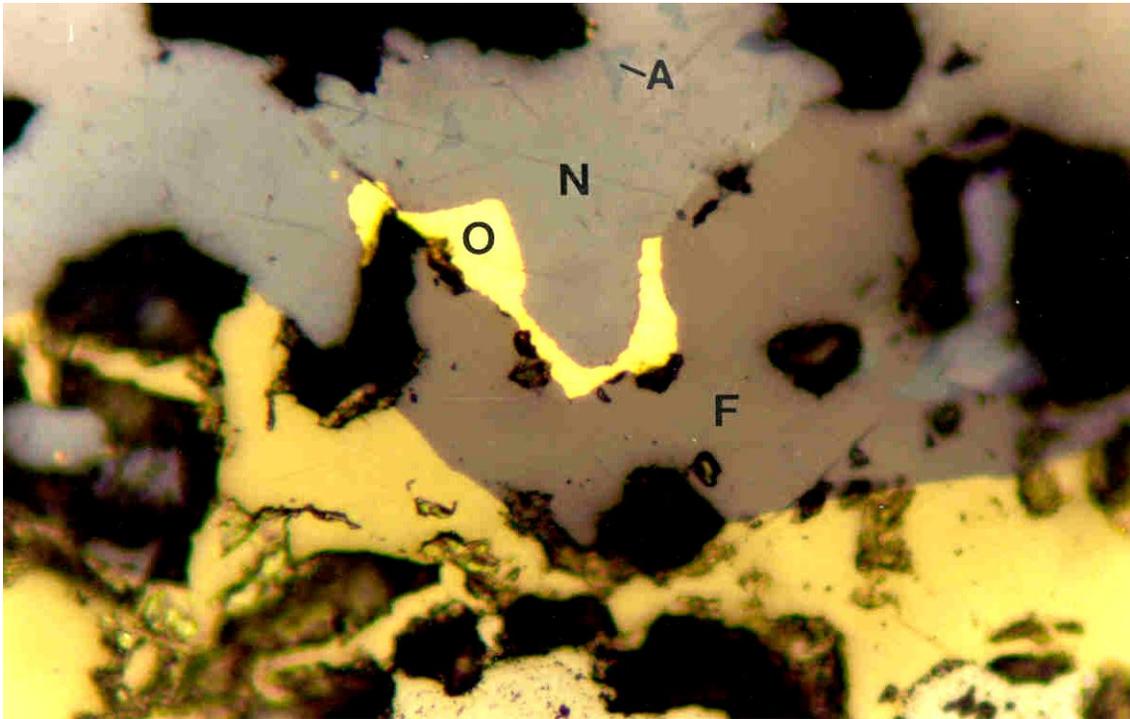
siguientes especies hipogénicas: oro nativo, plata nativa (en menor proporción) calcopirita, pirita, arsenopirita, pirrotita, galena, esfalerita, argentita, freibergita-tetrahedrita-tenantita, bornita, magnetita, boulangierita y una serie de seleniuros raros de plata y oro asociados, como la naumanita, aguilarita, fischerita y crookesita. Entre los minerales de enriquecimiento secundario se observaron oro nativo, plata nativa, pirargirita, polibasita y hematita.

A continuación veamos los resultados concretos de la investigación mineralógica de las muestras analizadas.

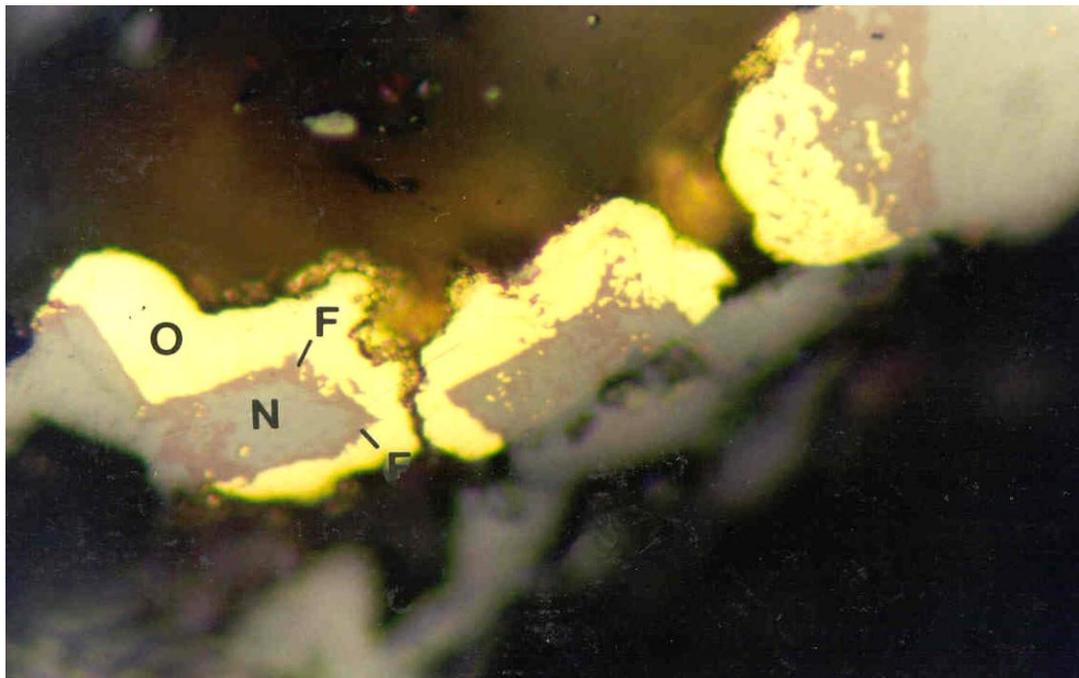
### **Descripción mineralógica de las muestras**

**Muestra 20M (Veta Barranca).** Descripción megascópica: color gris con partes blancas, cuarzo, pirita, pirargirita; textura:relleno de cavidades.

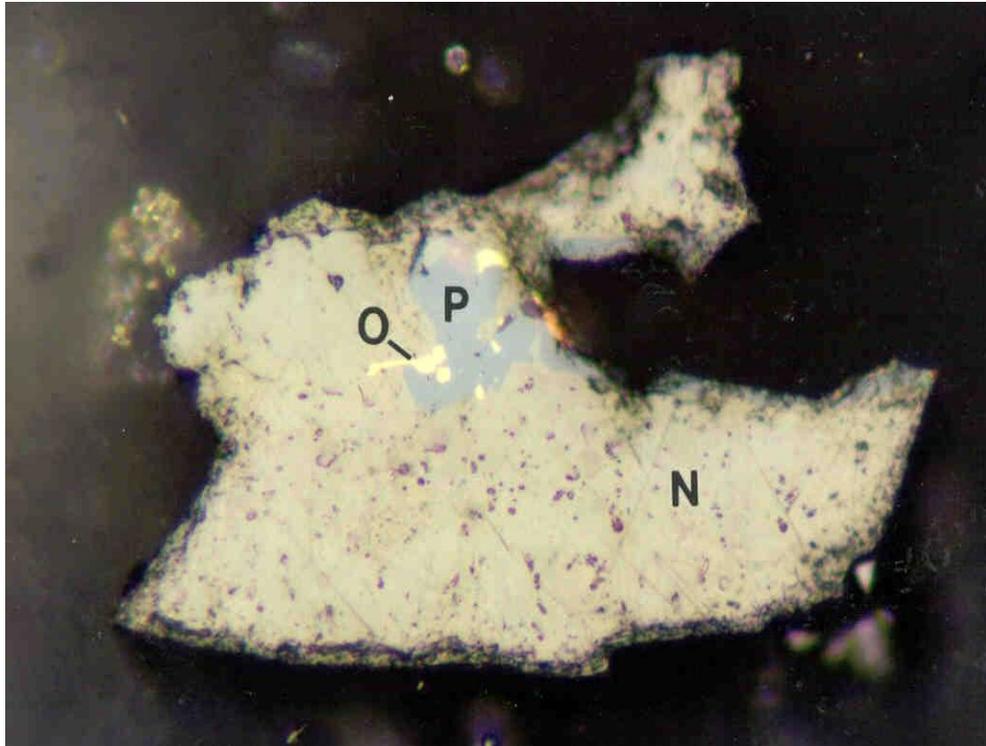
Descripción microscópica (Amplificación 725 x). Microtextura: relleno de cavidades e intercrecimiento. Minerales principales (contenido tentativo 5 a 25%): Aguilarita  $\text{Ag}_4\text{SeS}$ , Pirargirita  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ , Calcopirita, Pirita, Arsenopirita, Freibergita  $(\text{Ag,Cu})_{10}\text{Fe}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ -Tetraedrita  $(\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13})$ -Tennantita; < 5%: Galena, Esfalerita, Naumanita  $(\text{Ag}_2\text{Se})$ , Polibasita  $(\text{Ag}_{16}\text{SbS}_{11})$ , Fischerita  $(\text{Ag}_3\text{AuSe}_2)$ , Boulangierita  $(\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11})$ , Oro nativo, Plata nativa, Pirrotita, Bornita. Forma: anhedral. Tamaño en micras: Pirargirita (2-2000), Naumanita (1-70), Polibasita (2-16), Oro (1-14).



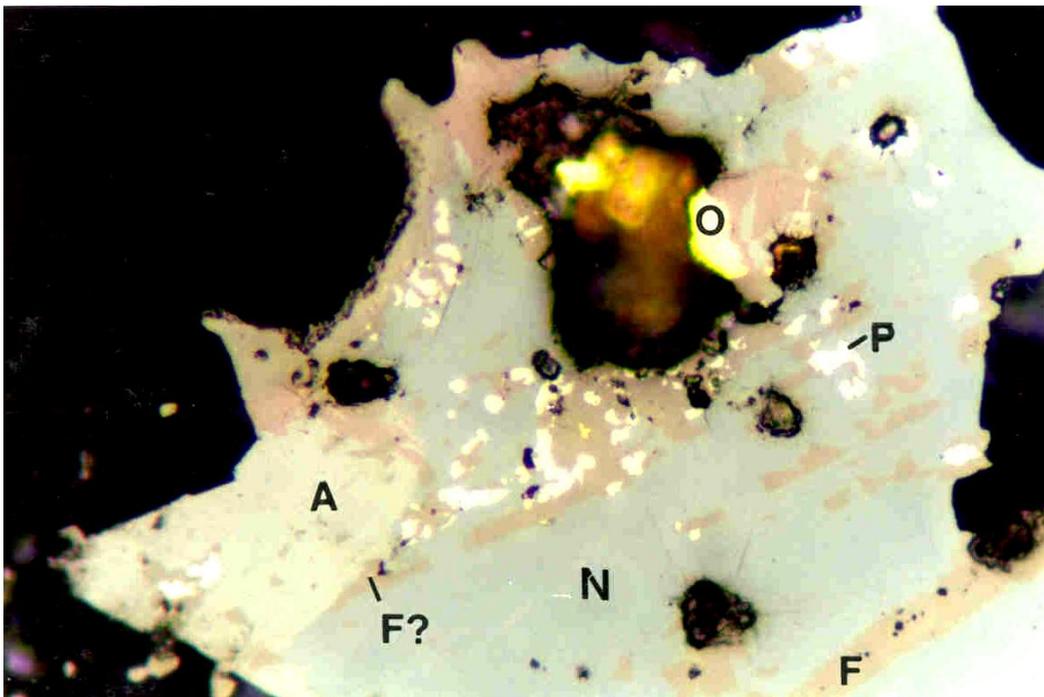
**Lamina 1: Partícula de oro (O -al centro) relleno huecos entre Naumanita (N) y Freibergita (F). En forma de exclusiones se observa Agularita (A) dentro de la Naumanita.**



**Lamina 2: Partícula de Naumanita (N) parcialmente reemplazada a través de sus bordes y huecos por Fischesserita (F) a su vez se observa el oro nativo (O) rodeando a este último mineral.**



**Lamina 3: Partícula de Naumanita (N) con exsoluciones de Oro nativo (O) y Polibasita (P).**



**Lamina 4: Partícula de Naumanita (N) intercrecida con Aguilarita (A), ambas están parcialmente reemplazadas a través de sus bordes por Fischesserita (F?), Freibergita (F) y Pirargirita (P), a su vez se observa Oro nativo (O) asociado.**

**Lamina 5:** Partícula de Naumanita con exoluciones de Oro nativo (O) rodeado de Fischesserita (F); estos minerales se encuentran intercercidos con Calcopirita (Cp).

**Lamina 6:** Partícula de Naumanita (N) con exsoluciones de Oro nativo (O) rodeado de Fischesserita (F). En la parte superior se aprecia más claramente el mineral Fischesserita con Naumanita. La Naumanita presenta exsoluciones de Polibasita (P).

**Lamina 7:** Partícula de Naumanita (N) con exsoluciones de Oro nativo (O) y Aguilarita (A) intercrecida con Freibergita (F), Calcopirita (Cp) y Esfalerita (Ef). La Calcopirita presenta inclusiones de forma botroidal de Pirita (P).

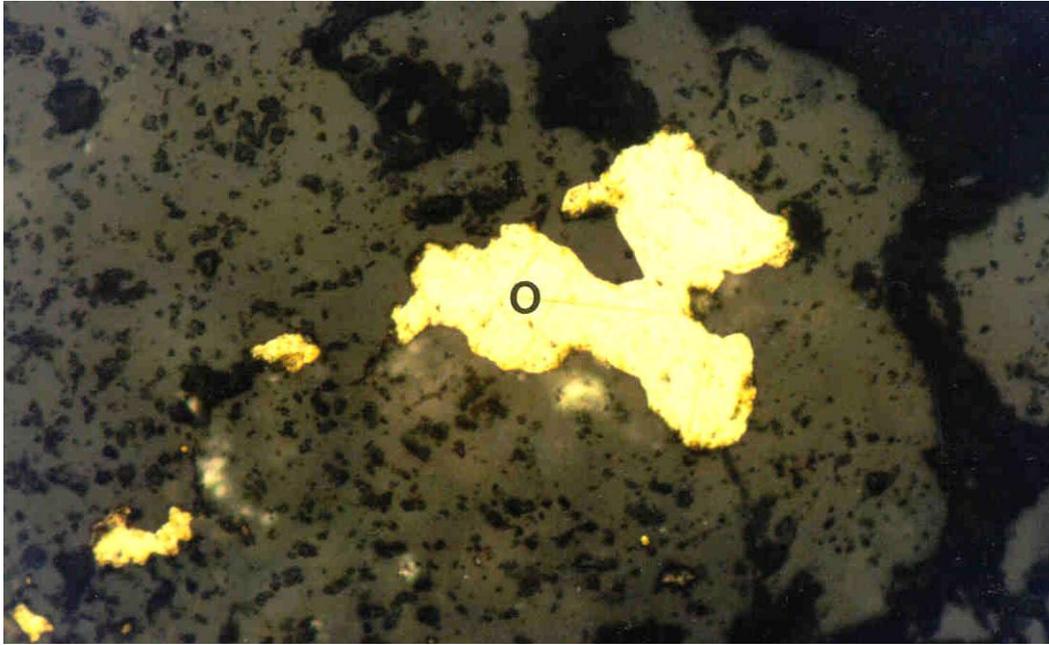
**Lamina 8:** Partícula de Naumanita con exsoluciones de Oro nativo (O) y Polibasita.

**Relaciones y asociaciones mineralógicas y microtexturales:** Pirargirita asociada a todos los sulfuros y sulfosales de plata, Naumanita intercrecida con Freibergita, asociada a Aguilarita y Oro, Oro incluido en Pirargirita, Calcopirita y Fischesserita, rodeando a Esfalerita, asociado a Aguilarita, Naumanita y Esfalerita.

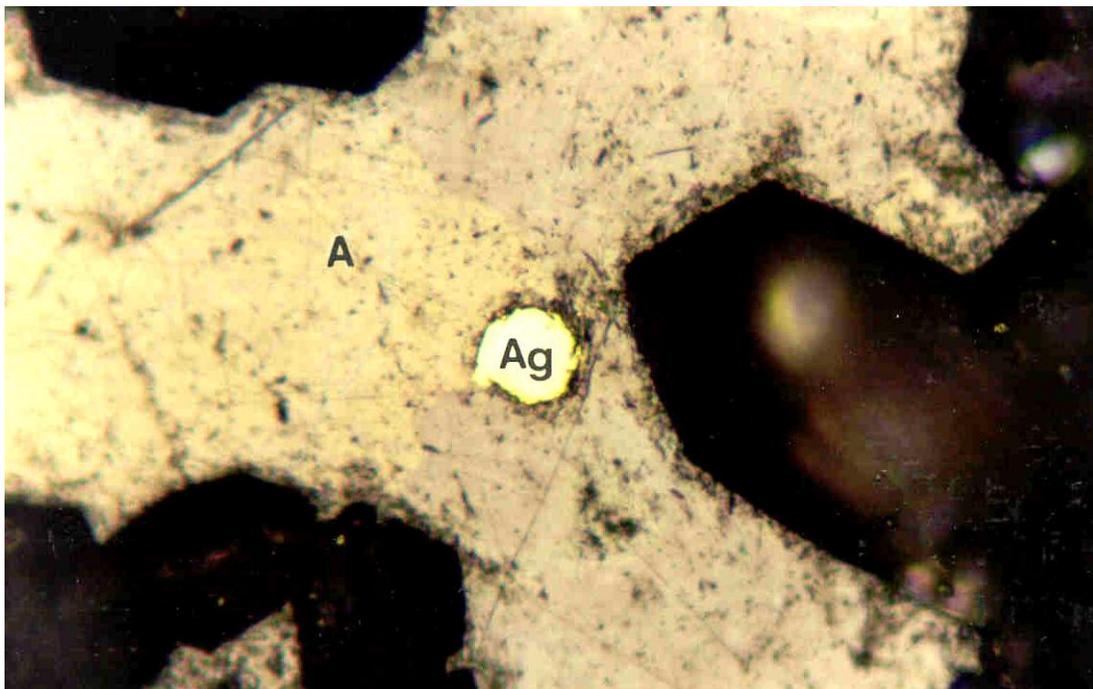
**Secuencia paragenética:** Pirita-Arsenopirita-Pirrotita-Esfalerita-Galena-Calcopirita-Pirargirita-Aguilarita-Naumanita-Tetraedrita-Freibergita-Polibasita-Bornita-Oro con Plata-Fischesserita-Boulangerita.

**La veta Borda, Muestra 25.** Descripción megascópica: blanco con gris metálico, Cuarzo, Argentita, Pirita, Hematita. Textura: relleno de cavidades. Tipo de matriz: Cuarzo.

**Descripción microscópica:** textura relleno de cavidades. Mineralogía: Argentita, Oro nativo, Plata Nativa, Pirita, Magnetita, Arsenopirita, Polibasita (contenido tentativo menor de 5%). Forma anhedral. Tamaño: Argentita (1-3000), Oro (5-150), Plata (5-10), Polibasita (5-15). Plata incluida en Argentita, Oro relleno de huecos en cuarzo en vetillas en Argentita, Argentita relleno de huecos en Cuarzo.



**Lamina 9: Partícula de Oro nativo (O) relleno huecos en cuarzo.**



**Lamina 10: Partícula de Argentita (A) con una inclusión de Plata nativa (Ag).**

**Secuencia paragenética:** Pirita-Magnetita-Arsenopirita-Argentita-Polibasita-Oro nativo.

Por lo tanto podemos indicar la diferencia entre la composición mineralógica de estas vetas. Es

evidente que las reservas económicas de ellas también son diferentes.

**La Veta El Pirul. Muestra 35.** La descripción megascópica es la misma.

Descripción microscópica: microtextura relleno de cavidades, mineralogía: Arsenopirita y Pirita-(5-25%), Argentita, Freibergita, Oro nativo (<5%). Forma: arsenopirita laminar, los demás anhedral.

Tamaño: Arsenopirita (100-1000), Pirita (5-1000), Argentita (8-24), Oro (1-4), Freibergita (15-36).

**Secuencia paragenética:** Pirita-Arsenopirita-Freibergita-Argentita-Oro.

**Lamina 11:** Partícula de Pirita (P) con huecos rellenos por Argentita (A) intercrecida con Freibergita (F). En forma aislada se observan los mismos minerales relleno de huecos en forma aislada en la Pirita. Las relaciones microtexturales y la paragénesis mineral testimonian un proceso hidrotermal en que varios minerales metálicos se formaron contemporánea o sucesivamente, probablemente en tres etapas hipogénicas y una supergénica de gran importancia económica, puesto que la mayor parte de las vetas productivas lo fueron precisamente en la zona de enriquecimiento secundario.

La pirita, de la primera etapa, tiene un aspecto botroidal y se encuentra relleno de huecos en el cuarzo o rodeada por calcopirita con bordes difusos e irregulares, a veces penetrado a la pirita, lo que indica que la calcopirita fue en parte contemporánea y en parte posterior a la pirita. La arsenopirita, por su parte, intercrece con la pirita, en señal de contemporaneidad.

La esfalerita de la segunda etapa, se observa incluida en pirita y la galena relleno de huecos en el cuarzo. También se observaron partículas de esfalerita con exsoluciones de galena y calcopirita del tipo emulsión, lo que indica que estos dos últimos minerales precipitaron contemporánea o ligeramente después de la esfalerita de la segunda etapa. En la tercera etapa la boulangerita rodea a la freibergita y a su vez es reemplazada por la pirargirita de la etapa supergénica. Partículas de oro nativo hipogénico se observan relleno de huecos en el cuarzo de las vetas. Una serie de seleniuros raros de plata y oro, como la naumanita, la aguilarita, la fischesserita y la crookesita, se asocia íntimamente a partículas de oro nativo al final de la etapa hidrotermal. Aquí es curioso destacar que

la fischesserita, un seleniuro de plata y oro ( $\text{Ag}_3\text{AuSe}$ ) que se presenta tardíamente en la secuencia paragenética, reemplaza parcialmente a la naumanita en contacto con partículas de oro. Para ilustrar la etapa supergénica se observó que la polibasita se desarrolla por cristales de naumanita, mientras la polibasita y la fisehesserita reemplazan en los bordes a la aguilarita y naumanita de finales de la etapa hidrotermal.

En la tabla 2 se presenta el resumen sobre la paragénesis y sucesión mineral en las menas del distrito de El Oro-Tlalpujahuá.

### **Difracción de rayos X**

Los resultados que arrojan los difractogramas de las menas y de la ganga de este distrito indican que los minerales esenciales de las muestras analizadas son: cuarzo, carbonatos, feldespatos, pirita, calcopirita, esfalerita, galena, y menas grises (Tabla 3). Entre los minerales de enriquecimiento secundario se han identificado por la DRX proustita-pirargirita, polibasita plata nativa y hematita (Tabla 4). Además, los datos difractométricos muestran la presencia muy escasa de los carbonatos y barita.

### **Microscopía Electrónica de Barrido.**

La microscopía electrónica de barrido ha corroborado la presencia de los minerales principales componentes de las vetas meníferas (esfalerita, galena, menas grises) que anteriormente habían encontrado mediante difracción de rayos X.

### **Estudio de las inclusiones fluidas.**

Por otro lado cabe mencionar que se realizó un muestreo para inclusiones fluidas en cuarzo asociado a la mineralización en algunas vetas del sector Tlalpujahuá. De 12 muestras estudiadas con el microscopio óptico, sólo en cinco se pudieron observar inclusiones, que reportaron temperaturas de homogeneización entre  $200^\circ\text{C}$  a  $245^\circ\text{C}$  (Figura 3). Estos valores revelan condiciones de

yacimientos epitermales con salinidades de bajas a altas, lo cual podría estar indicando la zona de transición entre la zona de sulfuros y la zona supergénica. En base a los aspectos texturales de las vetas, las relaciones paragenéticas de la sucesión mineral y los rangos de temperaturas de homogeneización, se puede afirmar que las vetas del distrito minero de El Oro-Tlalpujahuá son de índole epitermal, manifestándose casi siempre como filones de fisura. La presencia de ciertos minerales como la naumanita y la aguilarita, de cristalización cúbica y bajas temperaturas de precipitación, podrían estar indicando al final del proceso hidrotermal temperaturas apenas arriba de los 160° C.



**Figura 3. Inclusiones fluidas que reportaron temperaturas de homogeneización entre 200° C a 245° C.**

### **Espectroscopía Raman.**

Respecto a la microsonda electrónica la espectroscopía Raman tiene la ventaja de poder analizar áreas que no salen a la superficie de la muestra, como inclusiones de minerales. Igualmente, se analiza en la actualidad el contenido químico de las fases líquidas, sólidas y de vapor dentro de las inclusiones fluidas, aportando una enorme cantidad de datos adicionales al estudio microtermométrico de las últimas. En el trabajo de Burke (2001) se han resumido las fases que se observan en las inclusiones de minerales y las cuales son activas en la espectroscopía Raman.

Las principales aplicaciones de estos estudios en las geociencias son las siguientes: 1. Identificación cualitativa de los componentes sólidos, líquidos y gaseosos de las inclusiones fluidas como el método de la “huella digital”; 2. Determinación semi-cuantitativa de la proporción entre dos o más componentes de la misma o diferente naturaleza en inclusiones (por ejemplo, entre CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>); 3. Estimación del origen y las condiciones de formación de las fases sólidas dentro de las inclusiones.

Con la ayuda de la espectroscopía Raman fueron identificados diferentes componentes en las inclusiones de los minerales entre los cuales algunos fluidos (<sup>12</sup>CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>) son de mayor importancia mientras que otros se observan sólo en algunos casos específicos (por ejemplo, <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CO, COS, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NH<sub>4</sub>). Los principales iones en las soluciones (Na, K, Mg, Fe y Li) fueron detectados en la forma de los hidratos sólidos. Finalmente, existen numerosas investigaciones en las cuales la ER muestra que en los cristales naturales se observa la presencia de diversas inclusiones sólidas (como regla, fases minerales) que fueron atrapadas durante el proceso de formación (Nasdala et al., 2004).

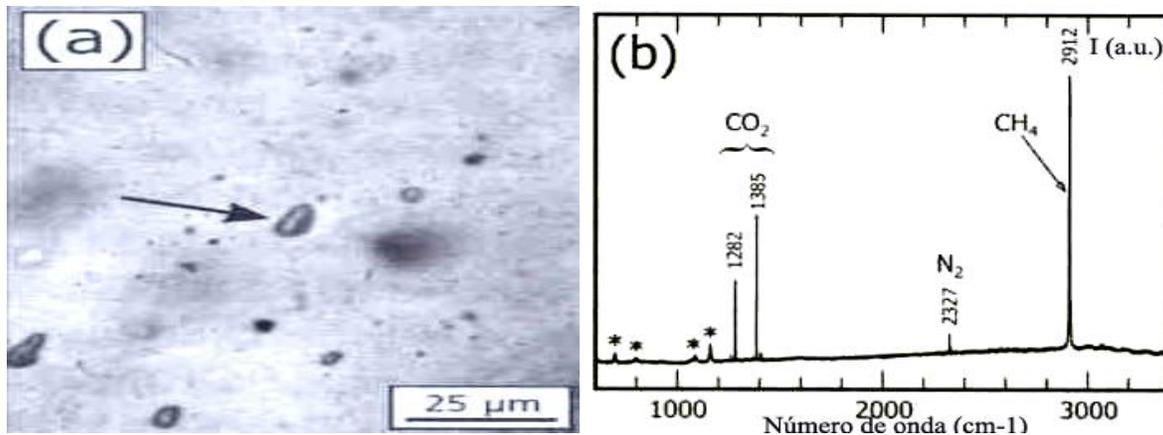
Las inclusiones fluidas en los minerales pueden ser usados como los indicadores de las condiciones de formación (temperatura, presión, composición de fluidos) a condición de que la composición química y la densidad de las inclusiones individuales son bien conocidos. La microespectroscopía Raman moderna alcanza la resolución efectiva del volumen mejor que 5 μm<sup>3</sup> y permite el análisis semi-cuantitativo de las inclusiones con el tamaño menos de 2 μm en diámetro. La calibración empírica de un espectrómetro Raman por una mezcla de gases de una composición conocida y la densidad de las inclusiones son usadas actualmente en la cuantificación de las mezclas de los fluidos.

Tradicionalmente la micro-termometría ha sido la técnica más comúnmente utilizada para

investigar inclusiones intraminerales. Las inclusiones son sometidas a un proceso de enfriamiento controlado en un micro-crióstato y, durante el aumento de temperatura posterior, se registra la temperatura a la cual ocurre la transición de fase. Esta temperatura puede ser tanto el punto de fusión de una fase sólida como también el punto de homogeneización de una mezcla gas/líquido. La temperatura de fusión u homogeneización de una inclusión ofrece información importante acerca de la naturaleza de la inclusión. Sistemas de un solo componente son fáciles de identificar por este método. Sin embargo, la micro-termometría es insuficiente para llevar a cabo la identificación del contenido de las inclusiones en sistemas que consisten de dos o más componentes. En estos casos la espectroscopía Raman ha demostrado ser una herramienta muy apropiadas para este fin, permitiendo un análisis de las inclusiones in-situ y no-destructivo.

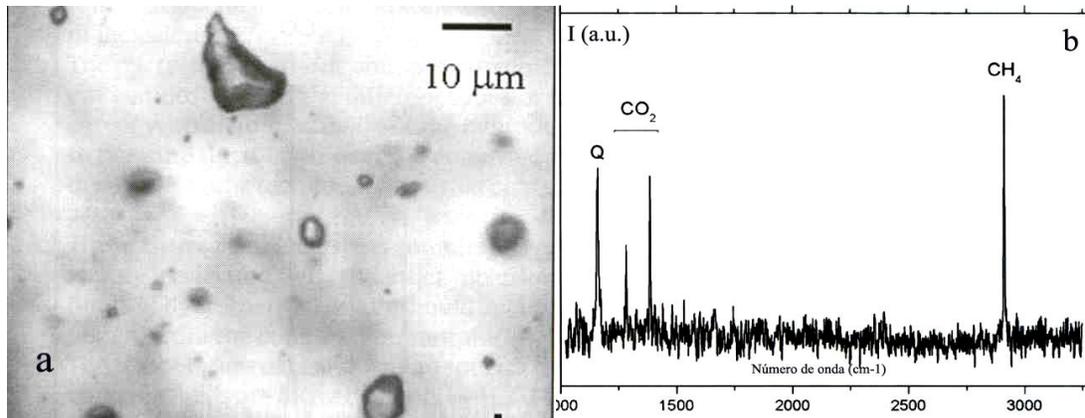
Veamos el ejemplo concreto que muestra la estimación semi-cuantitativa de la composición de gases ( $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ ) en una inclusión que fue observada en el cuarzo (Fig. 4 a) de un yacimiento epitermal de oro en Australia (Nasdala et al., 2004). La figura 4b muestra que en la región entre  $600$  y  $3400\text{ cm}^{-1}$  se observan las bandas características de los tres componentes gaseosos y además, algunas bandas de la matriz del cuarzo. Sería conveniente comentar que las posiciones de las bandas de estos componentes son desplazados ligeramente a la región de los números de onda más bajos comparados con los valores correspondientes a la presión de 1 bar ( $1285$ ,  $1388$ ,  $2331$  y  $2917\text{ cm}^{-1}$ ; Burke, 2001). Este hecho es una evidencia de la presión elevada interna en la inclusión estudiada.

De acuerdo con la metodología que fue propuesta por Debussy et al. (1989), los áreas integrados de las bandas características son los parámetros básicos en la determinación de las fracciones relativas de los tres componentes gaseosos. La calculación realizada muestra que en la inclusión estudiada el componente principal es  $\text{CH}_4$  (73%), mientras que otros dos componentes se encuentran en la concentración subordinada:  $\text{CO}_2$  (20%) y  $\text{N}_2$  (7%).



**Figura 4: Fotomicrografía de la inclusión de gas (a) en el cristal de cuarzo. Espectro Raman (b) de la parte central de inclusión en (a). Se observan las bandas de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. Bandas Raman del cristal-anfitrión de cuarzo son marcados con asteriscos.**

Sería importante subrayar que las inclusiones del mismo tipo también son características para los cuarzos que se formaron en otros yacimientos de oro de origen epitermal. En particular, las inclusiones de esta composición química (Fig. 5a,b) fueron descritos en los cuarzos de los yacimientos de Honduras (Bersani et al., 2009) y México (presente estudio). Entre estos últimos yacimientos mexicanos llaman la atención los depósitos hidrotermales polimetálicos de la región noreste de Michoacán, donde resaltan por su importancia y las reservas de oro y plata las minas del distrito minero de El Oro-Tlalpujahua. Cabe mencionar que se realizó un estudio (microtermometría y obtención de espectros Raman) de las inclusiones fluidas en cuarzo asociado a la mineralización en algunas vetas del sector Tlalpujahua. Los resultados obtenidos han mostrado que los fluidos mineralizados son formados principalmente por H<sub>2</sub>O-NaCl-KCl-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> y en base a los aspectos espectroscópicos y microtermométricos (las temperaturas de homogeneización entre 200-300°C) se puede afirmar que las vetas del distrito minero de El Oro-Tlalpujahua son de índole epitermal, manifestándose casi siempre como filones de fisura.



**Figura 5: Fotomicrografía (a) y el espectro Raman (b) de las inclusiones en cuarzo con alto contenido de fluidos  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ .**

En suma, la micro-espectroscopía de FT-Raman ha demostrado ser una herramienta analítica muy útil para investigar inclusiones líquidas en matrices minerales, especialmente cuando las técnicas tradicionales tales como la micro-termometría no tienen éxito. La micro-espectroscopía FT-Raman del cercano infrarrojo ofrece posibilidades singulares si retrata de muestras que tengan la tendencia a fluorescer bajo irradiación con luz visible.

### **Discusión**

Los resultados de estudio muestran que las asociaciones principales paragenéticas son de tipo único para los yacimientos auroargentíferos del distrito del Oro-Tlalpujahuá. Del mismo tipo es también y la sucesión general en la formación de las asociaciones típicas. Las diferencias entre las menas de diferente tipo se determinan por las relaciones cuantitativas de las asociaciones minerales principales lo que refleja el cambio de la intensidad de los procesos de mineralogénesis (Tabla 2).

La importancia tiene también la concentración relativa de los minerales en estas asociaciones:

1. Asociaciones más tempranas están relacionadas con las zonas de alteración en las rocas encajonantes donde se encuentran los silicatos neogénicos (principalmente micas y cloritas)

conjuntamente con cuarzo, carbonatos y pirita.

2. Asociación temprana de Cuarzo-Sulfuros (pirita-arsenopirita-pirrotita). La temperatura de su formación está en los límites 300-350°C.

3. Asociación de sulfuros tardíos está relacionada con el estadio productivo (esfalerita, galena, menas grises y otros sulfuros y sulfosales complejas, elementos nativos, seleniuros). Para estas asociaciones son características las concentraciones más altas de Pb, Zn, Ag, Au y por eso ellas se consideran como las más productivas para todos los yacimientos. Su presencia indica nuevo impulso de la actividad hidrotermal con transposición de las sustancias minerales. Las temperaturas de formación se encuentran en los límites 280°-120°C.

4. Los estadios más tardíos son iguales o parecidos para los yacimientos de diferentes formaciones: asociación de cuarzo con carbonatos o solo carbonatos sin la mineralización productiva.

5. Entre las particularidades específicas de mineralogía y geoquímica de los yacimientos estudiados sería conveniente indicar lo siguiente. En primer lugar, los yacimientos estudiados de oro y plata se caracterizan por una paragénesis característica de la adularia, elementos nativos y seleniuros de plata y oro. En segundo lugar, para los estadios productivos de las formaciones argentíferas es muy característico el contenido alto de manganeso. De acuerdo con los datos experimentales, la presencia de este elemento en las soluciones hidrotermales provoca la cristalización de los minerales concentradores de plata.

Por lo que se refiere a la distribución espacial de la mineralización auroargentífera en los yacimientos del distrito, existen algunos datos interesantes como resultado de las observaciones que se realizaron a través de muchos años en el interior de las obras mineras, cuya longitud en todo el distrito puede alcanzar más de 150 km., según datos de la Cía. LUSMIN, S.A. de C.V. que ha elaborado un plan de obras antiguas en base a toda la documentación minera existente. Se sabe, por

ejemplo, que en las más importantes vetas del área, la mineralización aurífera se concentraba en los niveles superiores al nivel cero, debido a procesos de enriquecimiento supergénico y que hacia la profundidad disminuían progresivamente su espesor y sus leyes hasta hacerse estériles, como sucedió en la Veta Verde que en el nivel -450 no tenía oro, y apenas 20 g/ton de Ag. En otras vetas, como la Coronas, no hubo producción abajo de ese nivel, debido a los bajos contenidos de oro y plata.

Analizando los planos con las proyecciones longitudinales de vetas como la Verde, San Rafael, Coronas, La Borda, etc. se puede observar que hacia el NW se restringe la zona productiva, mientras que hacia el centro y suroeste de las vetas aumentan significativamente estas zonas que fueron las causas de las bonanzas históricas en este distrito (Figura 2).

Tomando en cuenta, además, que hacia el SE de Tlalpujahua existen algunas vetas como la Luz de Borda que presentan contenidos auroargentíferos importantes, se puede concluir que la mineralización económica del distrito se ha concentrado por lo general en la zona de enriquecimiento supergénico, alcanzando su máxima expresión en extensión y profundidad en la parte central y al SE de las vetas del distrito.

## **CONCLUSIONES**

De hecho los resultados aquí expuestos aportan nuevos datos a la mineralogía de mena de las vetas del distrito, aspectos que no fueron descritos anteriormente en las vetas Verde, San Rafael y otros, ya sea por que no existen en ellas o por que fue imposible observarlos. Para estas vetas y otros yacimientos auroargentíferos de El Oro-Tlalpujahua, se caracterizaron las siguientes especies minerales: oro nativo, tetrahedrita, calcopirita, bornita, pirita, pirrotita, arsenopirita, siderita, magnetita, rodocrosita, esfalerita y rodonita, todos ellos de la etapa hipogénica. Como minerales de enriquecimiento supergénico menciona oro nativo, plata nativa, argentita, pirargirita, embolita, estefanita, polibasita, calcosita, covelita, marcasita.

Las conclusiones principales de esta investigación mineralógica son las siguientes:

1. Se establece la tendencia del tipo único en la formación de las asociaciones minerales para los yacimientos epitermales auroargentíferos. Cada de las asociaciones es típica para el estadio determinado del proceso menífero. Los cambios en las asociaciones paragenéticas son índices de la influencia geoquímica de las regiones meníferas o de la superposición de las menas de diferente tipo.
2. Las relaciones cuantitativas de las asociaciones minerales y sus fases determinan las diferencias principales en la composición de las menas que se concentran en diferentes partes de los yacimientos epitermales. Su distribución espacial determina la zonalidad de los yacimientos.
3. Los minerales característicos de ganga y de mena son característicos para los yacimientos auroargentíferos de la región nor-oriental de Michoacán.

A pesar de que en este distrito se ha extraído mineral desde hace más de 400 años, presenta todavía un atractivo potencial minero, debido a la abundancia de vetas y estructuras mineralizadas que no alcanzaron a ser explotadas en su totalidad. Algunas todavía se explotan a nivel gambusino en el extremo sureste de distrito. De acuerdo a evaluaciones efectuadas por el Servicio Geológico Mexicano se cubicaron las siguientes reservas: las correspondientes a obras antiguas de las vetas San Rafael y Descubridora (parte sur) fueron del orden de 1 322 000 toneladas de macizos y retaqes, con leyes de 5 a 6 g/ton. de oro y 40 a 50 g/ton. de plata. Otras zonas que presentan buenas perspectivas, son los jales localizados en las cercanías del tiro México, con un tonelaje aproximado de 1 039 134 ton., con leyes de 2.75 g/ton. de oro y 75 g/ton. de plata.

## Referencias.

- Burke, E. 2001. Raman microspectrometry of fluid inclusion. *Lithos*, 139, 139-158.
- Gonzalez-Partida E., Torres-Rodriguez V., 1988. Evolución tectónica de la porción centro-occidental de México y su relación con los yacimientos minerales asociados. *Geof. Int.*, Vol. 27-4, 543-581.
- Megaw P.K.M., 1997, Silver deposit of Mexico. Monografía Geológico-Minera del Estado de Michoacán. 2008.
- Nasdala, L., Smith D., Kaindl R. 2004. Raman spectroscopy: Analytical perspectives in mineralogical research. In: *Spectroscopic methods in mineralogy*. (Eds. Beran A, Libowitzky E.), European Mineralogical Union, Notes in Mineralogy, vol.6.
- Ostrooumov M., Bustamante G. 1998. Estudio mineralógico de las menas del distrito de El Oro-Tlalpujahuá. VIII Encuentro Universitario de Investigación, Mem. técnico, 112.
- Salas, G.P., 1975. Carta y provincias metalogenéticas de la República Mexicana. C.R.M., Publicación 21-E, 242 p.
- Velasco H.J., 1977. Exploración de yacimientos minerales en el Estado de Michoacán, México: Consejo de Recursos Minerales, VI Seminario interno sobre exploración geológico-minero.

Provincia geológica	Proceso metalogenético	Tipo de yacimiento	Principales Menas	Principales Minerales	Edad de Emplazamiento	Yacimiento tipo	Núm. de yacimientos
Sierra Madre del Sur	Volcánico - sedimentario	Volcanico-sedimentario	Mn-Fe	Pirolusita, Braunita Magnetita	Valangiano-Aptiano (134 -113 Ma)	Dulces Nombres	5
Sierra Madre del Sur, NE de Michoacán (Tierra Caliente)		"Kuroko"	Pb-Zn-Ag (Mn-Ba-Fe)	Galena, Esfalerita Freibergita	Albiano-Cenomiano (106 - 94 Ma)	La Minita	5
Sierra Madre del Sur	Plutónico ó Magmático-Hidrotermal	Skarns	Fe (Au-Ag-Cu)	Magnetita, Hematita Calcopirita	Paleoceno-Eoceno temprano (58 -43 Ma)	Las Truchas	32
NE (Depresión de Balsas), Tierra Caliente		Hidrotermal de media temperatura	Cu (Mo-Ag-An-W)	Calcosina, Calcopirita Bornita, Cuprita Molibdenita	Eoceno temprano-Oligoceno temprano (35 - 33 Ma)	La Verde	76
Sierra Madre del Sur		Hidrotermal de media temperatura	Au-Ag-Cu-Fe	Magnetita, Hematita Calcopirita, galena	Paleoceno-Eoceno temprano (58 -43 Ma)	Cerro Bola	7
Sierra Marginal a la Depresión de Balsas; NE de Michoacán	Hidrotermal	Media temperatura	Ag-Pb-Zn	Argentita, Galena Esfalerita, Ag-Galena	Eoceno tardío-Oligoceno temprano (43 - 31) Ma	La Trinidad	10
NE, Tierra Caliente		Baja temperatura	Sb (Hg)	Estibinita Cinabrio	Mioceno temprano (24-20 Ma)	Tzitzio	6
NE, Tierra Caliente		Baja temperatura	Au-Ag (Pb-Zn)	Oro nativo, Plata nativa Argentita, Polibasita, Prusita	Mioceno temprano (24-20 Ma)	El Oro-Tlalpujahua	5
NE, Tierra Caliente		Media a Baja temperatura	Pb-Zn-Ag-Au-Cu	Esfalerita, Calcopirita Argentita, Freibergita	Mioceno tardío (12-8? Ma)	Anganguaco	11
Cinturon Volcanico Mexicano		Media a Baja temperatura	Mn (Fe)	Pirolusita, Manganita Psilomelano	Mioceno tardío-Plioceno (6-1Ma)	Indaparapeo	4

Tabla 1. Elementos metalogenéticos principales de los yacimientos minerales del Estado de Michoacán.

Tabla 2.

**PARAGÉNESIS Y SUCESIÓN MINERAL EN LAS  
MENAS DEL DISTRITO DE EL ORO-TLALPUJAHUA  
(VETAS BARRANCA, LUZ DE BORDA, BORDA).**

MINERAL \ ETAPA	CUARZO-PIRITA	GALENA-ESFALERITA	METALES PRECIOSOS	SUPERGENICA
CUARZO	—————			
PIRITA	—————	—————		
CALCOPIRITA	—————	———		
ARSENOPIRITA	———	—————		
ESFALERITA		—————		
GALENA		—————		
PIRROTITA		———		
FREIBERGITA			—————	
BOULANGERITA			———	
BORNITA			—————	
ARGENTITA			—————	
ORO NATIVO			—————	
PLATA NATIVA			—————	
NAUMANITA			—————	
AGUILARITA			—————	
FISHESSERITA			—————	
PIRARGIRITA			—————	
POLIBASITA			—————	
HEMATITA			—————	
TEXTURAS	MASIVA	BANDEADA BORDES CORRIDOS CRUSTIFORME	BORDES CORROIDOS EXSOLUCION CRUSTIFORME	HUECOS DE LIXIVIACION

————— EL ESPESOR DE LA LINEA INDICA CANTIDAD

**Difracción de rayos-X de los principales minerales hipogénicos.**

Tabla 3

<b>Muestra 20M</b>				
<b>Veta Barranca</b>	<b>Py</b>	<b>Ga</b>	<b>Esf</b>	<b>Ten</b>
<b>Líneas en Å</b>				
3.420		3.429		
3.120	3.128		3.123	
2.970		2.969		
2.955				2.950
2.695	2.705		2.705	
2.550				2.555
2.425	2.420			
2.207	2.210			
2.105		2.099		
2.001				2.004
1.915	1.916		1.912	
1.808				1.806
1.787		1.790		
1.717		1.714		
1.630	1.633		1.633	
1.539				1.540

**Observación.** Py – pirita ; Ga – galena ; Esf – esfalerita ; Ten – tennatita.

**Difracción de rayos-X de los principales minerales de enriquecimiento secundario.**

**Tabla 4**

<b>Muestra 22M Veta Barranca Líneas en Å</b>	<b>Pr</b>	<b>Pol</b>	<b>Hem</b>	<b>Pl</b>
3.590		3.593		
3.280	3.270			
3.180	3.178	3.186		
3.153		3.148		
3.120	3.116			
2.980		2.978		
2.903		2.905		
2.859		2.862		
2.775		2.770		
2.740	2.739	2.099		
2.705			2.700	
2.670	2.548	2.675		
2.505				2.500
2.517		2.521	2.519	
2.480	2.483			
2.420		2.415		
2.387		2.391		
2.205		2.200		
2.225	2.224			
2.115	2.113			
2.070	2.080			
2.005				2.000
1.920	1.922			
1.845	1.848		1.840	
1.732	1.730			
1.690			1.694	
1.630	1.636			
1.555	1.557			1.561
1.484			1.486	
1.440				1.443

**Observación.** Pr – proustita ; Pol – polibasita ; Hem – hematiita ; Pl – plata.

**ASOCIACIONES MINERALES DE LAS VETAS HIDROTEMALES DE ESCASA SULFIDACIÓN,  
(DISTRITO MINERO DE EL ORO-TLALPUJAHUA).**

<b>ASOCIACIÓN MINERAL</b>	<b>MINERALES PRINCIPALES</b>	<b>MINERALES SECUNDARIOS</b>	<b>MINERALES ACCESORIOS</b>	<b>TEXTURAS CARACTERÍSTICAS</b>
<b>CUARZO-FELDESPATOS-SULFUROS TEMPRANA</b>	<b>CUARZO ADULARIA</b>	<b>PIRITA</b>	<b>ARSENOPIRITA PIRROTITA</b>	<b>MASIVA</b>
<b>ESTADIO PRODUCTIVO SULFUROS</b>	<b>PIRITA</b>	<b>GALENA ESFALERITA</b>	<b>CALCOPIRITA BORNITA Se-ACANTITA</b>	<b>BANDEADA EXSOLUCIÓN</b>
<b>SULFOSALES</b>	<b>Se-PIRARGIRITA Se-FREIBERGITA</b>	<b>Se-POLIBASITA</b>	<b>BULANGERITA</b>	<b>CRUSTIFORME</b>
<b>METALES NATIVOS-SELENIUROS</b>	<b>ORO NATIVO PLATA NATIVA</b>	<b>NAUMANITA Ag<sub>2</sub>Se</b>	<b>AGUILARITA Ag<sub>4</sub>SeS FISHESSERITA Ag<sub>3</sub>AuSe<sub>2</sub></b>	<b>BORDES CORRIDOS HUECOS DE LIXIVIACIÓN</b>

**Tabla 5.**