

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



Caracterización mineralógica de fases minerales metálicas en
muestras de jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahuá

T E S I S

Que para obtener el grado de
Ingeniero Geólogo

Presenta

Roberto Maldonado Villanueva

Asesor: Ing. Alfredo Victoria Morales

Septiembre 2008

En memoria de Victor M. M.



Agradezco a el Dr. Pedro Corona Chávez por haberme incluido en el proyecto, por el apoyo, los consejos y las enseñanzas.

Gracias a el Ing. Alfredo Victoria Morales por la ayuda en todo y por su guía.

Un agradecimiento a mis sinodales M. en C. Ma. Guadalupe Villaseñor Cabral, M en I. José E. Santos Jallath, Ing. Juan Carlos Cruz Ocampo y Dr. Carles Canet Miquel por sus aportaciones a la tesis.

La tesis fue posible gracias al apoyo en distintos momentos de M. en C. Margarita Reyes Salas, Dr. Jasinto Robles Camacho, M. en C. Sonia Ángeles Gracia, Ing. Carlos Linares , Hugo A. García González, Edras F. Bravo Cardona, María Chapela Lara, Ing. Guadalupe Contreras Ordaz, Ing. José de Jesús Huevo Casillas, Ing. Teodoro Hernández. Gracias a todos.

Un agradecimiento especial a Petroanálisis por el apoyo en la preparación de las superficies pulidas, particularmente a la M. en C. Rosario Peralta y a el Ing. Antonio Godoy.

Gracias a CONACYT por la beca otorgada a través del proyecto FOMIX- Michoacán-2005-C01-014.

CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Conceptos generales sobre los desechos mineros.....	7
2.2. Características físico-químicas de los jales.....	9
2.3. Impacto Ambiental vs. Aprovechamiento económico de los jales.....	12
2.4. Geoquímica y mineralogía aplicada al estudio de los jales.....	14
2.5. Casos generales de estudio de residuos mineros en México.....	16
3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	18
3.1. Localización geográfica.....	19
3.2. Hidrografía.....	19
3.3. Clima y vegetación.....	19
3.4. Geomorfología.....	19
3.5. Asentamientos humanos.....	19
4. ANTECEDENTES	21
4.1. Geología del distrito minero El Oro-Tlalpujahua.....	21
4.1.1. Provincia geológica.....	21
4.1.2. Estratigrafía.....	21
4.1.3. Geología estructural.....	24
4.2. Depósitos minerales auríferos epitermales del distrito minero El Oro-Tlalpujahua.....	27
4.3. Desarrollo del distrito minero el Oro-Tlalpujahua.....	28
4.3.1. Historia del distrito.....	28

4.3.2.	Producción de desechos mineros del distrito.....	31
4.3.3.	Distribución espacial de los jales.....	33
5.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.....	34
6.	METODOLOGÍA.....	36
6.1.	Metodología precedente.....	37
6.1.1.	Cartografía.....	37
6.1.2.	Levantamiento de perfiles y muestreo.....	37
6.1.3.	Caracterización mineralógica y geoquímica general de las muestras.....	37
6.2.	Metodología empleada para la caracterización de las fases minerales metálicas.....	38
6.2.1.	Selección y muestreo de los perfiles.....	38
6.2.2.	Concentración de las fases minerales pesadas.....	39
6.2.3.	Preparación de superficies pulidas para análisis microscópico.....	39
6.2.4.	Análisis de las fases minerales metálicas por microscopía óptica.....	40
6.2.5.	Análisis de las fases minerales metálicas por microscopía electrónica.....	41
7.	RESULTADOS.....	42
7.1.	Caracterización general de los jales.....	42
7.2.	Caracterización de las fases minerales metálicas contenidas en los jales.....	46
7.2.1.	Perfil 3.....	47
7.2.2.	Perfil 4.....	51
7.2.3.	Perfil 5.....	52
7.2.4.	Perfil 7.....	54
7.2.5.	Perfil 9.....	62
7.2.6.	Perfil 10.....	63
7.2.7.	Muestras de terreros.....	65
7.2.8.	Variaciones mineralógicas espaciales en los depósitos de jales.....	65
8.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	67

8.1. Génesis de los minerales opacos contenidos en los jales.....	67
8.2. Ocurrencia de EPT's y de elementos de importancia económica.....	70
8.3. Variaciones espaciales en la concentración y en la mineralogía de los minerales opacos.....	77
Conclusiones	78
REFERENCIAS.....	80

ANEXOS

- Anexo I. Propiedades físico-químicas de las muestras de jales del DMOT.
- Anexo II. Elementos mayores por fluorescencia de rayos-X.
- Anexo III. Datos de análisis de elementos traza en muestra total por ICP-MS.
- Anexo IV. Mineragrafía

RESUMEN

Los yacimientos auro-argentíferos de El Oro y Tlalpujahua hicieron de esta región uno de los centros mineros más importantes de México. Como producto de dicha actividad se acumularon cientos de miles de toneladas de jales y terreros. En este trabajo se lleva a cabo una caracterización mineralógica de las fases minerales metálicas contenidas en muestras seleccionadas de estos residuos, empleando las técnicas de microscopía óptica y electrónica. Para ello se definieron perfiles de jal que poseen un espesor promedio de 150 cm, los cuales contienen horizontes que pueden distinguirse de acuerdo a su coloración, textura y estructura.

La granulometría de los jales es heterogénea, en promedio inferior a 1mm, y su textura varía ampliamente entre arcillosa y arenosa. Las fases minerales opacas, en particular, se caracterizan por presentar tamaños que varían entre 10-500 μm . Sin embargo, es notable el contenido de fases opacas que ocurren como inclusiones de tamaño inferior a 50 μm , en minerales transparentes como cuarzo y feldespato. El contenido de minerales metálicos es variable a lo largo de cada perfil y de un perfil a otro, presentándose concentraciones de entre el 1 y el 3%.

La mineralogía de las fases metálicas consiste en una serie de sulfuros, sulfoseleniuros, sulfosales, óxidos de Fe y Ti, oxihidróxidos de Fe y excepcionalmente metales nativos como Au y Ag. La presencia de tal diversidad de minerales opacos sugiere que el contenido de elementos metálicos ocurre principalmente en dichas fases, aunque el contenido en minerales transparentes podría ser significativo en algunos casos.

Las características texturales más comunes son el intercrecimiento entre fases minerales opacas y transparentes; la inclusion de fases opacas en transparentes y visceversa; los bordes de alteración y otros rasgos de remplazamiento por alteración y el crecimiento mineral concéntrico. Algunos de estos rasgos son evidencia de la formación de minerales secundarios a partir de reacciones químicas dentro del depósito.

1. INTRODUCCIÓN

México es un país eminentemente minero y a través de cientos de años de historia minera, en todo el territorio nacional se han acumulado millones de toneladas de desechos relacionados con esta actividad. Como resultado, se han presentado numerosos casos de deterioro ambiental y por otro lado, en más de un caso, los jales han sido aprovechados de forma exitosa generando un beneficio adicional a la conservación ambiental.

Los jales representan el residuo de extracción minera con mayor volumen sobre la superficie terrestre. En consecuencia, se han diagnosticado numerosos problemas de tipo ambiental, relacionados a su generación, acumulación y evolución durante los procesos exógenos dinámicos. No obstante, es sabido que los residuos mineros podrían representar, además de un volumen de material geoquímicamente anómalo, un recurso potencial con valor económico agregado. En los últimos años, se han sumado esfuerzos para desarrollar una metodología que permita diagnosticar, evaluar y en su caso, remediar y/o aprovechar los jales (Armienta et al., 2005; Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006).

Los jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahua (DMOT) han sido objeto de diversos estudios desde hace décadas (e. g. Aguilar, 1971). Los trabajos previos relacionados a su cartografía, mineralogía general y geoquímica forman parte de un proyecto multidisciplinario (FOMIX-Michoacán-2005-C01-014) dentro del cual se han integrado los resultados de este trabajo. Los resultados generales obtenidos marcan interrogaciones de interés específicas y puntuales en relación a las fases mineralógicas metálicas presentes en dichos residuos, ya que se ha detectado la coexistencia de elementos potencialmente tóxicos (EPT) y potencialmente económicos (EPE) en cantidades significativas. Hasta el momento se ha planteado la hipótesis general de que los valores metálicos se encuentren contenidos en minerales opacos, concretamente en óxidos y sulfuros (Robles-Camacho et al., 2007), por lo que se considera que un punto clave para su comprensión radica en la determinación de la relación de las fases metálicas y el contenido de dichos elementos.

El presente trabajo consiste en la identificación y la caracterización de las fases minerales opacas contenidas en los jales del DMOT, tarea fundamental si se considera que dichos minerales

son los portadores principales de elementos potencialmente tóxicos y potencialmente económicos en los yacimientos minerales y en los depósitos de jales. Un conocimiento detallado de las fases minerales portadoras de dichos metales es primordial para conocer el potencial de afectación ambiental y el de aprovechamiento que poseen dichos residuos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos generales sobre los desechos mineros

La minería, el procesamiento mineral y las operaciones metalúrgicas son actividades que producen cantidades importantes de desechos sólidos. Existe una gran diversidad entre los residuos mineros dependiendo de los procesos industriales que les dieron origen. En términos prácticos, se les puede clasificar como: a) desechos de minado, b) desechos metalúrgicos (escorias), c) aguas de proceso y d) desechos de beneficio (Lottermoser, 2003).

a) Los desechos de minado son todos aquellos residuos mineros que se han generado a partir de la remoción de material rocoso, ya sea en superficie o a profundidad, lo cual ha permitido tener acceso a los minerales de mena.

b) Los desechos metalúrgicos, son aquellos que provienen de los procesos de lixiviación, fundición o demás métodos metalúrgicos. Se considera que dichos residuos ya no pueden ser tratados para obtener algún beneficio de ellos.

c) El agua de proceso es un concepto que se utiliza para nombrar a toda aquella agua que interviene en algún momento en el proceso de beneficio mineral, mientras que el agua de mina es aquella que se extrae de las bras mineras. Muchas operaciones de beneficio utilizan agua para procesar el material molido, la composición química de dicha agua es función del método aplicado, pero en general puede contener concentraciones residuales de elementos relacionados a los reactivos usados.

d) Los desechos de beneficio se generan a partir del procesamiento mineral de yacimientos metálicos que se encuentran encajonados en rocas bien consolidadas, lo cual implica la fragmentación del material y la separación de minerales individuales (metalurgia extractiva).

En la primera etapa del procesamiento mineral, bloques de roca mineralizada de gran tamaño, son reducidos a partículas cuya dimensión es de apenas algunos milímetros o micrómetros, esto se consigue triturando y moliendo la roca. La trituración es un proceso llevado a cabo en seco mientras que la molienda implica la abrasión de partículas suspendidas

generalmente en agua. La finalidad de la reducción del tamaño es alcanzar la liberación de los minerales económicos a partir de las fases de ganga. El grado óptimo de molienda, por lo tanto, está en función del tamaño de liberación de los minerales de mena.

La extracción del mineral económico es la segunda etapa del proceso, para este efecto existen diferentes métodos cuyo principio se basa en las propiedades gravimétricas, magnéticas, eléctricas, etc., de las fases de mena y ganga. Consecuentemente, los productos finales del tratamiento mineral son, por un lado el concentrado del mineral económico y por otro una cantidad de desechos residuales conocidos como "jales" (Figura 1).

Un jal (*xali*≈*arena*) puede definirse como todo aquel desecho minero que resulta del procesamiento (trituración, molienda y separación) al que se somete un determinado material rocoso para remover y recuperar metales o minerales económicos. En la minería de los yacimientos metálicos, los minerales de mena extraídos representan solo una pequeña fracción del volumen de roca que constituye el yacimiento, por lo que la gran mayoría del material minado termina como jal y representa el desecho minero más voluminoso que se genera. En las minas de oro modernas, por ejemplo, hasta el 99.99% del volumen del yacimiento explotado puede convertirse finalmente en jal (Lottermoser, 2003).

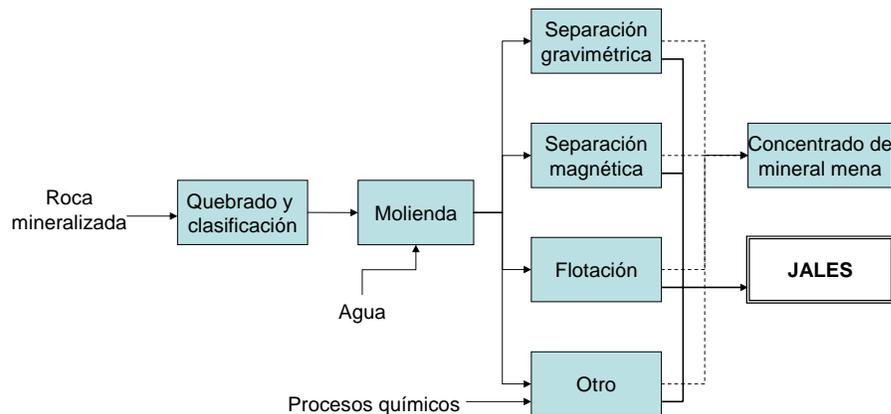


Fig. 1 Diagrama de flujo simplificado de las operaciones de tratamiento mineral que llevan a la generación de jales (tomado y modificado de Lottermoser, B. G. y referencias citadas, 2003)

La disposición final de los jales se lleva a cabo comúnmente en presas construidas especialmente para dicho fin, las cuales son similares en su constitución a las presas hidráulicas.

En la actualidad existen diversas técnicas para su construcción, pero en general son obras que se construyen conforme se genera el residuo y se modifican según los requerimientos de cada sitio.

Recientemente y en consideración a las normativas de impacto ambiental, se han implementado otras formas de almacenamiento que consisten en la colocación del jal por debajo de la superficie del suelo o incluso en las profundidades del mar. La práctica de relleno dentro de la mina (*Backfilling*), es un método que se ha utilizado ampliamente y resulta una buena alternativa para la disposición de dichos desechos. También se pueden llevar a cabo tratamientos del residuo, con la finalidad de que su almacenamiento sea más fácil o represente menor riesgo ambiental, como es el caso de los jales espesados y los jales en pasta.

Aunque en muchos países la tendencia actual para el depósito de los jales es procurar su aislamiento con el fin de evitar posibles daños al ambiente, la práctica más común en zonas mineras históricas, fue la descarga directa de los residuos sobre el lecho de los ríos cercanos, sin tener control alguno sobre su depósito y dispersión. Resulta evidente que mucha de la contaminación ambiental que pudiera ser generada a partir de los jales, se debe en gran medida a la disposición descontrolada de los desechos en esas épocas.

2.2. Características físico-químicas de los jales

Las características físicas y químicas de los jales varían considerablemente dependiendo de la mineralogía del yacimiento y de los procesos físico-químicos llevados a cabo para extraer el producto económico. Entre las principales variaciones se pueden mencionar las siguientes: composición mineralógica y geoquímica, peso específico de las partículas, granulometría, permeabilidad, densidad, plasticidad, consolidación, composición química del agua de poro, etc., (Lottermoser, 2003).

Por otro lado, los depósitos de jales antiguos pueden ver modificadas sus propiedades con el paso del tiempo, dependiendo del modo en que fueron colocados y de las características físicas de la superficie donde se encuentran, como son la topografía, el clima, la vegetación, etc. Así mismo, en relación al periodo de tiempo que han sido expuestos a tales condiciones, se verifican otros procesos exógenos “naturales” como la erosión, el intemperismo, la lixiviación y la remoción en masa del desecho, lo cual puede tener importantes implicaciones ambientales.

Granulometría y estructura de un jal

Los jales son producidos como suspensiones de partículas de grano fino, su tamaño es relativamente restringido y varía desde las arcillas a las arenas (1 μm a 2 mm). Comúnmente entre el 70 y el 80 % de un jal presenta partículas del tamaño de arena y el resto del tamaño de arcilla (Figura 2). Como se mencionó antes, la dimensión de las partículas de un jal, depende del tamaño de liberación de los minerales de ganga y de mena, así como del proceso de trituración-molienda. Los jales generados pueden ser transportados y depositados en un entorno acuoso, por lo cual algunas estructuras sedimentarias como la estratificación, la estratificación cruzada y la gradación son comunes (Jambor, 1994). Después de su acumulación, la redepositación de las partículas finas puede ocurrir sobre áreas extensas, particularmente si la superficie del terreno presenta cambios de pendiente, ya que los depósitos de jales son volúmenes de material no consolidado, cuyas partículas pueden moverse fácilmente tanto por la acción del viento como por la influencia del agua de lluvia (Ramos-Arroyo y referencias citadas, 2006). Los depósitos de jales que no presentan obras para desviar el agua de escurrimiento de la cuenca de captación tienen altos riesgos de erosión hídrica. En épocas de lluvia intensa, los poros pueden tener un nivel de saturación cercano al 100% y los jales pueden llegar a fluir por efecto de su peso, resultando en pérdida de estabilidad y deslizamiento (Ramos-Arroyo y referencias citadas, 2006).

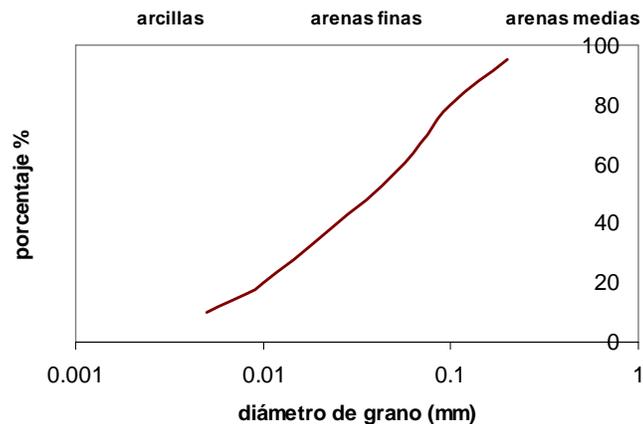


Fig. 2 Curva que muestra la distribución del tamaño de grano en los jales (modificada de Robertson, 1994; Younger et al., 2002)

Composición mineralógica de un jal

La mayor parte de los fragmentos sólidos que contiene un jal proviene de los minerales de ganga, sin embargo pueden presentarse pequeñas cantidades de minerales de mena. Esto se debe a que la recuperación de las fases económicas nunca es del 100%, en casos de tratamiento

mineral inadecuado, los depósitos de jales pueden contener altas concentraciones de dichos minerales.

Como se ha dicho anteriormente, los residuos pueden modificar sus características con el paso del tiempo al entrar en contacto con los agentes atmosféricos. El acomodo de los jales en un lugar donde las condiciones físico-químicas del entorno son diferentes a aquellas que predominaron en su ambiente natural, propicia que se lleven a cabo reacciones químicas internas en las que están involucrados los minerales de mena y ganga, las sustancias químicas utilizadas en los procesos de beneficio que pudieron quedar rezagadas en el desecho pueden contribuir en la modificación del pH del material. Jambor (1994) propone una clasificación para las fases minerales presentes en un jal, distinguiendo cuatro tipos: *primarios*, *secundarios*, *terciarios* y *cuaternarios*.

Minerales primarios: Son aquellos minerales que no fueron modificados física o químicamente más allá de la reducción de tamaño que implica el proceso de trituración-molienda. Dichos minerales pueden ser las fases de ganga (cuarzo, calcita, pirita, etc.) o de mena (galena, esfalerita, etc.).

Minerales secundarios: Son los que han cristalizado a partir de reacciones químicas ocurridas dentro del jal, principalmente por medio de reacciones oxido-reducción. Por ejemplo, los oxihidróxidos de Fe como la goethita $\text{FeO}(\text{OH})$ y algunos sulfatos como la jarosita $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$.

Minerales terciarios: Son aquellos formados por un proceso de precipitación a partir de soluciones acuosas contenidas en los poros del jal y que pueden permanecer relativamente *insitu* bajo forma de cementante de las partículas cuando el agua de poro se evapora o se infiltra, ejemplo, yeso microcristalino u otros sulfatos principalmente de Fe y Mg; o bien estas fases pueden ser removida por procesos de escurrimiento extraordinarios.

Minerales cuaternarios: Son aquellos que se forman por oxidación superficial posteriormente a la formación de los minerales anteriores, el criterio para distinguirlos de los terciarios es el momento de su cristalización. Los minerales cuaternarios son típicos de los jales provenientes de yacimientos de sulfuros masivos. Son ejemplos la rozenita $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y el siderotilo $\text{FeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

En resumen, la granulometría y la mineralogía de los depósitos de jales suele ser compleja y multifásica en relación directa al el tipo de yacimiento explotado, la proporción de sulfuros (en el caso de yacimientos polimetálicos), los métodos de beneficio utilizados, así como de las condiciones fisiográficas y climáticas del área donde se encuentran acumulados, todo lo cual influye en los procesos geoquímicos internos.

Las reacciones geoquímicas que pueden llevarse a cabo en el jal, además de generar nuevos minerales pueden motivar la liberación de elementos químicos al ambiente, la liberación de dichos elementos y su dispersión en el ambiente depende de especiación geoquímica de estos. Los residuos mineros representan una de las fuentes más importantes de metales pesados al ambiente, los jales generados a partir de la explotación de yacimientos polimetálicos, pueden contener altos niveles de Pb, Cd, Zn, As, Cu, Fe y otros metales. Puesto que los jales constituyen los residuos mineros más voluminosos, es probable que sean la fuente más importante de contaminación ambiental por metales tóxicos (Talavera et al. y referencias citadas, 2005).

2.3. Impacto Ambiental vs. Aprovechamiento económico de los jales

El procesamiento mineral y la disposición final de los jales, particularmente, han provocado serios problemas de contaminación ya que constituyen una de las fuentes de aporte más importantes de metales pesados al ambiente. La contaminación química ambiental a partir de los residuos ocurre principalmente por la movilización de los metales, provocada por el intemperismo de los materiales sólidos, bajo condiciones exógenas (Fanfani, 1996). Dicho impacto ambiental puede afectar severamente los ecosistemas.

La presencia de un depósito de jales en el ambiente implica en sentido estricto un deterioro de este. Además de constituir un rasgo geomorfológico extraño, el terreno donde el almacenamiento ocurre pierde sus cualidades naturales ya que el suelo y la vegetación quedan enterrados. Aún más, el área que estuvo ocupada por suelo, estará cubierta por un material poco consolidado y sin cubierta vegetal, el cual será propenso a erosionarse y dispersarse en el ambiente. Uno de los puntos más importantes, es que la composición química de los jales, provoca que su presencia represente una anomalía geoquímica antropogénica.

Las principales implicaciones ambientales causadas por la presencia de jales en el ambiente son:

- Destrucción de suelo y cobertura vegetal
- Acumulación de materiales poco consolidados, susceptibles a movimientos repentinos, a erosión y a intemperismo.
- Oxidación de minerales insolubles y formación de sustancias ácidas solubles con alto contenido de metales.
- Acumulación de material con niveles altos de elementos potencialmente tóxicos (EPT) (Volke, 2003).

Por otro lado, la presencia de un gran volumen de estos residuos y el hecho de que consistan en material pétreo molido, sugiere también la posibilidad de que puedan utilizarse como fuente alternativa de materia prima. La reutilización de los jales puede llevarse a cabo en distintas áreas de la Industria y su aplicación depende de las características de cada residuo. Aunque los residuos mineros no son considerados valiosos mientras se lleva a cabo la explotación de un yacimiento, algunos de ellos pueden ser útiles si están enriquecidos en algún producto económico. Desventajas económicas, procesamiento ineficiente, limitaciones tecnológicas o factores mineralógicos pueden provocar que la extracción de los metales no sea completa en el tiempo de la producción (Lottermoser, 2003). Las técnicas de procesamiento mineral ineficientes y las pobres recuperaciones en el pasado, produjeron desechos con concentraciones de metales relativamente altas. En algunos casos los jales y terreros antiguos, que fueron considerados sin valor años atrás, son ahora aprovechados haciendo uso de operaciones mineras modernas (Lottermoser, 2003). Este concepto de operación es ampliamente usado en la industria minera y existen numerosos casos de empresas que recurrieron al beneficio de los jales para mantener la producción y evitar su quiebra.

Hoy en día, los adelantos tecnológicos y los avances en la investigación del uso de materiales alternativos, ofrecen un nuevo panorama para considerar los desechos mineros como un material capaz de transformarse en un producto útil. La viabilidad de reutilizar un residuo con determinadas cualidades, hace pensar en los jales, no solo como una fuente virtual de contaminación, sino como una fuente bastante voluminosa de material de uso industrial. Si cada depósito de jales o de cualquier residuo minero es estudiado para conocer su potencial de uso y finalmente es utilizado como materia prima, entonces su aprovechamiento no será la única

ventaja, también los problemas ambientales que implica su presencia serán resueltos. La utilización total del recurso, donde todo el material extraído encuentra un buen uso, es un concepto estimulante para los investigadores y para los mineros (Lottermoser, 2003).

2.4. Geoquímica y mineralogía aplicada al estudio de los jales

Recientemente, se han llevado a cabo numerosos trabajos orientados a determinar las características de los jales, con el fin de conocer sus posibles implicaciones ambientales. Unas de las principales preocupaciones en dichos estudios son, por un lado, determinar si los residuos presentan concentraciones altas de elementos potencialmente tóxicos; y por otro, conocer si los desechos pueden generar o generan drenaje ácido.

En otros casos, los estudios han sido orientados a determinar el contenido metálico de los residuos, con la finalidad de conocer la factibilidad para reciclarlos y recuperar los valores, o para utilizar dicho material en algún otro campo de la industria.

En ambas circunstancias, el conocimiento de la composición química y mineralógica del desecho es fundamental, por lo cual, los análisis mineralógicos y geoquímicos constituyen la base metodológica de cualquier estudio sobre desechos mineros y en particular sobre jales.

Cuando se llevan a cabo estudios ambientales es indispensable integrar datos resultantes de análisis mineralógicos, geoquímicos e hidrogeoquímicos. Un análisis mineralógico ambiental tiene como objetivo, no solo determinar las fases minerales contenidas en el jal, sino distinguir y caracterizar los minerales primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios, definiendo así los productos de las reacciones químicas internas del depósito que permiten la liberación de elementos potencialmente tóxicos al ambiente. Por su parte, el análisis geoquímico tiene por objetivo determinar la composición química del jal, cuantificando el contenido de elementos mayores y traza, su especiación y ocurrencia; además busca conocer los procesos geoquímicos ocurridos en el depósito, los cuales controlan los niveles de pH e influyen en la movilización de elementos potencialmente tóxicos en el ambiente. Los estudios mineralógicos y geoquímicos ambientales pueden caer dentro de cualquiera de las siguientes facetas: predicción, prevención, control y remediación (Jambor y Blowes, 1998).

Los estudios que pretenden evaluar la posibilidad de reutilizar los jales, pueden involucrar una gran cantidad de análisis y pruebas que permitan determinar si dicho residuo es apto para un determinado fin. En el caso particular de un virtual beneficio de los metales rezagados en el jal, el análisis mineralógico tiene como finalidad, determinar las fases portadoras de los valores, su nivel de alteración, tamaño, etc., dicha información es de suma importancia en la fase de pruebas metalúrgicas. Es importante señalar que un conocimiento detallado de las variaciones en la composición de las fases de mena puede ser determinante para que el procesamiento experimental de beneficio tenga o no éxito.

Jambor (1994) expone ampliamente una metodología para el estudio mineralógico de los depósitos de jales, desde su muestreo y preparación hasta la aplicación de técnicas mineralógicas determinativas. Las etapas de dicho estudio pueden resumirse de la siguiente forma:

- 1) Muestreo: Es la primera etapa, del estudio, su objetivo es adquirir muestras representativas del área en cuestión y mantenerlas inalteradas hasta la etapa de los análisis geoquímicos y mineralógicos. La obtención de muestras representativas es difícil debido a la extensión de los jales y a su heterogeneidad, ya que el material puede estar muy compacto (Armienta et al., 2005).
- 2) Preparación de las muestras: El procedimiento estándar consiste en obtener una sección delgada pulida para análisis microscópicos posteriores.
- 3) Análisis: Generalmente se obtiene un difractograma de rayos-X para cada muestra colectada. La microscopía de luz transmitida es usada para obtener una descripción petrográfica mientras que la de luz reflejada ayuda a definir la mineralogía de las fases opacas (sulfuros, óxidos, etc.). El objetivo de estos análisis es correlacionar los minerales identificados y los que permanecen ambiguos al analizarlos con microscopía óptica y con difracción.
- 4) Análisis a detalle: El microscopio electrónico de barrido (SEM) y la microsonda electrónica (EPMA) son utilizados comúnmente para complementar la información obtenida con los métodos anteriores. Su aplicación es esencial para obtener datos de la composición química mineral en solución sólida, para obtener información de características a micro escala como la composición de los bordes

de alteración y para la identificación de partículas que fueron clasificadas con ambigüedad (Jambor y Blowes, 1998)

2.5. Casos generales de estudio de residuos mineros en México

Las actividades mineras en México se han llevado a cabo de forma intensiva desde el siglo XVI, por lo cual una cantidad inestimada de residuos asociados a la extracción y procesamiento de los metales ha sido acumulada durante siglos, y se encuentra dispersa en todo el territorio.

Los yacimientos minerales que se han explotado y se explotan en México son de varios tipos, los principales históricamente han sido los de tipo hidrotermal, sin embargo también son de importancia los yacimientos tipo skarn, pórfido de cobre y de sulfuros masivos vulcanosedimentarios. Así mismo, el método de beneficio usado, ha sido diferente en cada época y en cada lugar. Los principales métodos de beneficio usados históricamente en México han sido: fundición, amalgamación, cianuración, flotación y lixiviación.

Los diversos tipos de yacimientos minerales que se han explotado en nuestro país así como los diferentes métodos de beneficio utilizados, por una lado, y la variedad de climas y condiciones fisiográficas del territorio, por otro; han determinado que los desechos mineros presentes en el territorio nacional sean igualmente heterogéneos.

En años recientes se han realizado estudios de jales en muchos distritos mineros de México, los cuales han contribuido a generar una estrategia metodológica general para la evaluación de la peligrosidad de jales mineros e identificar el potencial de riesgo ambiental (Armienta et al., 2005; Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006).

En muchos casos se ha determinado el nivel de afectación ambiental y en algunos, se han tomado medidas para la remediación. En otros, se ha concluido que los jales no representan peligro ambiental. Sin embargo, aún existen cientos de millones de toneladas de jales dispersos, de los cuales no se conocen sus condiciones y sus potenciales afectaciones al ambiente (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006).

Los trabajos realizados con el fin de aprovechar los jales, son mucho más antiguos, existe registro desde principios del siglo XX, de estudios realizados en varios distritos mineros históricos de México con el fin de reprocesar el jal, como son los casos de los distritos de Pachuca-Real del Monte, El Oro-Tlalpujahuá, Fresnillo, Guanajuato, etc.

Entre 1905 y 1930 en el Distrito de Guanajuato se beneficiaron los terreros y jales para sostener la producción (Ramos-Arroyo et al., 2004), sin embargo la condición de los desechos no permitió un aprovechamiento óptimo. Un trabajo de reutilización de los jales a nivel industrial, que tuvo buenos resultados, fue el realizado en la década de los 70' del siglo pasado, en el Distrito Minero Pachuca-Real del Monte. Los jales que aún quedan en dicho distrito, pueden ser utilizados para la fabricación de cerámica y como material de construcción (Hernández et. al., 2006).

En el Distrito de El Oro-Tlalpujahuá se llevaron a cabo cálculos de reservas y pruebas metalúrgicas desde 1925, intensificándose en las décadas de los 50' y 80', sin pasar nunca de la etapa de planta piloto. En la década de los 80' la Minera Real de Ángeles en "La Peñuelita" realizó estudios sobre los jales y llevó su proceso a un nivel semi-industrial. Otro caso en el cual el proceso de beneficio fue llevado hasta nivel industrial, es el del distrito de Fresnillo, en la década de los 90', donde incluso se beneficiaron los jales durante tres años.

El aprovechamiento de los jales para usos industriales diferentes al reprocesamiento metalúrgico, como es el uso en la construcción y la fabricación de materiales cerámicos, tiene varias limitantes y no ha sido llevado a cabo ampliamente.

3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Localización geográfica

El Distrito minero El Oro-Tlalpujahua comprende un área de aproximadamente 230 km², la cual está localizada en los límites de los estados de México y Michoacán, entre las coordenadas geográficas 19°52'00"- 19°45'00" de latitud norte y 100°05'00"- 100°20'00" de longitud oeste (figura 3). Los municipios de El Oro de Hidalgo y Tlalpujahua de Rayón distan apenas 7 km. uno del otro y se puede tener acceso a estos a través de la carretera federal que va de Atlacomulco a Maravatío o por medio de la autopista México-Guadalajara.

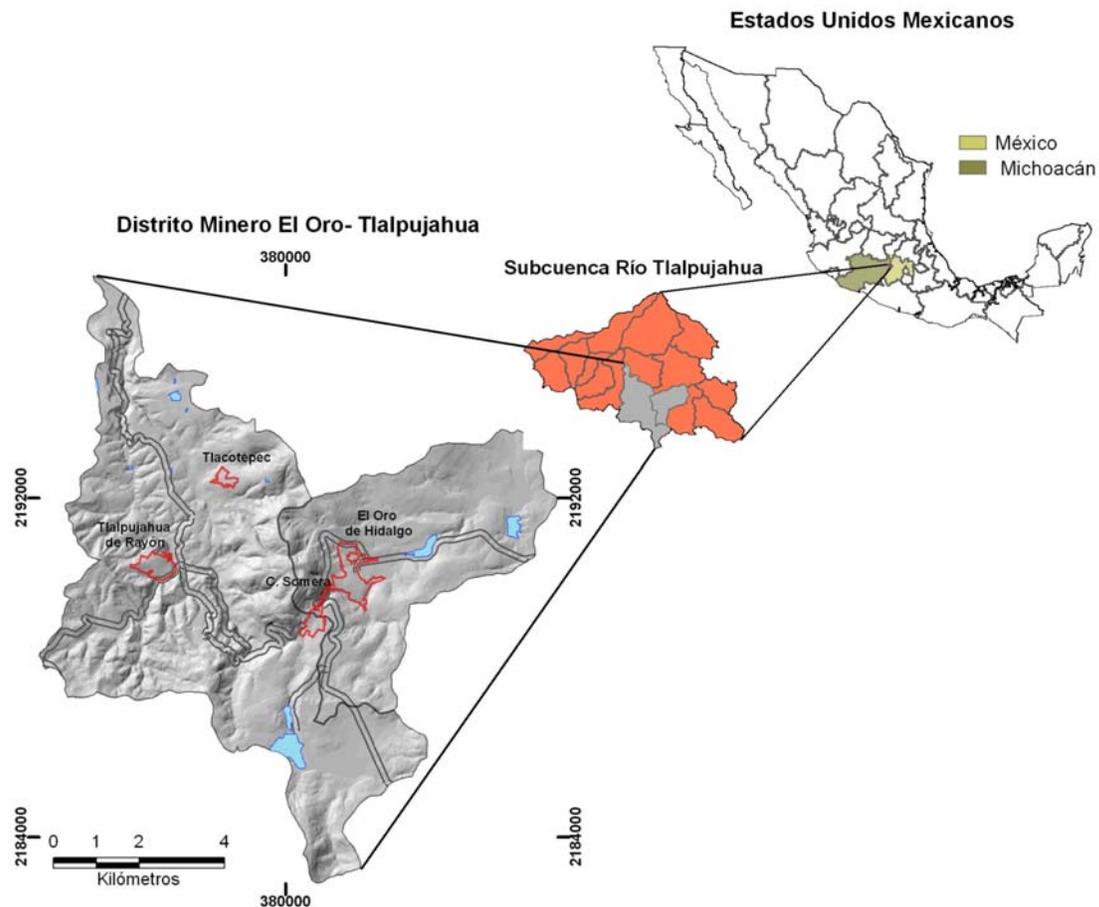


Fig.3 Localización del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua. Proyección UTM 14Q WGS84, elaboró Mónica Martínez Medina.

3.2. Hidrografía

La zona de estudio se encuentra contenida en la región hidrológica número 12 Lerma-Santiago, en la Cuenca Río Lerma Santiago, subcuenca Río Tlalpujahua (Martínez-Medina et al., 2006).

Los ríos principales son: Tlalpujahua, San Miguel y Tultenango; los cuales son permanentes, el resto de los arroyos se activan únicamente durante la época de lluvias.

3.3. Clima y vegetación

El clima de la región es templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio anual es de 14 °C en las tierras altas (>2500 msnm) y de 16 °C en las zonas bajas (2000-2500 msnm). La precipitación pluvial varía de 800 a 1000 mm por año.

En cuanto a vegetación, en la región predominan el bosque de coníferas y el bosque mixto, destaca la presencia de pino, oyamel, encino y cedro, además de fresno, eucalipto, sauce, etc.

3.4. Geomorfología

El origen de las unidades geomofológicas de la región, en general, está relacionado íntimamente con la evolución geológica de la misma, particularmente con el vulcanismo y la actividad tectónica del cuaternario. En la tabla 1 se presentan las principales características geomorfológicas de la región.

3.5. Asentamientos humanos

La zona de estudio forma parte de dos municipios: El Oro, Estado de México y Tlalpujahua, Michoacán. El municipio de El Oro, cuya cabecera es la ciudad del mismo nombre, está integrado por 42 localidades y agrupa una población cercana a los 32,000 habitantes. El municipio de Tlalpujahua, por su parte, cuenta con una población de aproximadamente 18,400 habitantes y sus principales poblaciones son Tlalpujahua de Rayón cuyo nombre da lugar al

municipio, San Francisco de Los Reyes, Tlacotepec, Tlalpujahuilla, San Pedro Tarímbaro, Los Remedios y Santa María de los Ángeles.

Tabla 1. Características de las principales geoformas de la región de El Oro-Tlalpujahuilla (Bocco, 1989).

Pendiente (grados)	Rango de pendiente	Amplitud de relieve (m)	Rango de relieve	Unidad morfogénica
0-2	Plana o casi plana	0-20	Plano o casi plano	Planicies y flujos piroclásticos y lávicos
2-4	Suave	20-50	Ondulado	Superficies cumbrales de derrames lávicos y depósitos piroclásticos
4-8	Moderada	30-100	Ondulado a lomerío	Superficies cumbrales de flujos de lava, laderas denudatorias y piedemontes
8-16	Moderadamente fuerte	70-150	Lomerío a colina	Conos monogenéticos y laderas de flujos volcánicos
6-35	Fuerte	Mayor a 150	Colina a montaña	Estratovolcanes, escarpes de fallas, laderas denudatorias, y laderas de flujos piroclásticos y lávicos

4. ANTECEDENTES

4.1. Geología del distrito minero El Oro-Tlalpujahua

4.1.1. Provincia geológica

El Distrito Minero el Oro-Tlalpujahua (DMOT) se sitúa geográficamente en el límite de los estados de México y Michoacán. En esta región los dos estados comparten características geológicas que indican una misma evolución en el tiempo geológico, Michoacán en su parte nororiental y México en su región occidental.

Dicha zona se localiza en lo que se ha denominado Terreno Tectonoestratigráfico Guerrero (Campa et al., 1980, Campa y Coney, 1983), el cual se desarrolló durante el Jurásico tardío y el Cretácico temprano, cual constituye el basamento de la región y tectónicamente ha sido interpretado bajo el contexto de la evolución de uno o varios arcos de islas intra-oceánicas. Recientemente la zona de estudio se ha atribuido al subterreno Teloloapan (Mendoza y Suástegui, 2000)

Cubriendo de manera discordante a las secuencias mesozoicas del Terreno Guerrero, se encuentran las rocas cenozoicas, las cuales constituyen el segundo grupo litológico de la zona. Dicho conjunto de rocas pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) cuya actividad se remonta al mioceno medio (Gómez-Tuena et al., 2005) y se extiende hasta nuestros días. Pueden definirse algunos episodios principales que definen de manera muy simplificada la evolución geológica la FVT, algunos de ellos están bien representados en la región, como es el caso del vulcanismo ignimbrítico y andesítico del Mioceno medio y y el sucesivo emplazamiento Plioceno-Cuaternario de un vulcanismo bimodal de máfico a intermedio.

4.1.2. Estratigrafía

La estratigrafía de la zona de estudio evidencia una evolución geológica compleja, que involucra rocas formadas en ambientes tectónicos muy diferentes. Se pueden distinguir dos grupos principales de rocas:

- Rocas metavolcánicas y metasedimentarias, desarrolladas a partir de la evolución de un arco volcánico insular.
- Rocas volcánicas y sedimentarias desarrolladas en ambientes continentales.

Rocas mesozoicas

Las rocas más antiguas de la zona conforman el paquete metamórfico que ha sido definido como parte del subterreno Teloloapan, el cual está constituido típicamente por dos conjuntos litológicos: rocas metavolcanoclásticas pertenecientes a un arco de edad Jurásico superior–Cretácico inferior (De la Teja, 1999).

El primer grupo es una secuencia volcánica que presenta lavas en almohadillas, tobas y aglomerados de composición andesítica, de los que se han registrado espesores de hasta 300 metros en la región de Tlalpujahuá (De la Teja, 1999). Con base en correlaciones regionales, esta secuencia ha sido identificada como la formación Villa de Ayala de edad Hauterviano-Aptiano (Guerrero-Suástegui et al., 1991). En algunas zonas, presenta un contacto transicional con rocas del Aptiano y en otros casos subyace discordantemente a unidades cenozoicas.

Cubriendo a la secuencia anterior se encuentra una unidad básicamente sedimentaria con cierta influencia volcánica denominada Formación Acapetlahuaya (Guerrero-Suástegui et al., 1991), de edad Aptiano superior (De la Teja y referencias citadas, 1999), la cual a su vez da paso a la formación Amatepec, definida como una alternancia de calizas con lutitas (De la Teja y referencias citadas, 1999). Las metacalizas de estas formaciones presentan estratificación de 5 a 30 cm de espesor. Con base en la presencia de microfósiles se ha propuesto que la unidad calcárea pertenece al Albiano. De acuerdo a su litología y microfauna se piensa que fue depositada en la cuenca asociada al arco de islas.

Cortando a las secuencias meta volcano-sedimentarias se encuentra un cuerpo ígneo que constituye la intrusión más antigua de la región, el cual sufrió metamorfismo contemporáneo al de la secuencia cortada y se emplazó antes del Cenozoico, ya que se encuentra cubierto de manera discordante por unidades del Plioceno al Reciente. La roca presenta coloración en diferentes tonos de verde, así mismo grises. Presenta una textura fanerítica a porfirítica con fenocristales de hornblenda y plagioclasa (oligoclasa-andesina), así mismo minerales como

tremolita-actinolita, augita, mineral opacos y en algunos casos segregaciones de cuarzo secundario. Ha sido clasificada como una metadiorita y aflora en un área de aproximadamente ocho kilómetros cuadrados.

Rocas cenozoicas

Posterior a los eventos anteriores y marcando un cambio radical del marco tectónico, ocurre el depósito de un conglomerado que sobryace de forma discordante a las secuencias antes descritas. Dicha secuencia consiste en rocas con fragmentos subangulosos principalmente de rocas metavolcánicas, metasedimentarias y calizas, así mismo pueden encontrarse fragmentos de cuarzo y calcita, todos contenidos en una matriz de arcilla. Cabe señalar que dicho conglomerado carece de fragmentos de rocas volcánicas, lo cual sugiere que su depósito fue anterior a la intensa actividad volcánica cenozoica registrada en la zona. En algunos lugares llega a presentar un espesor de 65 m. No se cuenta con una edad precisa para este conglomerado pero de acuerdo a sus relaciones espaciales se piensa que fue depositado durante el Paleógeno, suele relacionársele con la Formación Balsas.

La región presenta un registro volcánico complejo desde el mioceno hasta el cuaternario, cuyo desarrollo está relacionado con la evolución de la Faja Volcánica Transmexicana. La actividad volcánica del Mioceno se encuentra representada por un paquete de rocas de composición andesítica, formado por lavas con niveles de tobas (De la Teja, 1999). El Plioceno, por su parte, está representado por rocas de composición variada (riolítica-basáltica). Para el Plioceno temprano existe una sucesión volcánico-piroclástica que consiste en depósitos de ignimbritas, denominados Formación Las Américas, los cuales parecen ser el registro de la evolución de una caldera de grandes dimensiones denominada caldera “El Capulín”. El final del Plioceno está representado por una serie de derrames lávicos basálticos, cuyo origen se liga al desarrollo del vulcanismo fisural monogenético controlado por el fallamiento E-O del sistema Morelia-Acambay. En algunos lugares, las manifestaciones ígneas mencionadas anteriormente se encuentran intercaladas con depósitos fluvio-lacustres constituidos por material arcillo-arenoso, con presencia de diatomitas.

El Cuaternario está dominado por la presencia de depósitos lacustres con importante influencia volcánica, los cuales cubren prácticamente a todas las unidades presentes en la región.

En algunas zonas, sin embargo, dichos depósitos se encuentran cubiertos por derrames basálticos, los cuales representan la última manifestación volcánica de la región.

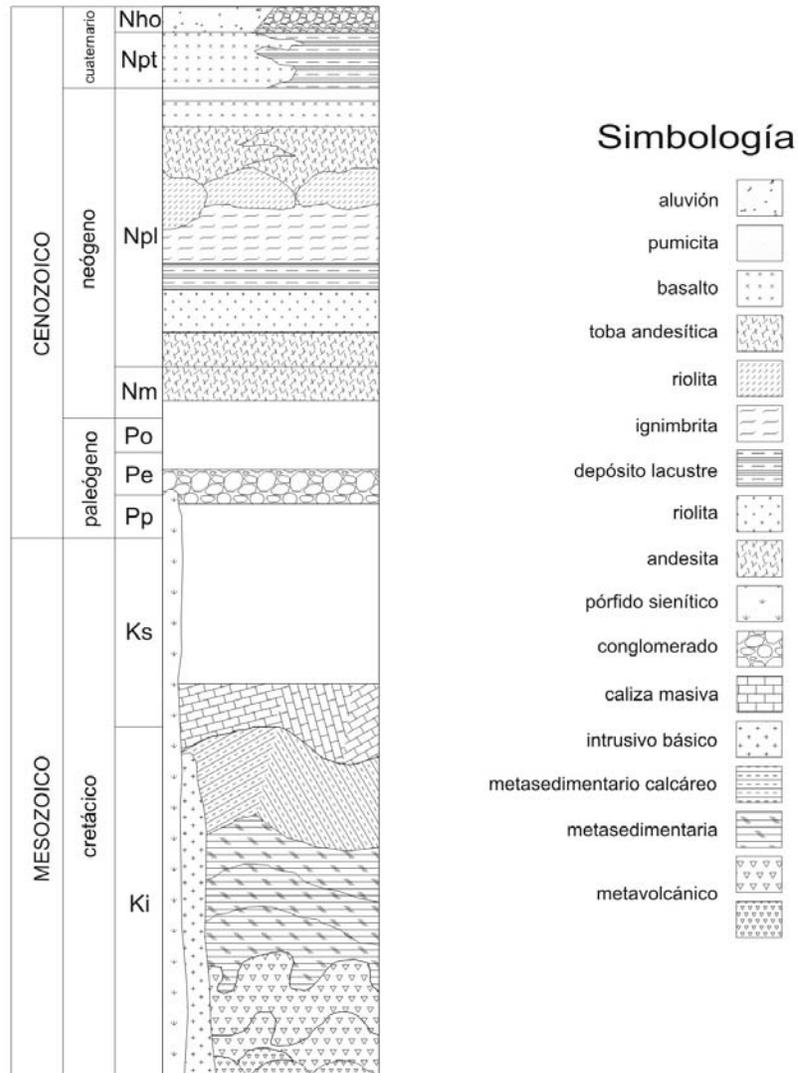


Fig.4 Columna estratigráfica de la región del DMOT (Modificada de De la Teja, 1999)

4.1.3. Geología estructural

La evolución tectónica del sur de México desde el Cretácico tardío se caracteriza por un evento orogénico de acortamiento con vergencia predominante al oriente. Posteriormente, a

partir del eoceno, se desarrolló un régimen tectónico caracterizado por fallas laterales cuyas direcciones preferenciales variaron en tiempo y espacio (Morán-Zenteno et al., 2005).

El subterreno Teloloapan registra dos etapas principales de deformación de tipo dúctil-frágil muy intensas, de carácter compresivo y transpresivo ambas entre el Cretácico tardío y el Cenozoico temprano (De la Teja y referencias citadas, 1999; Salinas, 2000), las cuales se caracterizan por presentar estructuras y microestructuras de plegamiento y cizalla, así mismo, generan esquistosidad de plano axial, cuya orientación preferencial tiene un rumbo que va de 10° a 25° al NO e inclinaciones al SO. A la primera etapa de deformación se le asocia la formación de pliegues isoclinales y fallas inversas con orientación NE o N-S (De la Teja, 1999), mientras que en el segundo evento de deformación se generan pliegues abiertos con planos axiales orientados NO-SE. Salinas J.C., et al. (2000) asigna al primer evento de deformación una edad de Paleoceno, siendo la manifestación de la acreción del arco insular de Teloloapan a la margen continental americana. El segundo evento está relacionado al proceso de relajamiento posterior a la acreción. Las estructuras formadas bajo el régimen frágil provocadas por los procesos anteriores (fallas y cabalgaduras) están asociadas a su vez con la intrusión de diversos cuerpos ígneos con espesores de hasta 20 metros (De la Teja, 1999).

La deformación en la región de El Oro-Tlalpujahuá consiste principalmente en pliegues y fallas, existiendo tres sistemas principales de fallamiento local. El primer sistema tiene un rumbo general análogo al de los pliegues, cuyo promedio es de N30°W con echados de 70° al NE-SW o en ocasiones verticales, se encuentra afectando únicamente a las rocas metamórficas y está cubierto por las secuencias volcánicas cenozoicas por lo que dicho sistema debió formarse durante el Paleoceno-Eoceno. Este sistema está asociado al conjunto de vetas mineralizadas que ha dado fama mundial al distrito por sus altas leyes de oro y plata. El segundo sistema de fallas posee un rumbo promedio de N45°E así como una componente de movimiento lateral importante que ha dislocado bloques, moviendo a las vetas mineralizadas del primer sistema. Tomando en cuenta lo anterior y basándose en que dichas fallas afectan a las rocas volcánicas recientes puede afirmarse que su edad es posterior al Mioceno. De igual forma este conjunto de fallas lleva asociado un grupo de vetas que en este caso carecen de mineralización. Puede mencionarse un tercer sistema de fallas cuyo rumbo general es E-W.

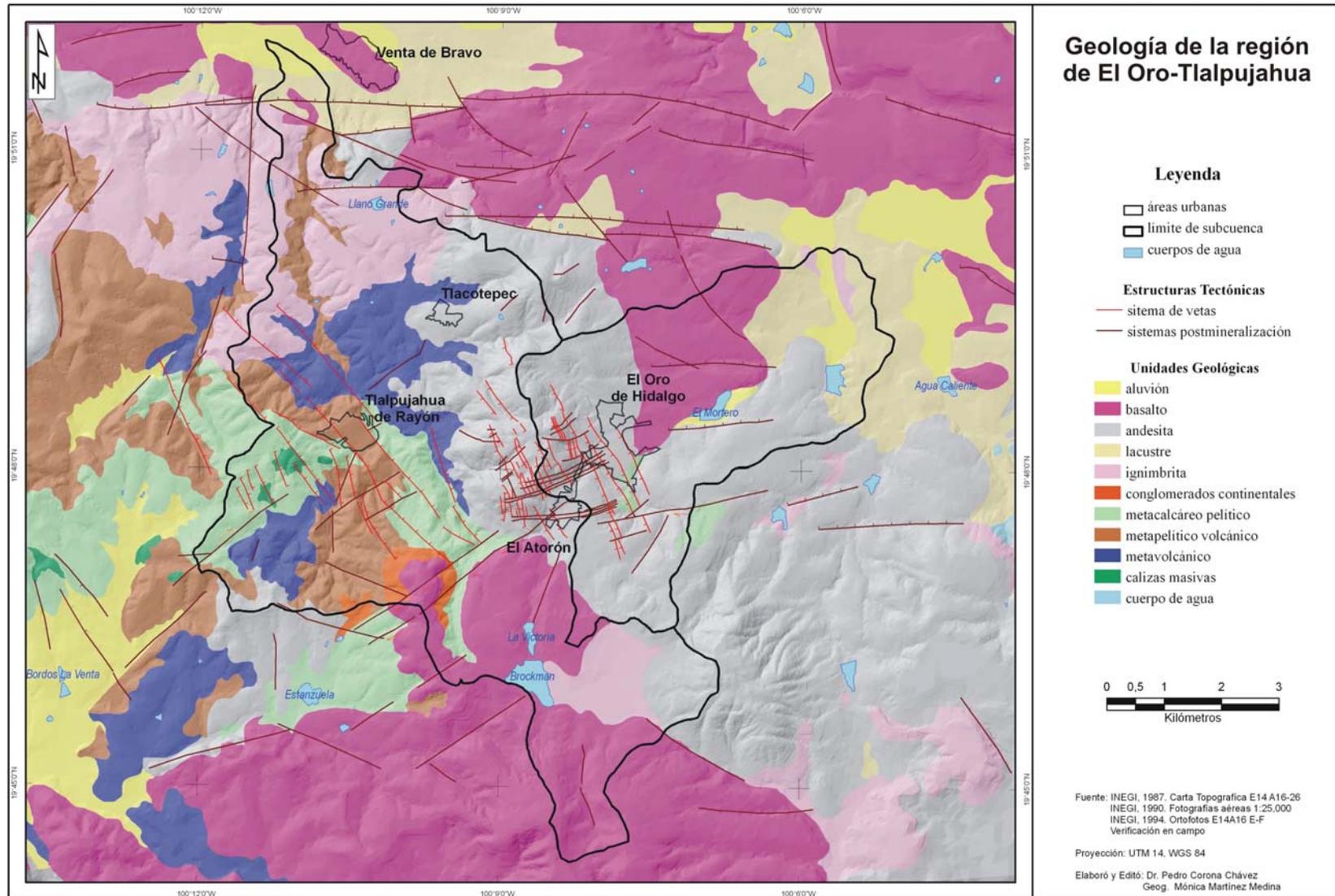


Fig. 5 Mapa geológico de la región de estudio (Elaboró y editó Dr. Pedro Corona Chávez y Geog. Mónica Martínez Medina)

4.2. Depósitos Minerales auríferos-epitermales del distrito minero El Oro-Tlalpujahua

El tipo de mineralización presente en el Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua puede compararse con aquellas del centro de México, en distritos como Guanajuato, Pachuca-Real del Monte, Zacatecas, etc. Dichos distritos conforman una región que se ha denominado Faja de la Plata, y han sido agrupados para definir una extensa provincia metalogénica.

El yacimiento se caracteriza por un sistema de vetas encajonadas en las rocas meta volcano-sedimentarias del terreno Guerrero, las cuales presentan una marcada constancia en su dirección. Los rumbos y echados promedio de dichas estructuras son N30°O y 70°NE-SO respectivamente, su longitud varía entre 100 y 3500 m, mientras que sus espesores van de 0.4 m a 33 m y excepcionalmente de 70 m, caso de la veta San Rafael. Las vetas carecen de espesores constantes y tienden a disminuir o aumentar su espesor, en algunos casos llegando a acuñarse hasta desaparecer.

La mineralización en el distrito está relacionada a una serie de sulfuros polimetálicos, sulfosales auríferas y argentíferas, oro y plata nativos, así como a un conjunto de seleniuros de oro, plata y cobre (De la Teja, 1999 y referencias citadas), los cuales quedan contenidos en una matriz de cuarzo y calcita. Las alteraciones asociadas a la mineralización se observan principalmente en los intrusivos relacionados a esta y consiste en silicificación, seritización y oxidación caracterizada por la presencia de óxidos de hierro y manganeso.

De la Teja (1999 y referencias citadas) menciona tres probables etapas hipogénicas y una supergénica, cuyas paragénesis pueden definirse como:

- 1) pirita-calcopirita-arsenopirita,
- 2) esfalerita-galena-calcopirita,
- 3) boulangerita-freigbergita-pirargirita-oro-naumanita-aguilarita fischerita-crookesita, oro y plata nativos, respectivamente.

El yacimiento ha sido clasificado como un depósito hidrotermal de tipo epitermal, es decir se formó a temperaturas de entre 240 y 160° C (Ostroumov y Corona-Chávez, referencias citadas, 1999). Dicha mineralización está relacionada con la actividad magmática ocurrida en la región durante el Eoceno-Mioceno temprano, hace aproximadamente (24-28) Ma (Ostroumov y Corona-Chávez, 1999).

4.3. Desarrollo del distrito minero El Oro-Tlalpujahua

A continuación se expone de manera general, en dos apartados, el desarrollo del distrito minero El Oro-Tlalpujahua a través de su historia. Este tema es relevante ya que la producción de desechos mineros está directamente relacionada con la explotación del yacimiento, por lo cual es importante conocer las épocas de mayor auge económico y en consecuencia de mayor producción así como los métodos metalúrgicos utilizados en determinada época, el volumen de explotación y el modo en que se acumularon los residuos generados.

4.3.1. Historia del distrito

Tlalpujahua en el estado de Michoacán y El Oro en el estado de México deben su origen, como muchas ciudades en América, a la actividad minera desarrollada desde la época colonial. La región, aunque desde hace muchos años ha pertenecido a entidades federativas diferentes, manifiesta una misma evolución geológica, una misma historia en la formación de sus yacimientos y un desarrollo similar en su actividad minera. La zona se caracterizó por ser eminentemente minera, desde los descubrimientos de los minerales de plata en Michoacán, a mediados del siglo XVI, hasta la clausura de toda labor relacionada con esa actividad en 1959. A lo largo de cuatro siglos, un gran número de empresas lograron crear una cultura ligada a los trabajos de extracción y beneficio de los minerales de oro y plata.

Los minerales de Tlalpujahua empezaron a trabajarse desde el siglo XVI, los de El Oro, por su parte, comenzaron a explotarse ya entrada la segunda mitad del siglo XVIII. El distrito tiene una historia plagada de altas y bajas en su producción minera, debidas a múltiples factores de índole político, económico y tecnológico, lo cual repercutió notablemente en el desarrollo de la región (Uribe-Salas, A., 2005).

Se piensa que desde 1517 se llevó a cabo explotación mineral en la región. Entre 1525 y 1558 se registra una explotación de grandes volúmenes, como parte de las actividades mineras españolas en el centro de la Nueva España. En las primeras minas, ubicadas en la región central de la Nueva España, la explotación de las vetas se llevaba a cabo superficialmente, acumulando pequeñas cantidades de mineral con altos contenidos de plata, lo cual facilitaba el uso de

pequeños hornos de fundición para el beneficio del metal. El *método de fundición*, fue el primer sistema de beneficio utilizado en el distrito y en todas las minas de la Nueva España.

A partir de la segunda mitad del siglo XVI se introdujo el *método de patio* o *amalgamación*, lo cual significó un gran avance tecnológico, mismo que influiría enormemente en la producción minera del distrito. El nuevo método de beneficio permitía aprovechar ahora minerales con bajos contenidos de plata además de beneficiarlos en cantidades relativamente industriales.

El año de 1570 marca el inicio de la primera gran bonanza de la región, al ser descubierta la veta Coronas. En esta época comienza el crecimiento de haciendas e ingenios de minas. Sin embargo, en 1639 ocurre un periodo de crisis relacionado con el crecimiento de la población, la falta de abastecimiento de mercurio y otros insumos.

Fue hasta la primera mitad del siglo XVIII cuando, impulsado por la presencia de Joseph de la Borda (1740) se registra un nuevo desarrollo, explotándose a partir de 1743 la veta Borda y reabriéndose antiguas obras mineras, esta nueva bonanza continuó hasta que en 1769 se presenta una nueva decadencia. En 1772 se funda el distrito minero de El Oro y en 1778 se lleva a cabo el descubrimiento de las vetas Descubridora, San Juan, San Rafael y Chihuahua.

La historia del siglo XIX registra dos periodos de gran actividad. El primero de ellos tuvo lugar en los años veinte cuando los ingleses invirtieron grandes cantidades de capital en la rehabilitación de las minas destruidas durante la guerra de Independencia, el segundo sesenta años después cuando fueron descubiertos los filones más ricos hasta entonces conocidos en el país (Uribe-Salas, 2005 y referencias citadas).

Fue hasta 1898 cuando con el establecimiento de la compañía minera francesa Las Dos Estrellas y otras de origen inglés como El Oro mining and Railway Company, la región experimentó el mayor desarrollo de su historia extrayendo los volúmenes más significativos de oro y plata, todo esto ligado al desarrollo tecnológico y operativo impulsado por la introducción del *sistema de cianuración* y la aplicación de la fuerza eléctrica en el conjunto de las operaciones minero metalúrgicas, así como por la aparición del ferrocarril que facilitó el transporte de maquinaria. Por otro lado la intervención de personal especializado en minería y geología dio lugar a una notable mejora en la planeación y en el desarrollo de las actividades extractivas y de

beneficio (Uribe-Salas, A., 2005). Este cambio tecnológico permitió explotar los minerales de baja ley y aquellos situados bajo el nivel del agua, extraer cientos de miles de toneladas y beneficiarlas en las mismas instalaciones con rendimientos de casi el 92% de oro y 56% de plata por tonelada (Uribe-Salas, A., 2005).

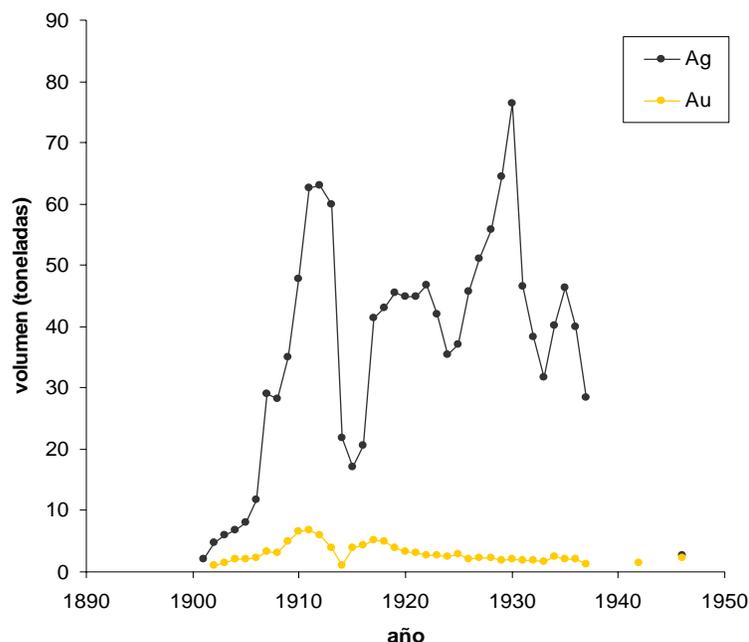


Fig. 6 Gráfico que muestra la producción de metales preciosos durante la época de mayor producción en la región (Datos tomados de Uribe-Salas, A., 2005).

Los yacimientos más ricos se descubrieron en la década de 1890, por debajo de las secuencias volcánicas, en la cual los mineros españoles habían detenido sus excavaciones. El hallazgo en el mineral de El Oro de la Veta Negra, y en Tlalpujahuá, de la Veta Verde, entre otras, coinciden con la introducción al país del *proceso de cianuración*. Este periodo de intensa actividad finalizó a mediados del siglo XX debido a la escasez de mineral, así mismo por las crisis económicas Norteamericana y europea, las cuales influyeron de manera negativa en el flujo de capital. La figura 6 muestra una gráfica donde se observa la producción de oro y plata, llevada a cabo en esta época.

El desbordamiento de la presa de Jales en mayo de 1937 puso fin a la actividad minera financiada por la inversión extranjera. Una última etapa de explotación se llevó a cabo por parte

de la Cooperativa Minera y Obrera Dos Estrellas formada en 1938, haciendo uso del *método de flotación*, con el cual sin embargo no se alcanzó nunca un nivel importante de producción, provocando el cese definitivo en 1959 (Uribe-Salas, A., 2005).

4.3.2. Producción de desechos mineros del distrito

Una historia de más de 400 años de explotación convierte al Distrito Minero El Oro-Tlalpujahuá en una de las regiones mineras históricas más importantes del país, la extracción de metales alcanzó niveles extraordinarios dándole fama mundial al distrito. Toda esa gigantesca producción a través de los siglos, dejó como consecuencia la generación y distribución en la superficie de un volumen de aproximadamente 23 millones de toneladas de residuos mineros, acumulados en los primeros siglos sobre el lecho del río Tlalpujahuá; y posteriormente a partir de 1902, en presas diseñadas para su almacenamiento.

En síntesis, fueron cuatro los métodos de beneficio utilizados históricamente en el distrito: *fundición, amalgamación, cianuración y flotación*. En la tabla 2 se muestra el periodo en que fue empleado cada método y algunos aspectos sobre el residuo generado (Uribe-Salas, 2005).

Durante los dos últimos periodos de explotación se procesaron y beneficiaron cientos de miles de toneladas de material, cuyas leyes fueron disminuyendo con el tiempo. Así, para poder mantener la producción, los volúmenes de material extraído fueron siendo mayores; además, los avances tecnológicos permitieron mayor capacidad de procesamiento y por lo tanto mayor volumen de residuos asociados. Como se mencionó anteriormente la Compañía Minera Las Dos Estrellas empleó el método de cianuración para el beneficio del mineral y generó volúmenes muy importantes de desechos durante casi cuarenta años.

Por su parte, la Cooperativa Minera y Obrera Dos Estrellas utilizó el método de flotación para el procesamiento mineral durante veinte años e igualmente produjo gran cantidad de residuos, situación motivada por las bajas leyes presentes en la última época de explotación. La figura 7 es una gráfica que muestra la cantidad de material extraído y procesado en el Distrito de Tlalpujahuá, entre 1893 y 1955, del cual un porcentaje de 99.99% fue convertido en desecho.

Tabla 2 Métodos metalúrgicos empleados y tipo de residuo generado en las distintas épocas de explotación

Época	Método	Tipo de Residuo	Volumen del residuo	Disposición del residuo
1558-1700'	Fundición	Terreros, escorias de fundición con gran cantidad de contenido metálico	?	Lugares cercanos al lugar de beneficio
1550' - 1894	Amalgamación	Terreros y jales con leyes altas de metales preciosos y de mercurio	?	Lecho de los ríos
1894-1938	Cianuración	Residuos con leyes menores de metales preciosos	99.99% del material extraído	Lecho de los ríos, presas de jales
1938-1959	Flotación	Residuos con leyes menores de metales preciosos	99.99% del material extraído	Presas de jales

Fuente: Uribe-Salas, A., 2005

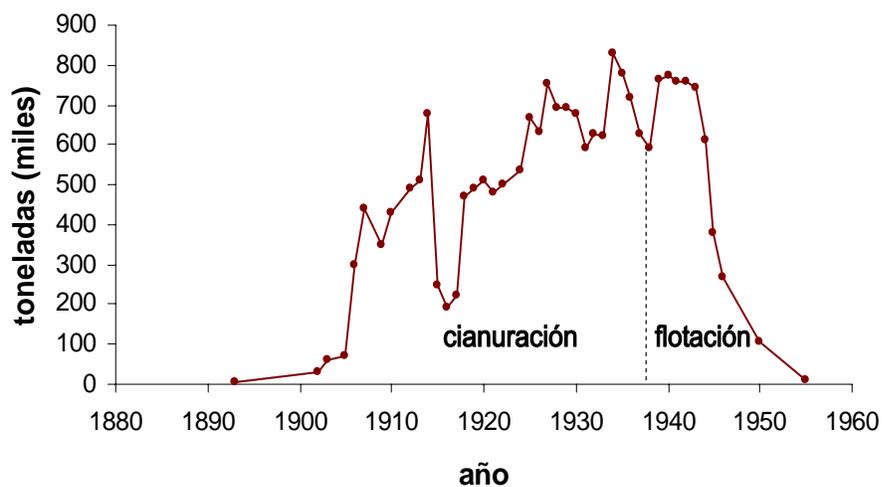


Fig. 7 Gráfico que muestra la cantidad de material procesado en el periodo 1893-1955, por parte de la Compañía Minera "Dos Estrellas", y de la Cooperativa Minera y Obrera Dos Estrellas, en Talpujahua, así como el método de beneficio empleado (datos tomados de Uribe-Salas, A., 2005).

4.3.3. Distribución espacial de los jales

Recientemente y a través del proyecto de FOMIX en el que se encuentra integrada esta tesis, se realizó la cartografía de los jales expuestos en el DMOT (Martínez, et. al., 2006). Existen en la región, cuatro áreas históricas de acumulación de jales: dos en el distrito minero El Oro y dos en el distrito minero Tlalpujahua (figura 8), las cuales tienen las siguientes dimensiones:

Tabla 3

Distrito Minero	Área superficial (Ha)
Tlalpujahua	38.85
Tlalpujahua	2.14
El Oro	7.89
El Oro	11.39

Tabla tomada y modificada de Martínez, et. al., (2006)

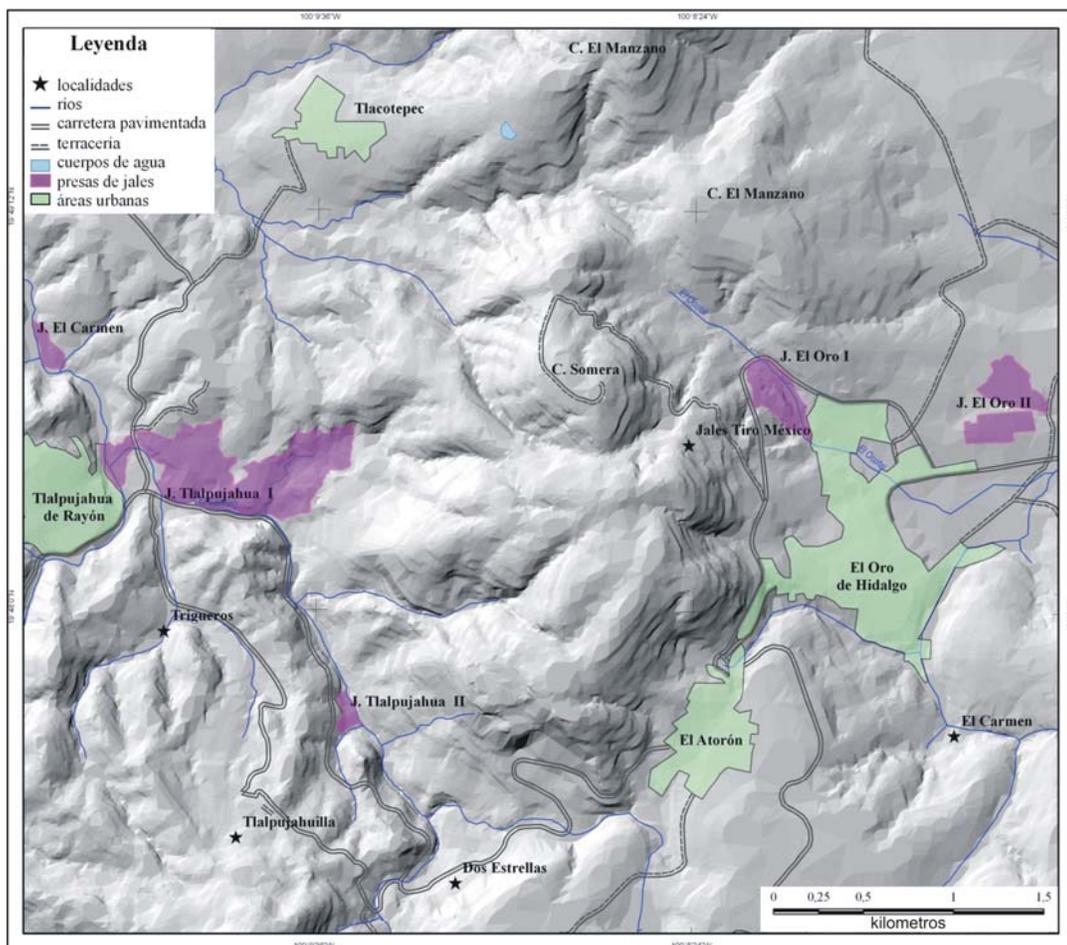


Fig. 8 Localización de los principales depósitos de jales del DMOT (Elaboró Mónica Martínez Medina)

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

El presente trabajo forma parte del programa de investigación multidisciplinario “Evaluación de la importancia económica (recuperación secundaria) y del efecto del impacto ambiental en la calidad del agua por residuos mineros (jales) en el distrito minero de Tlalpujahua, Michoacán”, el cual contempla dos vertientes, la primera ha pretendido diagnosticar el impacto ambiental derivado de los desechos mineros (jales); y la segunda, determinar el valor potencial de dichos residuos como recurso explotable. Actualmente, el proyecto se encuentra en su etapa final.

En etapas previas del proyecto se ha observado que los depósitos de jales han sufrido procesos de alteración, lo que ha conducido a la incorporación de elementos geodisponibles como el As, Pb, Zn, Cd, Ni, y Cr, a la red fluvial local (Robles-Camacho et al., 2007). Sin embargo los valores de elementos potencialmente tóxicos contenidos en los residuos son muy bajos y podría no ser significativa su acumulación en suelos y plantas (Corona-Chávez et al., 2007). Ahora en este mismo proyecto en curso se pretende realizar un diagnóstico geoquímico y mineralógico que permita proponer alternativas para el manejo de los jales como potencial recurso económico.

Los antecedentes de estudio de los jales del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua se remontan a 1925, y se llevaron a cabo con el objetivo de conocer su potencial para ser reutilizados y así obtener los valores de metales que contienen (Villafaña, 1951). Desde esa época han sido sometidos a pruebas de laboratorio y de planta piloto por diferentes compañías, sin embargo, a pesar de que se reportaron leyes de oro y plata de 2.75g/T y 75 g/T respectivamente (Villafaña, 1951, Allende et al., 1990), no se ha logrado llevar a cabo una explotación a nivel industrial.

En una etapa previa, se realizó la caracterización general de dichos residuos, la cual se basa principalmente en un análisis mineralógico y geoquímico que involucró las técnicas de microscopía óptica, difracción y fluorescencia de rayos-X (Robles-Camacho et al., 2007). Además se utilizó espectrometría de masas (ICP-MS) para medir elementos traza, donde sobresale la presencia de Au y Ag con leyes promedio de 1.4 g/T y 32 g/T (promedio aritmético a partir de datos geoquímicos) respectivamente, además de otros metales de interés económico y ambiental como Pb, Zn, Cu, As, etc.

Sin embargo, no se han reconocido con precisión las fases minerales que contienen los elementos metálicos. El conocimiento preciso de la ocurrencia de los metales es determinante para plantear una posible reutilización de los jales, además, un conocimiento más profundo de las fases minerales es fundamental para predecir las probables implicaciones ambientales de dichos residuos.

Objetivos

Objetivos principales:

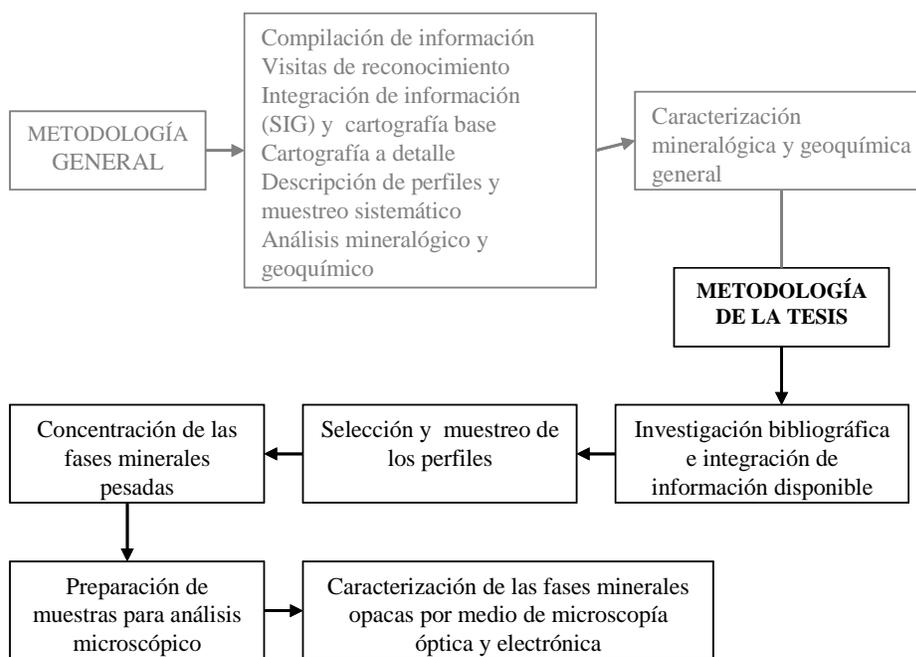
- Realizar una caracterización mineralógica y química de las fases opacas contenidas en 21 muestras representativas de jales.
- Determinar la ocurrencia de los principales metales contenidos en los residuos.

Objetivos secundarios:

- Comparar datos de composición química con datos mineralógicos.
- Identificar las fases metálicas primarias o secundarias.
- Determinar la distribución espacial de las fases minerales opacas.

6. METODOLOGÍA

Como se mencionó en el capítulo anterior, el presente trabajo forma parte de un proyecto multidisciplinario y por tanto, el concepto metodológico aplicado se integra a una metodología general, cuyo fin entre otros, es la caracterización mineralógica y geoquímica de los jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahuá. A continuación se presenta un cuadro que muestra la metodología empleada en su momento para llevar a cabo una caracterización general (metodología precedente) y la metodología empleada en este trabajo de tesis (caracterización de las fases minerales opacas), la cual releva a la caracterización geoquímica y mineralógica general.



6.1. Metodología precedente

6.1.1 Cartografía

Actualmente se dispone de un importante volumen de datos que han sido integrados con motivo del estudio de los jales del distrito. Tomando como base mapas cartográficos del INEGI se realizó trabajo de campo en diversas disciplinas como son: hidrología, geoquímica, geología, etc. Toda la información compilada se integró haciendo uso de sistemas de información geográfica (SIG), posteriormente se llevó a cabo una cartografía detallada de la zona de estudio donde se buscó determinar la distribución superficial y el volumen de los residuos mineros del distrito.

6.1.2 Levantamiento de perfiles y muestreo

Durante la identificación de los jales en campo, se realizó el levantamiento de perfiles de jal que fueron descritos de acuerdo a la metodología de descripción de suelos propuesta por Siebe et al. (1996).

Posteriormente, se llevó a cabo un muestreo sistemático, obteniéndose una muestra de jal para cada horizonte definido. Así mismo, se colectó también una serie de muestras aisladas con base en características específicas identificadas.

6.1.3 Caracterización mineralógica y geoquímica general de las muestras

A partir de las muestras colectadas se prepararon láminas delgadas que fueron analizadas mediante microscopía óptica de luz transmitida con el objetivo de determinar la mineralogía general.

Para determinar con mayor precisión las fases minerales predominantes y conocer la composición química (elementos mayores, trazas y REE) de las muestras, se llevaron a cabo análisis de difracción de Rayos-X (DRX), utilizando un difractómetro para polvos marca Siemens D5000. Por otro lado, se llevaron a cabo análisis de fluorescencia de Rayos-X (FRX) y espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS) ambos en los

laboratorios del Instituto de Geología de la UNAM. El instrumento utilizado para los análisis de FRX fue un espectrómetro secuencial (LFRX -SIEMENS SRS 3000 con tubo de Rh y ventana de Berilio de 125 μm); los elementos mayores se midieron en muestra fundida y los traza en muestra prensada (Lozano-Santa Cruz et al., 1995; Verma et al., 1996). El análisis de la serie de los lantánidos se realizó por medio de ICP-MS (VGEelemental modelo PlasmaQuad3®).

6.2. Metodología empleada para la caracterización de las fases minerales metálicas

6.2.1 Selección y muestreo de los perfiles

Teniendo como base la caracterización mineralógica y geoquímica general, se llevó a cabo una selección de muestras de acuerdo a su contenido de minerales opacos y al porcentaje de elementos potencialmente tóxicos (EPT) y potencialmente económicos (EPE) presente. Se consideró un conjunto de 21 muestras de jal para realizar la caracterización de las fases minerales opacas.

A partir de lo anterior se llevó a cabo el muestreo específico de los perfiles seleccionados siguiendo los siguientes pasos:

- a. Localización del perfil
- b. Descripción e identificación de los horizontes del perfil
- c. Toma de muestra, para lo cual se empleó espátula y pala
- d. Almacenamiento de las muestras en bolsas de plástico

Además del muestreo de los perfiles, se colectaron dos muestras aisladas de terreros, las cuales se consideraron importantes ya que representan un desecho minero que puede ser particularmente útil para conocer las características originales del yacimiento, ya que dicho material no fue sometido a un proceso de beneficio. Estas muestras se sometieron a un ensaye de Au y Ag por fusión y apartado con determinación gravimétrica, dicho estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Química del Departamento de Minas y Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Cada muestra seleccionada fue analizada empleando un microscopio estereoscópico Leica modelo XL-2 para corroborar las características generales como mineralogía básica, tamaño de grano y abundancia de opacos.

6.2.2 Concentración de las fases minerales pesadas

Las muestras seleccionadas fueron sometidas a un proceso de concentración gravimétrica, empleando los métodos de decantación y batea con la finalidad de separar las fases minerales ligeras contenidas en dicho residuo y coleccionar la mayor cantidad posible de partículas minerales metálicas (óxidos, sulfuros, sulfosales, etc.). El procedimiento fue el siguiente:

- a. Cada muestra fue decantada, usando agua corriente, un vaso de precipitados de 250 mL, una cápsula de porcelana y un contenedor de plástico con capacidad de 10 L. Con este procedimiento se obtuvo un pre-concentrado, al haberse separado las fracciones fina, ligera y soluble de la muestra en cuestión. Cabe señalar que no se llevó a cabo tamizado en esta etapa, pues se partió de la idea de que las partículas más pequeñas forman parte del grupo de la sílice y de las arcillas, además no parece existir una relación entre el contenido de arcillas y el contenido de EPT y EPE. Por otro lado, el estudio de las fases solubles en agua (sulfatos, carbonatos, etc.) se encuentra aún en proceso en el mismo proyecto FOMIX-Conacyt, por lo cual, el contenido metálico probablemente incluido en dichas fases y su posible relación composición química-mineralógica no podrán ser discutidas en este documento.
- b. El pre-concentrado obtenido anteriormente, fue sometido a un nuevo proceso de separación mediante la técnica de batea, una cápsula de porcelana, una pipeta y agua corriente; obteniéndose un concentrado final de minerales para cada muestra seleccionada.

6.2.3 Preparación de superficies pulidas para análisis microscópico

Obtenidos los concentrados de minerales pesados, se procedió a la preparación de superficies pulidas (briquetas) para estudio mineralógico microscópico. Los pasos seguidos para la obtención de las briquetas fue la siguiente:

1. Se llevó a cabo una preparación de resina epóxica de marca Buehler, utilizándose una parte de endurecedor por cada 3 de resina.
2. Cada concentrado (polvo) fue mezclado con la resina hasta formar una pasta homogénea utilizando un palillo de madera común y cuidando que no se formaran burbujas.
3. La mezcla de resina y polvo se vació después en un molde cilíndrico donde las partículas sólidas se depositaron en el fondo luego de un tiempo de reposo.
4. El vaciado fue puesto a secar durante 18 horas en un lugar seco y a temperatura ambiente.
5. Una vez endurecida la resina, las partículas quedaron montadas en briquetas que fueron extraídas de los moldes.
6. Por último, cada briqueta se lijó por el lado en que se asentaron las partículas, utilizando diferentes abrasivos de carburo de silicio (No. 260, 600, 1000, 1500 y 2000) y de alúmina hasta conseguir un pulido fino.

6.2.4 Análisis de las fases minerales metálicas por microscopía óptica

Una vez realizada la preparación para cada muestra, fue posible comenzar con el estudio mineralógico. Cada muestra fue sometida a un análisis de microscopía óptica de luz reflejada (análisis minerográfico) utilizando microscopios de polarización Carl Zeiss Axiolab con objetivos para observaciones en aire de 5x, 10x, 20x y 50x de la misma marca (Facultad de Ingeniería UNAM); y Olympus BX40 con objetivos de 5x, 10x, 20x, 50x para observaciones en aire (Instituto de Investigaciones Metalúrgicas UMSNH).

El análisis incluyó: la identificación de las fases minerales opacas, hipogénica, supergénicas y/o secundarias; determinación de la textura de sus partículas, medición del tamaño de las mismas, así mismo se determinaron características especiales para cada muestra. Se realizaron observaciones utilizando un sistema de coordenadas cartesiano en el plano de reflexión de cada muestra, para una ubicación precisa de las fases minerales. Cada zona de interés fue señalada con marcadores permanentes con el fin de ubicar las fases minerales más representativas o ambiguas de las muestras.

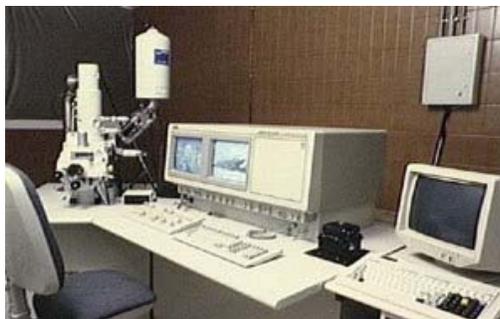
Finalmente, se llevó a cabo una base de datos de las propiedades ópticas y características específicas de cada mineral y de los aspectos texturales característicos de cada muestra.

6.2.5 Análisis de las fases minerales metálicas por microscopía electrónica

El análisis por microscopía óptica se complementó llevando a cabo análisis de microscopía electrónica de barrido en algunas muestras siguiendo el siguiente criterio:

- Aquellos casos en que el reconocimiento de las fases minerales opacas resultó ambiguo.
- Alguna partícula que haya presentado características texturales especiales.
- Aquellas muestras en las que se observó una relación entre las fases minerales opacas presentes y el contenido de elementos potencialmente tóxicos o potencialmente económicos determinado en trabajos precedentes.

Las muestras seleccionadas fueron recubiertas con grafito y se analizaron utilizando un microscopio electrónico de barrido Jeol JSM-6400 con analizador EDS, ya sea en el Laboratorio Universitario de Petrología de la UNAM que en el Instituto de investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH.



Microscopio electrónico de barrido IIM, UMSNH

7. RESULTADOS

7.1. Caracterización general de los jales

Con base en la cartografía realizada por medio de fotos aéreas y verificación de campo, se han delimitado cinco principales depósitos de jales en el Distrito minero El Oro-Tlalpujahua (figura 10). Del mismo modo, considerando sus características espaciales, espesores, así como su relación preliminar en la cuenca hidrográfica se ubicaron una serie de estaciones de muestreo (perfiles o muestras aisladas). Fueron descritos un total de 14 perfiles de jal, de los cuales se obtuvo una cantidad de 66 muestras correspondientes a los diferentes horizontes distinguidos, además fueron colectadas 17 muestras aisladas.

Los perfiles de jal seleccionados presentan espesores de entre 0.5 m y 2.80 m; forman parte de varios depósitos antiguos (edad mínima de 50 años) que consisten en acumulaciones de material poco consolidado y altamente erosionado. Dichos depósitos poseen una cubierta forestal principalmente de coníferas, lo cual ha determinado que el volumen de material removido no sea mayor. Cada perfil contiene distintos horizontes que pueden distinguirse de acuerdo a su coloración, textura y estructura; así mismo pueden distinguirse zonas de acumulación de lixiviados entre los horizontes, en la base de los depósitos y en zonas de escurrimiento superficial.



Fig. 9 Vista panorámica de un depósito de jales en El Oro, el espesor de la columna mostrada es de aproximadamente 15 metros

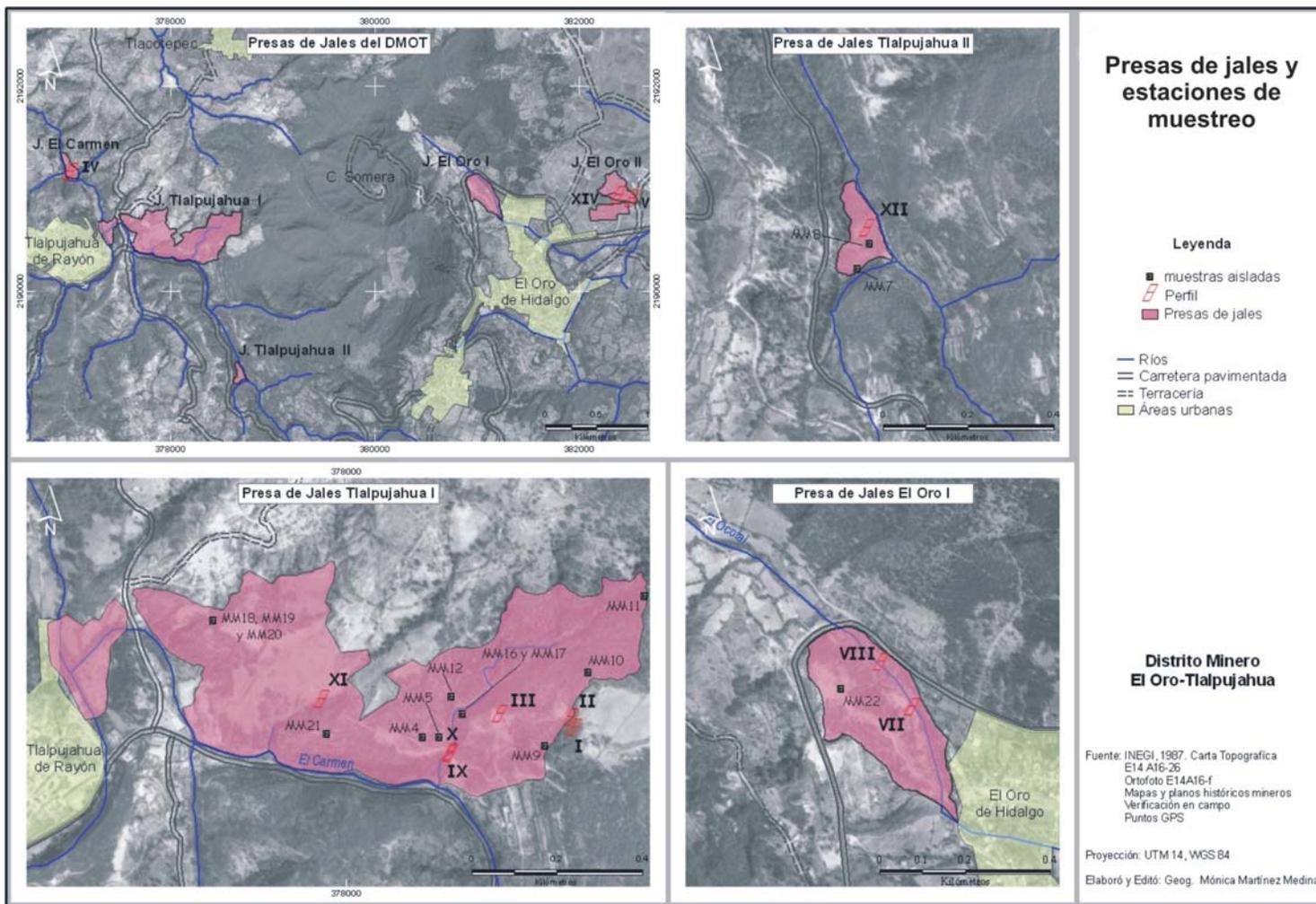


Fig. 10 Mapas de ubicación de los depósitos de jales del Distrito minero El Oro-Tlalpujahua. En la esquina superior izquierda se aprecia una vista general del distrito, las demás imágenes representan detalles de la misma.

De acuerdo con la clasificación de suelos de Siebe et al. (1996) la textura de los jales varía ampliamente entre arcillosa y arenosa. La granulometría es heterogénea, el tamaño promedio de las partículas es inferior a 1mm.

Cada perfil es referido como Ei, donde i = 1, 2,..., 14 = número de perfil; los horizontes se definen como H j, donde j = 1,2, ..., n, n = número de horizontes en cada perfil, medidos verticalmente de la cima a la base, así cada muestra se representa con la clave *EiHj*.

A continuación se presenta una tabla que resume las características fisicoquímicas medidas en campo en los perfiles. Los datos para cada horizonte pueden consultarse en el anexo I.

Tabla 4 *Propiedades fisicoquímicas de muestras colectadas en el Distrito minero El Oro-Tlalpujahuá*

Perfil ¹	Color	T °C	pH	Conductividad eléctrica (MS)	Contenido de CaCO ₃ ²
E1 (3)	Pardo grisáceo a rojo	16.8	6.39-7.15	20-60	Libre de CaCO ₃
E2 (3)	Gris a pardo oscuro	16.3	7.13-8.32	40-60	Medio
E3 (7)	Pardo grisáceo a amarillo	26.4-31.9	5.14-8.43	90-2090	Medio
E4 (3)	Pardo grisáceo oscuro	23.0	8.50	110	Medio
E5 (8)	Pardo a gris oscuro	20.4	7.52-8.81	49-765	Alto
E7 (7)	Gris a pardo verdoso	19.4	4.48-8.46	197-895	Variable (libre-alto)
E8 (4)	Gris oscuro a pardo rojizo	18.8	5.73-8.54	6-1937	Variable (libre-alto)
E9 (5)	Pardo grisáceo a pardo amarillento	18.3	8.05-8.78	7-406	Alto
E10 (4)	Pardo grisáceo	18.5	8.20	3-1139	Alto
E11 (6)	Gris oscuro a pardo	19.1	6.71-9.03	4-1728	Variable (bajo-alto)
E12 (4)	Pardo grisáceo a pardo amarillento	19.0	7.14-8.14	31-51	Variable (libre-alto)
E13 (4)	Gris a pardo	18.2	7.73-8.39	6-1483	Muy bajo
E14 (8)	Gris a pardo	18.7	7.35-8.24	145-1570	Alto

¹Entre paréntesis el número de horizontes distinguidos. Así, por ejemplo, el perfil E1 contiene los horizontes E1H1, E1H2, E1H3.

²De acuerdo con Siebe et al., 1996

La composición mineralógica de los jales consiste predominantemente en minerales del grupo de la sílice, principalmente cuarzo y en ocasiones tridimita-cristobalita, en menor

proporción se encuentran: feldspatos, minerales del grupo de las arcillas, calcita, fragmentos líticos de rocas volcánicas y metamórficas, minerales máficos y minerales metálicos opacos.

En la mayoría de los casos la composición mineralógica consiste en más del 80% de cuarzo, sin embargo existen casos en los que el contenido de minerales arcillosos es dominante y de hasta 95%. El porcentaje del resto de minerales presentes es menor al 10%.

La composición química de elementos mayores obtenida a partir de los análisis por fluorescencia de rayos-X muestra un predominio de SiO_2 , coherente a la mineralogía. Las proporciones promedio de los elementos en las muestras son las siguientes (datos completos en el anexo I):

SiO_2 73.7%	TiO_2 0.4%	Al_2O_3 9.0%	F_2O_3 3.8%	MnO 0.1%	MgO 0.8%	CaO 3.3%	Na_2O 0.4%
-------------------------	------------------------	---------------------------------	--------------------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-------------------------------

Por otro lado, el análisis de elementos traza y lantánidos realizado mediante ICP-MS, muestra la presencia de algunos metales pesados de importancia, los cuales se encuentran en las siguientes concentraciones promedio en partes por millón (ppm).

Cr 35.5	Co 15.5	Ni 22.1	Cu 63.0	Zn 238.3	As 34.4	Ag 36.0	Cd 0.6	Au 1.4	Pb 91.6
------------	------------	------------	------------	-------------	------------	------------	-----------	-----------	------------

Es necesario mencionar que los valores de algunos de estos elementos varían considerablemente de una muestra a otra. Tal es el caso de el oro y la plata, los cuales muestran concentraciones variables de 0.6-4.4 ppm y 1.8-178 ppm respectivamente. Por su parte el plomo y el arsénico varían entre 16.6-317.5 ppm y 3.0-83.9 ppm respectivamente (para otros elementos ver anexo III).

Por otro lado, es importante señalar que los valores promedio anteriores no pueden ser considerados representativos para todo el volumen y mucho menos para todos los horizontes. Sin embargo, para este estudio resulta importante señalar los datos generales obtenidos, con la finalidad de considerar una referencia comparativa con otros casos de estudio de jales del país.

7.2. Caracterización de las fases minerales metálicas contenidas en los jales

Para el estudio de las fases minerales opacas se seleccionaron y muestrearon 21 horizontes representativos correspondientes a 6 de los perfiles antes mencionados (E3, E4, E5, E7, E9 y E10), además se obtuvieron 2 muestras de terreros, lo que suma un total de 23 muestras tomadas. De las muestras de jales, 11 pertenecen al distrito minero de El Oro y 10, al distrito minero de Tlalpujahuá (Figura 10); las muestras de terreros pertenecen al distrito de Tlalpujahuá y fueron obtenidas en las cercanías de la veta Borda. La figura 11 muestra una vista general de los 6 perfiles de los cuales se obtuvieron las muestras seleccionadas.



Fig. 11 Imagen que muestra los perfiles de los cuales provienen las muestras estudiadas. a) perfil E3, se aprecian sus diferentes horizontes; b) perfil E4; c) perfil E5, el cual presenta horizontes de tonos pardos y grises; d) perfil E7; e) perfil E9; f) perfil E10.

La siguiente tabla enumera las muestras estudiadas, así como su clave, localidad y ubicación geográfica la cual corresponde a cuatro de los depósitos de jales del distrito.

Tabla 5 Muestras estudiadas en el trabajo de tesis

No. de muestras	Clave	x (UTM)	y (UTM)	Altitud (msnm)	Distrito minero
1	E3H1	378361	2190457	2593	T
2	E3H2	378361	2190457	2593	T
3	E3H3	378361	2190457	2593	T
4	E3H5	378361	2190457	2593	T
5	E3H6	378361	2190457	2593	T
6	E4H2	377028	2191170	2512	T
7	E5H2	382527	2190905	2675	O
8	E5H3	382527	2190905	2675	O
9	E5H4	382527	2190905	2675	O
10	E5H5	382527	2190905	2675	O
11	E5H6	382527	2190905	2675	O
12	E7H1	381140	2190964	2728	O
13	E7H3	381140	2190964	2728	O
14	E7H4	381140	2190964	2728	O
15	E7H5	381140	2190964	2728	O
16	E7H6	381140	2190964	2728	O
17	E7H7	381140	2190964	2728	O
18	E9H3	378245	2190369	2577	T
19	E9H4	378245	2190369	2577	T
20	E10H2	378246	2190364	2575	T
21	E10H4	378246	2190364	2575	T
22	Te1	376636	2189687	2650	T
23	Te2	376636	2189687	2650	T

Te: terrero

T: Distrito minero de Tlalpujahuá, O: Distrito minero de El Oro

Nota: En (Ei Hj), i= número de perfil y j= número de horizonte.

Descripción de los perfiles

7.2.1. Perfil 3

El perfil E3 (horizontes E3Hj, j=1, 2, 3, 5 y 6) se encuentra localizado en el distrito de Tlalpujahuá y se caracteriza por la presencia de 6 horizontes distinguibles y un espesor de 130 cm. Presenta tonalidades que van del pardo grisáceo en la cima al amarillo-pardo hacia la base. La textura varía entre arcillo-limosa a franco-arcillo arenosa. Está constituido casi en su totalidad por minerales transparentes, presentando solo un 2% de minerales opacos.

Las fases minerales opacas presentes en el perfil son: pirita, galena, ilmenita, titanomagnetita, magnetita, goethita-limonita y hematita, sin embargo, estas no se encuentran distribuidas uniformemente de manera vertical. Dicha característica permite definir la zona superior del perfil como el nivel de predominancia de pirita y galena, mientras que los niveles inferiores se caracterizan por el predominio de ilmenita, titanomagnetita y magnetita, como se muestra en la siguiente figura:

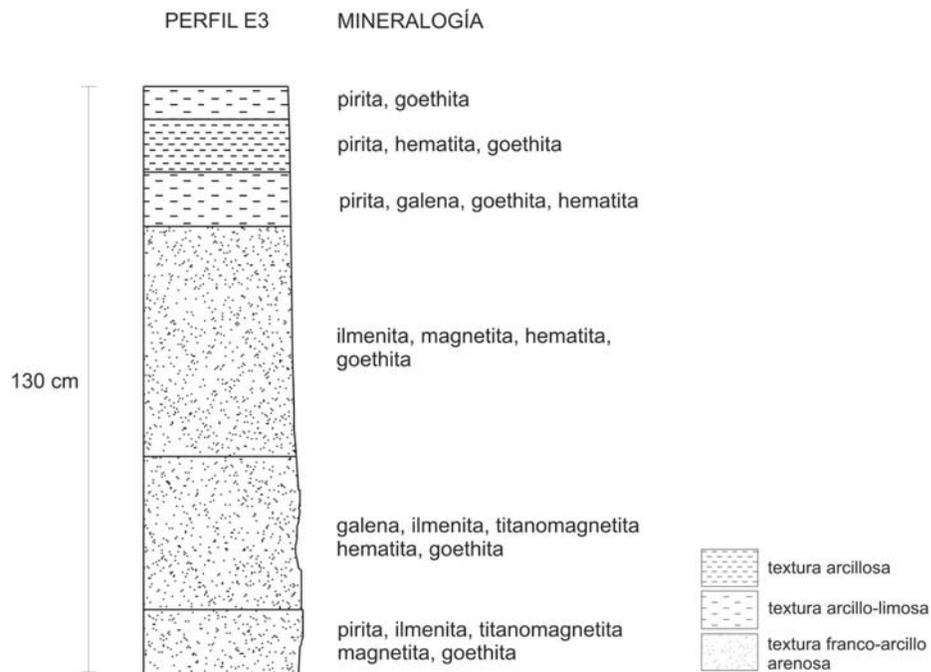


Fig. 12 Representación del perfil E3 que muestra las variaciones mineralógicas verticales

A nivel microscópico, las muestras de este perfil se caracterizan por la presencia de partículas de cuarzo y feldespatos que contienen inclusiones de minerales opacos como pirita e ilmenita cuyo tamaño varía entre 1-70 μm . Las partículas de minerales opacos, por su parte, se presentan en tamaños que varían entre 2-500 μm , las cuales consisten generalmente en fragmentos monominerales (partículas liberadas), con excepción de aquellas que contienen goethita-limonita y hematita, las cuales suelen presentarse como partículas mixtas de ambas fases minerales. Otro aspecto textural destacable es la presencia de partículas de pirita que son reemplazadas a través de sus bordes por oxihidróxidos de Fe. A continuación se presenta una serie de fotomicrografías que muestran diversos aspectos texturales de las muestras del perfil E3.

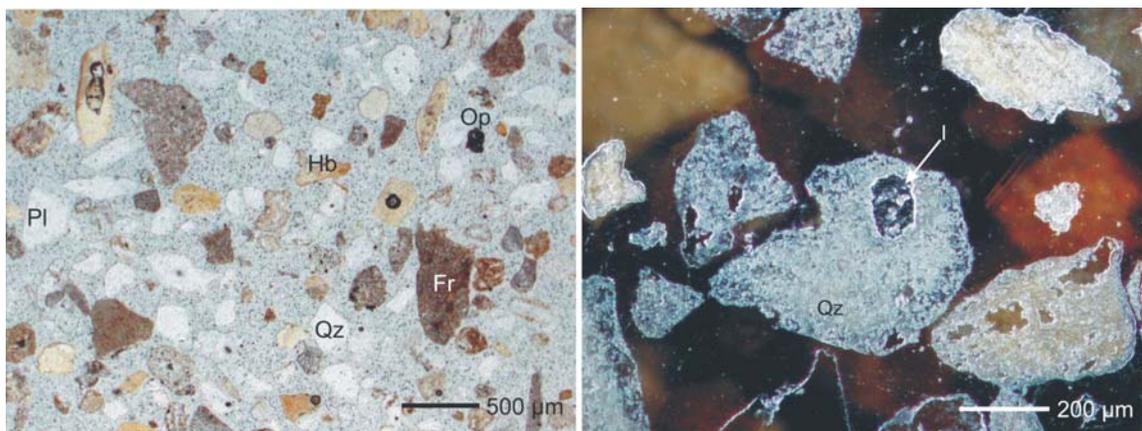


Fig. 13 Fotomicrografías que muestran el aspecto general del perfil 3. A la izquierda, fotografía de microscopio petrográfico con luz paralela (objetivo 2x), muestra la mineralogía dominante en la base del perfil (muestra E3H6, Qz: cuarzo, Pl: plagioclasa, Fr: fragmentos de roca, Op: minerales opacos, Hb: hornblenda u otros minerales máficos). A la derecha, fotografía de microscopio mineralográfico con nicoles cruzados (objetivo 5x), en el centro se observa una partícula de cuarzo (Qz) que contiene una inclusión de ilmenita de 170 µm de tamaño.

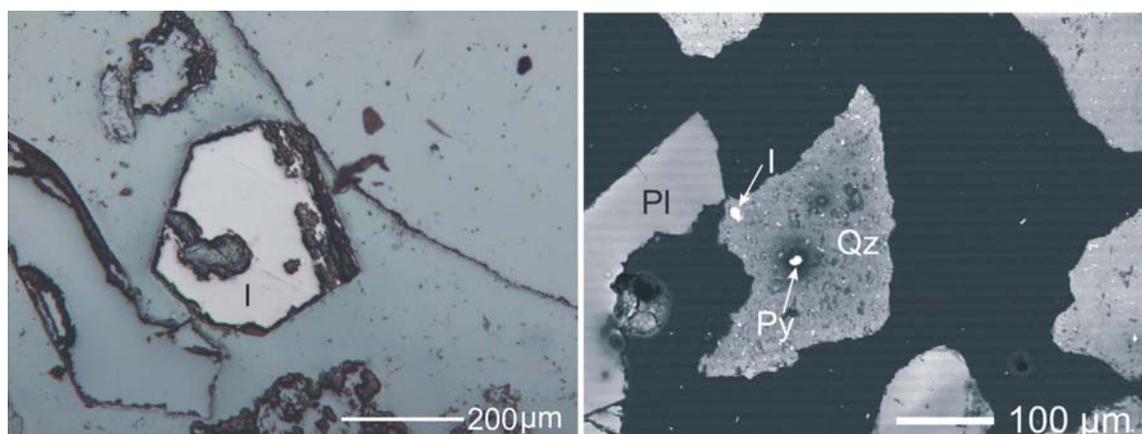


Fig. 14 Fotomicrografías que muestran los aspectos texturales más constantes del perfil 3. A la izquierda, fotografía de microscopio mineralográfico con luz paralela (objetivo 10x), al centro, partícula de ilmenita (I) que exhibe inclusiones de minerales transparentes. A la derecha, fotografía de SEM, que muestra una partícula de cuarzo (Qz) con inclusiones de pirita (Py) e ilmenita (I), fragmento gris al centro-izquierda de la fotografía. Pl: plagioclasa.

Microscopía electrónica aplicada a muestras del perfil 3

Algunas de las fases minerales opacas encontradas fueron identificadas haciendo uso de microscopía electrónica, principalmente en aquellos casos en que el diámetro de la partícula es inferior a 10 µm, dimensión que es común en las partículas de minerales opacos incluidas en

minerales transparentes. Esta técnica fue utilizada también para determinar de manera cualitativa la composición química de partículas mixtas de texturas complejas cuya identificación con técnicas ópticas no fue posible. A continuación se muestran dos casos del uso de microscopía electrónica para la determinación cualitativa de la composición química en muestras del perfil E3.

La figura 15 muestra una fotografía de microscopio electrónico de barrido (MEB) de una partícula mixta de textura compleja que en el borde exhibe zoneamiento concéntrico. La tabla muestra el análisis cualitativo por MEB. Como se observa, las zonas blancas consisten en minerales de Fe intercrecidos con feldespato y cuarzo (tonos grises)

Punto de medición	Composición
1	Si, Na, O
2	Si, Fe
3	Fe
4	Si, O

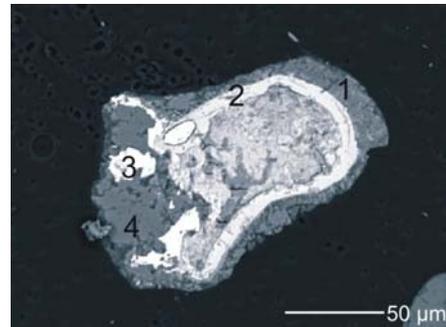
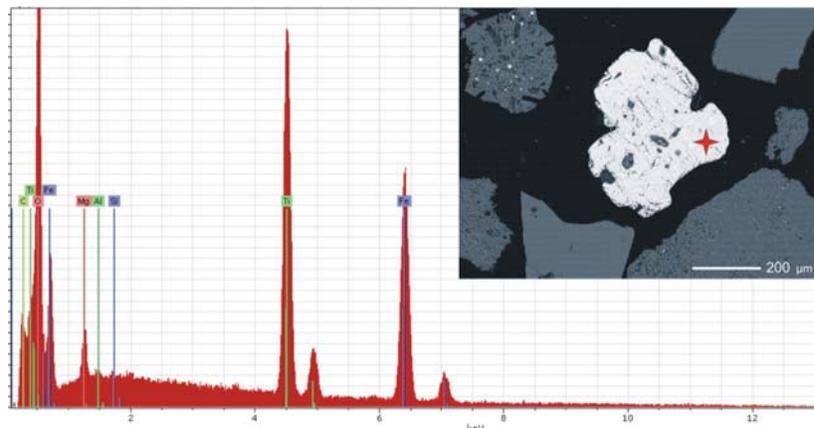


Fig. 15 Fotomicrografía de SEM de una partícula mixta compleja contenida en la muestra E3H6

La figura 16 muestra el análisis por MEB y la fotografía de una partícula subedral de ilmenita (mineral blanco al centro de la foto) con inclusiones de minerales transparentes. El espectro de rayos-X obtenido presenta picos de O, Ti, Fe y Mg, la tabla muestra los resultados del análisis semicuantitativo puntual donde pueden observarse los valores altos de Ti y Fe típicos de esta especie mineral. Nótese que el fragmento gris en la parte superior izquierda presenta también inclusiones de ilmenita (puntos blancos).

Elemento	Peso en porcentaje
MgO	0.816
Al ₂ O ₃	0.444
SiO ₂	0.566
CaO	0
FeO	56.310
CuO	0.684
TiO ₂	40.482
P ₂ O ₅	0.698

Fig. 16



7.2.2. Perfil 4

El perfil 4 se localiza en el distrito de Tlalpujahua. Presenta un espesor de 180 cm y consta de 2 horizontes. Exhibe tonalidades que varían entre pardo grisáceo y pardo amarillento, la textura es predominantemente franco-limosa. La mineralogía está conformada por cuarzo, plagioclasa, calcita, minerales arcillosos, anfíboles y fragmentos de rocas (figura 17), los cuales constituyen el 99% de la muestra, el 1% restante lo representa el conjunto de minerales opacos. Cabe señalar que sólo fue estudiado el horizonte E4H2 de este perfil.

Los minerales opacos observados en este perfil son: ilmenita, pirita, magnetita y hematita. Estas fases minerales se presentan generalmente como partículas mixtas y en ocasiones como fragmentos libres. La pirita suele estar asociada con oxihidróxidos de Fe, mientras que la ilmenita y la magnetita coexisten en la mayoría de los casos con cuarzo, la hematita se presenta intercrecida con agregados minerales amorfos de Fe no identificados con precisión.

Las inclusiones de minerales como cuarzo y zircón en las fases opacas, y el remplazamiento por alteración en el que intervienen oxihidróxidos de Fe, son unos de los atributos texturales más constantes (figura 17). El tamaño de las partículas metálicas oscila entre 50 y 500 μm .

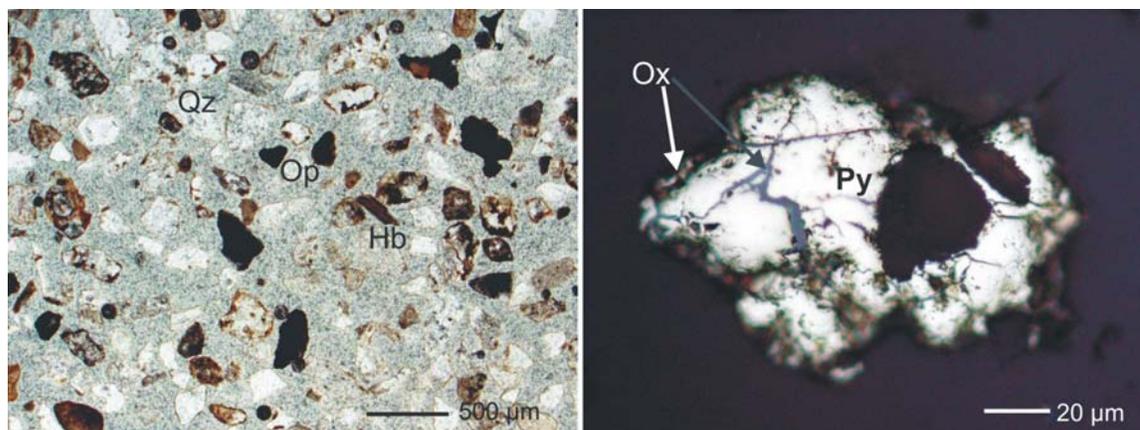


Fig. 17 Fotomicrografías de la muestra del horizonte E4H2. A la izquierda, vista general de la muestra donde se observa la mineralogía dominante y los aspectos texturales generales (microscopio petrográfico con luz paralela y objetivo 2x). A la derecha, partícula de pirita que exhibe bordes de corrosión por remplazamiento de oxihidróxidos de Fe y remplazamiento de las mismas fases a través de fracturas (microscopio minerográfico con luz paralela y objetivo de 50x).

7.2.3. Perfil 5

El perfil 5 (horizontes E5Hj, j=2, 3, 4, 5 y 6) se encuentra ubicado en el distrito de El Oro, presenta un espesor de 110 cm y pueden distinguirse 6 horizontes. El color es variable y va del gris oscuro al pardo amarillento. La textura es notablemente heterogénea, varía entre franco-arcillosa y franco-arenosa. El contenido de minerales opacos es variable en los diferentes horizontes, en general fluctúa entre 3-5 %.

Las fases minerales opacas presentes en el perfil son: pirita, ilmenita, galena, pirrotita, magnetita, goethita y hematita (figura 19). Se observa que la galena y la pirrotita se encuentran contenidas en la parte media e inferior del perfil, mientras que la ilmenita y la pirita predominan en la parte superior y se mantienen más o menos constantes en todo el perfil. El contenido de goethita-limonita y hematita es variable (figura 18).

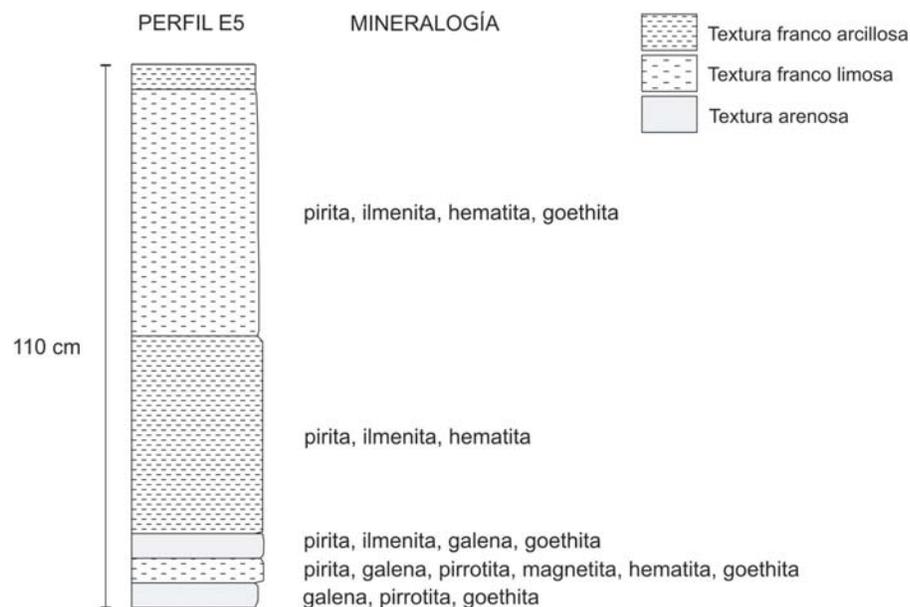


Fig. 18 Representación del perfil E5 que muestra la distribución vertical de los minerales presentes.

Los minerales opacos suelen presentarse como partículas monominerales y mixtas, cuya granulometría varía entre 20 y 500 μm ; o bien como inclusiones de tamaño menor a 10 μm en minerales transparentes tales como cuarzo y feldspatos. Otro aspectos texturales importantes son el remplazamiento por alteración, el cual es evidente en fragmentos de pirita y pirrotita que

muestran bordes de oxidación; textura lamelar en magnetita y crecimiento coliforme en oxihidróxidos de Fe.

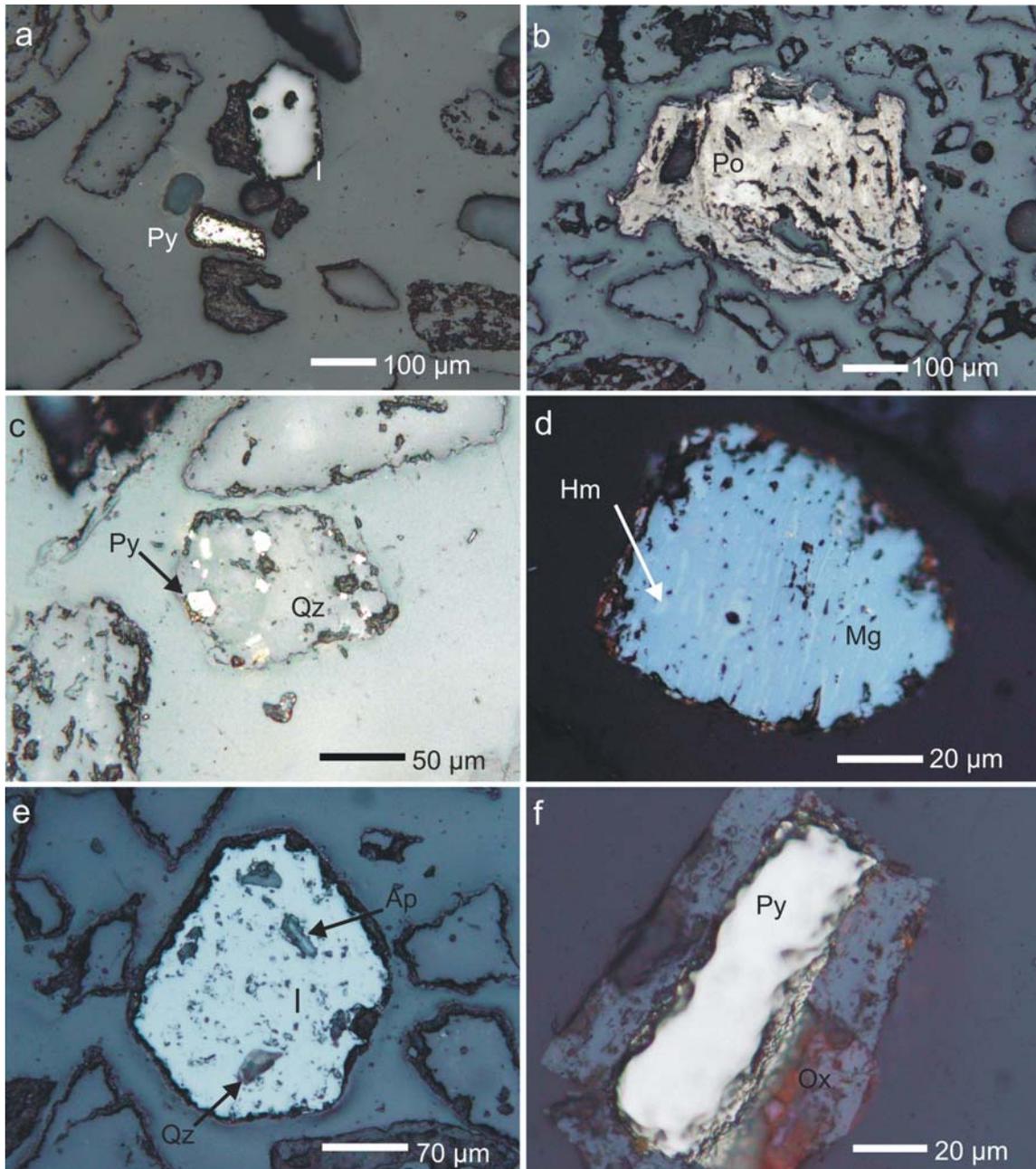


Fig. 19 Fotografías de microscopio mineralográfico con luz paralela de las muestras correspondientes al perfil 5. a) partículas de pirita e ilmenita (muestra E5H5, objetivo 10x). b) partícula de pirrotita en la muestra E5H6 (objetivo 10x). c) partícula de cuarzo que incluye cristales subedrales de pirita (muestra E5H5). d) fragmento de magnetita que presenta rasgos de exolución con hematita y borde de oxidación (muestra E5H5, objetivo 50x). e) partícula subedral de ilmenita con inclusiones de cuarzo y apatito. f) partícula de pirita que muestra remplazamiento concéntrico por oxihidróxidos de Fe. Py: pirita, I: ilmenita, Po: pirrotita, Mg: magnetita, Hm: hematita, Qz: cuarzo, Ap: apatito, Ox: oxihidróxios de Fe.

La pirita y la pirrotita se encuentran asociados generalmente con hematita, goethita-limonita y otras fases no cristalinas de Fe. Se presentan como partículas mixtas que en algunos casos exhiben bordes de corrosión por remplazamiento supergénico o secundario y en otros caso presentan remplazamiento concéntrico de probable origen hipogénico (ver figura 19b y 19f). La pirita y la ilmenita se presentan en múltiples casos como pequeñas inclusiones en cuarzo y feldespatos (figura 19c), a su vez la ilmenita suele contener inclusiones de cuarzo y en ocasiones de apatito (figura 19e). La galena y la magnetita son escasas y se presenta únicamente como partículas monominerales de tamaño inferior a 50 μm y 100 μm , sin embargo excepcionalmente la magnetita presenta bordes de oxidación y textura lamelar con hematita (figura 19f).

7.2.4. Perfil 7

Este perfil se localiza en el distrito de El Oro, se encuentra depositado sobre rocas piroclásticas cenozoicas de color ocre, mide 160 cm y contiene 7 horizontes. Su color es gris claro a gris medio con niveles pardos-verdoso, así mismo, presenta zonas de coloraciones roja-anaranjada y azul-verdosa que corresponden a lixiviados producto de la oxidación de minerales metálicos, los cuales se acumulan principalmente en la base del depósito, al contacto con la roca. La textura varía entre limosa y franco arenosa. El porcentaje de minerales opacos es variable y se encuentra entre el 2 y el 5%.

Desde el punto de vista de la mineralogía y caracterización de las fases metálicas resulta ser el perfil de mayor interés ya que presenta una gama singular de fases minerales opacas constituida por: pirita, ilmenita, calcopirita, arsenopirita, galena, covelita, aguilarita, freibergita, tennantita, hematita y goethita-limonita (figura 20). Sin embargo, la mineralogía es variable a lo largo del perfil, lo que permite definir zonas de concentración para determinadas especies minerales. Así, la parte superior contiene únicamente pirita, mientras que la parte media (horizontes 3 y 4) se caracteriza por la presencia de pirita, calcopirita, arsenopirita, pirrotita, covelita, galena y sulfosales de Ag y Au; la parte inferior contiene únicamente galena e ilmenita. La presencia de oxihidróxidos de Fe es constante en todas las muestras.

El carácter mineralógico de las partículas es variable, en los niveles superior e inferior suelen presentarse como partículas monominerales, mientras que en el nivel medio predominan

las de carácter mixto, llegándose a presentar partículas compuestas hasta por seis fases minerales. Otros rasgos texturales presentes en el perfil son: remplazamiento por alteración principalmente en la pirita, zoneamiento concéntrico, presencia de partículas subedrales de ilmenita y textura lamelar en oxihidróxidos de Fe.

Texturalmente, las muestras del perfil 7 se caracterizan por contener partículas opacas de tamaño variable entre 20 y 600 μm , así como partículas menores de 60 μm contenidas como inclusiones en minerales transparentes como cuarzo y feldespatos.

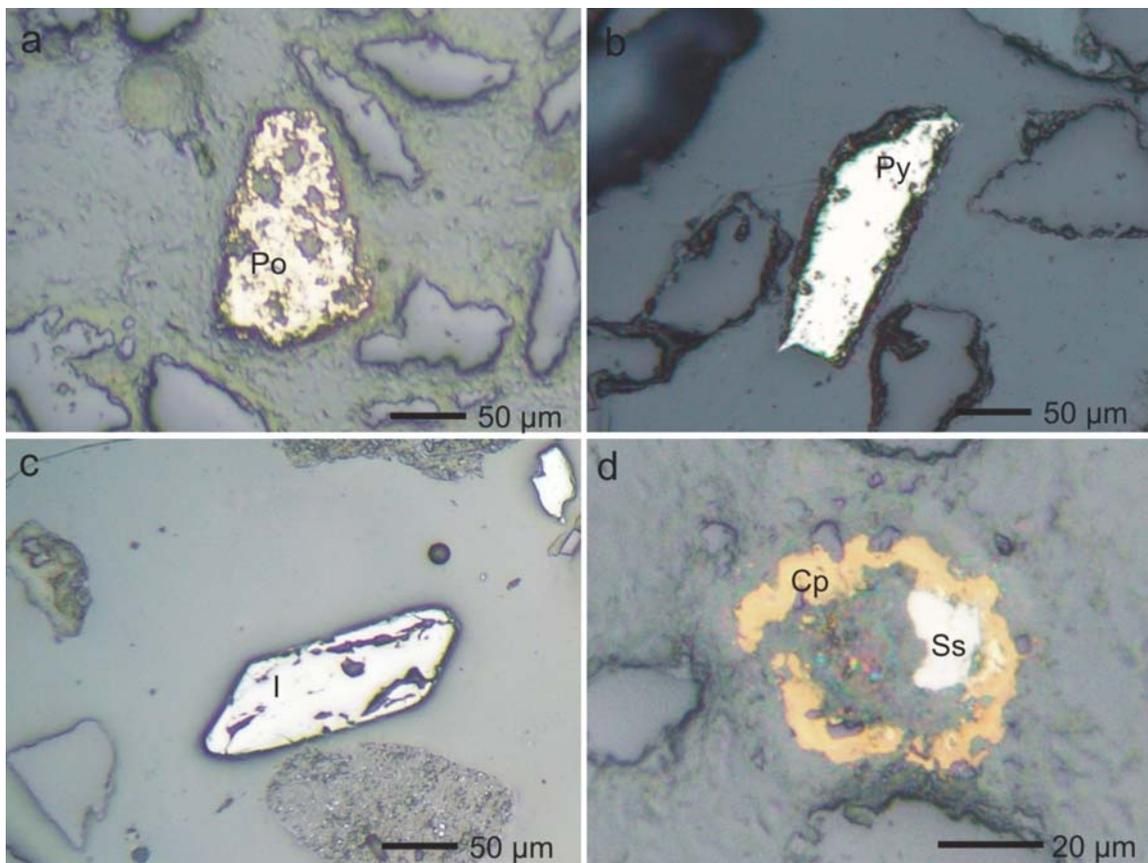


Fig. 20 Imagen de microscopio minerográfico con luz paralela que muestra la gama mineralógica más representativa del perfil del perfil 7. a) partícula de pirrotita (Po) exhibiendo bordes de oxidación incipientes e inclusiones de minerales transparentes. b) fragmento de pirita (Py) con bordes de oxidación. c) sección longitudinal de ilmenita (I) y en la parte superior derecha un fragmento de galena. d) detalle de una partícula mixta, se observan calcopirita (Cp) en color amarillo, sulfoseleniuros y sulfosales en tonos de gris rosáceo y azulado (Ss).

Microscopía electrónica aplicada a las muestras del perfil 7

La técnica de microscopía electrónica permitió la identificación de fases minerales auro-argentíferas las cuales se encuentran contenidas en partículas mixtas cuyo carácter textural puede ser alguno de los siguientes:

1. Intercrecimiento entre fases auro-argentíferas.
2. Una o más fases auro-argentíferas contenidas como inclusiones en cuarzo.

Fueron obtenidos mapas de distribución de Au y Ag en partículas del tipo 1 a partir de barridos por elemento utilizando MEB como puede observarse en la figura 21.

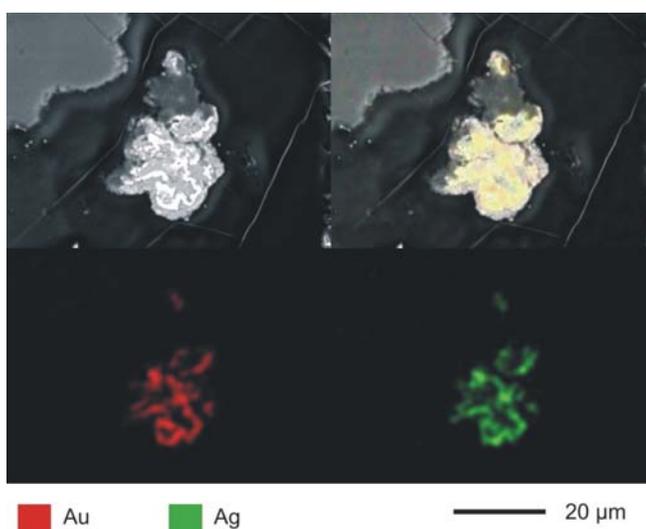


Fig. 21 *Imágenes de microscopio electrónico de barrido. La fotografía en el recuadro superior izquierdo muestra el aspecto de una partícula mixta de dos fases auro-argentíferas intercrecidas. El recuadro superior derecho muestra la distribución de Au y Ag en la partícula, los recuadros inferiores muestran la distribución de cada elemento por separado.*

La partícula de la fotografía anterior se encuentra contenida en la muestra correspondiente al horizonte E7H3 y representa un fragmento mixto formado por dos fases minerales argentíferas. Cada una de las fases fue sometida a un análisis de espectroscopía de rayos-X por energía dispersiva (EDS) resultando picos característicos de Cu, Fe, S, Au y Ag. Con base en el espectro de rayos-X y de acuerdo a las propiedades ópticas de la partícula se deduce que la región en tono gris consiste en freibergita?, mientras que la zona blanca consiste en oro

enriquecido en plata. A continuación, la figura 22 muestra los puntos medidos y su respectivo espectro.

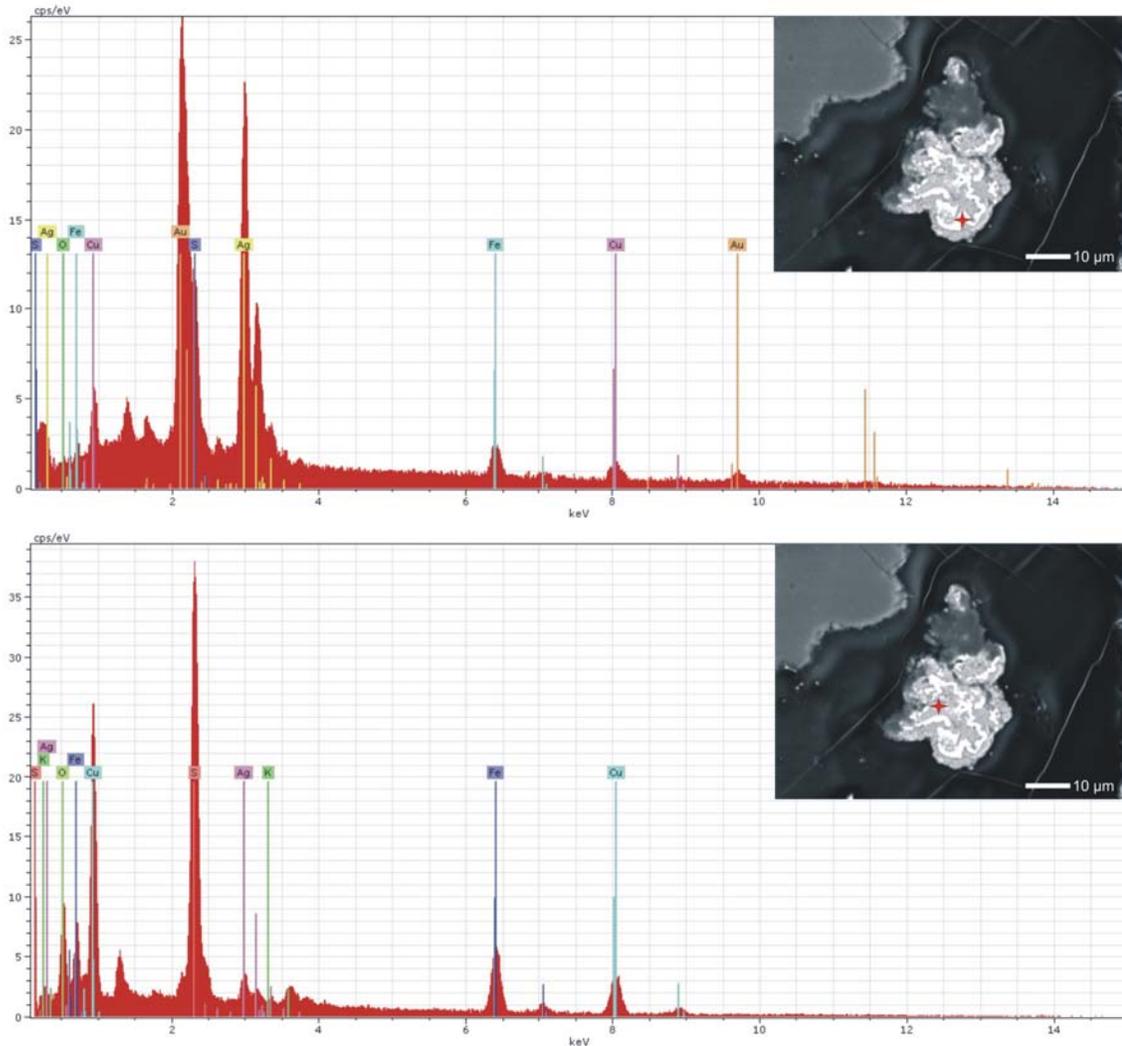


Fig. 22 Espectros de rayos-X de energía dispersiva (EDS) obtenidos para una partícula mixta de dos fases minerales perteneciente a la muestra E7H3. La imagen superior muestra el análisis de una amalgama de oro y plata distribuida en la parte más luminosa de la partícula. La imagen inferior muestra un análisis de freibergita que presenta enriquecimiento en plata.

El caso más notable de fragmentos minerales de carácter mixto es el de aquellas partículas formadas por el intercrecimiento de más de 2 fases minerales auro-argentíferas. Este caso es exclusivo de los horizontes E7H3 y E7H4, en ambas muestras fueron detectadas partículas caracterizadas por presentar en los bordes un crecimiento concéntrico a modo de

corona, la cual engloba una serie de fases minerales intercrecidas de manera aleatoria. Al igual que el caso anterior, se llevaron a cabo mediciones puntuales por EDS en partículas de este tipo.

Las figuras 23 y 24 muestran el análisis de un fragmento mineral que contiene al menos 5 fases minerales opacas intercrecidas. De acuerdo con la figura 23a la fase mineral medida consiste en S, Cu, Fe y Ag, de lo cual, y de acuerdo a las propiedades ópticas, se deduce que se trata de calcopirita enriquecida en Ag. La figura 23b muestra un punto donde sobresale la presencia de As, de acuerdo a sus propiedades ópticas se trata de tennantita-tetraedrita. Las fases se encuentran distribuidas en la partícula a modo de corona.

La figura 24c muestra un punto de medición en el interior de la corona de calcopirita, el espectro de rayos-X presenta picos importantes de Au, Ag, Cu, Fe y S. A partir de microscopía óptica de luz reflejada se puede observar que la región analizada se caracteriza por presentar una tonalidad gris verdosa lo que hace pensar que se trata de freibergita?. La figura 24d muestra otro punto de medición interno en una región caracterizada ópticamente por tonalidades grises azuladas y ligera anisotropía, el espectro de rayos-X muestra la presencia de Ag, Se, y S, lo cual permite afirmar que dicha región consiste en aguilarita.

Otra forma en que se presentan las fases auro-argentíferas consiste de una o más fases contenidas como inclusiones en cuarzo. En la figura 25 se muestra el análisis por espectrometría de rayos-X con energía dispersiva de una partícula de este tipo perteneciente a la muestra E7H3. En las fotografías se observa la textura de inclusión típica de estas partículas, donde la región en tono gris oscuro consiste en cuarzo (recuadro inferior) y la región más luminosa consiste en una fase auro-argentífera, de acuerdo a las propiedades ópticas y a los espectros de las figuras intermedia y superior se deduce que se trata de aguilarita.

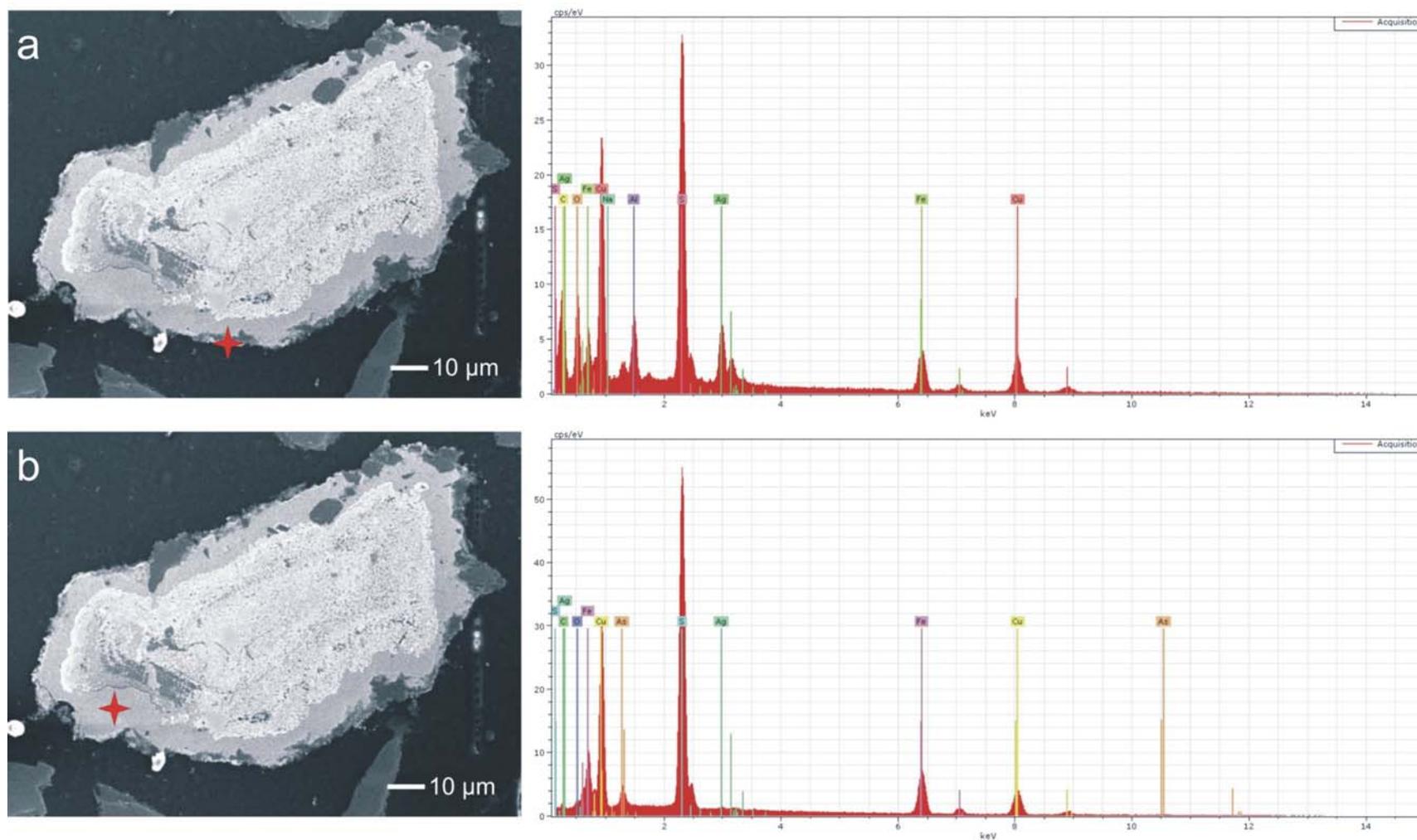


Fig. 23 Imágenes de SEM que muestran los puntos de medición por EDS en una partícula mixta constituida por al menos 5 fases minerales opacas, perteneciente a la muestra E7H3. a) Punto de medición y espectro de una región que consiste en calcopirita rica en Ag. b) Punto de medición y espectro de una región donde destaca la presencia de un pico de As y que consiste en tennantita-tetraedrita.

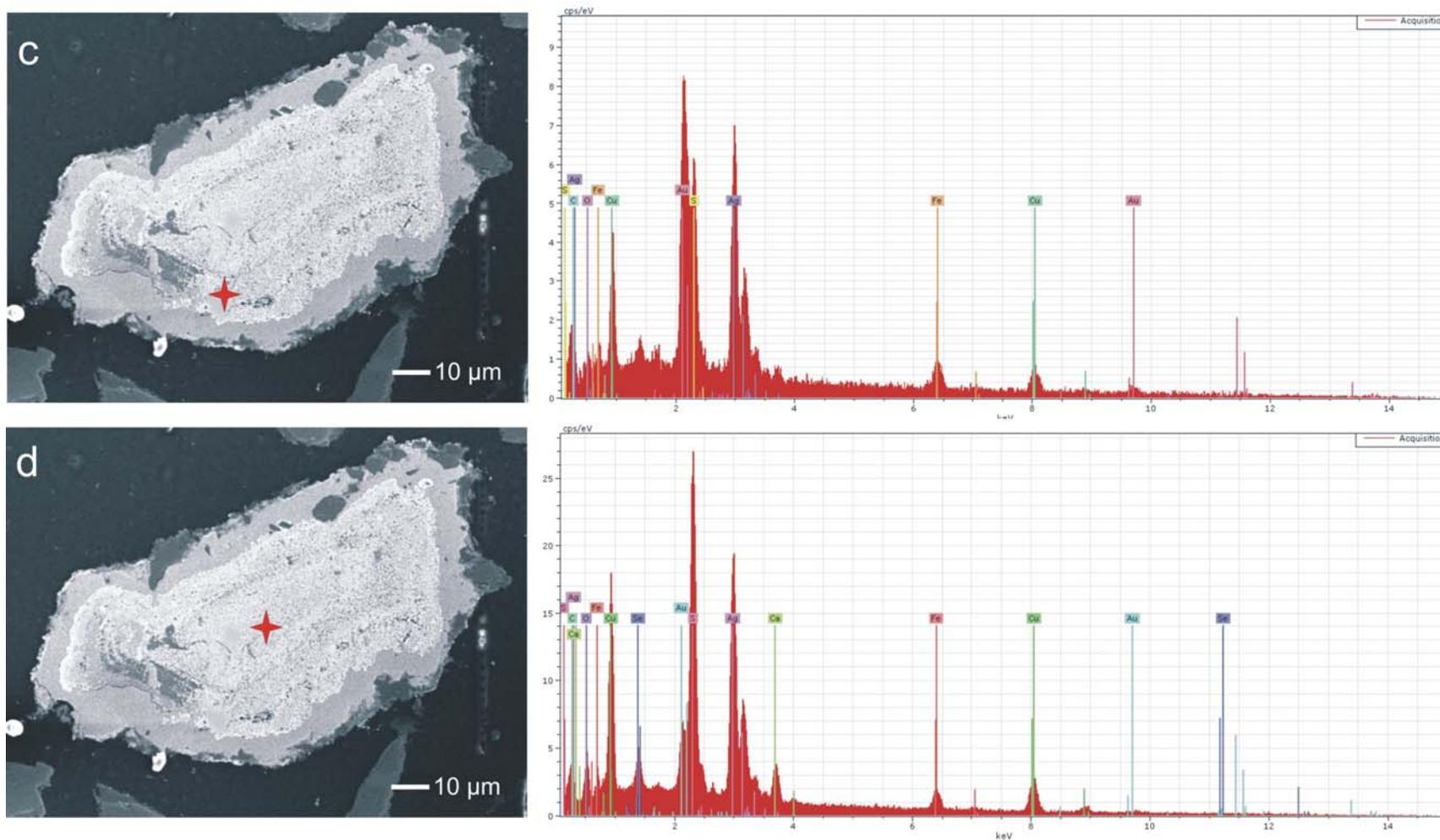


Fig. 24 Imágenes de SEM que muestran los puntos de medición por EDS en una partícula mixta constituida por al menos 5 fases minerales opacas, perteneciente a la muestra E7H3. c) Punto de medición y espectro de una región que consiste probablemente en freibergita. b) Punto de medición y espectro de una región que consiste en agularita.

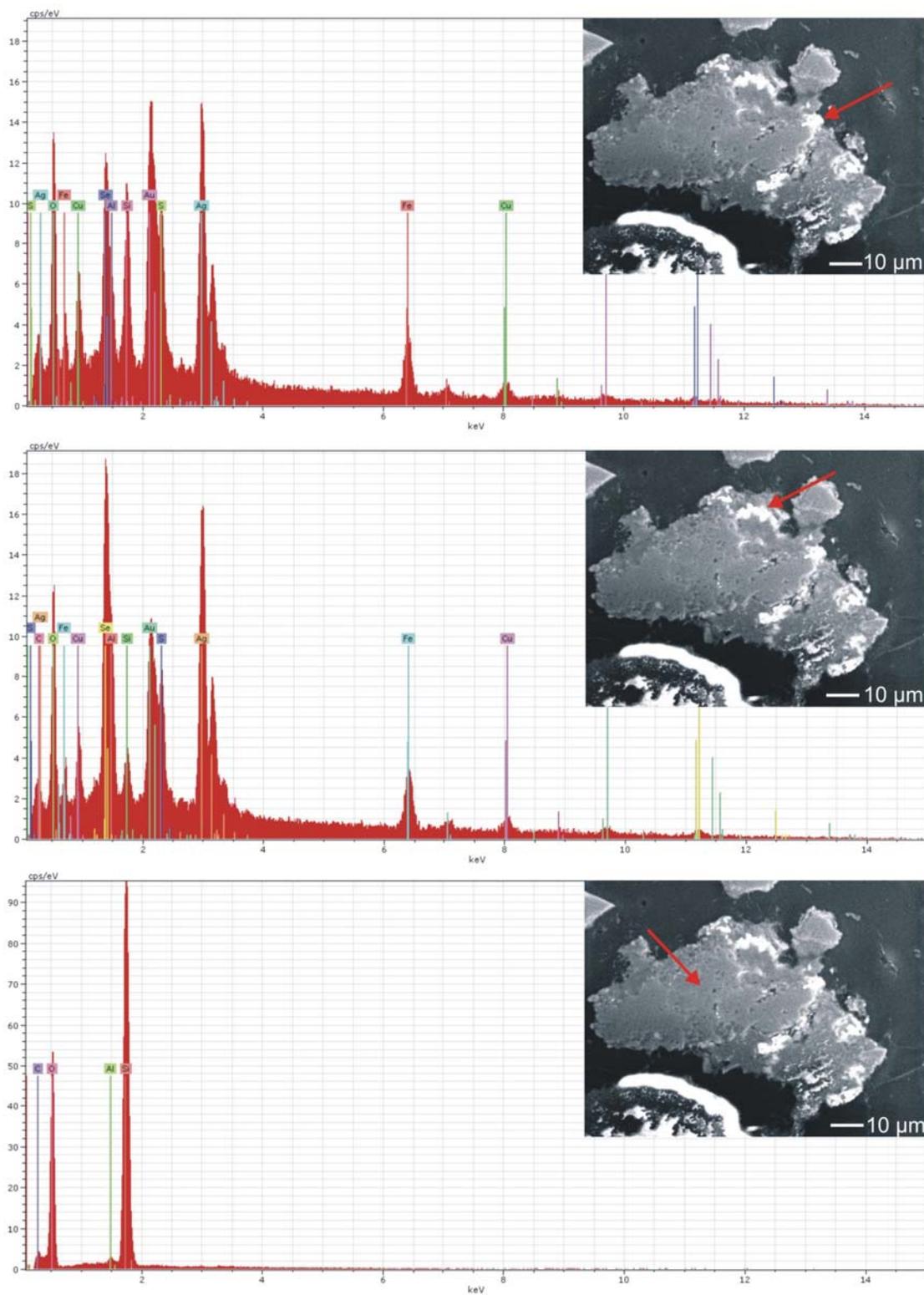


Fig. 25 Imágenes de SEM que muestran el análisis por EDS en una partícula mixta de cuarzo que presenta inclusiones de aguilera con pequeñas inclusiones de oro, las flechas en las fotografías indican el punto de medición en la partícula. Los espectros de los recuadros superior e intermedio muestran picos de Au, Ag, Se y S.

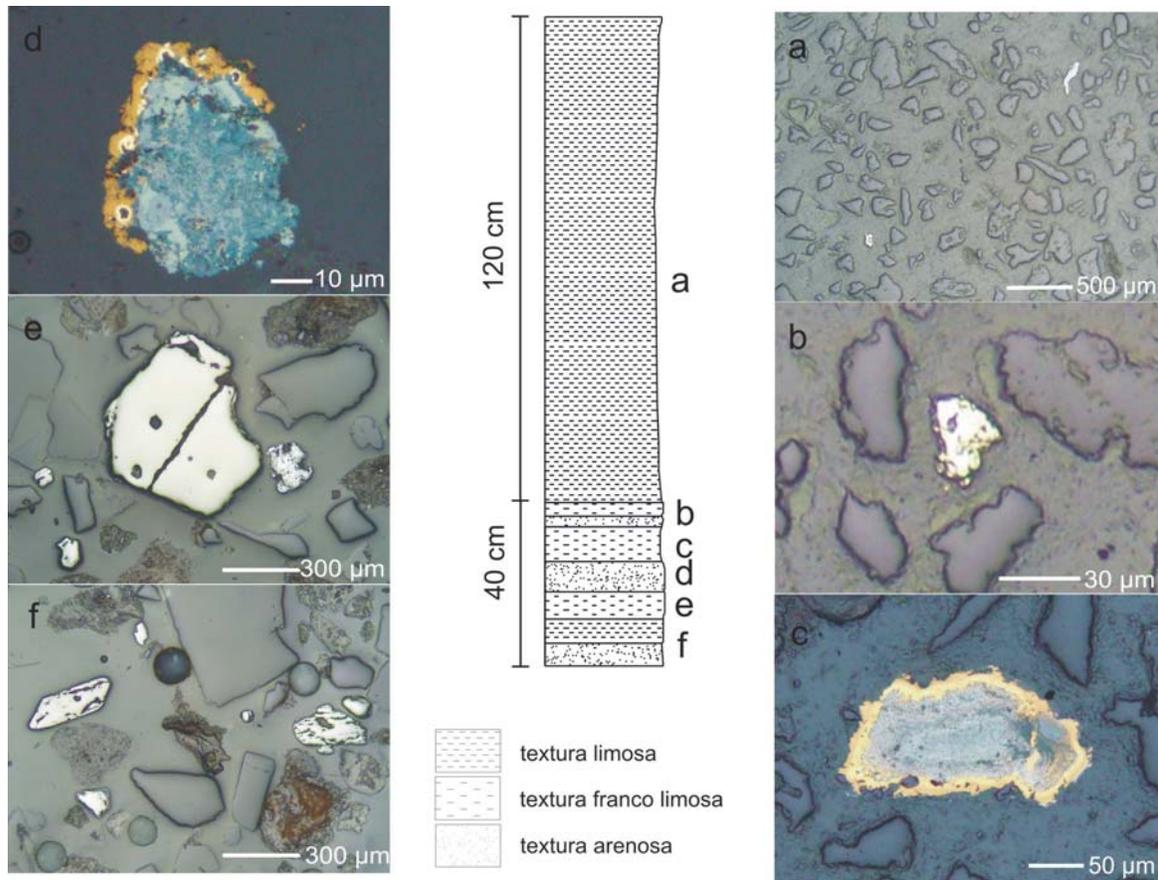


Fig. 26 Esquema sintético que muestra los diferentes horizontes del perfil E7 y las variaciones mineralógicas verticales identificadas. a) aspecto general de la parte superior del perfil donde se aprecia la poca cantidad de partículas minerales opacas las cuales consisten en pirita, hematita y goethita (microscopio minerográfico con luz paralela). b) partícula de pirita característica de los niveles intermedios del perfil (microscopio minerográfico con luz paralela). c) partícula mixta perteneciente al horizonte E7H 3 constituida por cuarzo, calcopirita, freibergita? y aguilarita que exhibe crecimiento concéntrico en el borde (microscopio minerográfico con luz paralela). d) partícula mixta similar a la anterior perteneciente al horizonte E7H4, este nivel del perfil se caracteriza por la presencia de distintas fases minerales auro-argentíferas. e) al centro partícula subedral de ilmenita, a la derecha de la ilmenita un fragmento de hematita en tono más claro (microscopio minerográfico con luz paralela). f) aspecto del nivel inferior del perfil caracterizado por la presencia de ilmenita (fragmento subedral a la izquierda, hematita a la derecha y galena (pequeño fragmento blanco en la parte superior de la fotografía).

7.2.5. Perfil 9

El perfil 9 se ubica en el distrito de Tlalpujahuá, mide 90 cm y pueden distinguirse 5 diferentes horizontes. Presenta distintas tonalidades de pardo y niveles de tonos grises oscuros y pardos-amarillentos. La textura es claramente heterogénea, varía entre franco arcillo-limosa, franco-limosa, limosa y franco arenosa. Fueron estudiadas únicamente 2 muestras que

corresponden a la parte media-inferior del perfil, en la que el contenido de minerales opacos es aproximadamente del 3%.

Las fases minerales opacas identificadas son por un lado pirita, calcopirita, magnetita, las cuales están contenidas únicamente en la base del perfil; y por otro lado hematita y goethita-limonita, las cuales se presentan a lo largo de todo el perfil de manera aleatoria.

Los rasgos texturales principales son bordes de reacción y remplazamiento, microbrechamiento entre cuarzo y pirita, partículas minerales mixtas e inclusión de fases opacas en minerales transparentes. La granulometría de las fases opacas varía entre 30 μm y 350 μm , mientras que las inclusiones se presentan en tamaño menor a 30 μm y se encuentran contenidas principalmente en cuarzo y excepcionalmente en feldespatos.

A continuación, la figura 27 muestra las características mineralógicas y texturales predominantes en el perfil E9.

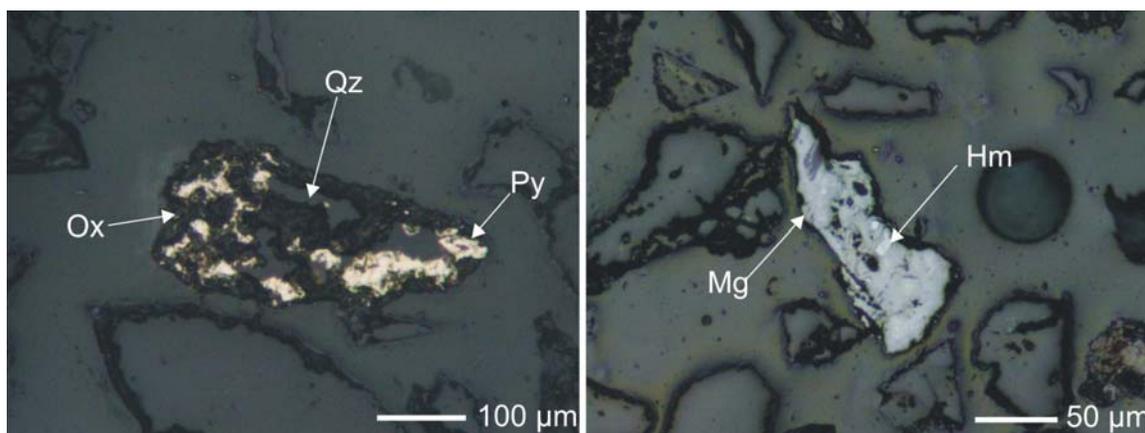


Fig. 27 Fotomicrografías de microscopio minerográfico con luz paralela que muestran, a la izquierda una partícula mixta de pirita y cuarzo intercrecidos y una corona de reacción constituida por oxihidróxidos de Fe (objetivo de 10x); a la derecha una partícula mixta compuesta por magnetita y hematita.

7.2.6. Perfil 10

Se localiza en el distrito de Tlalpujahuá, mide aproximadamente 260 cm y consta de 3 horizontes con tonalidades pardas grisáceas oscuras y en algunos niveles gris verdoso. La textura es variable y va de franca arcillosa a limosa y franca arenosa. Las fases minerales opacas varían entre 1% y 2% del total de la muestra.

Los minerales opacos presentes son pirita, calcopirita, magnetita, hematita y goethita-limonita, sin embargo la mayor parte consiste en hematita y goethita-limonita, los cuales suelen estar asociados y presentan como partículas mixtas. La pirita exhibe generalmente texturas de remplazamiento por alteración, presentándose en algunos casos coronas de reacción, en otros remplazamiento aleatorio y en casos excepcionales remplazamiento a través de las zonas de crecimiento del mineral. En la figura 28 se presenta una muestra de la mineralogía del perfil E10, la fotografía (a) muestra una partícula de magnetita con pequeñas inclusiones de cuarzo (puntos grises dentro del mineral); la fotografía (b) muestra una partícula mixta formada por hematita que está siendo reemplazada por goethita-limonita; el recuadro (c) muestra un fragmento mixto constituido por calcopirita intercrecida con cuarzo y la fotografía (d) muestra una partícula de pirita que presenta remplazamiento a través de sus fracturas y sus bordes.

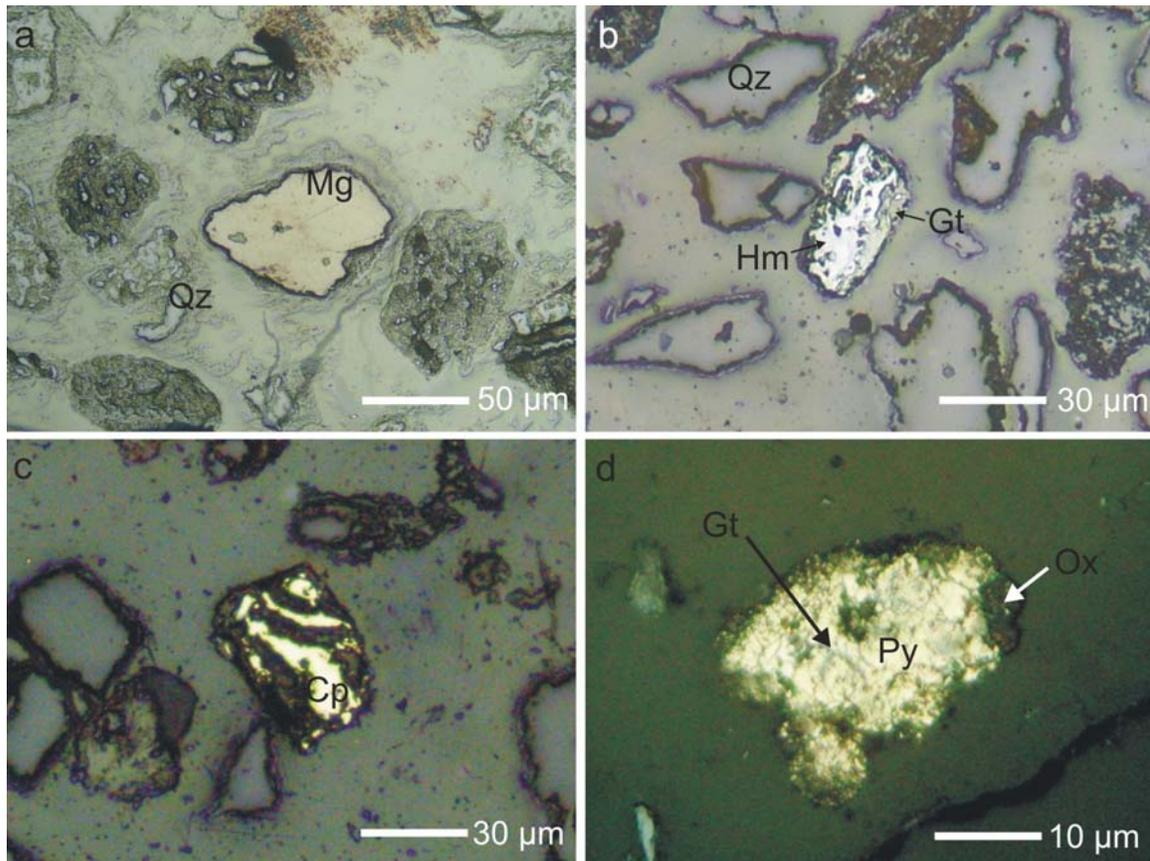


Fig. 28 Fotografías de microscopio de luz reflejada que muestran la mineralogía del perfil E10 (luz paralela) Mg: magnetita, Qz: cuarzo, Hm: hematita, Cp: calcopirita, Gt: goethita-limonita, Py: pirita, Ox: oxihidróxidos de Fe.

Este perfil muestra un contenido de hematita y goethita-limonita constante, la variación mineralógica vertical está marcada por la presencia de pirita, calcopirita y magnetita en los niveles superiores, mientras que en la parte inferior contiene únicamente calcopirita.

El tamaño de las partículas opacas del perfil 10 varían entre 20 μm y 200 μm , mientras que el tamaño de aquellas que se encuentran incluidas en minerales transparentes es menor a 20 μm .

7.2.7. Muestras de terreros

Los depósitos de terreros son acumulaciones de material de tamaño mayor a 5 cm, consisten principalmente en cuarzo de veta y presentan generalmente pequeñas cantidades (<10 %) de minerales opacos sumamente alterados los cuales no pueden reconocerse a simple vista debido a que han sido remplazados casi completamente por óxidos.

Las muestras de terreros permitieron conocer de manera especial acerca de la química y mineralogía del yacimiento debido a que representan un material de veta que no ha sido procesado. El ensaye de Au y Ag por fusión y apartado con determinación gravimétrica resultó positivo en ambos casos, determinándose los siguientes valores.

Muestra	Au (g/T)	Ag (g/T)
Te1	41	123
Te2	0	14

Microscópicamente se observa que la mineralogía consiste en su mayoría en cuarzo presentándose pequeñas cantidades de goethita-limonita, pirita y calcopirita. Debido a las características mineralógicas de estos residuos y a los altos valores de Au y Ag, es muy probable que los valores se encuentren diseminados en forma nativa en el cuarzo.

7.2.8. Variaciones mineralógicas espaciales en los depósitos de jales

La composición mineralógica de los horizontes contiguos es en algunos casos la misma o presenta variaciones transicionales de uno a otro. No obstante, en algunos casos la variación mineralógica vertical es drástica, dicho atributo fue detectado aún en los casos en que no se estudiaron perfiles completos. Los ejemplos más notables de variación mineralógica vertical corresponden a la estaciones de muestreo de los perfiles E3, E5 y E7 (ver figuras 12, 18 y 26).

Horizontalmente es posible también definir zonas de concentración para determinados minerales. El perfil E7 ubicado en El Oro, por ejemplo, es el único punto donde se identificaron fases minerales auro-argentíferas y arsenopirita. Por otro lado, todos los perfiles estudiados contienen pirita en alguno de sus horizontes, con excepción del perfil E4 localizado en El Carmen (figura 10) el cual se encuentra dentro de un depósito de material removido durante el desbordamiento de una presa de jales. Así mismo los perfiles E3, E5 y E7 son los únicos que contienen ilmenita, mientras que E7, E9 y E10 se distinguen del resto por contener calcopirita, mientras que la pirrotita se encuentra presente únicamente en el perfil E5 y escasamente en el perfil E7. Los oxihidróxidos de Fe son las fases minerales más constantes y aunque presentan variaciones verticales aleatorias suelen encontrarse en todos los perfiles.

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Por medio de los análisis minerográficos, DRX, petrográficos y de MEB se han identificado un número importante de fases minerales opacas en los jales del DMOT. Su origen tiene que ver en gran medida con el desarrollo de los depósitos minerales hidrotermales de la región y en algunos casos con procesos de formación de nuevos minerales relacionados a reacciones químicas ocurridas dentro del depósito de jales. Este hecho es entendible si consideramos que los residuos mineros del DMOT han estado expuestos a los agentes de meteorización durante cientos de años.

La presencia de determinados elementos químicos de interés medio ambiental y/o económico, está relacionada en ambos casos con el contenido y distribución de las fases minerales opacas. El contenido de minerales metálicos es variable de una zona a otra del depósito, sin embargo, aunque en diferente proporción dichos minerales se encuentran siempre presentes en el residuo aunque representen en ocasiones menos del 1% del total de material. Por lo tanto, los jales del DMOT pueden considerarse como un material heterogéneo, siendo el cuarzo su principal constituyente, llegando a representar hasta el 99% de algunas muestras, las cuales presentan contenidos variables en el porcentaje de fases opacas presentes, ya sea espacial (área) o temporalmente (horizontes pseudo-estratigráficos)

A continuación se discuten algunos aspectos importantes que han resultado del estudio microscópico de los minerales opacos contenidos en los jales de El Oro-Tlalpujahuá, como son:

- Génesis de las fases minerales opacas contenidas en los jales.
- Ocurrencia de EPT's y de elementos de importancia económica.
- Variaciones espaciales en la concentración y en la mineralogía de las fases minerales opacas.

8.1. Génesis de los minerales opacos contenidos en los jales

La mayoría de las fases minerales metálicas identificadas en los jales del DMOT coinciden con las reportadas recientemente por Ostroumov (2002) en un estudio sobre muestras obtenidas directamente de las vetas del Distrito minero El Oro-Tlalpujahuá.

Como es lógico, la composición mineral de los jales estudiados, además de contener partículas coherentes a la litología del distrito (fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, cuarzo de veta, etc.); contiene remanentes de los minerales de mena u otros minerales accesorios o de alteración. A continuación en la tabla 6 muestra las fases minerales identificadas en los jales y su clasificación metalogénica de acuerdo con diversos trabajos sobre el origen, la evolución y las relaciones paragenéticas del yacimiento del distrito (e. g. Flores, 1920; De la Teja, 1999; Ostroumov, M., 2002).

Tabla 6 Clasificación metalogénica de las fases minerales opacas contenidas en los jales

Fases minerales opacas contenidas en los jales	
Origen hipogénico	Origen supergénico
Pirita (FeS ₂)	Hematita (Fe ₂ O ₃)
Calcopirita (CuFeS ₂)	Otros minerales no reportados
Arsenopirita (FeAsS)	
Pirrotita (Fe ₁₁ S ₁₂)	Ilmenita (FeTiO ₃)
Galena (PbS)	Titanomagnetita (Fe, O, Ti)
Magnetita (Fe ₃ O ₄)	Goethita-limonita (αFeO (OH))
Covelita (CuS)	Otros oxihidróxidos
Freibergita (Ag, Cu, Fe) ₁₂ (Sb, As) ₄ S ₁₃	
Aguilarita (Ag ₄ SeS)	
Au enriquecido en Ag (electrum)	
Tennantita (Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃)	

Como se puede observar, el contenido de fases minerales opacas consiste en una serie de sulfuros, óxidos, oxihidróxidos y en menor medida seleniuros, elementos nativos y sulfoseleniuros. Muchos de estos minerales son típicos de yacimientos minerales epitermales y han sido reportados en otros depósitos de jales del país (e. g. Armienta, M.A. et al., 2003; Talavera, O. et al., 2005)

Entre las fases minerales de origen primario (hipogénicas y supergénicas) sobresale la presencia de minerales auro-argentíferos. Algunas de estas fases junto con otros sulfuros se encuentran asociados en partículas de carácter mixto (figuras 22, 23, y 24) y permiten definir un

cuadro paragenético que coincide con los reportados en estudios metalogénicos del distrito, como se plantea a continuación:

tennantita » aguilarita » freibergita » oro» calcopirita

La relación genética y textural sugiere por lo tanto un sucesión mineral que tiene que ver con el desarrollo de minerales hipogénicos y supergénicos (Ostoumov, M., 2002), lo cual es reconocible en las partículas del jal (figura 29).

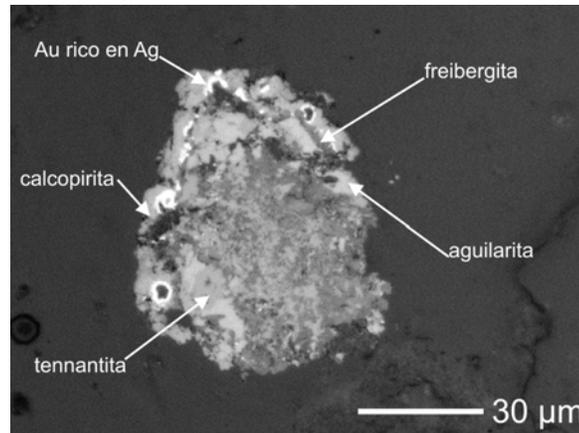


Fig. 29 *Fotomicrografía con luz paralela de una partícula mixta de origen hipogénico y supergénico, compuesta por fases minerales auro-argentíferas.*

En la tabla 6 puede observarse además, una columna que enlista algunas fases minerales no reportadas como parte del yacimiento, y que sin embargo representan una porción importante (60%) del volumen de minerales opacos de los jales. El caso de la ilmenita y de la titanomagnetita podrían estar relacionados a minerales accesorios de rocas ígneas intrusivas y extrusivas, en cuanto generalmente son fases raramente presentes en depósitos hidrotermales. Por lo tanto podrían provenir de los cuerpos ígneos que intrusionan las secuencias mesozoicas de la región (figura 4), ya que parte de estos cuerpos pudieron ser procesados como roca encajonante junto con el material de veta quedando rezagados en el residuo. Dada su relativa escasez no tienen valor económico.

Es de llamar la atención que en las muestras estudiadas sean más frecuentes minerales como ilmenita y titanomagnetita que sulfuros como pirita y galena, lo cual se debe

probablemente a las características del yacimiento (pocos sulfuros) y a la resistencia a la alteración de dichos minerales.

La presencia de goethita-limonita y otros oxihidróxidos de Fe que no pudieron ser caracterizados con precisión, por su parte, sugieren la existencia de reacciones químicas dentro del depósito de jales y la formación de minerales secundarios. La goethita y demás oxihidróxidos de Fe, son fases secundarias típicas en innumerables depósitos de jales y ocurren universalmente (Jambor, J. L., 1994). El conocimiento de su presencia en los desechos mineros no es trivial e incluso, su identificación es parte de los objetivos de muchos estudios mineralógico-ambientales en jales (e. g. Blowes, D.W. et al., 1991; Jambor, J. L., 1994; Shaw, S.C. et al., 1998), esto se debe a que representan una evidencia de los procesos de oxidación y generación de drenaje ácido, además de ser importantes complejos adsorbentes de iones metálicos potencialmente tóxicos.

La presencia de oxihidróxidos de Fe, sin embargo, no es suficiente para asegurar que estos fueron formados dentro del depósito de jales ya que pudieron desarrollarse por procesos supergénicos, sin embargo en los jales estudiados se observa en más de un caso partículas minerales quebradas producto de la molienda, que exhiben remplazamiento por estas fases a través de sus bordes lo cual es una evidencia de que su origen es secundario.

El caso de la covelita pudiera ser más complejo, este sulfuro se ha encontrado como mineral secundario en varios depósitos de jales del mundo, ocurriendo típicamente por debajo de la zona de oxidación, como granos diseminados, anillos de alteración y otros rasgos de remplazamiento parcial de sulfuros, especialmente en pirrotita y calcopirita (Jambor, 1994), sin embargo las relaciones texturales de este mineral en los jales del DMOT sugieren un origen primario (supergénico en el yacimiento).

8.2. Ocurrencia de EPTy de elementos de importancia económica (EPE) en los minerales metálicos

Una de las principales metas en este trabajo ha sido definir la ocurrencia de elementos metálicos de interés. La siguiente tabla muestra la mineralogía de los diferentes horizontes estudiados y el contenido de algunos metales obtenido en la caracterización geoquímica precedente.

Tabla 7 Mineralogía y concentración de algunos metales en los jales del DMOT

Muestra	Mineralogía	Au (g/T)	Ag (g/T)	Pb (g/T)	Zn (g/T)	As (g/T)	Cu (g/T)	TiO ₂ (%)
E3H1	Py, Gt,	1.6	38.9	51.3	116.3	51.3	29.1	0.2
E3H2	Py, H, Gt	0.9	26.2	70.3	147.1	64.1	43.8	0.3
E3H3	Py, Gn, H	1.7	38.9	60.4	123.5	55.1	35.7	0.3
E3H5	I, Tm, Gn, H, Gt	0.7	2.1	18.8	124.7	3.0	17.4	0.7
E3H6	I, Tm, Mt, Py, Gn, Gt	1.0	5.3	23.8	151.1	8.4	17.9	0.7
E4H2	I, Mt, Py, H	1.3	33.7	55.1	137.3	52.9	37.4	0.3
E5H2	Py, I, H, Gt	1.2	27.7	198.0	485.6	42.3	45.7	0.2
E5H3-A	Py, I, H	1.2	46.1	122.2	298.0	29.3	42.8	0.2
E5H4	Py, Gn, I, Gt	1.9	29.7	247.0	437.5	47.7	55.2	0.2
E5H5	Py, Po, Mg, Gn, H, Gt	1.0	39.6	184.3	298.8	34.1	43.9	0.2
E5H6	Po, Gn, Gt	0.6	2.3	25.7	63.8	5.3	21.3	1.1
E7H1	Py, H, Gt	1.7	71.1	317.5	527.0	29.7	20.9	0.1
E7H3	Py, Cp, Apy, Au, Fr, A, Cv, Gt	4.4	178.3	164.0	519.5	26.8	314.4	0.1
E7H4	Py, Cp, A, Fr, H, Gt	1.8	59.8	190.2	451.0	23.1	808.6	0.1
E7H5	I, H, Gt	1.9	12.4	27.0	370.9	11.3	41.4	1.4
E7H6	I, Gn, H	1.3	5.3	23.1	262.1	7.0	27.0	1.9
E7H7	I, Gn, H, Gt	0.8	2.7	33.6	79.2	7.3	64.7	1.4
E9H3	H, Gt	1.2	55.7	32.3	402.5	33.8	145.3	0.4
E9H4	Py, Cp, Mt, H, Gt	2.9	18.3	120.5	198.3	35.8	41.4	0.2
E10H2	Py, Cp, Mt, H, Gt	1.1	29.3	45.5	153.7	59.0	32.7	0.3
E10H4	Cp, H, Gt	1.3	57.0	83.6	185.6	71.5	68.0	0.2

Pirita=Py, Calcopirita=Cp, Arsenopirita=Apy, Galena=Gn, Ilmenita=I, Titanomagnetita=Tm, Magnetita=Mt, Freibergita=Fr, Aguilarita=A, Oro rico en plata (electrum)=Au, Covelita=Cv, Hematita=H, Goethita=Gt.

Aquellos niveles en los que fueron identificadas fases minerales opacas auro-argentíferas coincide con los que muestran los valores más altos de estos dos elementos y de otros asociados como Cu, Pb y As (ver anexo III para valores de arsénico). Este hecho es importante porque permite afirmar que los elementos involucrados ocurren como parte esencial de los minerales presentes. La figura 30 muestra esta correspondencia, la parte superior del perfil enriquecida en

Au, Ag, Cu y As, es coincidente con los horizontes donde fueron identificados aguilarita, freibergita?, tennantita-tetraedrita, calcopirita, covelita y arsenopirita. Así mismo, aquellos niveles donde el Ti presenta valores mayores es donde la ilmenita es predominante.

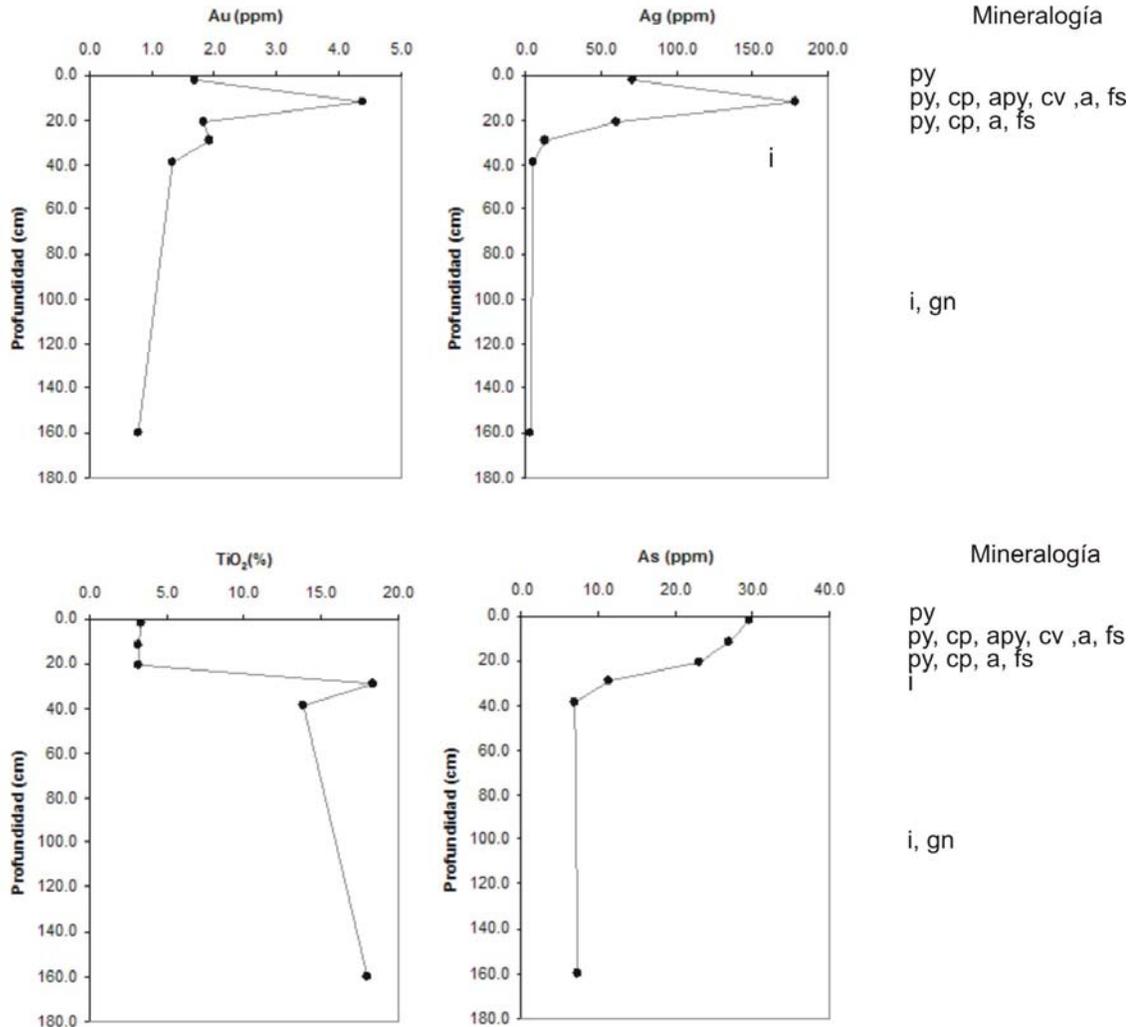


Fig. 30 Gráficas que muestran la concentración de Au, Ag, Ti y As respecto a la profundidad en el perfil E3, así como la mineralogía presente. Se observa la relación directa entre las fases minerales opacas y el la abundancia relativa del elemento químico correspondiente. py= pirita, gn=galena, i=ilmenita, apy=arsenopirita, cp=calcopirita, a=aguilarita, fr=freibergita, cv=covelita.

La relación de composición química y mineralógica en las fases opacas auro-argentíferas se manifiesta claramente en el grupo de las sulfosales. Por ejemplo, la figura 24c muestra un espectro de rayos-X que parece coincidir con la composición química de freibergita, no obstante la presencia de Au. Sin embargo, al graficar los contenidos totales de Ag y Au respecto a Sb queda claro que existe una relación directa la cual se justifica con la presencia de sulfosales de Sb

y Ag (figura 31), donde el Au podría ocurrir como traza en la estructura química de los minerales o como pequeñas inclusiones dentro de los mismos.

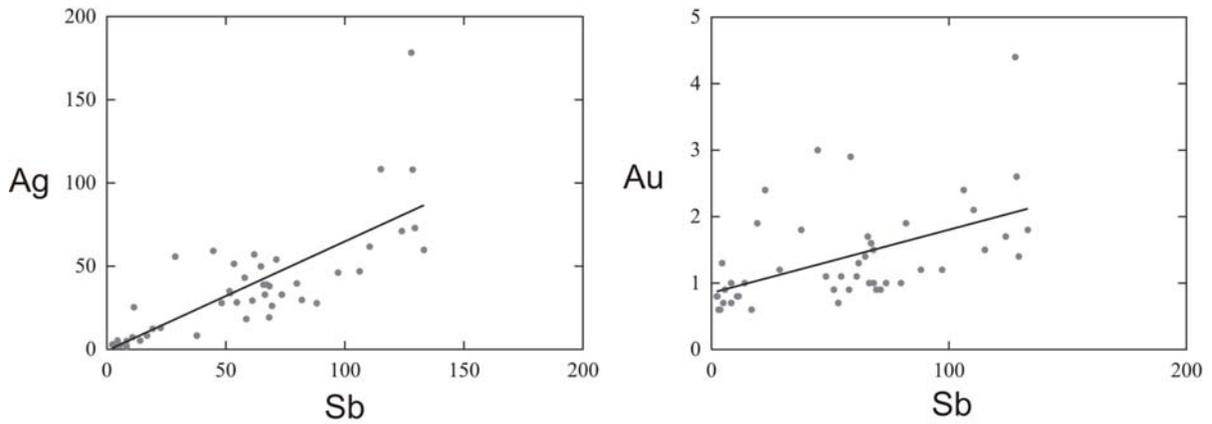


Fig. 31 Gráficas que muestran la relación directa entre Ag, Au y Sb (ppm), esta tendencia sugiere una fuente mineral común, lo cual se confirma con la presencia de sulfosales de estos elementos. Análisis de muestra total por ICP-MS.

Por otro lado, es oportuno hacer notar que además de las inclusiones de fases auro-argentíferas en sulfuros y sulfosales, otro carácter textural importante en la mayoría de los perfiles es la presencia de fases auro-argentíferas que ocurren como inclusiones en cuarzo. Este punto es relevante dada la escasez de partículas opacas y la enorme abundancia de cuarzo, por lo tanto la mayor parte del contenido de Au y Ag debe estar presente de esta forma, como se identificó en algunos horizontes (figura 25).

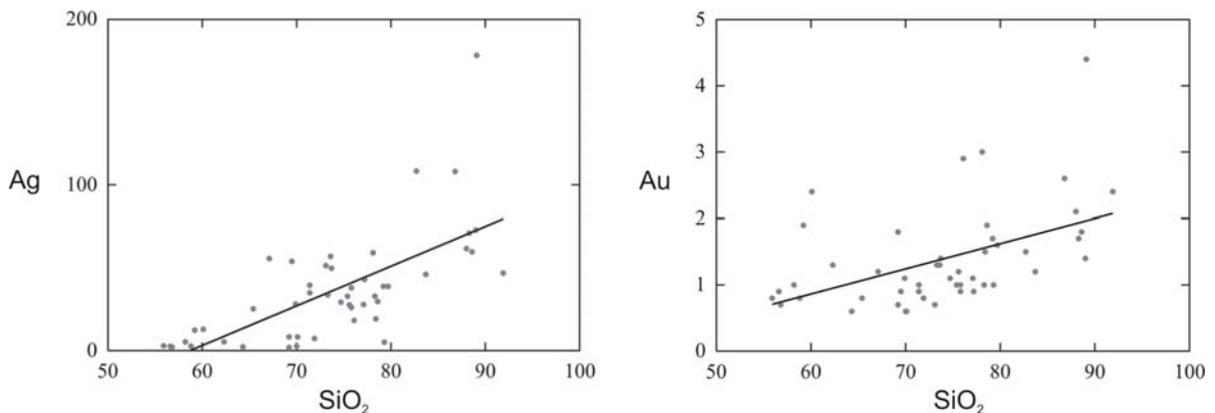


Fig. 32 Relación química del contenido de Au y Ag (ppm) respecto a SiO₂ (%) en análisis de muestra total por ICP-MS, la tendencia es coherente con la relación textural identificada entre los metales preciosos y el cuarzo.

Los datos químicos muestran que existe una relación directa entre los valores de Au y Ag con respecto a SiO₂ (figura 32), lo cual ha sido confirmado mineralógicamente (Robles et al., 2008), aunque no en todos los perfiles debido al nivel de detección de las técnicas empleadas, puesto que el tamaño de una fracción importante de las partículas del jal presenta tamaño de arcillas y el contenido promedio de Au es del 1.4 %.

En algunos otros horizontes los valores de Cu, Pb y Ti son coherentes también con la mineralogía, sin embargo existen horizontes en los que no se presentan o se presentan en cantidades mínimas los minerales metálicos que de acuerdo a su composición química teórica se esperaría que estuvieran presentes en aquellos horizontes donde el elemento metálico distintivo abunda. Tal es el caso del perfil E3 en el cual los horizontes que contienen galena no coinciden con aquellos donde los valores de Pb son más altos, como puede observarse en a figura 33.

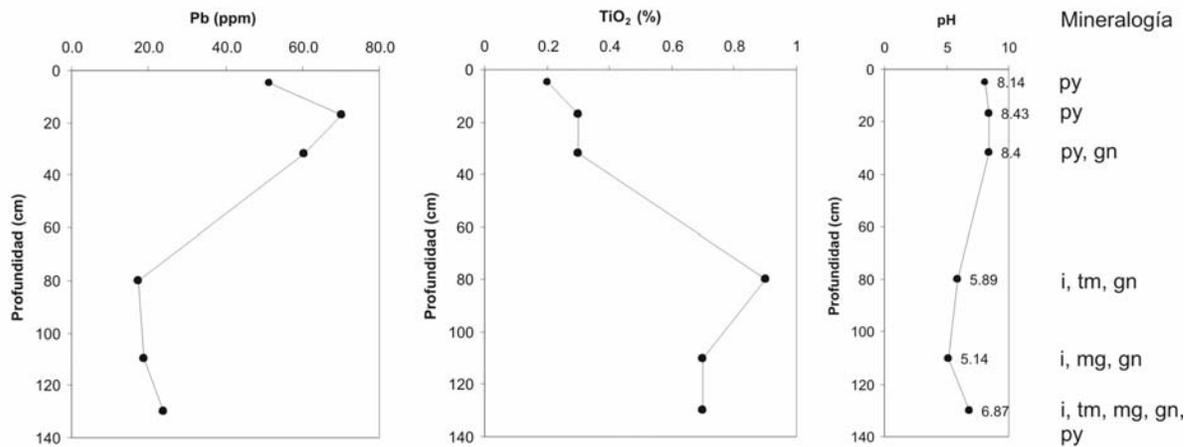


Fig. 33 Gráficos que muestran la concentración de Pb y Ti, el valor de pH y la mineralogía presente respecto a la profundidad en el perfil E3. py= pirita, gn=galena, i=ilmenita, tm=titanomagnetita, mg=magnetita.

De acuerdo a la imagen, el contenido más alto de Pb se presenta donde la galena está ausente y el pH es ligeramente alcalino. En contraparte la zona de mayor concentración de galena coincide con la región de menor concentración de Pb y de pH ligeramente ácido. Lo anterior sugiere que la galena no es el principal mineral de plomo en los jales, por lo que dicho elemento probablemente podría estar contenido en minerales transparentes como cerusita y anglesita o adsorbido en oxihidróxidos de Fe. En contraste, la abundancia de Ti a lo largo del perfil es coherente con el contenido de ilmenita y titanomagnetita como lo es en todos los horizontes

estudiados, por lo que las fuentes portadoras principales de este elemento son dichos minerales opacos.

Es evidente que las fases opacas portadoras de Fe son: pirita, calcopirita, pirrotita y en mayor medida oxihidróxidos como goethita, hematita y otras fases amorfas no identificadas, que como se mencionó pueden estar asociadas a otros elementos por el proceso de adsorción.

A continuación se presenta una tabla que resume la relación y el modo de ocurrencia mineral de algunos elementos potencialmente tóxicos y potencialmente económicos.

Tabla 8 *Ocurrencia de algunos elementos químicos de interés económico y ambiental.*

Elemento	Minerales opacos	Minerales transparentes
Fe	Pirita, calcopirita, pirrotita, magnetita titanomagnetita, ilmenita, goethita, hematita, otros oxihidróxidos no identificados con precisión	Jarosita*
Pb	Galena	Cerusita? anglesita?
Cu	Calcopirita, tennantita, covelita, freibergita	?
Ti	Ilmenita, titanomagnetita	?
Ag	Freibergita, aguilarita, electrum	?
Au	Electrum, freibergita, calcopirita	Cuarzo
As	Arsenopirita, tennantita	?
Zn	-	Goslarita?

* De acuerdo a Robles-Camacho et al., 2007

? minerales no reportados pero que pudieran estar presentes

Actualmente existen numerosos trabajos sobre geoquímica ambiental de jales (e. g. Razo, I. et al., 2004; Martínez Hernández, K. D. et al., 2005; Villaseñor-Cabral, M. G. et al., 2005; Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D., 2006; Gutiérrez-Ruiz, M. et al., 2007; etc.), sin embargo en pocos de ellos se ha planteado como objetivo determinar la mineralogía a detalle de los residuos y en particular la mineralogía de las fases opacas. A continuación se presenta una tabla que resume el contenido de minerales opacos reportados en jales de Taxco, Zimapán y de

Concepción del Oro, tres distritos mineros históricos del país, en comparación con los datos mineralógicos obtenidos en este trabajo.

Tabla 9 Comparación de la mineralogía de algunos jales del país

Minerales opacos	Distrito Minero			
	El Oro-Tlalpujahua	Zimapán ¹	Taxco ²	Concepción del Oro ³
Pirita	x	x	x	
Galena	x		x	
Esfalerita		x	x	x
Calcopirita	x	x	x	x
Pirrotita	x	x	x	
Arsenopirita	x	x	x	x
Covelita	x			
Calcocita			x	
Aguilarita	x			
Sulfosales de Ag	x		x	
Tetrahedrita-tennantita	x	x		x
Hematita	x		x	
Magnetita	x		x	
Ilmenita	x			
Titanomagnetita	x			
Goethita	x			x

¹ De acuerdo a Pérez, I., et al. 2004.

² De acuerdo a Talavera, O. et al., 2005, en jales provenientes de la explotación de un yacimiento de vetas hidrotermales.

³ De acuerdo a Martínez Hernández, K. D. et al., 2005, en jales provenientes de la explotación de un yacimiento tipo skarn de metales base.

En principio, se puede observar que aparentemente existe una similitud entre el contenido de minerales opacos en los jales de Taxco y el de El Oro-Tlalpujahua. Sin embargo la concentración de algunos EPT es significativamente superior en el primer caso, debido a que presentan diferencias importantes en su contenido mineral y en sus relaciones paragenéticas, a pesar de que ambos yacimientos consisten en depósitos de vetas hidrotermales. Por su parte, los jales de Concepción del Oro provienen de la explotación de un yacimiento tipo skarn con minerales metálicos donde el contenido de sulfuros de hierro y plomo es escaso, lo cual se refleja

en la mineralogía del residuo. En otros yacimientos de tipo skarn, como el de Zimapán, se han hallado cantidades importantes de arsenopirita en los residuos mineros.

8.3 Variaciones espaciales en la concentración y en la mineralogía de los minerales opacos en los jales del DMOT.

Los jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahu se caracterizan por contener un porcentaje menor al 3% de minerales opacos, alcanzando en algunos niveles hasta un máximo de 5%. No parece existir un patrón de variación en el contenido porcentual de fases opacas, más bien parece ser aleatoria, lo cual puede atribuirse a la naturaleza del yacimiento y a la alta eficiencia de los métodos metalúrgicos empleados.

Sin embargo, desde el punto de vista de composición mineralógica, en algunos casos es posible definir zonas de abundancia relativa para determinada especie mineral como por ejemplo para la pirita, la galena, la ilmenita y las fases auro-argentíferas. Esto puede deberse a cualquiera de los siguientes puntos:

- Variaciones mineralógicas del yacimiento conforme transcurría la explotación.
- Variaciones mineralógicas entre un distrito y el otro.
- Diferencias en los métodos metalúrgicos empleados.
- Diferencias locales en las condiciones físico-químicas dentro del depósito de jal.

Hay que recordar que los yacimientos de la región presentan variaciones mineralógicas de un distrito a otro, así mismo fue explotado por empresas mineras diferentes por lo que la aplicación de los métodos metalúrgicos tuvieron variantes, además los desechos fueron acumulados en una área extensa y en condiciones geomórfológicas diversas.

CONCLUSIONES

Los jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahuá presentan contenidos de minerales opacos variables y menores del 5%. Las fases minerales opacas se presentan principalmente como partículas mixtas de tamaño variable entre 10 μ y 500 μ y como inclusiones de tamaño inferior a 50 μ en minerales transparentes como cuarzo y feldespatos. Las partículas monominerales son escasas. Las características texturales principales son el intercrecimiento entre fases minerales opacas y transparentes; el zoneamiento concéntrico; la inclusión de fases opacas en transparentes y viceversa; el remplazamiento a través de los bordes de las partículas y otros rasgos de remplazamiento por alteración.

Los minerales identificados coinciden ampliamente con la paragénesis mineral reportada para el yacimiento, así como con la litología de la región. La mineralogía de los jales consiste en una serie de sulfuros, sulfoseleniuros, sulfosales, óxidos y oxihidróxidos, en los cuales ocurren elementos químicos como Fe, Cu, Pb, As, Au, Ag y Ti.

El oro aparece diseminado en fases sulfurosas y excepcionalmente como una aleación rica en plata incluida en sulfuros y cuarzo. La plata ocurre como elemento esencial en la estructura química de sulfosales y sulfoseleniuros que en algunos casos se encuentran incluidos en cuarzo.

La relación entre la presencia de algunas especies de minerales opacos y el contenido de elementos químicos como Ag, Au, Cu y As presenta también buena correspondencia. Sin embargo para otros elementos metálicos como el Zn, no se encontraron especies minerales opacas que pudieran ser esencialmente portadoras de estos y, en algunos casos, los contenidos altos de Pb se presentan en niveles donde no se identificó galena. Lo anterior sugiere que dichos elementos podrían encontrarse asociados con otras fases no identificadas y/o transparentes o eventualmente en menor cantidad adsorbidos en oxihidróxidos de Fe.

Las fases minerales primarias consisten en óxidos de Fe y fases sulfurosas de origen hipogénico y supergénico; así como algunos óxidos de origen magmático como la ilmenita. Las fases minerales secundarias consisten en oxihidróxidos de Fe pobremente cristalinos que no fueron identificados con precisión, su presencia evidencia la existencia de reacciones químicas de

óxido-reducción dentro de los depósitos de jales del distrito, principalmente en partículas de pirita y pirrotita.

Es necesario llevar a cabo estudios mineralógicos enfocados a la identificación de fases minerales transparentes móviles en soluciones acuosas, ya que como se ha determinado en este trabajo existen elementos químicos de interés que podrían estar alojados en estos minerales.

Los depósitos de jales del DMOT son un material heterogéneo, tanto en su porcentaje de contenido mineral como en su composición química-mineralógica. Existen variaciones mineralógicas espaciales verticales y horizontales que permiten definir zonas de abundancia relativa de algunas especies minerales opacas. Aunque en etapas previas del proyecto se ha determinado que los jales del distrito no son peligrosos, dichas variaciones pueden motivar reacciones químicas bastante localizadas y generar zonas de condiciones fisicoquímicas diferenciadas.

CONCLUSIONES

Los jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahuá presentan contenidos de minerales opacos variables y menores del 5%. Las fases minerales opacas se presentan principalmente como partículas mixtas de tamaño variable entre 10 μ y 500 μ y como inclusiones de tamaño inferior a 50 μ en minerales transparentes como cuarzo y feldespatos. Las partículas monominerales son escasas. Las características texturales principales son el intercrecimiento entre fases minerales opacas y transparentes; el zoneamiento concéntrico; la inclusión de fases opacas en transparentes y viceversa; el remplazamiento a través de los bordes de las partículas y otros rasgos de remplazamiento por alteración.

Los minerales identificados coinciden ampliamente con la paragénesis mineral reportada para el yacimiento, así como con la litología de la región. La mineralogía de los jales consiste en una serie de sulfuros, sulfoseleniuros, sulfosales, óxidos y oxihidróxidos, en los cuales ocurren elementos químicos como Fe, Cu, Pb, As, Au, Ag y Ti.

El oro aparece diseminado en fases sulfurosas y excepcionalmente como una aleación rica en plata incluida en sulfuros y cuarzo. La plata ocurre como elemento esencial en la estructura química de sulfosales y sulfoseleniuros que en algunos casos se encuentran incluidos en cuarzo.

La relación entre la presencia de algunas especies de minerales opacos y el contenido de elementos químicos como Ag, Au, Cu y As presenta también buena correspondencia. Sin embargo para otros elementos metálicos como el Zn, no se encontraron especies minerales opacas que pudieran ser esencialmente portadoras de estos y, en algunos casos, los contenidos altos de Pb se presentan en niveles donde no se identificó galena. Lo anterior sugiere que dichos elementos podrían encontrarse asociados con otras fases no identificadas y/o transparentes o eventualmente en menor cantidad adsorbidos en oxihidróxidos de Fe.

Las fases minerales primarias consisten en óxidos de Fe y fases sulfurosas de origen hipogénico y supergénico; así como algunos óxidos de origen magmático como la ilmenita. Las fases minerales secundarias consisten en oxihidróxidos de Fe pobremente cristalinos que no fueron identificados con precisión, su presencia evidencia la existencia de reacciones químicas de

óxido-reducción dentro de los depósitos de jales del distrito, principalmente en partículas de pirita y pirrotita.

Es necesario llevar a cabo estudios mineralógicos enfocados a la identificación de fases minerales transparentes móviles en soluciones acuosas, ya que como se ha determinado en este trabajo existen elementos químicos de interés que podrían estar alojados en estos minerales.

Los depósitos de jales del DMOT son un material heterogéneo, tanto en su porcentaje de contenido mineral como en su composición química-mineralógica. Existen variaciones mineralógicas espaciales verticales y horizontales que permiten definir zonas de abundancia relativa de algunas especies minerales opacas. Aunque en etapas previas del proyecto se ha determinado que los jales del distrito no son peligrosos, dichas variaciones pueden motivar reacciones químicas bastante localizadas y generar zonas de condiciones fisicoquímicas diferenciadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, A., 1971. Reporte sobre las principales acumulaciones de jales que hay en los alrededores de la población de “El Oro”, Méx. Archivo Técnico, Consejo de Recursos Minerales.
- Allende, G., Morales J., Velázquez Y., Pérez, I., 1990. Estudio metalúrgico preliminar por peletizado-volatilización clorurante de los jales de tiro México perteneciente a la CIA. Minera México Michoacán, S. A. Reporte técnico, Comisión de fomento minero.
- Armienta, M.A., Villaseñor, G., Rodríguez, R., Ongley, L.K., Mango, H., 2001. The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, México. *Environmental Geology* 40 (4-5).
- Armienta, M.A., Talavera, O., Morton, O., Barrera, 2003. Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, Mexico. *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 71:387–393.
- Armienta, M. A., Villaseñor-Cabral, G., y Romero, F., 2005. Propuesta de estrategia metodológica para la evaluación de la peligrosidad de jales mineros en México.
- Blowes, D.W., Reardon E.J., Jambor J.L., Cherry J.A., 1991, The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings: *Geochimica e Cosmochimica Acta*, 55, 965-978.
- Bocco, G., 1989. Aspects of the anthropic erosion in Tlalpujahua river basin, central Mexico: An applied geomorphological approach. *International Institute for aerospace survey and earth science*.
- Campa, M.F., Ramírez, J., Flores, R., Coney, P., 1980. Terrenos tectonoestratigráficos de la Sierra Madre del Sur, Región comprendida entre los estados de Guerrero, Michoacán, México y Morelos. *Universidad Autónoma de Guerrero, Serie Técnico-Científica*, Vol. 10, 28 pp.
- Campa, M.F., Coney, P., 1983. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resources distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences* 20, 1040-1051.
- Chae, YB, Jeong SB and Hyun JY, 2001. Recycling and decontamination of metal mine tailings. Project Manager, Minerals Utilization and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (Kigam), Taejeon city, South Korea.
- Corona-Chávez, P., Martínez-Medina, M., Robles-Camacho, J., Ramos-Arroyo, Y. R., 2007. Evaluación de la importancia económica y del efecto del impacto ambiental por residuos mineros (jales) en el Distrito Minero de El Oro-Tlalpujahua: resultados geoquímicos preliminares: económicos y potencialmente tóxicos. IDEAR, Morelia Mich., 2007.
- De la Teja, M. A., 1999. Carta geológico-minera El Oro de Hidalgo E14A16 escala 1:50000, Consejo de Recursos Minerales, 36 p.
- Dean, J. D., Stephens, J. E., Bankroft, J., 1995. Use of Mine Tailings in Construction Materials. *Tailings and Mine Waste '96*, 567- 575 (Eng.). Balkema, Rotterdam (resumen).
- Fanfani, L., Zuddas, P., Chessa, A., 1996. Heavy metals speciation analysis as a tool for studying mine tailings weathering. *Journal of Geochemical exploration* 58 (1997) 241-248.
- Flores, T., 1920. Estudio Geológico Minero de los Distritos de El Oro y Tlalpujahua. Ed. Secretaria de Gobernación. Cd. México, 85 p y anexos.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, volumen conmemorativo del centenario, temas selectos de la geología mexicana. Tomo LVII, número 3, p. 227,283.

- González-Partida, E., Salinas-Prieto, J.C., Moctezuma-Salgado, M., 2001. Datos microtermométricos de algunas unidades litológicas del subterreno Teloloapan, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LIV 2001, P. 10-18
- Guerrero-Suástegui, M., Ramírez-Espinosa, J., Talavera-Mendoza, O., Campa-Uranga, M.F., 1991. El desarrollo carbonatado del Cretácico inferior asociado al arco de Teloloapan, noroccidente del estado de Guerrero. *Convención sobre la evolución geológica mexicana y el 1er Congreso de Mineralogía*, Memoria, p. 67-70.
- Gutiérrez-Ruiz, M., Romero, F., y González-Hernández, G., 2007. Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 24, núm. 2, 2007, p. 170-184.
- Hernández, J., Salinas, E., Patiño F., Rivera, I., Yta, M., Pérez, M., 2006. Caracterización de los jales del distrito Pachuca-Real del Monte, Hidalgo, y su posible uso como material industrial. *Boletín de Mineralogía* 17 (2006) 129 – 134.
- Jambor, J. L., 1994. Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. In: Blowes D.W. & Jambor J.L. Eds., *The environmental geochemistry of sulfide mine wastes*. Mineralogical Association of Canada, Waterloo, 59-102.
- Jambor, J.L., Blowes, D.W., 1998. Theory and applications of mineralogy in environmental studies of sulfide-bearing mine waste. Cabri, L.J., Vaughan, D.J. (eds.), *Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy*: Ottawa, Canadá, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 27, 367-401.
- Lottermoser, B. G., 2003. *Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 278 p.
- Lozano-Santa Cruz, R., Verma, S.P., Girón, P., Velasco, F., Morán, D., Viera, F., Chávez, G., 1995. Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas: *Actas INAGEQ*, 1, 203-208.
- Martínez Hernández, K. D., Castro Larragoitia, J. y Monroy Fernández, M., 2005. Caracterización mineralógica y geoquímica de los residuos mineros de Concepción del Oro, Zacatecas. *Actas INAGEQ Volumen 11, No.1*.
- Martínez-Medina, M., Corona-Chávez, P., Ramos-Arroyo, Y. R., Robles-Camacho, J., Montañón-Cisneros, E. y Escudero-García, R., 2006. Estimación preliminar de impacto ambiental causado por la actividad minera (jales y terreros) mediante el uso de SIG en el Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua. IDEAR, Morelia, Mich., 2006.
- Mendoza-Amézquita, E., Armienta-Hernández, M.A., Ayora, C., Soler, A., y Ramos-Ramírez, E., 2006. Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, núm. 1, p. 75-83.
- Mendoza, O.T., Suástegui, M.G., 2000. Geochemistry and isotopic composition of the Guerrero Terrane (western Mexico): implications for the tectono-magmatic evolution of southwestern North America during the Late Mesozoic. *Journal of South American Earth Sciences* 13, 297-324.
- Morán-Zenteno, D.J., Cerca, M., Keppie, J.D., 2005. La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de Interpretación. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, volumen conmemorativo del centenario, temas selectos de la geología mexicana. Tomo LVII, número 3, p. 319-341.
- Ostroumov, M. y Corona-Chávez, P., 1999. Ensayo Metalogenético del Estado de Michoacán. *Carta Geológica del Estado de Michoacán escala 1: 250 000 en 4 hojas con notas explicativas*, 97-107.

- Ostroumov, M. y Bustamante, J., 2002, Mineralogía de las menas del distrito minero de El Oro-Tlalpujahua: nuevos datos, Sociedad Mexicana de Mineralogía, <http://smm.iim.umich.mx/menas.htm> , consulta: junio 2008.
- Pérez, I., Armienta, M. A., Villaseñor, G., Cruz, O., Aguayo, A., Cisneros, N., 2004. Procesos de oxidación en una presa de jales en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo. *Actas INAGEQ Volumen 10, No.1.*
- Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe, C., 2004. Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México; Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(2), 268-284.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D., 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, núm. 1, p. 54-74.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro-Larragoitia, J., Díaz-Barriga, F., Monroy, M., 2004. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution* 152: 129-152.
- Robles-Camacho, J., Corona-Chávez, P., Montaña-Cisneros, E., Martínez-Medina, M., Ramos-Arroyo, Y. R., 2007. Caracterización mineral y reutilización potencial de los jales en el Distrito Minero de El Oro-Tlalpujahua. IDEAR, Morelia, Mich., 2007.
- Salinas, J.C., Monod, O., Faure, M., 2000. Ductile deformations of opposite vergence in the eastern part of the Guerrero Terrane (SW Mexico). *Journal of South American Earth Sciences* 13 (4), p. 389-402.
- Shaw, S.C., Groat, L.A., Jambor, J.L., Blowes, D.W., Hanton-Fong, C.J., Stuparyk, R.A., 1998. Mineralogical study of base metal tailings with various sulfide contents, oxidized in laboratory columns and field lysimeters: *Environmental Geology*, 33, 209 - 217.
- Siebe, C. D., Jahn, R., Stahr, K., 1996, *Manual para la Descripción y Evaluación Ecológica de Suelos en el Campo: Chapingo, México*, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., *Publicación Especial*, 4, 57 p.
- Talavera, O., Yta, M., Moreno, R., Dótor A., Flores N. and Duarte, C., 2005. Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact. *Geofísica Internacional*, Vol. 44, Num. 1, pp. 49-64
- Uribe-Salas , A., 2005. Historia de la minería en Michoacán, Colección: Historia y Procesos, UMSNH, volumen 2, 2005.
- Villaseñor-Cabral, M. G., Linares, C., Armienta, M.A. y Girón P., 2005. Alteración de arsenopirita en una presa de jales del Distrito Minero de Zimapán, Hidalgo. *Actas INAGEQ Volumen 11, No.1.*
- Villafaña, M., 1951, El tratamiento de los jales del “tiro México” en El Oro, Estado de México. Reporte técnico, Comisión de fomento minero.
- Verma, S.P., Lozano-Santa Cruz, R., Girón P., Velasco F., 1996, Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos traza en rocas ígneas: *Actas INAGEQ*, 2, 237-242.
- Volke, T., 2003. Remediación de sitios contaminados por metales provenientes de jales mineros en los Distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, Baja California Sur. Centro Nacional de investigación y capacitación ambiental

ANEXOS

ANEXO I Propiedades físico-químicas de las muestras de jales del DMOT

Muestra	Color	T °C	pH	CE (MS)	CaCO ₃ *
E1H1	gris oscuro rojizo	16.9	7.15	30	Libre
E1H2	café oscuro rojizo	16.8	6.83	20	Libre
E1H3	café	16.6	6.39	60	Libre
E2H1	café oscuro	16.0	8.17	60	Medio
E2H2	gris oscuro	16.9	7.13	40	Medio
E2H3	gris oscuro	16.0	8.32	60	Medio
E3H1	café oscuro grisáceo	27.1	8.14	100	Muy alto
E3H2	café oscuro grisáceo	26.7	8.43	110	Muy alto
E3H3	gris oscuro	26.4	8.4	90	Muy alto
E3H4	amarillo pálido	28.5	5.89	2090	Medio
E3H5	amarillo pálido	29	5.14	570	Medio
E3H6	café amarillento	31.9	6.87	330	Medio
E4H2	café oscuro grisáceo	22.4	8.52	110	Muy alto
E4H3	café oscuro grisáceo	23.6	8.4	110	Muy alto
E5H1	gris oscuro	20.8	8.35	48.8	Alto
E5H2	gris oscuro	18.6	8.74	89	Medio
E5H3-A	café oscuro grisáceo	21.9	8.81	79.2	Alta
E5H3-B	café oscuro grisáceo	21.4	8.68	101	Alto
E5H3-C	gris oscuro	21.0	8.68	101.4	Alto
E5H4	gris oscuro	21.3	8.45	108.88	Alto
E5H5	gris olivo oscuro	18.9	8.04	765	Alto
E5H6	gris muy oscuro	19.3	7.52	395	Bajo
E7H1	gris verdoso	19.6	7.93	563	Alto
E7H2	café oscuro	19.8	8.33	750	Alto
E7H3	gris oscuro	19.9	8.46	197	Alto
E7H4	gris verdoso oscuro	19.6	7.97	378	Libre
E7H5	café muy oscuro	18.8	4.48	895	Libre
E7H6	café oscuro	19	6.83	342	Bajo
E7H7	café oscuro	19.4	7.14	240	Bajo
E8H1	gris oscuro	19.0	8.54	655	Alto
E8H2	café rojizo oscuro	19.4	7.81	1937	Muy bajo
E8H3	gris oscuro	28.7	8.36	642	Alto
E8H4	café oscuro	18.2	5.73	5.68	Libre
E9H1	café	18.4	8.45	406	Alto
E9H2	café oscuro grisáceo	18.4	8.78	166	Alto
E9H3	café amarillento	18.5	8.09	197	Muy alto
E9H4	gris oscuro	17.6	8.49	6.78	Medio

E9H5	café amarillento	18.6	8.05	218	Alto
E10H1	café ligeramente olivo	18.5	8.29	1139	Alto
E10H2	café obscuro grisáceo	19.0	8.06	113	Alto
E10H4	café obscuro grisáceo	18.0	8.04	3.42 ms	Alto
E11H1	gris muy obscuro	18.7	8.32	76.2	Alto
E11H2	café grisáceo	19.6	8.66	78.4	Alto
E11H3	gris obscuro	18.4	9.03	67.5	Alto
E11H4	café	19.5	8.87	1728.0	Alto
E11H5	café amarillento	19.7	7.40	3.96	Bajo
E11H6	gris obscuro	18.8	6.71	1530.0	Medio
E12H1	café obscuro grisáceo	18.6	7.14	35.0	Libre
E12H2	café obscuro amarillento	18.7	8.14	43.2	Libre
E12H3	café ligeramente amarillento	19.0	7.82	31.1	Alto
E12H4	café	20.0	7.65	50.8	Medio
E14H1	café obscuro grisáceo	19.2	7.8	144.9	Alto
E14H2	café	18.7	7.37	821	Alto
E14H3	gris obscuro	18.9	7.35	1188	Muy alto
E14H4	café obscuro grisáceo	19.0	7.53	1570	Alto
E14H5	café obscuro grisáceo	18.8	8.24	715	Alto
E14H6	gris obscuro	18.08	8.04	1025	Alto
E14H7	café obscuro grisáceo	18.5	7.86	814	Alto
E14H8	gris obscuro	18.1	7.95	823	Alto

*De acuerdo con Siebe et al., 1996

ANEXO II Elementos mayores por fluorescencia de rayos-X

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O _{3t}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
E2H1	69.9	0.3	6.2	3.4	0.1	0.7	3.8	0.3	1.9	0.2
E2H3	75.8	0.2	6.0	3.3	0.1	0.7	5.6	0.1	2.0	0.1
E3H1	79.7	0.2	5.0	2.5	0.1	0.6	3.5	0.1	1.7	0.1
E3H2	75.8	0.3	6.9	3.1	0.1	0.8	5.3	0.2	2.0	0.1
E3H3	79.2	0.3	5.7	2.7	0.1	0.6	4.0	0.2	1.7	0.1
E3H4	56.6	0.9	22.3	6.0	0.0	1.0	1.7	0.7	1.1	0.0
E3H5	56.8	0.7	18.4	11.5	0.0	1.7	1.8	1.1	0.3	0.0
E3H6	58.2	0.7	18.8	8.7	0.0	1.3	1.9	1.3	0.5	0.1
E3H7	70.0	0.4	14.6	4.9	0.0	1.4	0.7	0.1	2.4	0.1
E4H2	73.3	0.3	7.3	3.5	0.1	0.9	4.6	0.3	1.9	0.1
E5H1	75.4	0.3	6.9	3.2	0.1	0.7	3.0	0.4	1.3	0.1
E5H2	75.6	0.2	6.1	3.0	0.1	0.7	5.8	0.2	1.4	0.1
E5H3	83.7	0.2	3.8	2.1	0.0	0.5	4.2	0.2	1.0	0.1
E5H4	78.6	0.2	4.6	2.4	0.1	0.6	5.9	0.1	1.3	0.1
E5H5	71.4	0.2	6.5	3.4	0.1	0.7	7.5	0.2	1.5	0.1
E5H6	64.3	1.1	15.6	4.8	0.1	0.6	2.3	2.0	1.2	0.1
E7H1	88.3	0.1	3.3	1.4	0.0	0.5	2.4	0.1	0.9	0.1
E7H3	89.1	0.1	3.2	1.3	0.0	0.4	1.9	0.1	0.8	0.1
E7H4	88.6	0.1	3.1	1.4	0.1	0.4	1.9	0.1	0.9	0.0
E7H5	59.2	1.4	18.4	7.4	0.1	1.0	1.6	1.3	1.2	0.1
E7H6	62.3	1.9	13.9	10.3	0.4	0.6	0.8	1.1	1.3	0.1
E7H7	58.8	1.4	18.0	7.7	0.1	1.1	1.9	1.6	1.3	0.1
A1	86.8	0.1	3.6	1.4	0.0	0.5	2.2	0.7	1.0	0.1
A2	82.7	0.1	4.5	1.8	0.1	0.6	4.0	0.1	1.3	0.1
E8H1	89.0	0.1	3.4	1.5	0.0	0.5	2.2	0.3	0.9	0.1
E8H2	60.1	1.1	18.3	6.0	0.1	1.1	1.9	1.3	1.3	0.2
E8H3	88.0	0.1	3.8	1.7	0.0	0.5	1.8	0.2	1.0	0.1
E8H4	55.9	1.2	20.9	7.0	0.0	0.8	0.9	1.8	1.4	0.1
E9H1	78.4	0.2	6.1	2.9	0.1	0.7	3.7	0.1	2.0	0.1
E9H2	79.3	0.2	5.9	2.8	0.1	0.7	3.8	0.1	1.9	0.1
E9H3	67.1	0.4	14.9	5.7	0.1	1.1	0.8	0.2	2.7	0.1
E9H4	76.1	0.2	5.6	2.7	0.1	0.7	5.4	0.5	1.6	0.1
E9H5	71.9	0.5	13.0	4.7	0.0	1.1	0.4	0.1	2.9	0.1
E10H2	74.7	0.3	6.5	3.0	0.1	0.7	5.7	0.2	2.1	0.1
E10H4	73.6	0.2	6.4	3.0	0.1	0.8	6.5	0.3	2.0	0.1
E11H1	71.4	0.3	5.7	3.0	0.1	0.8	3.2	0.2	1.7	0.1
E11H2	77.2	0.3	6.2	3.2	0.1	0.7	4.4	0.2	1.7	0.1
E11H3	77.1	0.3	5.3	2.7	0.1	0.6	5.8	0.1	1.9	0.1
E11H4	73.7	0.2	6.3	2.9	0.1	0.8	6.0	0.2	1.9	0.1
E11H5	65.4	0.7	13.9	6.0	0.1	1.4	0.9	0.8	1.8	0.1
E11H6	69.2	0.3	14.8	3.1	0.0	1.8	0.3	0.4	3.6	0.1
E12H1	78.1	0.4	7.6	3.3	0.1	0.6	0.6	0.2	1.3	0.1
E12H3	91.9	0.0	2.1	0.6	0.0	0.3	1.5	0.1	1.1	0.0
E12H4	70.1	0.6	12.8	4.3	0.1	0.9	0.9	0.3	1.8	0.1
E13H1	78.3	0.2	5.9	2.9	0.1	0.6	4.5	0.1	1.8	0.1
E13H4	73.1	0.3	6.8	3.0	0.1	0.7	6.3	0.1	2.1	0.1
E14H2	69.2	0.5	10.5	3.9	0.1	0.6	4.9	0.6	0.9	0.2
E14H8	69.5	0.2	6.5	3.1	0.1	0.8	8.3	0.2	1.7	0.1

ANEXO III Datos de análisis de elementos traza en muestra total por ICP-MS

Muestra	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
E2H1	2.9	6.1	89.3	22.5	14.4	25.1	31.5	134.0	67.2	87.2	157.0	15.3	62.4	3.0
E2H3	3.4	6.7	99.2	14.5	17.9	27.7	36.9	156.1	83.9	102.7	150.5	17.4	61.8	2.7
E3H1	3.3	5.0	72.3	xx	9.7	17.5	29.1	116.3	51.3	82.5	115.1	13.7	55.3	2.3
E3H2	4.9	7.7	97.0	25.0	10.5	20.4	43.8	147.1	64.1	96.6	136.6	17.8	74.3	3.2
E3H3	3.2	5.7	75.4	xx	15.8	21.1	35.7	123.5	55.1	81.5	129.9	15.0	60.2	2.0
E3H4	2.7	20.0	130.9	38.9	9.3	17.6	25.2	89.9	5.1	48.8	142.0	32.3	226.7	11.9
E3H5	2.6	22.2	61.6	xx	11.2	11.7	17.4	124.7	3.0	6.9	138.2	71.8	391.7	14.9
E3H6	4.3	21.2	53.9	xx	9.3	15.3	17.9	151.1	8.4	14.9	145.1	70.8	386.3	16.8
E3H7	1.9	14.9	145.9	14.1	10.3	22.7	36.2	122.1	3.6	97.4	67.0	81.0	143.9	4.9
E4H2	2.9	8.4	99.7	42.6	16.2	25.4	37.4	137.3	52.9	84.4	130.8	17.5	53.1	2.2
E5H1	2.6	6.2	73.3	xx	10.2	17.2	48.5	511.3	35.2	65.5	125.0	17.4	54.4	2.3
E5H2	2.6	6.2	78.0	17.9	10.4	18.2	45.7	485.6	42.3	66.8	170.4	15.5	58.0	3.1
E5H3	2.4	3.2	45.8	xx	7.3	13.4	42.8	298.0	29.3	45.2	127.8	9.3	37.8	1.1
E5H4	2.5	6.4	81.0	xx	10.1	20.7	55.2	437.5	47.7	72.5	199.3	17.4	64.2	2.2
E5H5	1.9	4.3	54.9	xx	8.4	14.3	43.9	298.8	34.1	56.5	143.5	12.3	44.5	1.5
E5H6	2.5	11.2	88.6	39.9	16.5	14.1	21.3	63.8	5.3	60.3	197.6	40.5	197.6	15.8
E7H1	2.2	2.9	41.2	xx	15.9	8.9	20.9	527.0	29.7	46.0	69.5	9.9	34.5	1.0
E7H3	2.1	2.6	42.0	xx	9.0	14.0	314.4	519.5	26.8	43.1	63.1	9.0	34.9	1.1
E7H4	2.2	2.6	38.3	4.6	15.0	76.5	808.6	451.0	23.1	46.4	63.4	9.3	32.7	0.7
E7H5	2.5	15.5	146.4	85.9	24.3	44.8	41.4	370.9	11.3	54.6	190.7	26.7	204.7	15.3
E7H6	2.8	14.3	172.8	60.1	37.6	23.5	27.0	262.1	7.0	63.3	236.4	35.7	220.1	15.4
E7H7	2.8	12.6	233.5	71.5	53.8	14.2	64.7	79.2	7.3	49.8	131.4	21.7	276.2	17.8
A1	2.1	3.2	41.6	xx	49.8	32.6	89.1	548.2	28.1	50.9	59.3	11.0	35.3	0.6
A2	2.0	4.5	57.8	11.3	11.7	13.7	32.5	252.7	40.8	67.9	111.7	13.1	40.8	1.4
E8H1	2.0	2.9	43.1	xx	15.7	12.9	66.7	388.3	33.0	44.2	64.0	10.2	35.0	1.2
E8H2	2.3	14.6	121.5	xx	24.5	29.4	58.8	192.0	14.9	47.6	223.1	22.4	191.1	10.0
E8H3	2.0	3.4	48.9	xx	17.2	9.8	30.5	395.8	22.6	48.9	67.2	11.2	39.1	1.8
E8H4	2.2	15.4	136.5	56.7	27.0	22.9	19.8	72.6	5.1	46.3	167.6	17.4	218.0	12.4
E9H1	4.0	6.2	91.8	29.3	11.4	22.4	37.7	129.7	61.6	96.8	126.4	16.7	59.4	2.4
E9H2	2.0	14.9	107.8	52.7	11.8	23.9	45.6	113.2	21.7	129.0	18.7	35.9	85.5	3.7
E9H3	3.0	16.9	137.9	53.9	8.1	39.3	145.3	402.5	33.8	149.0	34.1	47.6	158.7	7.5
E9H4	1.8	4.3	63.3	48.5	12.4	15.4	41.4	198.3	35.8	54.1	109.6	11.7	26.3	1.2
E9H5	2.1	16.2	116.7	54.4	12.8	25.6	47.1	117.2	24.3	142.5	23.0	37.5	140.9	5.2
E10H2	3.4	6.6	99.4	7.1	14.9	24.2	32.7	153.7	59.0	103.0	157.6	17.5	43.3	1.1
E10H4	3.7	6.3	98.8	9.2	15.9	24.9	68.0	185.6	71.5	96.3	175.7	16.7	42.8	1.3
E11H1	3.0	5.9	82.6	52.4	14.5	18.9	34.7	166.2	50.3	78.8	100.8	13.7	45.0	2.0
E11H2	3.6	5.9	87.1	19.5	12.6	19.8	36.4	192.9	71.0	84.3	140.5	13.3	34.0	1.1
E11H3	3.1	4.9	66.2	xx	12.3	20.4	26.6	95.7	46.0	85.4	135.8	14.3	33.9	0.8
E11H4	3.7	6.4	92.4	xx	14.3	21.4	55.1	186.6	59.3	98.8	147.4	17.0	56.7	1.9
E11H5	2.0	17.0	214.6	90.6	28.2	49.6	64.5	124.0	15.8	91.7	74.1	29.3	140.1	8.4
E11H6	2.3	7.6	74.9	4.3	7.4	22.6	30.2	112.5	8.0	150.8	22.9	49.9	133.3	12.9
E12H1	3.6	6.6	71.2	xx	12.6	17.5	20.5	258.0	24.1	75.1	63.2	16.7	78.2	4.4
E12H3	6.6	0.4	11.0	xx	17.4	3.2	18.3	99.2	23.3	63.5	86.6	3.0	16.0	>0.2
E12H4	2.3	12.3	113.4	26.3	15.8	32.4	25.3	180.0	27.3	97.9	71.4	29.2	110.0	7.1
E13H1	3.8	5.8	87.3	15.3	11.1	22.2	50.4	152.0	65.4	88.4	157.9	16.0	57.5	1.8
E13H4	3.1	6.7	92.3	24.4	8.6	19.9	35.1	177.9	55.2	102.1	151.3	17.6	60.8	2.2
E14H2	2.1	4.4	47.0	35.7	5.0	12.0	20.2	471.8	14.3	28.4	120.2	12.2	66.7	2.3
E14H8	2.2	6.6	85.8	xx	7.5	19.9	44.5	465.5	46.6	78.0	207.2	17.6	60.6	2.0

ANEXO III (continuación)

Muestra	Mo	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
E2H1	1.4	0.8	28.2	0.6	1.5	54.6	10.7	326.1	11.8	21.8	2.9	11.6	2.6	0.5
E2H3	1.4	0.8	38.0	0.7	1.2	68.3	13.1	324.5	11.0	20.2	2.7	10.8	2.6	0.6
E3H1	1.3	0.7	38.9	0.6	1.1	67.2	10.6	280.2	9.9	17.5	2.4	9.6	2.2	0.5
E3H2	1.8	0.8	26.2	0.6	1.5	69.4	13.2	421.1	13.0	22.8	3.2	12.9	2.9	0.7
E3H3	1.8	0.8	38.9	0.6	3.0	65.8	10.9	313.0	10.9	19.0	2.6	10.7	2.4	0.5
E3H4	0.9	1.1	2.6	0.3	2.3	5.7	16.9	402.9	28.2	40.9	7.6	28.1	5.8	1.4
E3H5	0.3	1.7	2.1	0.4	2.9	5.0	2.1	295.5	67.0	75.2	17.6	69.6	13.8	3.1
E3H6	0.5	2.0	5.3	0.6	2.8	14.0	4.1	421.1	71.4	90.4	20.4	80.2	16.7	3.8
E3H7	0.3	1.6	2.6	0.2	2.3	3.7	15.3	365.0	52.7	57.8	13.3	54.7	11.6	2.7
E4H2	1.4	0.8	33.7	0.5	1.5	51.8	11.5	340.1	11.9	22.4	2.9	11.9	2.8	0.6
E5H1	0.8	0.8	32.9	1.5	4.2	66.4	9.4	287.5	13.0	25.1	3.1	12.4	2.8	0.6
E5H2	0.7	0.8	27.7	1.5	4.0	88.2	10.0	274.2	10.9	20.6	2.6	10.6	2.4	0.5
E5H3	0.6	0.7	46.1	1.1	2.5	97.1	7.7	179.5	6.4	11.9	1.5	6.2	1.5	0.3
E5H4	1.0	0.9	29.7	1.5	4.7	81.9	11.1	307.2	13.0	23.7	3.0	12.1	2.8	0.5
E5H5	0.6	0.8	39.6	1.2	2.9	79.8	8.5	229.3	8.2	15.2	2.0	8.0	1.9	0.4
E5H6	1.2	1.2	2.3	0.3	2.0	3.0	3.9	498.1	49.2	112.2	12.2	45.5	8.8	2.1
E7H1	0.4	0.5	71.1	0.4	0.9	123.9	8.3	141.0	6.3	11.7	1.5	6.1	1.5	0.3
E7H3	0.4	0.5	178.3	0.4	0.7	127.9	8.0	135.6	5.5	10.6	1.3	5.5	1.4	0.2
E7H4	1.0	0.5	59.8	0.5	1.3	133.2	7.9	159.6	5.5	10.5	1.3	5.6	1.4	0.2
E7H5	3.7	1.0	12.4	0.3	2.4	19.3	5.7	367.1	27.6	56.9	7.4	28.5	5.8	1.5
E7H6	3.4	1.3	5.3	0.3	2.2	4.5	6.2	343.0	83.6	154.3	17.4	60.1	9.8	1.8
E7H7	6.1	0.9	2.7	0.3	2.1	2.2	4.8	491.8	23.6	121.2	6.5	24.4	5.1	1.3
A1	1.2	0.5	108.0	0.6	0.7	128.5	4.8	139.2	6.6	12.1	1.6	6.5	1.6	0.3
A2	0.5	0.6	108.3	0.5	1.1	115.1	9.9	232.2	8.7	15.8	2.1	8.3	1.9	0.4
E8H1	0.7	0.5	72.9	0.8	1.0	129.4	8.5	145.9	6.2	11.3	1.5	6.0	1.4	0.2
E8H2	3.9	1.1	12.9	0.4	1.6	22.6	4.6	421.1	22.5	51.0	5.7	21.4	4.6	1.2
E8H3	1.9	0.5	61.7	0.4	0.9	110.4	8.9	177.8	8.0	14.3	1.8	7.3	1.7	0.3
E8H4	1.7	0.9	3.0	0.3	1.6	2.5	4.1	465.5	19.1	37.6	5.1	18.9	4.1	1.1
E9H1	1.2	0.8	19.2	0.6	1.3	68.2	12.8	306.3	11.0	20.5	2.7	11.0	2.5	0.6
E9H2	1.9	0.8	5.1	0.3	1.7	8.3	18.6	501.2	27.7	46.2	7.1	26.3	5.7	1.0
E9H3	1.8	1.0	55.7	0.4	2.6	28.7	25.0	602.9	34.5	53.1	9.6	38.0	8.1	1.7
E9H4	0.8	0.6	18.3	0.6	3.6	58.6	8.9	195.1	7.8	14.3	1.9	7.5	1.8	0.3
E9H5	1.6	0.9	7.3	0.3	2.7	10.8	19.4	544.3	28.7	50.3	7.3	28.6	6.0	1.1
E10H2	1.2	0.8	29.3	0.6	1.0	61.1	13.4	326.0	11.7	21.6	2.9	11.8	2.7	0.6
E10H4	1.6	0.9	57.0	0.8	1.3	61.9	12.3	321.0	10.9	20.1	2.7	11.0	2.6	0.6
E11H1	1.3	0.7	35.0	0.9	1.5	51.5	10.8	272.0	9.7	18.2	2.4	9.6	2.3	0.5
E11H2	1.3	0.7	43.1	0.5	1.2	57.9	11.3	292.3	9.2	17.6	2.3	9.1	2.1	0.5
E11H3	1.0	0.8	27.9	0.5	0.4	48.2	9.9	257.4	9.9	18.9	2.4	9.8	2.3	0.5
E11H4	1.4	0.8	49.9	0.7	1.5	64.7	12.6	336.6	11.7	21.2	2.8	11.4	2.6	0.5
E11H5	2.5	0.8	25.3	0.3	2.1	11.4	20.3	525.3	26.9	42.5	6.1	23.1	4.3	1.0
E11H6	3.6	1.1	1.8	0.3	2.1	8.3	26.9	1171.8	51.5	76.8	10.7	38.7	7.6	1.4
E12H1	1.1	0.6	59.2	0.5	1.5	44.7	10.2	357.9	14.1	26.2	3.3	12.8	2.7	0.5
E12H3	0.3	0.5	46.9	0.4	0.3	106.2	9.1	108.1	1.6	3.3	0.5	2.1	0.6	0.1
E12H4	1.3	0.8	8.3	0.9	2.0	16.9	14.4	804.1	29.4	48.5	7.2	27.0	5.4	1.1
E13H1	1.5	0.8	32.9	0.6	2.9	73.5	12.1	325.4	10.7	19.4	2.6	10.6	2.5	0.5
E13H4	1.7	0.8	51.4	0.7	1.3	53.4	12.6	364.8	12.6	23.1	3.0	12.3	2.8	0.6
E14H2	0.6	0.8	8.3	0.8	4.0	37.8	4.8	185.2	10.5	20.0	2.6	10.7	2.4	0.5
E14H8	0.8	1.0	54.0	1.6	4.4	71.2	11.3	316.6	11.6	21.2	2.8	11.2	2.6	0.5

ANEXO III (continuación)

Muestra	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Lu	Hf	Ta	Pt	Au	Pb	Th	U
E2H1	2.3	0.4	2.4	0.5	1.4	0.2	0.2	1.8	0.3	0.2	1.1	34.7	3.2	2.0
E2H3	2.4	0.4	2.6	0.6	1.6	0.2	0.2	1.8	0.3	0.2	1.0	39.9	2.8	2.4
E3H1	2.0	0.3	2.2	0.5	1.3	0.2	0.2	1.6	0.3	0.2	1.6	51.3	2.4	1.8
E3H2	2.6	0.5	2.7	0.6	1.7	0.2	0.3	2.1	0.3	0.2	0.9	70.3	3.4	2.0
E3H3	2.2	0.4	2.3	0.5	1.4	0.2	0.2	1.7	0.2	0.2	1.7	60.4	2.7	1.9
E3H4	4.8	0.8	4.9	1.1	3.0	0.4	0.5	6.1	0.9	0.3	0.9	17.5	8.0	2.5
E3H5	12.2	2.0	11.2	2.3	6.3	0.8	0.9	10.6	0.9	0.3	0.7	18.8	9.0	1.2
E3H6	13.9	2.4	13.0	2.6	7.0	1.0	1.0	10.0	1.1	0.3	1.0	23.8	8.5	1.3
E3H7	11.2	2.0	11.6	2.6	7.0	1.0	1.0	4.4	0.5	0.2	0.6	16.5	9.0	3.4
E4H2	2.5	0.4	2.8	0.6	1.6	0.2	0.3	1.5	0.2	0.2	1.3	55.1	2.9	2.1
E5H1	2.5	0.4	2.7	0.6	1.6	0.2	0.2	1.5	0.3	0.2	1.0	184.1	3.7	2.0
E5H2	2.3	0.4	2.4	0.5	1.4	0.2	0.2	1.7	0.3	0.1	1.2	198.0	3.2	2.1
E5H3	1.3	0.2	1.5	0.3	0.9	0.1	0.1	1.1	0.2	0.2	1.2	122.2	1.7	1.4
E5H4	2.5	0.4	2.7	0.6	1.6	0.2	0.2	1.9	0.3	0.2	1.9	247.0	3.5	2.3
E5H5	1.7	0.3	1.9	0.4	1.1	0.2	0.2	1.3	0.2	0.2	1.0	184.3	2.4	1.6
E5H6	7.8	1.2	6.9	1.4	3.8	0.5	0.5	5.4	1.1	0.2	0.6	25.7	11.0	3.0
E7H1	1.3	0.2	1.5	0.3	0.9	0.1	0.1	1.0	0.3	0.2	1.7	317.5	2.0	1.2
E7H3	1.2	0.2	1.4	0.3	0.8	0.1	0.1	1.0	0.2	0.2	4.4	164.0	1.8	1.0
E7H4	1.2	0.2	1.4	0.3	0.8	0.1	0.1	1.0	0.2	0.2	1.8	190.2	1.8	1.2
E7H5	4.9	0.8	4.5	0.9	2.5	0.4	0.4	5.7	1.1	0.2	1.9	27.0	10.6	3.0
E7H6	7.8	1.2	6.0	1.2	3.4	0.5	0.5	6.2	1.1	0.3	1.3	23.1	15.9	3.3
E7H7	4.8	0.7	4.0	0.8	2.3	0.3	0.4	7.6	1.2	0.3	0.8	33.6	10.9	3.6
A1	1.4	0.3	1.6	0.4	1.0	0.1	0.1	1.1	0.4	0.2	2.6	115.1	2.0	1.3
A2	1.8	0.3	2.0	0.4	1.2	0.2	0.2	1.2	0.2	0.1	1.5	231.6	2.6	1.8
E8H1	1.3	0.2	1.5	0.3	0.9	0.1	0.1	1.0	0.2	0.2	1.4	248.4	1.9	1.3
E8H2	3.9	0.6	3.7	0.8	2.1	0.3	0.3	5.5	0.7	0.3	2.4	41.1	7.4	2.5
E8H3	1.6	0.3	1.7	0.4	1.0	0.1	0.2	1.2	0.3	0.2	2.1	195.8	2.4	1.6
E8H4	3.3	0.5	3.1	0.6	1.8	0.3	0.3	6.2	0.8	0.2	0.8	16.6	7.5	2.6
E9H1	2.4	0.4	2.6	0.6	1.6	0.2	0.2	1.8	0.2	0.2	1.5	50.4	2.9	2.5
E9H2	5.0	0.9	5.6	1.2	3.6	0.5	0.6	2.5	0.3	0.2	1.0	23.6	8.2	3.3
E9H3	7.1	1.2	7.1	1.6	4.4	0.6	0.7	4.7	0.6	0.2	1.2	32.3	9.3	4.7
E9H4	1.6	0.3	1.8	0.4	1.1	0.2	0.2	0.8	0.2	0.1	2.9	120.5	2.3	2.6
E9H5	5.4	0.9	5.8	1.3	3.7	0.5	0.6	4.3	0.4	0.2	0.8	23.8	8.6	3.4
E10H2	2.5	0.4	2.7	0.6	1.6	0.2	0.2	1.2	0.2	0.2	1.1	45.5	3.0	2.7
E10H4	2.4	0.4	2.5	0.6	1.6	0.2	0.2	1.2	0.2	0.2	1.3	83.6	2.9	2.3
E11H1	2.0	0.3	2.1	0.5	1.3	0.2	0.2	1.2	0.2	0.2	0.9	63.5	2.4	1.7
E11H2	1.9	0.3	2.1	0.4	1.3	0.2	0.2	0.9	0.1	0.2	0.9	121.4	2.4	1.7
E11H3	2.1	0.4	2.3	0.5	1.3	0.2	0.2	0.9	0.1	0.3	1.1	33.1	2.4	2.0
E11H4	2.4	0.4	2.7	0.6	1.6	0.2	0.2	1.3	0.1	0.2	1.4	98.7	3.1	2.5
E11H5	3.9	0.7	4.3	1.0	2.8	0.4	0.4	4.0	0.6	0.2	0.8	73.4	6.4	3.4
E11H6	7.0	1.2	6.9	1.5	4.3	0.6	0.7	4.5	1.1	0.2	0.7	16.8	21.1	7.7
E12H1	2.4	0.4	2.6	0.6	1.6	0.2	0.2	2.4	0.4	0.2	3.0	47.7	4.3	2.0
E12H3	0.4	0.1	0.6	0.1	0.3	0.1	0.0	0.5	0.2	0.2	2.4	42.3	0.4	0.3
E12H4	4.6	0.8	4.8	1.0	2.9	0.4	0.5	2.8	0.6	0.2	0.6	34.2	7.8	3.5
E13H1	2.3	0.4	2.5	0.5	1.5	0.2	0.2	1.7	0.2	0.2	1.0	115.7	2.7	2.6
E13H4	2.5	0.4	2.7	0.6	1.7	0.2	0.3	1.8	0.2	0.2	0.7	79.4	3.4	2.3
E14H2	2.0	0.3	2.0	0.4	1.1	0.2	0.2	1.9	0.2	0.3	1.8	104.3	3.3	1.7
E14H8	2.3	0.4	2.6	0.6	1.6	0.2	0.2	1.8	0.2	0.2	0.9	234.5	3.4	3.3

ANEXO IV Minerografía

a) Perfil 3

Muestra	Mineralogía		Atributos texturales
	Minerales hipogénicos	Minerales supergénicos y secundarios	
E3H1	Pirita	Goethita	Partículas de cuarzo y feldspatos con inclusiones de opacos, cuyos tamaños varían entre 1-50 μm Partículas libres de minerales opacos con tamaño menor a 150 μm
E3H2	Pirita	Hematita Goethita	Remplazamiento de pirita por goethita y hematita Partículas de cuarzo con inclusiones de pirita y otros minerales, con tamaño entre 2-70 μm . Partículas libres con tamaño variable entre 50-350 μm
E3H3	Pirita Galena	Hematita	Partículas de pirita con bordes de oxidación Sulfuros ínter crecidos Partículas libres de entre 50-100 μm de diámetro
E3H5	Ilmenita Titanomagnetita Galena	Hematita Goethita	Partículas macladas de óxidos de Fe Minerales transparentes con inclusiones de minerales opacos, cuyos tamaños van de 1-20 μm y en casos excepcionales llegan a medir hasta 170 μm Partículas libres de opacos cuyos tamaños varían entre 30-200 μm
E3H6	Galena Ilmenita Titanomagnetita Pirita Magnetita	Goethita	Inclusiones de opacos en partículas de cuarzo y feldspatos, y viceversa. Intercrecimiento entre sulfuros Partículas de óxidos de Fe con textura lamelar Partículas libres de minerales opacos con tamaño que varía entre 20-500 μm Inclusiones de opacos de tamaño inferior a 15 μm .

b) Perfil 4

Muestra	Mineralogía		Atributos texturales
	Minerales primarios	Minerales supergénicos y secundarios	
E4H2	Ilmenita Pirita Magnetita	Hematita	Fragmentos de minerales opacos con inclusiones de minerales transparentes Intercrecimiento entre sulfuros Partículas libres de 50-500 μm

c) Perfil 5

Muestra	Mineralogía		Atributos texturales
	Minerales primarios	Minerales supergénicos y secundarios	
E5H2	Pirita Ilmenita	Hematita Goethita	Partículas de pirita con bordes de oxidación Fragmentos de minerales opacos con inclusiones de cuarzo y apatito Inclusiones de minerales opacos con tamaño menor a 10 μm Partículas libres de 20-500 μm
E5H3-A	Pirita Ilmenita	Hematita	Partículas de pirita con borde de oxidación Partículas libres de 50 a 400 μm Inclusiones de minerales opacos menores a 10 μm
E5H4	Pirita Galena Ilmenita	Goethita	Crecimiento coloforme de goethita Pirita con borde de oxidación Partículas libres de 100 μm
E5H5	Pirita Galena Pirrotita Magnetita	Hematita Goethita	Cuarzo y feldespatos con inclusiones de opacos Intercrecimiento entre sulfuros Partículas libres de minerales opacos con tamaño que varía entre 50 y 450 μm
E5H6	Galena Pirrotita	Goethita	Intercrecimiento entre sulfuros Partículas libres de minerales opacos con tamaño variable entre 20 y 300 μm

d) Perfil 7

Muestra	Mineralogía		Atributos texturales
	Minerales primarios	Minerales supergénicos y secundarios	
E7H1	Pirita	Goethita Hematita	Partículas de cuarzo con inclusiones de pirita Inclusiones de opacos de 1-60 μm Partículas libres de 50-120 μm Remplazamiento entre oxihidróxidos de Fe
E7H3	Pirita Calcopirita Arsenopirita Freibergita Tenantita Aguilarita Covelita Pirrotita	Goethita	Partículas de sulfuros con bordes de oxidación. Remplazamiento de sulfuros y óxidos por alteración Intercrecimiento entre sulfuros Partículas de sulfuros con zoneamiento concéntrico Inclusiones de opacos de tamaño menor a 50 μm Partículas libres entre 40-240 μm

E7H4	Pirita Calcopirita Freibergita Aguilarita	Hematita Goethita	Partículas de pirita con bordes de oxidación Partículas libres de 50-120 μm Inclusiones de opacos de tamaño menor a 30 μm Partículas con intercrecimiento y zoneamiento concéntricos
E7H5	Ilmenita	Hematita Goethita	Intercrecimiento entre sulfuros Partículas libres de 40-50 μm Partículas subedrales de ilmenita Inclusiones de opacos con tamaño menor a 50 μm Zoneamiento concéntrico
E7H6	Ilmenita Galena	Hematita	Inclusiones de minerales transparentes en ilmenita Partículas subedrales de ilmenita Partículas libres de 40-400 μm
E7H7	Ilmenita Galena	Hematita Goethita	Partículas de cuarzo y feldespatos con inclusiones de minerales opacos con tamaño menor a 20 μm Ilmenita con inclusiones de cuarzo Partículas de subedrales de ilmenita Partículas libres de 50-600 μm Textura lamelar en hematita

e) Perfil 9

Muestra	Mineralogía		Atributos texturales
	Minerales primarios	Minerales supergénicos y secundarios	
E9H3	-	Hematita Goethita	Oxihidróxidos de hierro incluidos en cuarzo y feldespatos Partículas mixtas de 30-100 μm
E9H4	Pirita Calcopirita Magnetita	Hematita Goethita	Inclusiones de opacos de tamaño menor a 30 μm Partículas mixtas de 100-130 μm Microbrechamiento entre pirita y transparente

f) Perfil 10

Muestra	Mineralogía		Atributos texturales
	Minerales primarios	Minerales supergénicos y secundarios	
E10H2	Pirita Calcopirita Magnetita	Hematita Goethita	Oxihidróxidos e Fe remplazando partículas de pirita a través de sus bordes Partículas mixtas de 80-150 μm
E10H4	Calcopirita	Hematite Goethite	Partículas mixtas de oxihidróxidos de Fe intercrecidos Partículas con tamaño entre 30-200 μm

