

03060 3

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFISICA

**GEOQUÍMICA DE METALES PESADOS EN LOS JALES
DE EL FRAILE MUNICIPIO DE TAXCO GUERRERO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS (AGUAS SUBTERRÁNEAS)

P R E S E N T A

MARILU BARRERA OLIVAREZ

MÉXICO, D.F

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada principalmente a mis padres: **Juan Barrera Pérez y Cirina Olivares Lázaro** por la confianza que han depositado en mí. Nunca los defraudare.

A mis hermanos: *Guillermo y Apolinar* porque me han guiado por el camino del bien; a *Iris Isabel, Oralia, Susana y Salvador* por el apoyo incondicional que me han brindado en todos los momentos de mi vida

A mi esposo *Sergio Fco. Bautista* por toda la comprensión y el amor que me haz mostrado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sinceramente a la Dra. Ma. Aurora Armienta por desempeñar un buen papel como directora de tesis. Por toda la ayuda que me ha brindado desde que llegue al Posgrado en Ciencias de la Tierra.

También quiero agradecer a mi comité tutorial: Dra. Ofelia Márton, Dr. Ramiro Rodríguez, Dr. Oscar Talavera y Dr. Alejandro Carrillo., por las sugerencias y comentarios en la revisión de la tesis.

Agradezco también a las Químicas: Olivia Cruz, Alejandra Aguayo, Nora Cisneros y a la M en C. Elizabeth Hernández por la gran ayuda en la realización de los análisis químicos.

De manera especial al Dr. Oscar Talavera Mendoza por la confianza depositada en mi persona. Así como por las continuas revisiones, comentarios y sugerencias al trabajo de tesis.

RESUMEN	1
I. GENERALIDADES	4
I.1 Introducción	4
I.2 Objetivos	7
I.3 Localización del Área de Estudio y Vías de Acceso	8
I.3.1 Fisiografía e Hipsometría	8
I.3.2 Clima y vegetación	11
I.4 Antecedentes de la Minería	11
I.5 Geología Económica	12
I.6 Sistema de Beneficio	13
1.7 Ubicación de los jales del Distrito Minero de Taxco	13
1.8 Geología	14
Esquisto Taxco-Roca Verde Taxco Viejo	14
Formación Morelos	17
Formación Mezcala	18
Formación Balsas	19
Formación Tilzapotla	19
II METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN	21
II.1 Etapas de experimentación	21
II.2 Métodos analíticos	25
II.2.1 Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS)	25

II.2.2 Absorción Atómica con Horno de Grafito	26
II.3 Método de Difracción de Rayos (DRX)	27
Ley de Bragg	27
II.4 Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)	28
III CARACTERÍSTICAS DE LOS JALES	30
III.1 Descripción de los jales	29
III.2 Mineralogía Megascópica	33
III.3 Difracción de rayos X (DRX)	35
III.4 Características del Extracto	42
III.5 Contenidos totales de Zn, Pb, As y Fe	43
III.5 Fracción soluble de Zn, Pb, As y Fe	45
III.6 Correlaciones	47
IV. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	57

Resumen

Desde el siglo XVI se ha llevado a cabo la extracción de metales en la región de Taxco y sus alrededores. Esta actividad ha liberado a través del tiempo una gran cantidad de desechos de mina que han sido depositados en el medio ambiente. Al extraer los minerales de Ag, Pb, Zn y Cu de los yacimientos se liberan cantidades importantes de sulfuros metálicos. Los sulfuros metálicos como pirita, esfalerita, calcopirita y arsenopirita debido a reacciones de oxido-reducción originan soluciones ácidas que liberan grandes cantidades de metales pesados como Zn, Pb, As y Fe. En la región de El Fraile se tomaron muestras de jales con el objeto de evaluar el potencial de los jales mineros para liberar metales al medio ambiente en función de su composición química y mineralógica. Para la cuantificación de contenidos totales se efectuó una digestión ácida de las muestras en horno de microondas y para la determinación de la fracción soluble se realizaron extracciones con agua desionizada a un pH similar al del agua de lluvia. Los contenidos totales y la fracción soluble se determinaron con las técnicas analíticas de ICP-MS y AAS respectivamente. Con la técnica de DRX se determinaron las especies minerales prevalecientes en los jales.

De las 10 muestras analizadas (JF1, JF2, JF3, JF4, JF5, JF6, JF7, JF8, JF9 y JF10) se pueden diferenciar dos grupos de jales debido a su composición mineralógica, valores de pH y concentraciones de Zn, Pb, As y Fe. El grupo I, se encuentra integrado por las muestras JF1, JF4, JF5, JF6, JF7, JF8, JF9 y JF10, y se caracteriza por presentar valores de pH ~ 2, altos contenidos de yeso y jarosita > pirita y argentojarosita, el grupo II se encuentra representado por las muestras JF2 y JF3 y se caracteriza por tener valores de pH neutros y altos contenidos de calcita mucho mayor que pirita y yeso.

Además el grupo I, representa en promedio las mas bajas concentraciones Tot y las mas altas concentraciones Sol. de Zn, Pb, As y Fe; Zn Tot 1045 mg/kg (fracción Sol. 457 mg/kg), Pb Tot 4089 mg/kg (fracción Sol. 2.4 mg/kg), As Tot 571 mg/kg (fracción Sol. 13.4 mg/kg), Fe Tot 9273 mg/kg (fracción Sol. 1843 mg/kg). Mientras que el Grupo II, representa en promedio las mas altas concentraciones Tot y las mas bajas concetraciones en forma Sol. de Zn, Pb, As y Fe; Zn Tot 13062 mg/kg (fracción Sol. 37 mg/kg), Pb Tot 13493 mg/kg (fracción Sol. 0.5 mg/kg), As Tot 1964 mg/kg (fracción Sol. 0.4 mg/kg) y Fe Tot 13445 mg/kg y el Fe soluble no fue detectado.

Al interrelacionar los resultados obtenidos por las diferentes técnicas analíticas se concluyó que el As del grupo I, probablemente se encuentra en la especie de escorodita $[\text{FeAsO}_4]$, ya que es la especie principal en jales ácidos y además es poco soluble. El Fe del grupo I se encuentra formando jarosita $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ y argentojarosita $[\text{Ag}_2\text{Fe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}]$, mientras que en el grupo II se encuentra formando hidróxidos férricos $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ como producto de la oxidación de la pirita y precipitados de oxihidroxidos. El Pb del grupo I se encuentra formando probablemente la especie de anglesita (PbSO_4) y en el grupo II se encuentra como galena $[\text{PbS}]$ y cerusita $[\text{PbCO}_3]$ que es casi insoluble en agua. Para el caso del Zn es difícil determinar las especies minerales que pudieran gobernar los jales debido a que se observa cierta heterogeneidad de los

resultados, sin embargo se cree que el grupo I pudiera estar representado por la especie de zincita [ZnO] y/o guningita [ZnSO₄ +H₂O] ya que se caracterizan por ser altamente solubles. En el grupo II se piensa que se encuentran la especie de esfalerita (ZnS) y willemita (SiO₄)Zn₂ ya que presentan poca solubilidad.. Además la especie de willemita ha sido encontrada en otros estudios en análisis de aguas de El Fraile.

La movilidad de los metales fue mayor en las muestras con pH ácido. Es posible que la presencia de calcita contribuya a disminuir la liberación de metales en las muestras con pH neutro.

Abstract.

Ore processing has been performed since the XVI Century in Taxco, Gro. and its surroundings. This activity produced mine wastes that have been disposed-off in the environment along the time. Important amounts of metal sulfides are released by the processing of Ag, Pb, Zn and Cu ores. Oxidation of sulfides like pyrite, sphalerite, chalcopyrite and arsenopyrite produces acid solutions rich in heavy metals like Zn, Pb, As and Fe.

To evaluate the potential of tailings to release metals to the environment, tailing samples were obtained at El Fraile. Chemical and mineralogical analyses were performed in the samples. An acid digestion in a microwave oven was done to determine total metals content. Water-soluble fraction was determined by treating samples with deionized water with a pH similar to rain water. Total and soluble metals concentrations were analyzed by ICP-MS and AAS respectively. Tailings mineralogy was determined by XRD.

Two different groups were observed in the studied samples (JF1, JF2, JF3, JF4, JF5, JF6, JF7, JF8, JF9 and JF10), as a function of pH, minealogy and Zn, Pb, As and Fe concentrations. Group I, formed by samples JF1, JF4, JF5, JF6, JF7, JF8, JF9 and JF10, was characterized by low pH values of ≈ 2 , high gypsum contents and jarosite > pyrite and argentojarosite. Group II, formed by samples JF2 and JF3 was characterized by near neutral pH values, high calcite contents, as well as calcite >> pyrite and gypsum.

Furthermore, group I had the lowest total concentrations and highest soluble concentrations of the analyzed metals; total Zn = 1045 mg/kg (Soluble Zn = 457 mg/kg), total Pb = 4089 mg/kg (soluble Pb = 2.4 mg/kg), total As = 571 (Soluble As = 13.4 mg/kg), total Fe = 9273 mg/kg (soluble Fe = 1843 mg/kg). Whereas in group II the average total metal contents were higher and the average soluble contents were lower; total Zn = 13062 mg/kg (Soluble Zn = 0.37 mg/kg), total Pb = 13493 mg/kg (Soluble Pb = 0.50 mg/kg), total As = 1964 mg/kg (soluble As = 0.40 mg/kg) and total Fe = 13445 mg/kg and non detectable soluble iron.

Correlation of the results allowed to infer that As in group I probably is present as scorodite FeAsO₄, since this mineral is the main As specie in acid tailings and has low solubility in this environment. Fe in group I may be forming jarosite [KFe₃(SO₄)₂(OH)₆]

and argentojarosite [$\text{Ag}_2\text{Fe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$], whereas in group II it may be forming ferric hydroxides produced by pyrite oxidation and oxihydroxides precipitation. Pb in group I is probably forming anglesite (PbSO_4) and in group II it may be present as galena (PbS) and cerussite PbCO_3 that is almost insoluble in water.

It is difficult to determine the main mineral species containing Zn, since a high variability was observed in Zn concentrations. Nevertheless, Zn in group I may be present as zincite (ZnO and/or gunningite $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, characterized by their high solubility. In group II, Zn may be present in sphalerite ZnS and willemite $(\text{SiO}_4)\text{Zn}_2$ that have low solubility. Besides, in previous studies, oversaturation of willemite has been found in percolated waters at El Fraile.

Higher mobility was found in samples with an acid pH. Calcite may contribute to decrease the release of metals in near neutral samples.

GENERALIDADES

1 Introducción

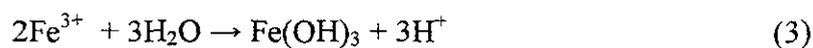
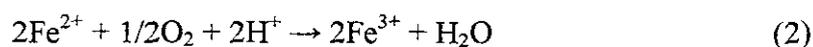
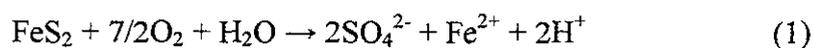
La industria minera representa una de las actividades productivas de mayor importancia, no solo como generador de recursos económicos, sino también como generador de empleos y de materias primas para el desarrollo industrial de muchos países. Desgraciadamente, los procesos de recuperación de metales generan grandes cantidades de desechos sólidos y líquidos que contienen cantidades importantes de metales pesados considerados como tóxicos para la biota y el medio ambiente (Fergusson, 1990; Salomons, 1990). Generalmente, los desechos sólidos (comúnmente llamados jales) son depositados al aire libre, como relleno de barrancas o en presas sobre arroyos, por lo que se encuentran expuestos a la acción del viento y al agua de lluvia produciendo una gran dispersión de contaminantes a los recursos del entorno (e.g. agua superficial, agua subterránea, suelos de cultivo, suelos urbanos, sedimentos, etc).

La composición de los jales mineros es altamente variable y depende fundamentalmente de la naturaleza del yacimiento explotado y del método de recuperación o beneficio (Ritcey, 1989; Alloway, 1990). Los jales mineros producidos por la explotación de los llamados metales base (e.g. Cu, Pb, Ag, Zn), están generalmente constituidos por mezclas heterogéneas de:

- (a) Residuos de los minerales sulfurados de la explotación como la pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), pirrotita [$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$], arsenopirita (FeAsS), galena (PbS), esfalerita (ZnS), argentita (Ag_2S), entre otros.
- (b) Minerales de ganga especialmente carbonatos como la calcita (CaCO_3), dolomita-anquerita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\text{-Ca}(\text{Fe,Mg})(\text{CO}_3)_2$] y siderita (FeCO_3) y silicatos como el cuarzo (SiO_2).
- (c) Fragmentos de las rocas huésped (Ritcey, 1989).

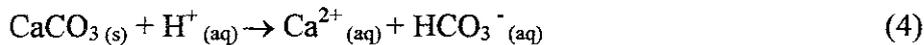
Aún cuando en los depósitos de metales explotados se reducen a los metales base, muchos minerales contienen cantidades importantes de otros metales como el As, Cd, Hg, Sb, Tl, Bi, etc, los cuales al ser acumulados en los residuos mineros constituyen una importante fuente potencial de contaminación (Fergusson, 1990; Evangelou, 1998).

La oxidación de los sulfuros metálicos, particularmente de la pirita es la fuente predominante de la acidez, así como de los metales disueltos, característicos del drenaje ácido de mina (*AMD por sus siglas en inglés*). La generación de AMD a partir de la pirita se produce en diferentes etapas las cuales son representadas por las siguientes reacciones (e.g. Ritcey, 1989; Evangelou, 1995; 1998):



La reacción (1) nos señala que en medios aeróbicos y en presencia de agua, la pirita produce la liberación de iones ferrosos y la generación de iones sulfato e hidronio. De acuerdo con la reacción (2) el ión ferroso es oxidado a ión férrico en presencia de oxígeno, el cual a su vez es transformado en hidróxido férrico estable en presencia de agua (3) liberando iones hidronio adicionales. Por otra parte, los iones sulfato e hidronio pueden combinarse entre sí para generar ácido sulfúrico. El aumento en la concentración del ión hidronio en el sistema y el consumo de oxígeno en la oxidación de los sulfuros produce un decremento importante en el pH y Eh del medio. De esta manera, el AMD resultante se caracteriza por presentar valores de pH <2.0 y valores de Eh < +0.08 V (Ritcey, 1989; Ferguson, 1990; Sanzalone, 1996).

Por otro lado, la presencia de minerales carbonatados tales como CaCO_3 (calcita) y $\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita) o minerales silicatados tales como $\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$ (anortita) tienen la capacidad de neutralizar la acidez producida en los drenajes mineros (Ritcey, 1989; Lin, 1997). La disolución de CaCO_3 se lleva a cabo a un pH ≥ 6.3 consumiendo un mol de H^+ por cada mol de calcita como se indica en la reacción 4 (Blowes et al, 1998).



Por otra parte, en las condiciones en las que los jales son generalmente depositados, éstos se encuentran expuestos a la acción del viento que transporta los contaminantes en forma de partículas, las cuales son depositadas en los suelos del entorno, elevando considerablemente los contenidos de metales (Salomons, 1995; Merian, 1991). En los suelos y jales mineros, los metales son adsorbidos por las arcillas principalmente por vermiculita y monmorilonita y/o capas de oxidróxidos de Fe, Al y Mn que sirven como barreras para la penetración de oxígeno (Zhixun, 1997). Los metales pesados también pueden formar complejos en presencia de materia orgánica (Alloway, 1990; Ritcey, 1989; Fergusson, 1990), y en niveles excesivos reducen la actividad enzimática de los suelos reduciendo considerablemente su fertilidad y aumentando su capacidad de intercambio catiónico (Ritcey, 1989).

La proporción de metales que es asimilada por la planta es una función directa de las concentraciones totales de metales en los suelos, siendo mayor la incorporación en suelos con exceso de metales (Alloway, 1990; Gregorich, 1997). Sin embargo, la distribución de los metales en las plantas depende de un gran número de factores incluyendo características físico-químicas del suelo, factores climáticos, tipo y fisiología de la planta, edad de la planta, entre otros (Alloway, 1990; Merian, 1991).

Sin embargo, el principal carácter dañino de los metales pesados radica en los efectos negativos que producen en los seres humanos. Muchos autores (Fergusson, 1990; Merian, 1991) han demostrado que el exceso de plomo en el organismo genera hipertensión, hiperactividad, daño severo en el hígado y cáncer. El Pb junto con el mercurio afectan el sistema nervioso central. Se ha demostrado también que el As y Cd afectan al sistema óseo y dental y al riñón e hígado (Abernathy et al, 1997; Seiler, 1988; Guy et al, 1991). Algunos de los ejemplos más conocidos de intoxicación por metales pesados son aquellos de Minamata en Japón y en Guatemala donde ocurrieron envenenamientos por mercurio por el consumo de pescado y granos de trigo (Fergusson, 1990). En Bangladesh, la presencia de arsénico en el agua potable ha producido serios trastornos en la salud de una gran parte de la población. En México existen

arios casos de afectación a la salud por el consumo de agua con altas concentraciones de As en
imipán, Hgo (Armienta et al, 1997 b).

En México, el estudio de los metales pesados relacionados con la actividad minera ha
obrado especial interés en años recientes. Aunque algunas pocas instituciones han desarrollado
investigaciones sobre este tema en las últimas dos décadas (Instituto de Geofísica, UNAM,
Instituto de Metalurgia, UASLP), muchos centros de investigación han iniciado sus estudios en
años recientes. Como consecuencia, el conocimiento sobre la dinámica físico-química de los
metales relacionados con la minería, su biodisponibilidad y las vías de acceso a los seres vivos es
muy limitado. Actualmente, el Instituto de metalurgia de la Universidad de San Luis Potosí,
el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, el Instituto de
Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, la Facultad de Ciencias
de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León realizan estudios sobre la
caracterización química y la mineralogía de los jales mineros. La Facultad de Ciencias Químicas
de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y la Facultad de Química de la Universidad
Autónoma de Querétaro estudian el impacto de los jales en los suelos. El Instituto de Geofísica de
la Universidad Nacional Autónoma de México, la Unidad de Ciencias de la Tierra, Campus
Tlaxiquilla, Qro de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Escuela Regional de
Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Guerrero estudian la caracterización
Hidrogeoquímica de Metales pesados. La Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de
San Luis Potosí, la Escuela de Enfermería N° 4 de la Universidad Autónoma de Guerrero, El
Departamento de Ciencias Ambientales del Instituto Nacional de Salud Pública, El Centro de
Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma de Aguas Calientes estudian el impacto de los
metales pesados en la salud.

2.2 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es evaluar el potencial de los jales mineros de El
Tráile (Taxco de Alarcón, Gro.) para liberar metales al medio ambiente en función de su
composición química y mineralógica.

Localización del Área de Estudio y Vías de Acceso

El área de estudio se localiza en la parte Norte del Estado de Guerrero, a 10 km al SW de Ciudad de Taxco de Alarcón (Fig. 1) y comprende una superficie de aproximadamente 10 km². Geográficamente, el área se encuentra entre los paralelos 18° 30' y 18° 35' 37" de latitud Norte y entre los meridianos 99° 40' y 99° 33' 30" de longitud Oeste. En la región de estudio, las principales poblaciones son Taxco de Alarcón, Cacalotenango, El Fraile, Santa Rosa, Dolores y Tepeyematla.

El acceso principal al área de estudio es por la Carretera Federal No 95 que une las ciudades de Taxco de Alarcón e Iguala, Gro. A aproximadamente 10 km de Taxco rumbo a Iguala se desprende un camino de terracería transitable en toda época del año que conduce a los poblados de Dolores, Santa Rosa, el Fraile y Cacalotenango. El poblado de El Fraile, donde se localizan los residuos mineros objeto del presente estudio, se encuentra a 5 km del entronque con la Carretera Federal.

1 Fisiografía e Hipsometría

Fisiográficamente, la región de estudio forma parte de la Sierra Madre del Sur y se ubica en la parte media superior de la Cuenca Hidrográfica del Balsas. El mapa de la figura 2 es un mapa hipsométrico que presenta elevaciones hasta de 2400 msnm hacia el Norte del área y las partes más bajas se localizan en la parte Sur con elevaciones de 1200 msnm, los principales ríos que drenan son el Río Taxco y el Río Cacalotenango que drenan de N a S-SE.

Algunas de las aplicaciones que se le pueden dar a la hipsometría es la identificación de unidades geológicas mediante la topografía que refleja cada unidad, así como la dirección de las cañadas que indican lineamientos estructurales. Por ejemplo, la Fm. Tilzapotla y las Fm. Morelos forman grandes escarpes. Mientras que las lutitas y areniscas de la Formación Mezcala forman pequeñas elevaciones arredondadas. Las cañadas hacia la parte central del área presentan una orientación N-S del Río Taxco y NW-SE del Río Cacalotenango. Estas orientaciones indican la presencia de fallas o fracturas (Fig. 2).

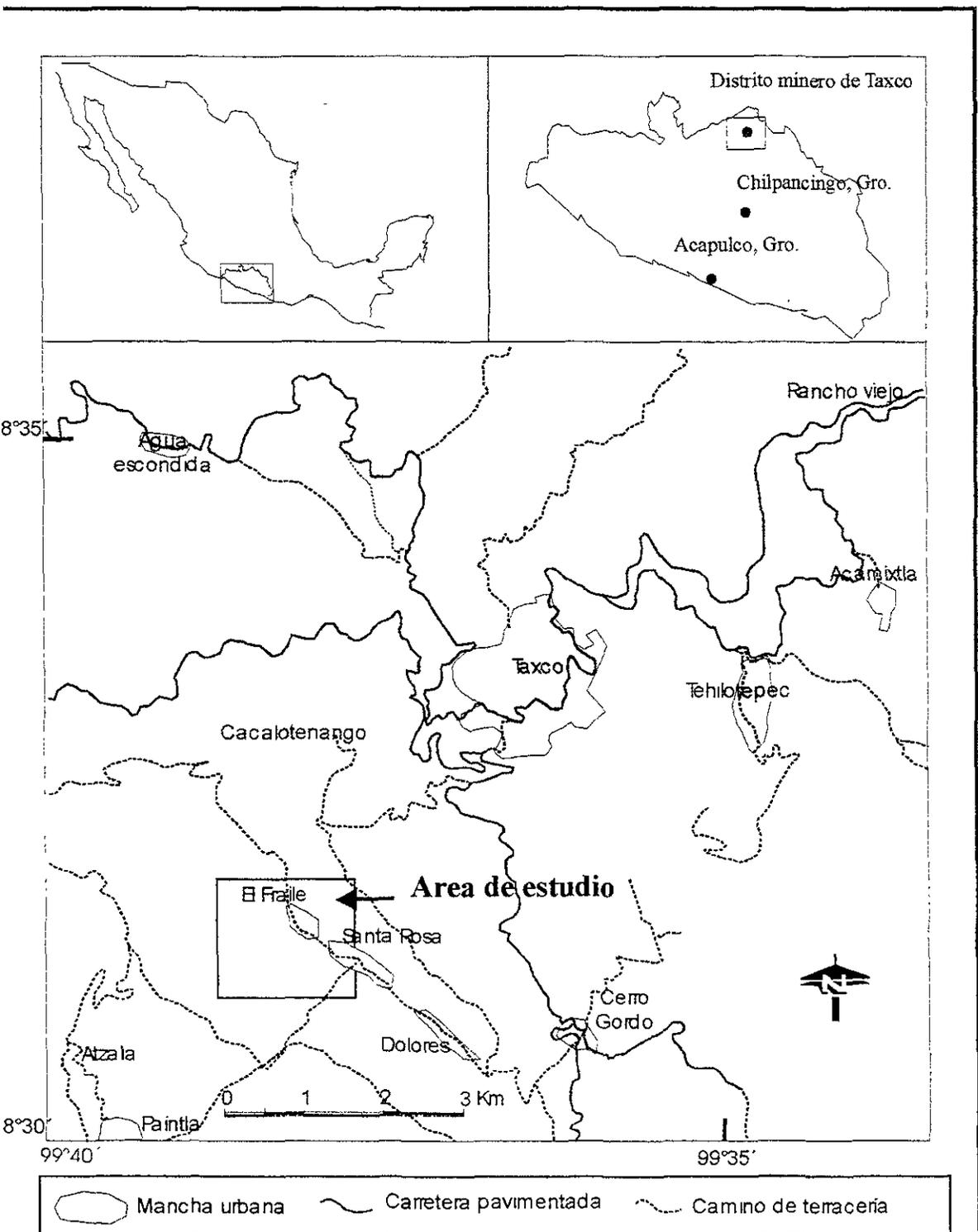


Figura 1. Mapa de ubicación y principales vías de acceso en el área de estudio

La topografía es contrastante y se caracteriza por la presencia de dos ciclos de erosión: moderadamente maduro caracterizado por un relieve suave y un sistema de drenaje rítico bien integrado con disecciones moderadas desarrollado en rocas mesozoicas (litas, calizas y lutitas) y uno juvenil caracterizado por una topografía accidentada con los cantiles y drenaje no integrado desarrollado en rocas terciarias (grupo Balsas y Riolita potla).

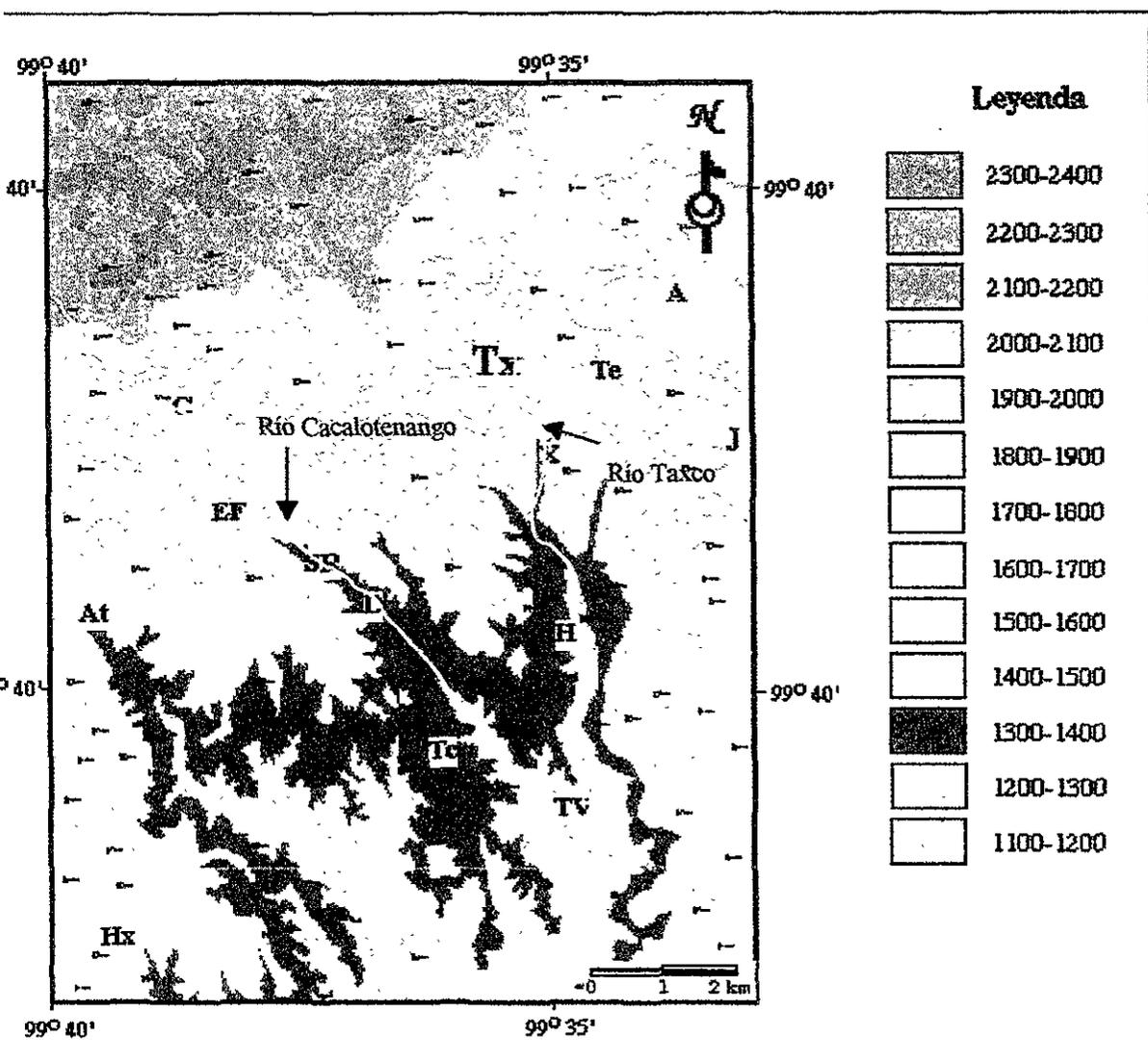


Figura 2 - Mapa hipsométrico del área de estudio. Los dos principales ríos de la región, Río Cacalótenango y Río Taxco han sido indicados para fines de ubicación. A = Acamixtla; Te = Tequilotepec; Tx = Taxco; X = Xochula; J = Juliántla; C = Cacalótenango; EF = El Fraile; SR = Santa Rosa; D = Dolores; Tc = Tecapulco; TV = Taxco el Viejo; At = Atzala; Hx = Huixtác. El mapa también muestra las formas topográficas y la orientación de los elementos orográficos tales como cerros, lomeríos y cañadas.

3.2 Clima y vegetación

El clima que predomina en la región es tropical lluvioso con fuertes precipitaciones en verano, mientras que es seco durante el invierno. Su precipitación pluvial oscila entre 1000 y 1500 mm anuales. La temperatura del sitio varía entre 10° C y 32° C, siendo la temperatura promedio de 25°C (Uribe, 1986).

La alta precipitación de la zona acelera el proceso del intemperismo de los materiales arcillosos, así como de los jales mineros dando origen a los hidroaluminosilicatos.

Las corrientes de agua en la presencia de oxígeno, CO₂ y sólidos disueltos aumentan el proceso de intemperismo ocasionando una mayor migración de iones a través del suelo y/o jales mineros donde son adsorbidos a materia orgánica o material arcilloso (Ritcey, 1989).

3.4 Antecedentes de la Minería

En la región de Taxco los yacimientos minerales de Ag y Au se comenzaron a explotar en pequeña escala desde la época prehispánica, probablemente en tiempos de Iztcoátl (1428-1440) o Moctezuma Ilhuicamina (1440-1468). En 1521, Hernán Cortés mandó explorar la región taxqueña, resultando la apertura de la primera mina en América denominada "Socavón del Rey", hoy mina Pedregal. En 1534, los conquistadores Juan de Cabra y Juan de Saucedo poblaron el sitio que hoy es la ciudad de Taxco y comenzaron a extraer minerales de Ag (CRM, 1999).

Desde 1747 a 1762, José de la Borda llevó a cabo el período de mayor producción de Ag y Au en las Minas San Ignacio, El Pedregal, La Lajuela, El Coyote y Cerro Perdido. En este periodo fueron descubiertas las bonanzas de las minas La Borda y Yo Amigo, encontrándose los minerales de Ag más ricos de México, los cuales contenían hasta 168 kg de Ag/ton. (CRM, 1999)

En 1811 el Distrito quedó paralizado como consecuencia de la sequía de la noria de San Felipe. Fue hasta 1920, cuando el Distrito se reactivó con la explotación de menas de sulfuros complejos de Pb, Zn y Cu, con Ag y Au, debido al cambio de sistema de beneficio de amalgamación en frío por cianuración, permitiendo trabajar minerales de baja ley. En el mismo año se instaló la primera planta de beneficio por flotación selectiva y empezó la explotación moderna de las minas de la región. La empresa "American Smelting and Refining Company" (ahora grupo México, S.A. de C.V.) llegó a Taxco en 1942 y adquirió los principales fondos de la zona (CRM, 1999).

5 Geología Económica

En el Distrito Minero de Taxco existen aproximadamente 50 vetas de importancia económica. Su longitud varía entre 500 y 700 m, pero algunas pueden llegar a medir hasta 2000 m. La anchura más común de las vetas varía entre 1 y 3 m, no obstante algunas pueden alcanzar hasta 10 m, con profundidad hasta de 400 m. Los clavos alcanzan 600 m de longitud y 200 m de altura. Los mantos más importantes se encuentran en los tiros el Solar y Guerrero (Cserna y Fries, 1981). Las vetas mineralizadas forman un patrón regional con rumbos de N-S, N10°W, N30°W y 60°W. Un sistema de fallas no mineralizadas con rumbo NE-SW cortan las vetas.

El grupo México (1997), postula una hipótesis genética de la evolución de la mineralización, relacionada con la fase terminal de un sistema calderítico, que funcionó en el Plioceno. Las principales evidencias de la caldera son una estructura circular y la presencia de abundantes materiales explosivos y lavas riolíticas. La instalación de un sistema hidrotermal tardío tuvo su mayor efecto en bordes septentrional y nororiental de la caldera, así como a lo largo de las fracturas NW-SE dentro de la misma. La fuente de los metales en el sistema hidrotermal es la diseminación en las rocas del Esquistó Taxco y la Roca Verde Taxco el Viejo, por medio de fluidos de salmuera de baja salinidad. De acuerdo con esta hipótesis, los minerales se lixiviaron y luego se precipitaron a temperaturas de 220° C y 260° C. La edad de la mineralización debe haber sido después de la salida de las riolitas, probablemente al final del Plioceno.

Sistema de Beneficio

El mineral que se extrae en el Distrito Minero de Taxco se procesa en la planta el Solar de Industrial Minera México S.A de C.V. Los molinos de flotación separan los minerales estéricos de la roca de desecho usando reactivos como cianuro de sodio, sulfato de zinc y amonio e causan que las burbujas de aire sujeten a las partículas minerales y las transporten hasta la superficie. La capacidad de la planta es de 3.300 ton/día aunque actualmente sólo se procesan 582 ton/día. En 1988 se beneficiaron 786 420 t, en 1989 fueron 889 080 t, y en 1996 se trataron 5 072 toneladas que produjeron 26 674 t de concentrado. El producto final de los procesos de flotación es concentrado de Pb y de Zn.

Esta unidad beneficia mineral con leyes de 0.29 g/ton de Au, 74 g/ton de Ag, 0.99 % de Cu, 0.10% de Cu y 3.36 % de Zn.

7 Ubicación de los jales del Distrito Minero de Taxco

Desde el siglo XVI se ha llevado a cabo la extracción de metales en la región de Taxco y sus alrededores liberando una gran cantidad de desechos de mina que han sido depositados en el medio ambiente a través del tiempo. Los jales de la época de la colonia no se han identificado. Sin embargo, se piensa que han sido cubiertos por la erosión de materiales rocosos. A partir de 1940, los depósitos de jales más importantes dentro del distrito minero Taxco son: jales la Toncha, jales Sta. Rosa, jales San Antonio, jales Taxco y jales el Fraile. Estos depósitos presentan características particulares que permiten que se puedan diferenciar entre ellos como se muestra a continuación:

- (a) Dimensión del depósito
- (b) Grado de oxidación de la superficie del depósito
- (c) Grado de compactación
- (d) Tipo de relieve
- (e) Edad del depósito
- (f) Mineralogía del depósito

(g) Tamaño de las partículas (como resultado de los métodos de amalgamación y flotación para la extracción de los minerales).

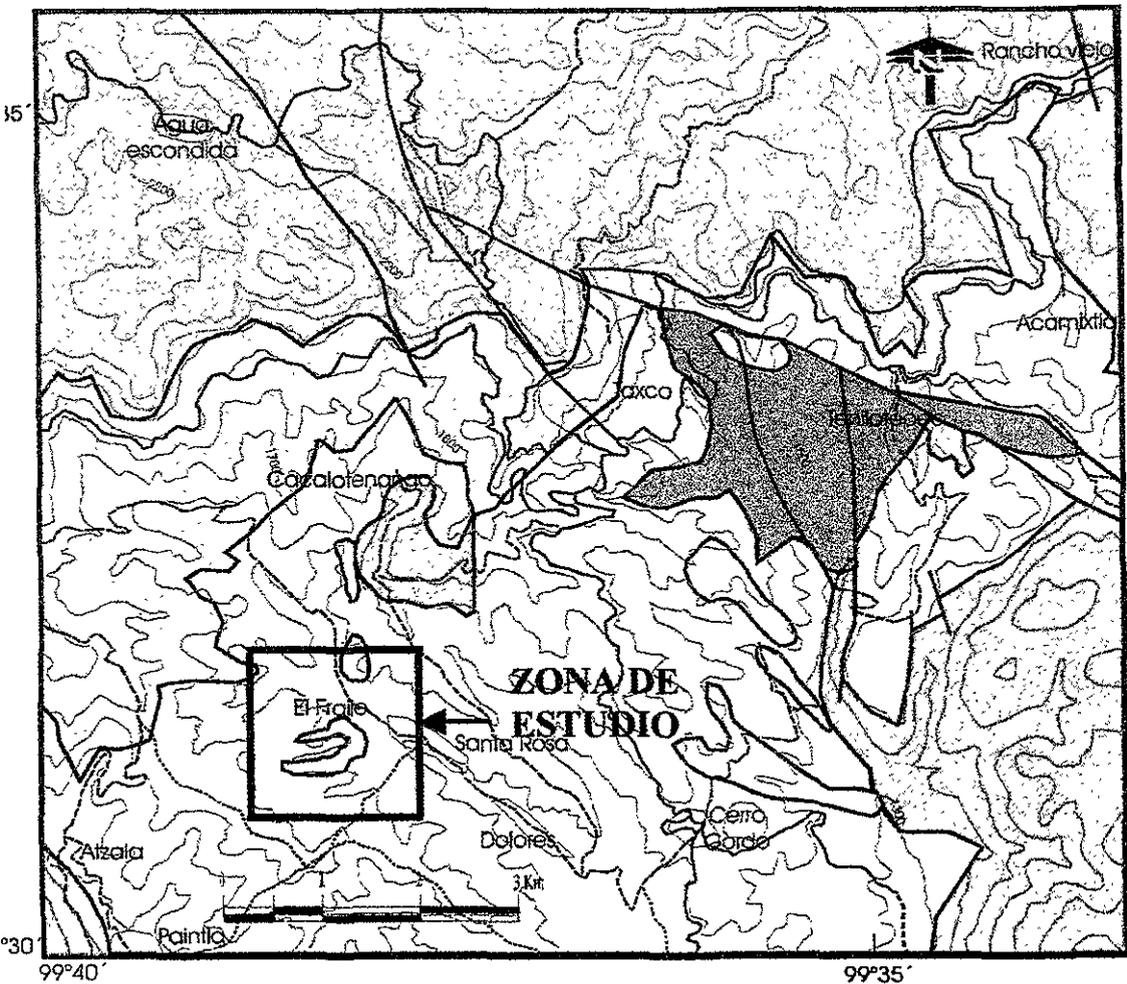
A pesar de que existen varios depósitos en la región, los jales del Fraile se consideraron de mayor interés ya que se encuentran depositados dentro del poblado del mismo nombre (figura 3) además los pobladores en época de estiaje, por medio de mangueras transportan el agua que ha sido almacenada por lixiviación debido a la precipitación de agua meteórica y ésta es empleada para satisfacer sus diferentes necesidades.

Geología

Geológicamente, la región de estudio se ubica en la parte occidental del Terreno Mixteco que forma parte de la provincia geológica denominada Plataforma Morelos-Guerrero (Campa y Ramírez, 1983). La figura 3 muestra un mapa geológico sintético de la región de estudio según Campa y Ramírez (1979) donde se pueden apreciar las relaciones espaciales de las unidades, mientras que la figura 4 muestra una columna estratigráfica compuesta donde se aprecian las relaciones cronoestratigráficas de las mismas. En esta región, las litologías que afloran corresponden a 6 unidades estratigráficas cuyas características se describen de manera resumida en los siguientes párrafos.

Esquisto Taxco-Roca Verde Taxco Viejo

El Esquisto Taxco y la Roca Verde Taxco Viejo (Fries, 1960) representan la unidad estructural más baja de la región estudiada. Se han reconocido solo dos afloramientos aislados de esta unidad, uno en la ciudad de Taxco y el otro al oriente del poblado de Taxco el Viejo, 10 Km. al sur de Taxco (Fig. 3). Afloramientos de esta unidad se pueden observar a lo largo de la carretera federal que cruza la ciudad de Taxco aunque las mejores exposiciones pueden observarse en la Cañada del Río Taxco y la Cañada de los Aguacates en Taxco el Viejo, Gro. Las relaciones estratigráficas de esta unidad con las otras unidades estratigráficas son complejas y, por lo general, de naturaleza tectónica. Al oriente de Taxco, el Esquisto Taxco-Roca Verde Taxco Viejo está en contacto tectónico a través de fallas normales con las calizas de la Formación Morelos. Sin embargo, en el afloramiento de Taxco el Viejo, el Esquisto Taxco-Roca-Verde



LEYENDA

	Formación Morelos		Jales Mineros
	Formación Mexcala		Poblaciones
	Esquisto Taxco		Mancha urbana
	Conjunto Tilzapotla		Carretera pavimentada
	Grupo Balsas		Camino de terracería

Figura 3. Mapa geológico que representa las diferentes formaciones geológicas, así como los depósitos de jales del área de estudio. (Tomado de Campa y Ramírez, 1979).

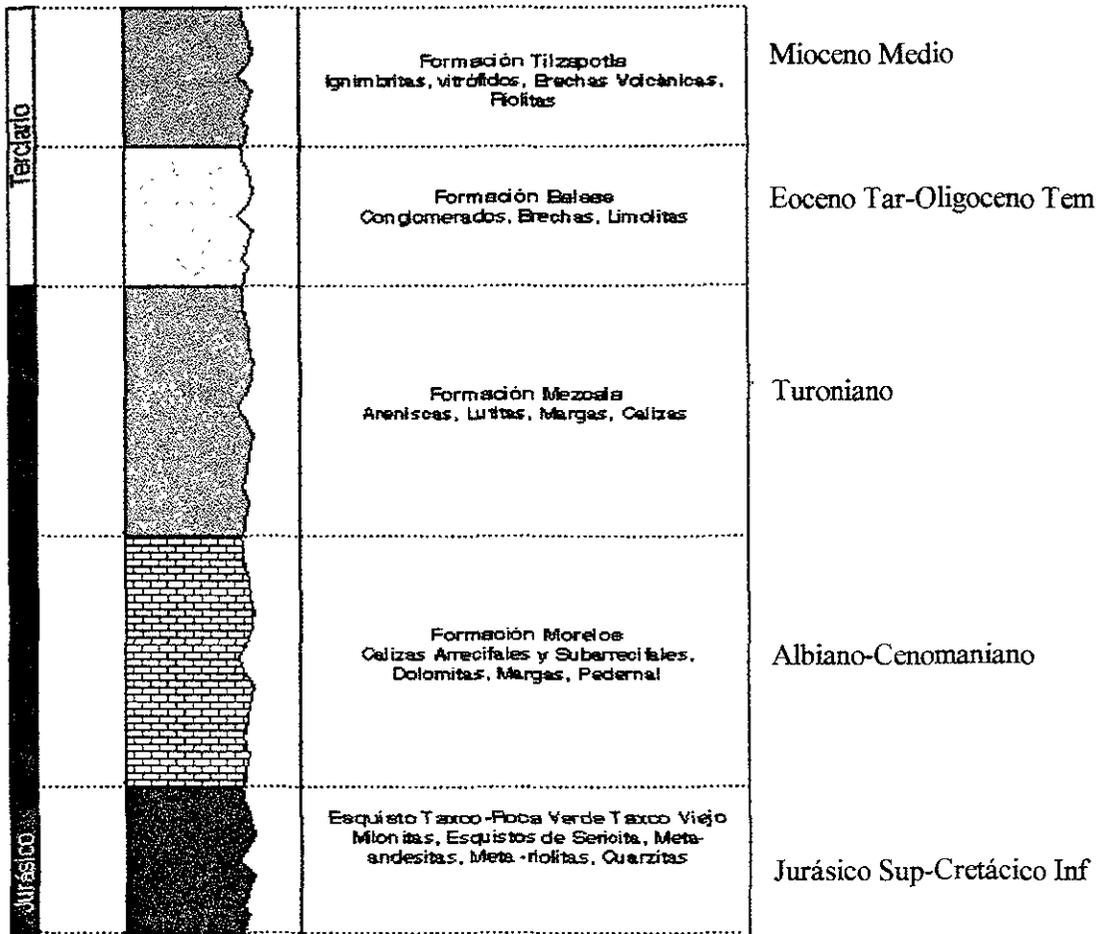


Figura 4. Columna estratigráfica de la región de estudio, mostrando las unidades geológicas. (Tomado de Campa y Ramírez, 1979).

El Esquisto Taxco-Roca Verde Taxco Viejo cabalga hacia el oriente a las calizas de la Formación Morelos. En el borde oriental del afloramiento de Taxco, el contacto está caracterizado igualmente por fallas normales que ponen en contacto las rocas de esta unidad con las lutitas y areniscas de la Formación Mezcala. No obstante, en Taxco el Viejo, la Formación Mezcala reposa directamente sobre el Esquisto Taxco-Roca Verde Taxco Viejo en un contacto con evidencias de cizalla. Al norte de Taxco, el Esquisto Taxco-Roca Verde Taxco Viejo es sobreyacido discordantemente por lechos rojos de la Formación Balsas y por las riolitas de la Formación Tilzapotla.

El Esquisto Taxco-Roca Verde Taxco Viejo está constituido por un esquisto sericítico arenolítico, de color gris, compuesto por cuarzo, feldespato y sericita, cuyo protolito es una roca volcánica. La Roca Verde Taxco Viejo está compuesta por una estratificación de toba, brecha y

mayor cantidad de corrientes lávicas, casi todas andesíticas. El color predominante es verdoso, con algunos manchones purpúreos y con abundancia, en algunos afloramientos, de minerales de talca y epidota. Esta unidad presenta un estilo de deformación dinámica, ya que muchos fragmentos que componen la roca están comprimidos y alargados, proporcionando una apariencia fragmentada con cantidades importantes de clorita.

La edad de esta unidad es incierta. Fries (1960), supuso que esta unidad se componía de unidades distintas, una superior constituida por la Roca Verde Taxco Viejo y una inferior representada por el Esquistos Taxco. Este autor correlacionó la Roca Verde Taxco Viejo con la Roca Verde del Triásico Tardío de Zacatecas y por posición le asignó una edad paleozoica al Esquistos Taxco. Campa (1974) considera que ambas secuencias constituyen una sola unidad litológica y la correlaciona con la secuencia vulcanosedimentaria de Teloloapan-Ixtapan de la Cruz del Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

Formación Morelos

La Formación Morelos (Fries, 1960) aflora principalmente en la parte oriental del área de estudio (Fig. 3). Un afloramiento aislado ha sido encontrado en la parte central del área al norte de El Fraile. La relación de las rocas de la Formación Morelos con las otras unidades es muy compleja. Sobre el Río Taxco, esta unidad se encuentra en contacto tectónico vertical con el Esquistos Taxco-Roca Verde Taxco Viejo, mientras que en Taxco el Viejo, esta formación es superpuesta por los mismos esquistos. En la porción oriental del área, en las cercanías de Taxco el Viejo, la Formación Morelos subyace de manera concordante a las lutitas y areniscas de la Formación Mezcala. Al norte de Taxco, esta unidad es sobreyacida de manera discordante por los arenos rojos de la Formación Balsas y por las lavas de la Formación Tilzapotla.

La Formación Morelos consiste principalmente de capas gruesas y bancos de calizas microporosas, interestratificadas con horizontes de material arcilloso, de color gris claro y oscuro, formando en muchos casos biostromas con predominio de rudistas. Sin embargo, también se tiene presencia de calizas delgadas (10-40 cm.) con abundante pedernal negro formando pliegues

rados “zig-zag” o de tipo “chevron”. El espesor de esta formación se desconoce, ya que no se encuentra aflorando su base. Sin embargo, Tarango (1973), reporta un espesor máximo de 1430 m mientras que Fries (1960) mide un espesor de 900 m.

La Formación Morelos fue datada por Fries(1960) como Albiano-Cenomaniano con base en la presencia de *Actionella*, *Taucasia*, *Nerinea* y los microfósiles como *Numoloculina heime* y *Styocumms sunnilandensis*.

Formación Mezcala

La Formación Mezcala (Fries, 1960) aflora principalmente en la parte central del área de estudio (Fig. 3). La relación de esta unidad con el resto de las unidades es variada. En Taxco, la Formación Mezcala se encuentra en contacto por falla normal con el Esquisto Taxco-Roca Verde y Taxco Viejo mientras que en Taxco el Viejo, descansa de manera concordante sobre esta misma unidad. En esta misma localidad, la Formación Mezcala sobreyace de manera concordante y transicional a las calizas de la Formación Morelos. Finalmente, al norte de Taxco, las lutitas y areniscas son sobreyacidas en discordancia por los conglomerados de la Formación Balsas.

La Formación Mezcala está constituida por una secuencia monótona de lutitas y areniscas. En la base, en particular cuando se encuentra sobreyaciendo de manera concordante y transicional a las calizas de la Formación Morelos, es muy común encontrar intercalaciones de lutitas delgadas y margas. El espesor de esta unidad es difícil de apreciar, ya que presenta un grado de deformación en pliegues cerrados que dificulta su medición. Sin embargo, Bohnenberger (1955) reportó un espesor de 1220 m medidos en el Río Mezcala y Campa (1976) reporta un espesor de 500 m para el Valle de Taxco.

La edad mas reciente de acuerdo a inoceramidos (*Mollusca Bivalvia*) encontrados en la Formación Mezcala, corresponde al Turoniano (Garibay et al,1998)

Formación Balsas

La Formación Balsas (Fries, 1960) aflora esencialmente a lo largo de una franja de orientación general E-W en la parte centro del área de estudio, justo al norte de la ciudad de Taxco (fig. 3). Esta unidad sobreyace de manera discordante a las rocas de las formaciones Esquistos Taxco-Roca Verde Taxco Viejo, Morelos y Mezcala y sobreyace de manera paralela a las riolitas de la Formación Tilzapotla.

Esta formación está constituida por sedimentos terrígenos continentales de color rojo que varían desde limolitas, areniscas finas y conglomeráticas a conglomerados, esencialmente volcánicos y calizos dispuestos en estratos que varían desde algunos centímetros (en limolitas principalmente) hasta metros (en los conglomerados). El espesor expuesto de la Formación es muy variable, dada su naturaleza de relleno de valles-fosas. Sin embargo se ha calculado que al menos comprende 500 m (Campa y Ramírez, 1979).

En esta unidad no se han encontrado fósiles por lo que su edad ha sido establecida por correlación con los conglomerados rojos de la región de Guanajuato, datados del Eoceno Tardío-Eoceno Temprano (Edwards, 1965; Fries *et al* 1955).

Formación Tilzapotla

La Formación Tilzapotla (Fries, 1960) aflora al norte del área de estudio. (fig. 3). Las rocas de esta unidad sobreyacen de manera paralela a los lechos rojos de la Formación Balsas y de manera discordante al Esquisto Taxco-Roca Verde Taxco Viejo y a la Formación Morelos.

Esta unidad está constituida principalmente por lavas riolítico-dacíticas, con texturas vidriadas, esferulíticas y porfídicas de color rozado; así como tobas y lahares asociados a depósitos de ignimbrita. El espesor de esta unidad en la región de Taxco es de aproximadamente 75 m.

En base a estudios radiométricos en zircones, Fries (1960), le asigna una edad de Plioceno Superior en la región de Taxco. Sin embargo, al considerar la estrecha relación con los afloramientos de la Sierra Madre Occidental, debido a que constituyen una misma provincia tectónica, se le asigno una edad de Mioceno-Medio (Mc. Dowell, 1972).

. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

.1. Etapas de Experimentación

Este trabajo consistió de tres diferentes etapas: (1) la primera se realizó en el campo e incluyó, además de la recolección de las muestras de jales, el reconocimiento de la geología local; (2) la segunda etapa se realizó en el laboratorio e incluyó la preparación de las muestras y sus análisis mineralógicos y químicos; y, (3) la tercera incluyó la interpretación de los resultados.

1.- Trabajo de Campo

El trabajo de campo incluyó la recolección de muestras y el reconocimiento de la geología local. Las muestras de este estudio provienen de los Jales El Fraile localizados en las cercanías de la mina y poblado del mismo nombre, y se recolectaron en el mes de Febrero de 2000 (fig. 5).

Se seleccionaron tres puntos de muestreo representativos de las características físicas macroscópicas de estos depósitos. La ubicación de estos puntos de muestreo se señala en el mapa de la figura 5. Todos los puntos se ubican en la parte inferior de los jales y se distribuyen a lo largo de una línea transversal cerca del muro que sirve de retén. En cada punto se levantaron tres muestras de diferentes niveles con características macroscópicas distintivas, con excepción del punto de muestreo 3 donde se levantaron cuatro muestras. El punto de muestreo número 1 incluye las muestras JF1, JF2, y JF3. El punto de muestreo número 2 incluye las muestras JF4, JF5 y JF6. Finalmente, el punto número 3 incluye las muestras JF7, JF8, JF9, JF10. La ubicación geográfica de los puntos de muestreo se realizó con ayuda de un posicionador satelital (GPS) y las coordenadas de cada punto se indican en la tabla 1.

Se levantaron aproximadamente 2 Kg de cada una de las muestras abarcando diferentes niveles con características físicas similares. Las muestras fueron tomadas inmediatamente debajo de la costra de oxidación (3 cm en promedio) utilizando materiales de polietileno prelavados con agua destilada.

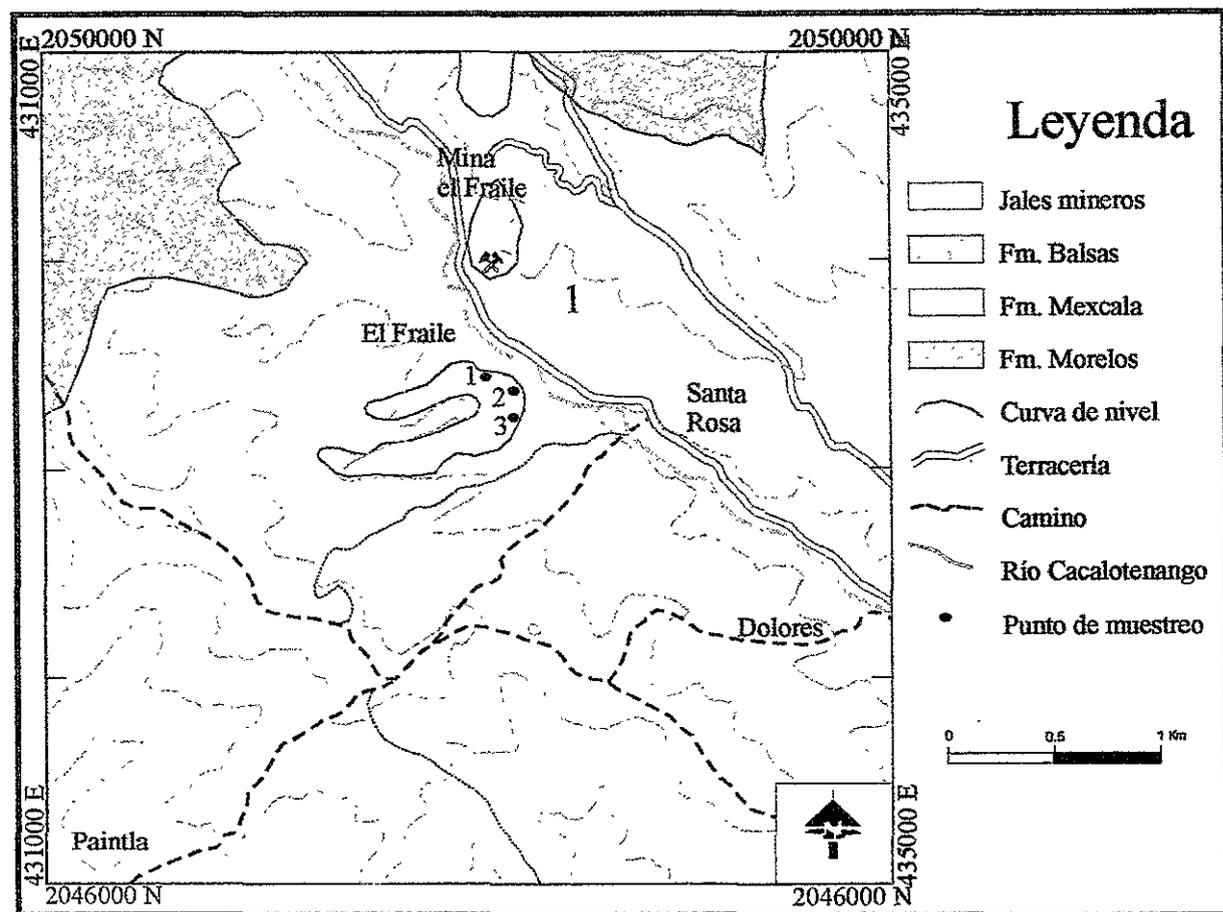


Figura 5. En el centro del mapa se ubican los tres puntos de muestreo en los jales el Fraile, en la parte Norte se observa la Mina del mismo nombre.

Puntos de muestreo	Muestras	Latitud	Longitud
1	JF1, JF2, JF3	18° 31' 35.1"	99° 38' 1.6"
2	JF4, JF5, JF6	18° 31' 31.3"	99° 37' 58.2"
3	JF7, JF8, JF9, JF10	18° 31' 28"	99° 36' 12"

Tabla 1. Coordenadas geográficas determinadas en los tres puntos de muestreo. Obtenidas a partir de un posicionador satelital (GPS).

Tomando como base ampliaciones (1:12 500) de la carta topográfica de INEGI E14A68 de Texco de Alarcón Guerrero escala 1:50 000 y del mapa geológico de Campa y Ramírez (1979), se realizó un reconocimiento geológico de las unidades litoestratigráficas que afloran en el área de estudio así como de sus características estructurales.

2.- Preparación de la muestra en el laboratorio, análisis mineralógicos y químicos

Las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la UNAM donde se llevó a cabo la preparación de las muestras y los análisis químicos.

Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente durante 48 horas en un lugar libre de polvos. Aproximadamente 0.5 Kg de la muestra perfectamente seca fue tamizada utilizando un tamiz de acero inoxidable malla No 18 para recuperar la fracción <1.0 mm. La fracción restante fue almacenada como testigo bajo refrigeración para evitar biodegradación.

El pH se determinó siguiendo el método propuesto por Jacson (1982). A aproximadamente 10 g de la fracción <1.0 mm se le agregaron 20 mL de agua bidestilada para obtener una relación sólido/líquido de 1:5. La mezcla se agitó durante 1 hora con ayuda de un agitador magnético y el pH se midió en el extracto utilizando un potenciómetro marca Orión modelo EA940 calibrado con soluciones buffer de 4.0 y 7.0. La conductancia se midió en el extracto filtrado a través de un filtro de 0.45 μm utilizando un conductímetro digital marca Conductronic PC 18.

El contenido de sulfatos se determinó con el método turbidimétrico. Inicialmente se lleva una alícuota de la muestra a un vaso de precipitado, se le adicionan 5 mL de solución acondicionadora (preparada con 25 mL de glicerol, 30 mL de HCl_{conc} , 150 mL de H_2O bidestilada, 10 mL de etanol al 95% y 37.5 g de NaCl) y 130 mg de BaCl_2 , la mezcla se agita durante 1 minuto a velocidad constante. La solución se traspasa a un matraz de 100 mL y se afora con agua destilada. La solución se homogeniza y se lee la absorbancia en un espectrofotómetro. La concentración de los sulfatos contenidos en la muestra se determina al comparar la curva obtenida con la curva estándar.

Para la determinación de los contenidos totales de Fe, As, Zn y Pb en los jales se tomaron aproximadamente 0.3 Kg de la fracción <1 mm de cada una de las muestras y se molieron con un pulverizador de anillos de carburo de tungsteno marca HERZOG en el Instituto de Geología. De cada muestra pulverizada se pesó 0.1 g en una balanza digital con 0.0001 g de precisión. La muestra fue colocada en botellas de fluorocarbono (PFA) con 10 mL de HF, 5 mL de HNO₃ y 1 mL de HCl. Las botellas se colocaron dentro de un horno de microondas marca MDS 2000 y se llevó a cabo una primera digestión durante 1 hora hasta alcanzar una presión de 150 psi. Se realizó una segunda digestión abierta en Parrilla de calentamiento agregando 5 mL de HF y 2 mL de HClO₄ para asegurar una digestión completa. Se llevó a cabo una tercera digestión agregándole 2 mL de HClO₄ con la finalidad de eliminar el F⁻ y la materia orgánica presentes. El resultado de la digestión total fue una masa pastosa blanquecina a la cual se le agregaron 10 ppb de In como estándar interno y se aforó a 50 mL en un matraz volumétrico. La solución fue analizada por Zn, Cu y As por ICP-MS en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS). El Fe fue analizado por Espectrometría de Absorción Atómica con flama en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica.

La determinación de las especies mineralógicas se llevó a cabo con el siguiente procedimiento: a aproximadamente 2 g de jales de la muestra que fue pulverizada, se colocaron en un porta muestras y se compactaron con un portaobjetos, la muestra se colocó en una cámara de portamuestras y se radió con rayos X en condiciones normales de 20 MA, 30 KV a una temperatura de 40 ° C hasta alcanzar 72° u 80° C. Las especies minerales presentes en las muestras se determinaron con un difractómetro de rayos X marca Phillips en el Instituto de Geología.

Para la determinación de la fracción soluble de Fe, As, Zn y Pb se pesó 1.0 g de la fracción <1 mm en una balanza granataria con 0.1 g de precisión con ayuda de un vaso de precipitado de 100 mL. Se agregaron 25 mL de agua bidestilada para obtener una mezcla con relación sólido/líquido de 1:25. La mezcla se agitó durante 2.5 horas en un agitador magnético. El extracto se separó del sólido con un filtro millipore de membrana de diámetro de poro de 0.45 µm, el extracto filtrado se aforó a 100 mL con agua bidestilada. La fracción soluble se analizó con la técnica analítica de espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) con flama, excepto para el Pb que se analizó con espectrofotometría de Absorción Atómica con acoplamiento de horno de grafito.

El horno de grafito es un aparato de muestreo sin flama. La energía requerida para la atomización es obtenida aplicando una diferencia de potencial eléctrico a través de un tubo de grafito dentro del cual se ha colocado una alícuota de muestra, que es totalmente consumida durante la atomización en pocos segundos. La señal de la absorción resultante es, por consiguiente, de naturaleza transitoria reflejando la rápida variación de la concentración de los átomos en el horno. El horno está alineado en el área de muestreo del espectrofotómetro en forma tal que la luz de la lámpara espectral pasará por el centro del tubo de grafito. El vapor atómico generado por la muestra cuando el horno está encendido absorberá entonces luz de la lámpara.

Método de Difracción de Rayos (DRX)

Los cristales tienen una estructura tridimensional con características periódicas a lo largo de los ejes cristalográficos. Cuando un haz de rayos X choca con un arreglo tridimensional, ocasiona que los electrones vibren con una frecuencia de la radiación X incidente. Cuando estos electrones vibran absorben algo de la energía de rayos X y actúan como una fuente de nuevos frentes de onda que emiten esta energía como radiación X de la misma frecuencia y longitud de onda. En general, las ondas dispersas interfieren destructivamente, pero en algunas direcciones específicas refuerzan a otras, produciendo un efecto de dispersión conocido como *difracción de rayos X*.

Ley de Bragg

Cuando un haz de rayos X choca con una superficie de un cristal en algún ángulo θ , una fracción es dispersada por la capa de átomos en la superficie. La porción no dispersada del haz penetra a la segunda capa de átomos donde otra vez una fracción se dispersa, y el resto pasa a la tercera capa. El efecto acumulativo de esta dispersión de los centros espaciados regularmente del cristal es la difracción del haz. Los requisitos para la difracción de los rayos X son: 1) El espaciamiento entre las capas de átomos debe ser aproximadamente igual que la amplitud de onda de la radiación; y, 2) los centros dispersados deben ser espacialmente distribuidos en un camino regularmente regular (Skoog & Leary, 1992).

En 1912 Bragg estudió la difracción de rayos X en cristales, donde un haz estrecho de radiación choca con la superficie del cristal en un ángulo incidente θ ; la dispersión ocurre como una consecuencia de la interacción de la radiación con átomos localizados en O , P y R . Si la distancia:

$$AP + PC = n\lambda \quad (6)$$

Donde n es un entero, la radiación dispersa estará en la fase en OCD , y el cristal parecería que reflectara la radiación X. Pero es realmente visto que:

$$AP = PC = d \text{ sen } \theta \quad (7)$$

Donde D es la distancia interplanar del cristal. De tal manera que se puede escribir que las condiciones para una interferencia constructiva del haz en un ángulo θ son:

$$n\lambda = 2d \text{ sen } \theta \quad (8)$$

Esta ecuación es la ecuación de Bragg y es de importancia fundamental. No obstante los rayos X son reflectados del cristal únicamente si el ángulo de incidencia satisface la siguiente condición

$$\text{Sen } \theta = n\lambda / 2d \quad (9)$$

4. Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)

La espectrometría por plasma inducido (ICP-MS) es una técnica analítica capaz de medir la mayoría de los elementos de la tabla periódica con muy bajos límites de detección y excelente precisión. Los elementos son medidos simultáneamente y se puede hacer un análisis completo en un tiempo de 2 minutos, lo que la hace una técnica analítica extremadamente rápida.

Las partes básicas del ICP-MS son: la fuente del plasma, la óptica iónica, el filtro de masas y detector.

El plasma de acoplamiento inductivo alcanza temperaturas mucho más altas que las flamas de combustión ordinarias. Generalmente se trata de argón parcialmente ionizado, soportado sobre una antorcha de cuarzo y sujeto a una radiofrecuencia de 40.68 MHz. Su alta temperatura (6000 a 10000 °K) y gran estabilidad elimina muchas interferencias y fuentes de error que se tienen con las flamas ordinarias. Debido a estas características, el plasma de acoplamiento inductivo empieza a sustituir a las flamas de mecheros ordinarios en técnicas de espectrometría de masas y de emisión atómica. De esta manera, en los últimos años la espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo se ha desarrollado como una técnica de análisis multielemental altamente sensible y rápida, que ha tenido gran impacto en análisis de elementos trazas en diversos tipos de materiales.

El análisis por medio de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) se basa fundamentalmente en dos principios.

Ionización.- Las temperaturas alcanzadas en el plasma permiten la extracción de un electrón de la corteza exterior del átomo produciendo un ion con una carga positiva más un electrón.



Detección.- En el espectrómetro de masas los iones (M^+) producidos en el plasma son separados y caracterizados. La separación se lleva a cabo con un filtro de masas y se basa en diferencias de las trayectorias de los iones a través de un campo eléctrico. El sistema de detección provee una señal eléctrica que es proporcional a la cantidad de iones que salen del filtro de masas.

Las partes básicas del ICP-MS son: la fuente del plasma, la óptica iónica, el filtro de masas y detector

II CARACTERÍSTICAS DE LOS JALES

II.1 Descripción de los jales

Los jales El Fraile, al igual que el resto de los depósitos de jales generados en la región de Taxco durante el siglo XX, fueron depositados como lodos sobresaturados en una presa sobre un arroyo. En el caso de estos depósitos, los jales fueron acumulados en dos arroyos contiguos tributarios del Río Cacalotenango (Fig. 6). En este lugar es posible observar aún restos de las instalaciones donde se concentraba el mineral y las tuberías que transportaban los desechos hasta su ubicación actual (Fig. 7). Los jales El Fraile están dispuestos en bancos horizontales cuyo espesor varía entre 3 y 7 m., la superficie de los bancos disminuye gradualmente hacia la cima imprimiéndole a estos depósitos una estructura piramidal escalonada. La base de los jales es irregular y está limitada en la parte inferior por un muro de retención de aproximadamente 3 m de altura cuya finalidad es evitar el desborde y dispersión de los desechos. Sin embargo, tal como puede apreciarse en la fotografía de la Figura. 8, este muro ha sido insuficiente y la dispersión mecánica de los desechos ha alcanzado el cauce del Río Cacalotenango. El banco superior ha sido protegido por una cubierta de suelo que ha permitido el crecimiento de escasa vegetación silvestre. Sin embargo, en las laderas de los depósitos no existe cubierta protectora alguna lo que unido a la alta pendiente, ha acelerado la erosión y dispersión de los jales (Fig 9).

En su parte más ancha, los jales El Fraile alcanzan los 50 m mientras que su parte más larga rebasa los 150 m. La altura máxima que alcanzan estos depósitos es de aproximadamente 40 m. Talavera et al. (2001) reporta para estos jales un volumen aproximado de 2.0 millones de toneladas.

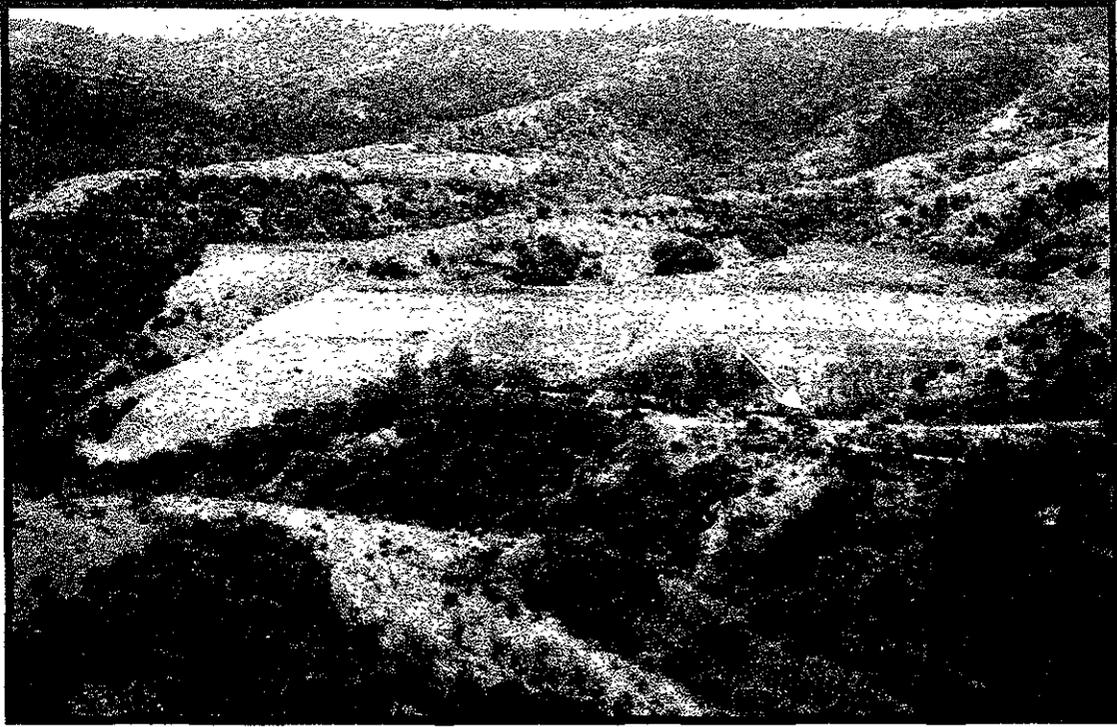


Figura 6.- Panorámica de los Jales El Fraile donde se observa la estructura general en bancos horizontales y su ubicación con respecto al Río Cacalotenango.

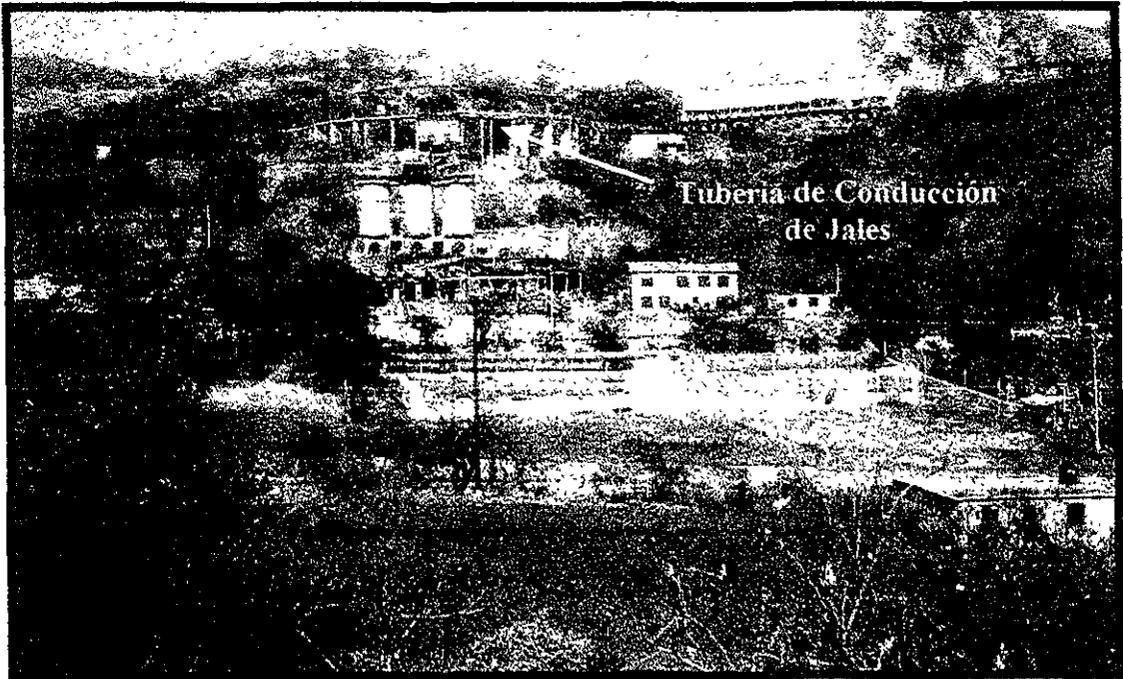


Figura 7 - Instalaciones mineras abandonadas en la Mina El Fraile.



Figura 8 - Muro de retención de los jales el Fraile. Note que el reten es insuficiente y la dispersión mecánica de los desechos ha alcanzado el cauce del Río Cacalotenango.

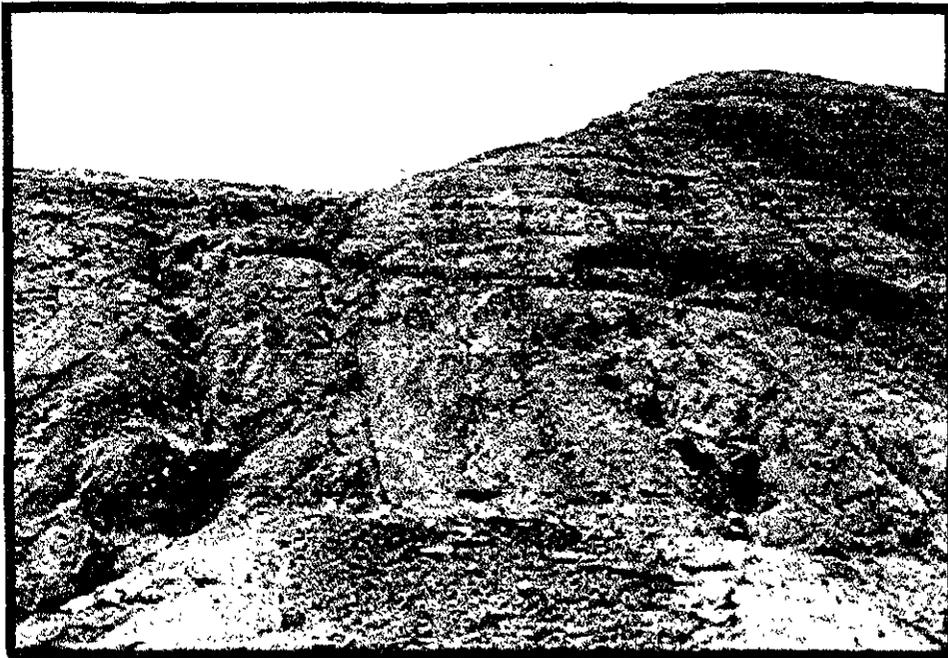
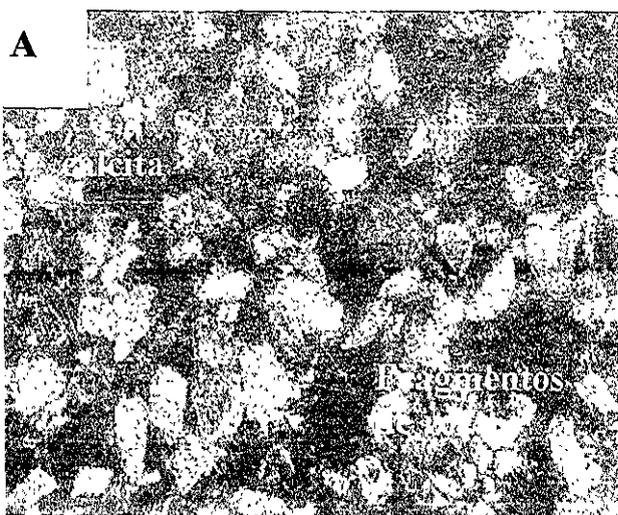


Figura 9. Jales el Fraile caracterizados por presentar heterogeneidad y grandes huecos de disolución debido a la erosión.

II.2 Mineralogía Megascópica

El material de los jales El Fraile presenta una granulometría homogénea dominando las partículas del tamaño de las arenas medias. Toda la superficie expuesta de los jales está caracterizada por la presencia de una costra endurecida de espesor que varía entre 1 y 5 cm compuesta de particulado de los mismos jales cementado por óxidos de hierro (hematita, magnetita y/o goethita) y precipitados blancos, especialmente sulfatos. Megascópicamente, los jales están constituidos mayoritariamente de cuarzo, fragmentos de roca, calcita, hidróxidos de hierro, sulfuros, especialmente pirita y precipitados microcristalinos y amorfos. En muchas áreas los sublimados ricos en azufre y sulfatos son muy abundantes. El estudio petrográfico/minerográfico de estos depósitos realizado por Flores (2001) establece que las fases minerales transparentes dominan sobre las fases minerales opacas en una relación aproximada de 5:1. En este mismo estudio se reconoce al cuarzo, ferromagnesianos y fragmentos de roca como las fases transparentes mayoritarias con calcita en proporciones importantes en muchas (pero no en todas) las muestras. Se reconocen, además, yeso, anhidrita y agregados microcristalinos y amorfos en la mayoría de las muestras. De acuerdo a este autor, las fases minerales opacas están dominadas por óxidos cristalinos y amorfos de Fe y sulfuros entre los que destacan la pirita, la galena y la esfalerita. Las fotografías de la figura 10 muestran la mineralogía de estos jales de acuerdo al estudio realizado por Flores (2001).



Figuras 10. Fotografías al microscopio petrográfico / minerográfico de muestras representativas de los Jales El Fraile. Figura 10 A. Fotografía con cantidades considerables de calcita, cuarzo y fragmentos de roca.



Figura 10 B. Fotografía representativa de una muestra con ausencia de calcita y presencia de cuarzo y fragmentos de roca.

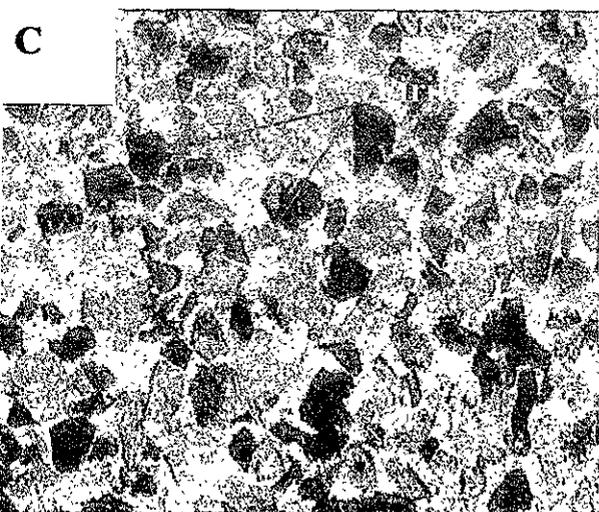


Figura 10 C. Igual a fotografía A con NL, donde se puede observar la abundancia de minerales opacos, particularmente de óxidos de Fe como un producto de la alteración de la pirita.



Figura 10 D. Detalle de un cristal de pirita mostrando alteración parcial en sus bordes y fracturas a óxidos de Fe.

II.3 Difracción de rayos X

Con la finalidad de comprobar la constitución mineralógica se realizó un estudio de Difracción de Rayos X en cada una de las muestras estudiadas. Las fases minerales encontradas en cada muestra se presentan en la tabla 2 y los difractogramas se presentan en las figuras 11 a 20.

Muestra	Calcita	Cuarzo	Pirita	Yeso	Jarosita	Argentojarosita	Illita
JF1		XXXX		XXX		X	X
JF2	XXXX	XXX	XX	X			
JF3	XXXX	XXX	XX	X			
JF4		XXXX		X	XXX		
JF5		XXXX		XXX	XXX		
JF6		XXXX		X	XXX		
JF7		XXXX		XXX	X		
JF8		XXXX	X	XXX	X		
JF9		XXXX		XXX	X		
JF10		XXXX		X	XXX		

Tabla 2. Especies mineralógicas identificadas en las muestras de jales del Fraile Mpio. de Taxco, Gro. Donde X = Especie de muy bajo predominio, XX = Especie de bajo predominio, XXX = Especie abundante, XXXX = Especie predominante.

Los resultados de la difracción muestran que el cuarzo (SiO_2) es la fase primaria mayoritaria en todas las muestras. La calcita (CaCO_3) sólo se detectó en las muestras JF2 y JF3 en tanto que la pirita (FeS_2) es el único mineral sulfurado que se detectó y sólo en las muestras JF2, JF3 y JF8. El yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, aunque en proporciones variables, es la fase secundaria de mayor abundancia en todas las muestras. La jarosita $[\text{KFe}_3 (\text{SO}_4)_2 (\text{OH})_6]$ y argentojarosita $[\text{Ag}_2\text{Fe}_6 (\text{SO}_4)_4 (\text{OH})_{12}]$ son fases secundarias en la mayoría de las muestras con excepción de las muestras JF2 y JF3. La Illita $(\text{K}_{1.5-1.0} \text{Al}_4[\text{Si}_{6.5-7.0} \text{Al}_{1.5-1.0} \text{O}_{20}] (\text{OH})_4$ es un mineral secundario que se produce por la alteración de los silicatos y solo se detectó en la muestra JF1.

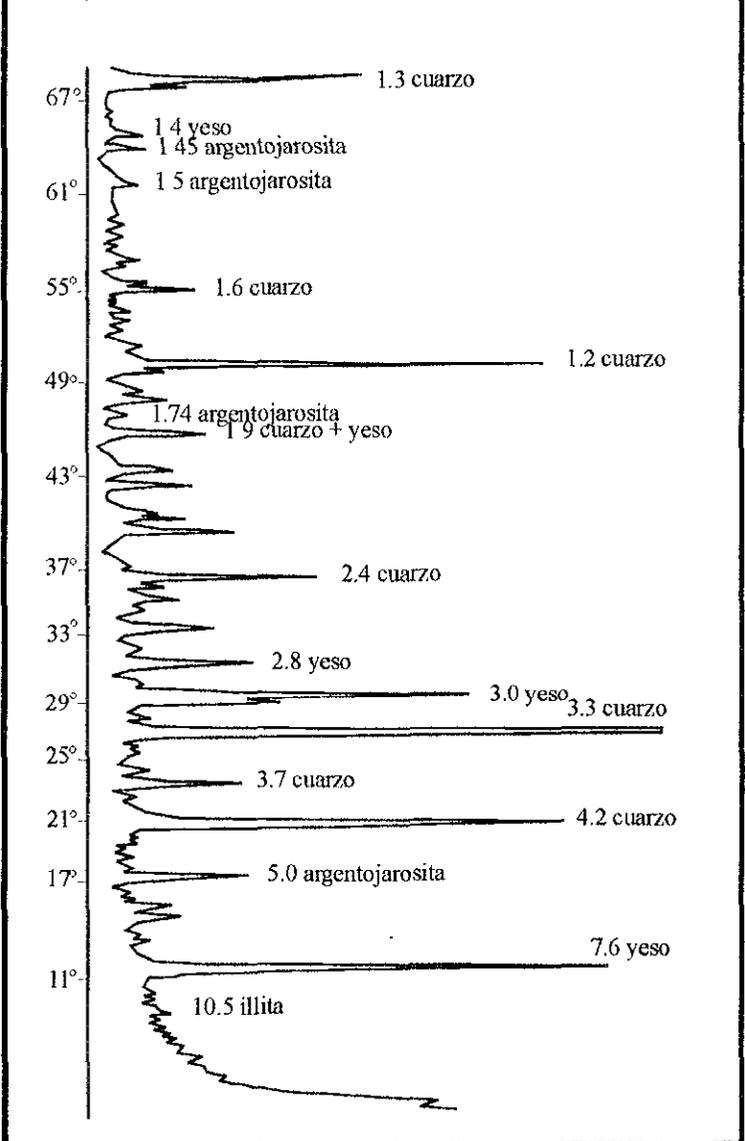


Fig. 11. Difractograma de la muestra JF1 donde se señalan las especies mineralógicas más importantes.

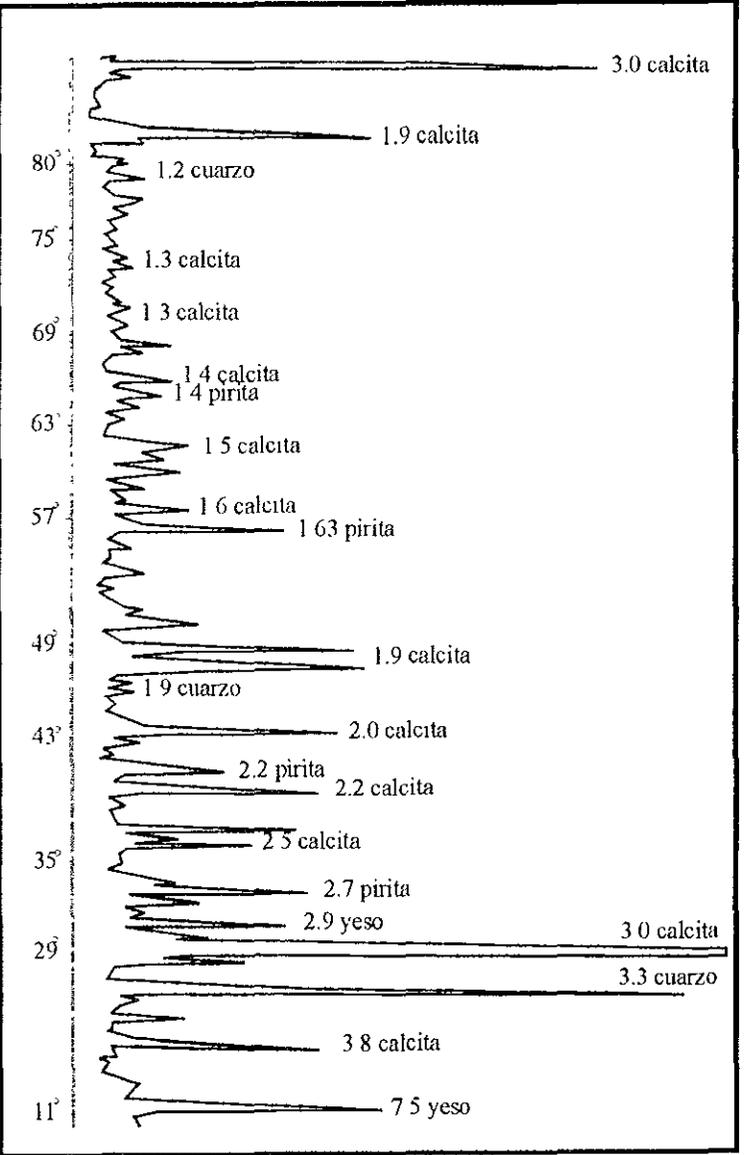


Fig. 12. Difractograma de la muestra JF2 donde se señalan las especies mineralógicas más importantes.

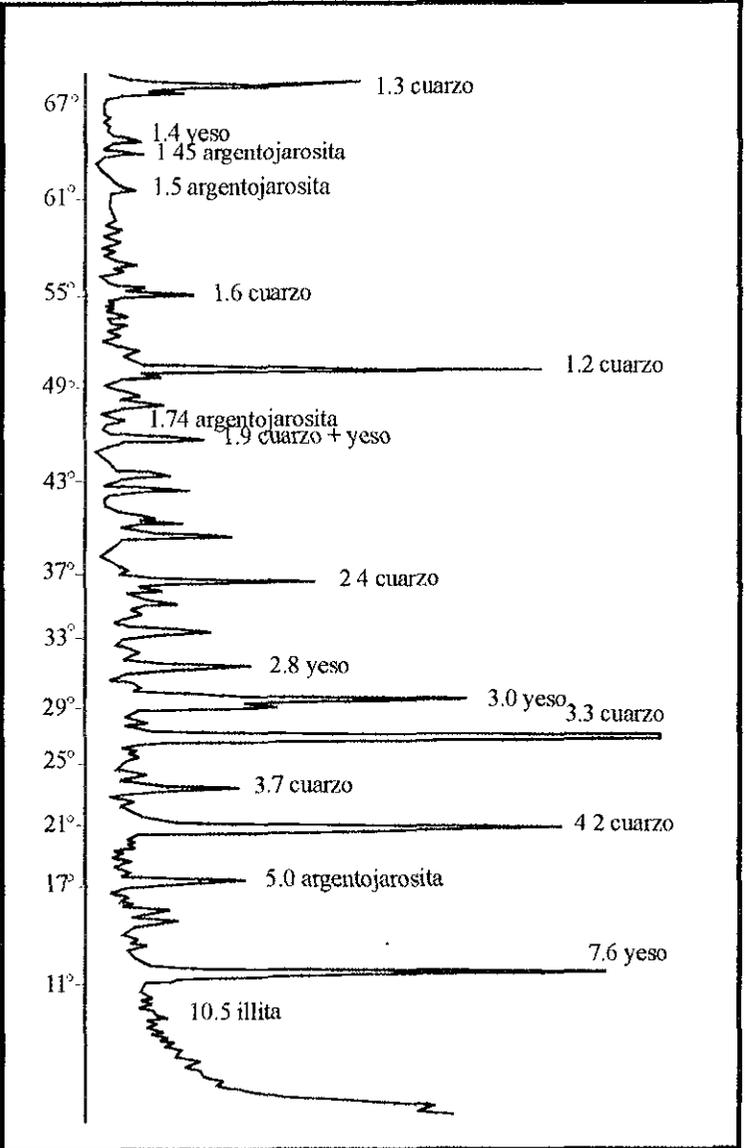


Fig. 14. Difractograma de la muestra JF4 donde se señalan las especies mineralógicas mas importantes.

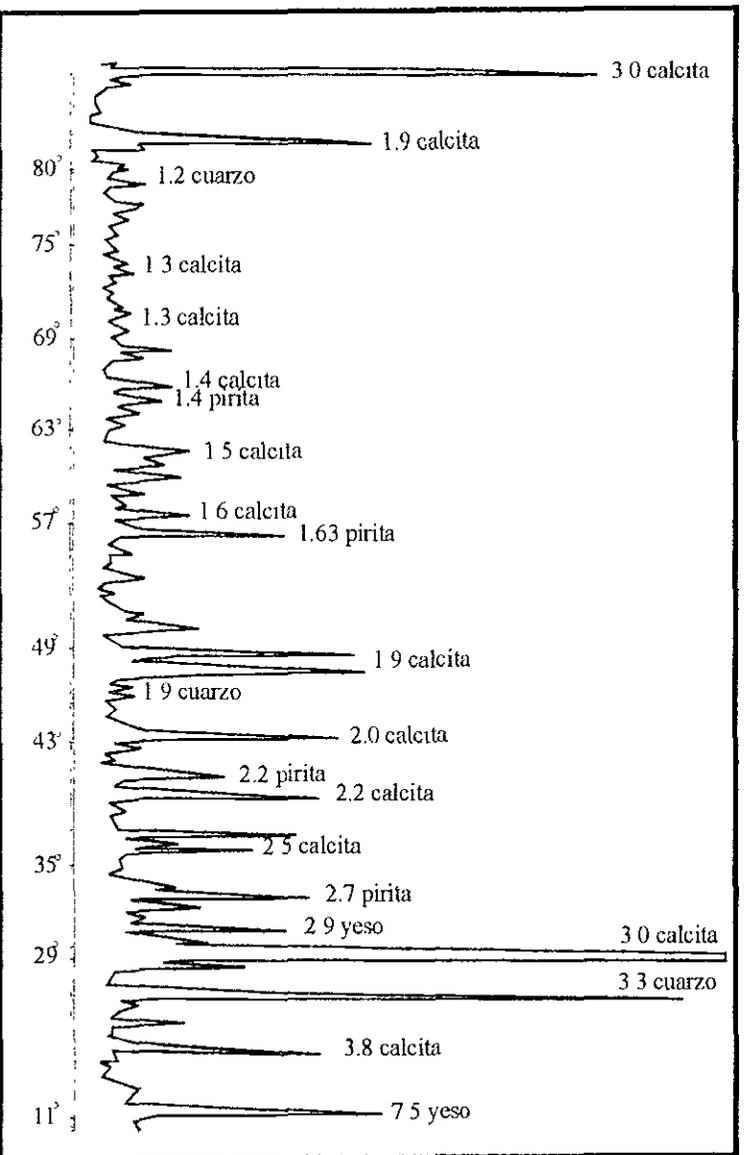


Fig. 13. Difractograma de la muestra JF3 donde se señalan las especies mineralógicas mas importantes

Fig. 16. Difractograma de la muestra JF6 donde se señalan las especies mineralógicas mas importantes

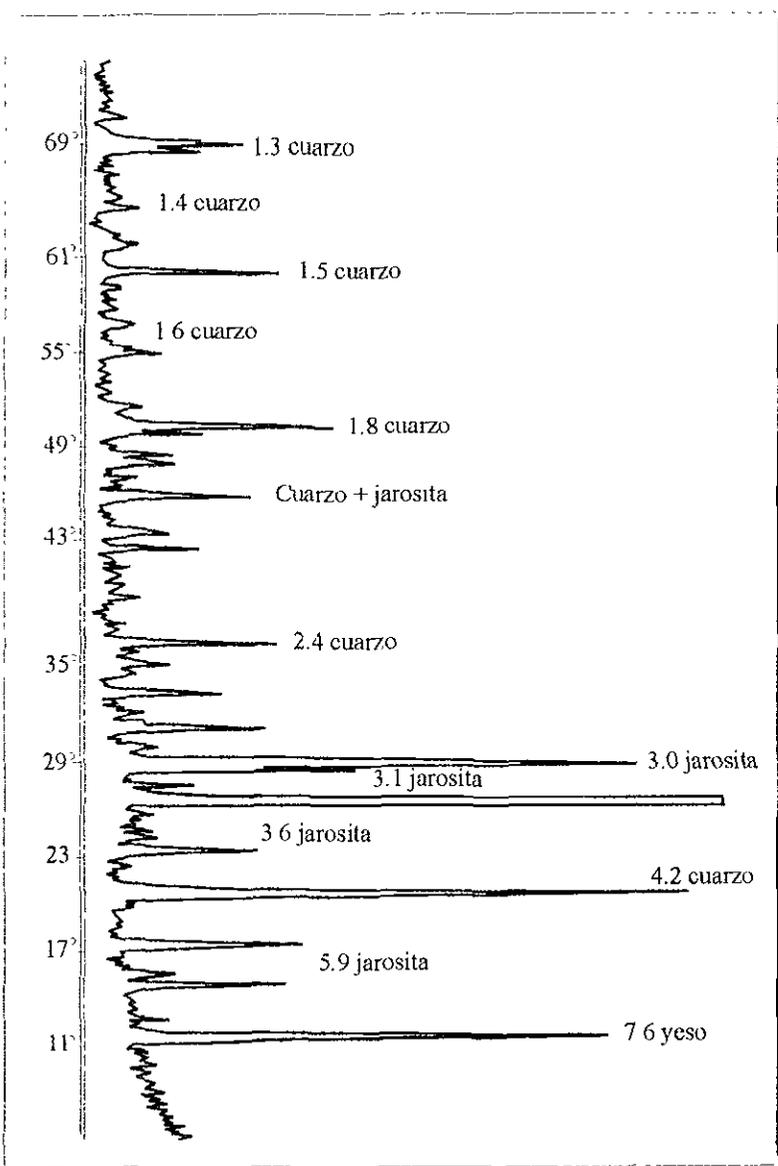


Fig. 15. Difractograma de la muestra JF5 donde se señalan las especies mineralógicas mas importantes.

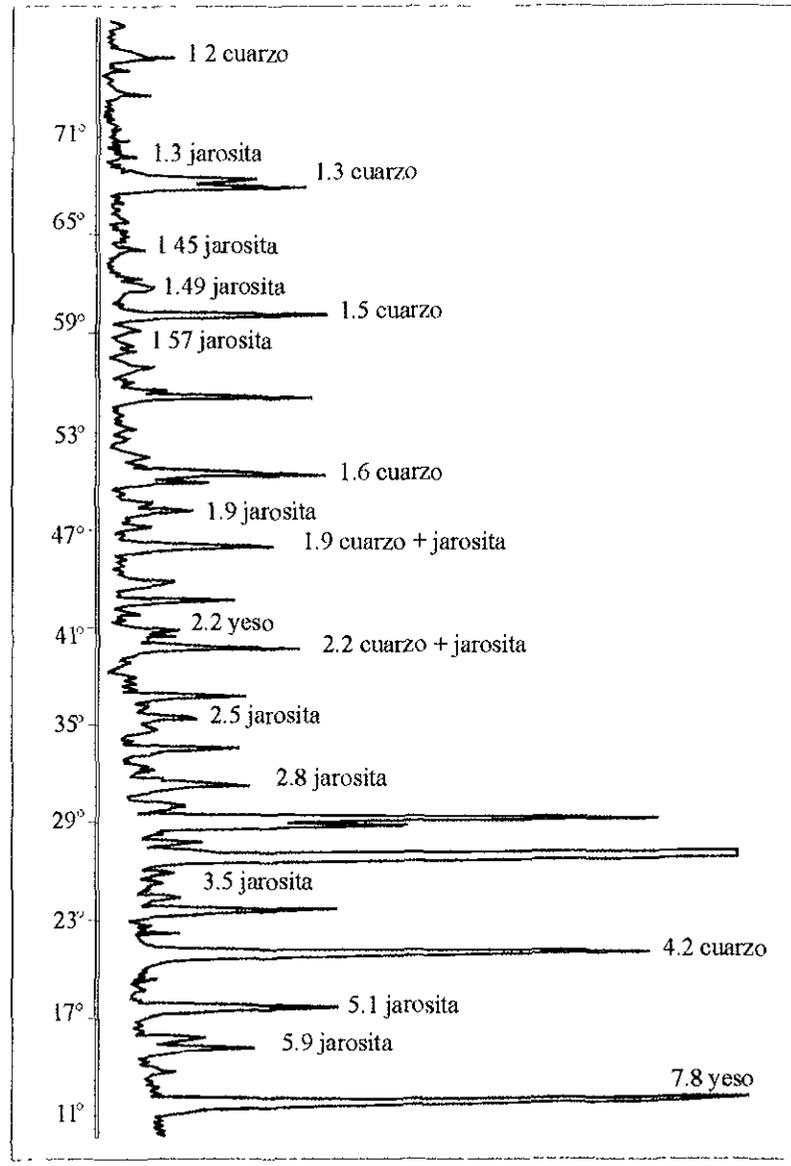


Fig. 20 Difractograma de la muestra JF10 donde se señalan las especies mineralógicas más importantes

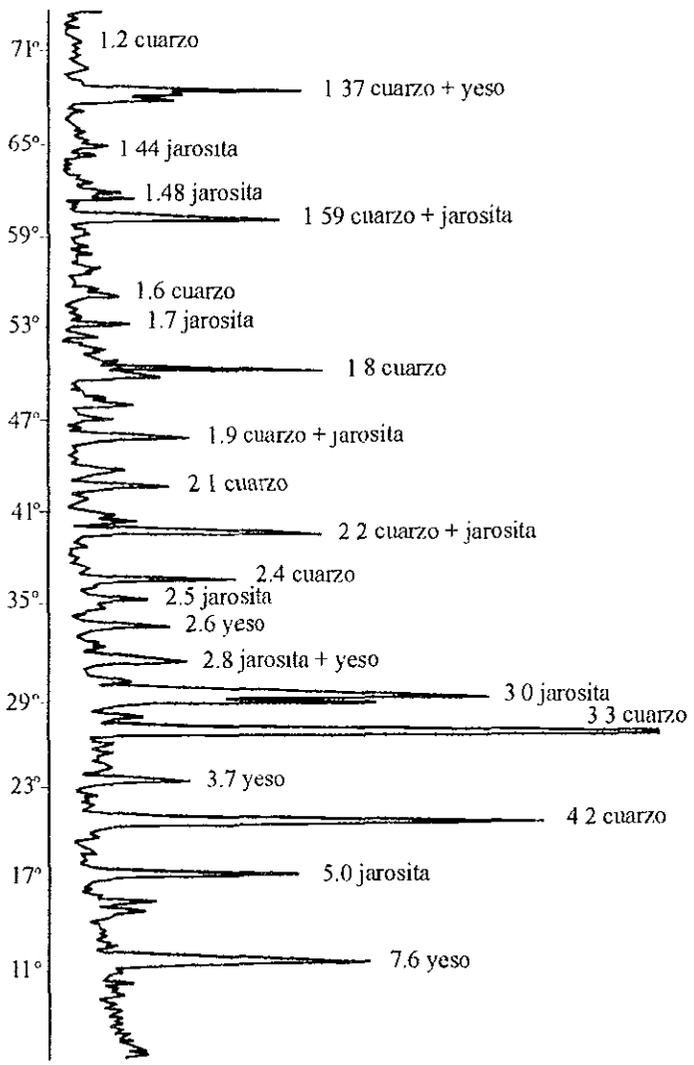


Fig. 19 Difractograma de la muestra JF9 donde se señalan las especies mineralógicas más importantes.

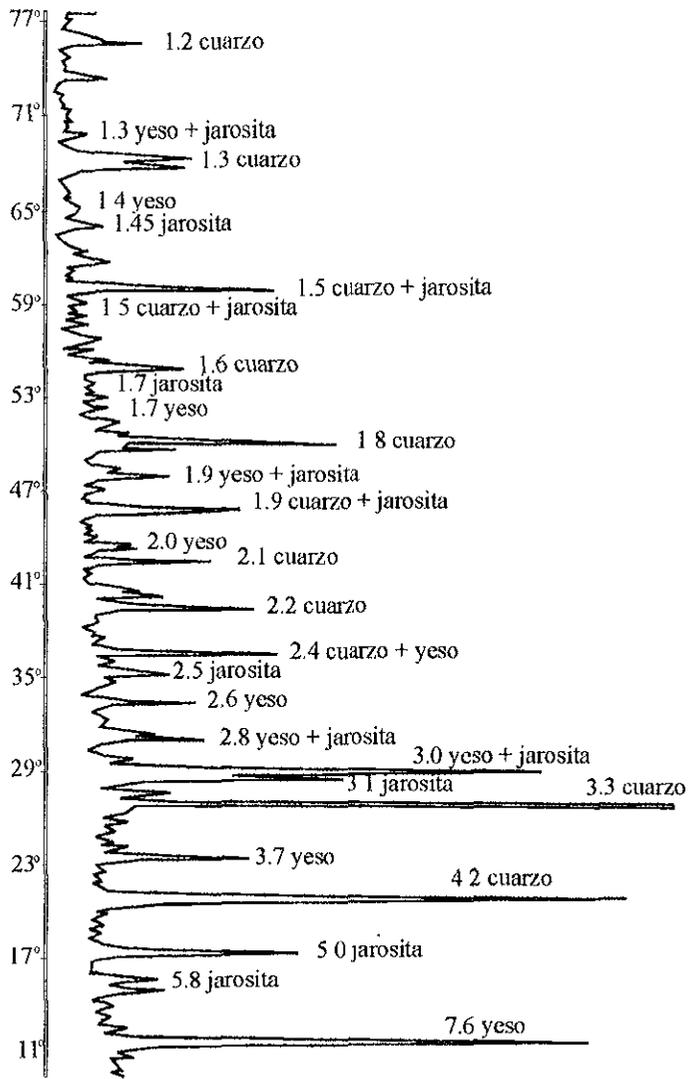


Fig. 18. Difractograma de la muestra JF8 donde se señalan las especies mineralógicas mas importantes

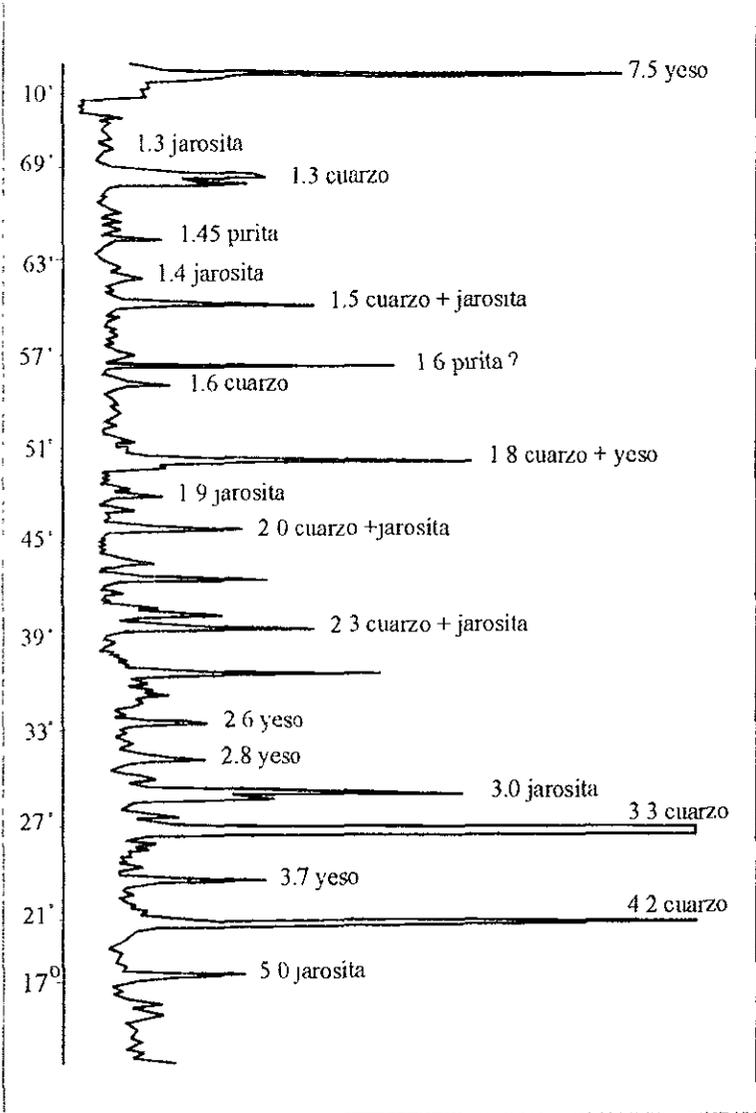
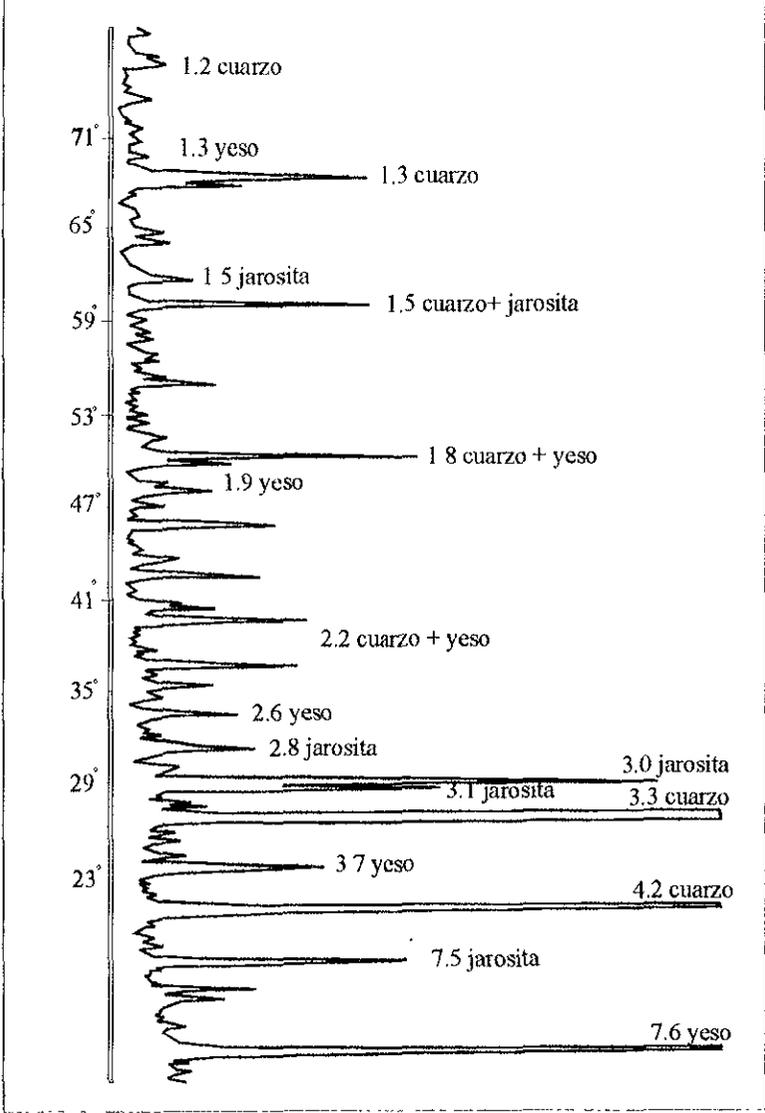


Fig. 17. Difractograma de la muestra JF7 donde se señalan las especies mineralógicas mas importantes.



Aún cuando la Difracción de Rayos X es una técnica muy segura en la identificación de especies minerales, en la identificación global de la mineralogía en las muestras de jales sólo las fases minerales mayoritarias, es decir, aquellas que por su concentración producen intensidades capaces de distinguirse del ruido de fondo, pueden ser generalmente detectadas. Las fases en pequeñas y muy pequeñas proporciones generalmente quedan enmascaradas por el ruido de fondo. No obstante, la identificación de grupos de minerales provee información de gran valía en el entendimiento de la constitución mineralógica de los jales. Así, la identificación de la pirita en los difractogramas de tres muestras, hace suponer que este mineral representa el mineral sulfurado más importante en algunas zonas de los jales mineros. La ausencia de líneas características de este mineral en los difractogramas del resto de las muestras hace suponer que este mineral se encuentra en pequeñas proporciones [aunque Flores (2001) reporta la presencia microscópica de este mineral en las 34 muestras de su estudio] o este mineral ha sido completamente oxidado. Cualquiera de estos dos supuestos es de suma importancia en el entendimiento de los procesos de oxidación, de generación del AMD y de la liberación de los metales. La identificación en los difractogramas de la pirita en las dos muestras que contienen calcita nos sugiere que la tasa de oxidación de la pirita se ve fuertemente disminuida por la calcita que juega el papel de neutralizante del drenaje ácido limitando su efecto catalizador. Como se verá en los siguientes apartados, la presencia de calcita en las muestras impide la generación de lixiviados ácidos disminuyendo, colateralmente, la liberación de metales.

La generación de AMD produce soluciones ricas en SO_4^{2-} las cuales permanecen en solución aún a pH neutros (Evangelou, 1995; 1998). La sobresaturación de la solución producida, entre otros procesos, por la evaporación y la elevación del potencial redox, produce la precipitación de una amplia variedad de minerales sulfatados. La presencia de estos minerales sulfatados es con frecuencia considerada como una evidencia de la afectación del agua por el AMD aún cuando actualmente las concentraciones de metales sean bajas y el pH y Eh altos (Ritcey, 1989).

Así, la presencia de minerales sulfatados como el yeso y minerales del grupo de la rosita en la mayoría de las muestras, indican que los jales tienen un potencial importante para generar soluciones sobresaturadas en SO_4^{2-} . Los altos contenidos de este ión en todos los extractos confirman esta hipótesis.

Finalmente, aunque sólo una muestra (JF1) presenta indicios de la existencia de calcita, la presencia global de este u otro tipo de minerales arcillosos puede jugar un papel muy importante en los procesos de adsorción y biodisponibilidad de metales.

II.4 Características del Extracto

El pH, la conductancia eléctrica y el contenido de SO_4^{2-} del extracto son tres parámetros indicativos de la capacidad de los jales para producir AMD y disolver cantidades importantes de metales. En las muestras estudiadas, los valores determinados permiten reconocer dos grupos: (i) un grupo (I) que incluye la mayoría de las muestras (JF1, JF4, JF5, JF6, JF7, JF8, JF9 y JF10) y que se caracteriza por generar extractos con valores de pH ~ 2.0 , valores de conductancia $\geq 2\ 615\ \mu\text{S}/\text{cm}$ y contenidos de $\text{SO}_4^{2-} \geq 1\ 450\ \text{mg}/\text{kg}$; y, (ii) un grupo (II) que incluye solo las muestras JF2 y JF3 caracterizadas por tener valores de pH neutros (6.7 y 7.0, respectivamente), valores de conductancia de $\leq 2\ 15\ \mu\text{S}/\text{cm}$ y contenidos de $\text{SO}_4^{2-} \leq 1\ 377\ \text{mg}/\text{kg}$. La existencia de dos grupos de muestras con estas características ha sido reportados por Dótor et al. (2000) en los jales La Concha, localizados a aproximadamente a 3 km de los jales el Fraile.

Los valores bajos de pH en las muestras del primer grupo junto con sus altas conductancias y altos contenidos de SO_4^{2-} indican, por un lado, que en las zonas de donde provienen las muestras, los jales presentan un alto potencial de generación de AMD y una alta capacidad de disolución. Por otro lado, los valores neutros en las muestras del segundo grupo junto con sus, también altos valores de conductancia y de SO_4^{2-} , sugieren que localmente los jales presentan una alta capacidad de neutralización de las soluciones ácidas producidas. La identificación de calcita en estas dos muestras en el estudio de difracción de rayos X hacen pensar que su presencia puede ser la causante de los valores de pH neutros

e sus extractos. Sin embargo, las altas conductancias y las altas concentraciones de SO_4^{2-} indican que la generación de AMD se desarrolló también en estas zonas pero la solución fue neutralizada.

II.5 Contenidos totales de Zn, Pb, As y Fe

Los contenidos totales de los elementos analizados se presentan en la tabla 3. En esta tabla se presentan también los valores de fondo regionales para suelos de cultivo determinados por Talavera et al. (2001) y los niveles máximos permitidos en suelos de cultivo y urbanos propuestos por Tammerman et al. (1984) para su comparación. Los datos estadísticos básicos de las muestras analizadas se presentan en la tabla 3.

Muestras	pH	Ω (μS)	SO_4	Zn	Pb	As	Fe
JF1	2.5	3890	2518	1422.5	455	201	12550
JF2	6.7	2215	1377	20200	22900	1875	13220
JF3	7	2225	1322	5924.5	4086.6	2052.6	13670
JF4	2.4	5510	7809	1730.4	5093.8	469.6	9960
JF5	2.3	4960	4707	1067.5	6033.4	991	9100
JF6	2.4	4965	4974	864.86	6351.4	412	8000
JF7	2.6	3385	1750	427.1	4361.6	586.8	7100
JF8	2.9	2615	1450	501.1	3229	731.6	9443
JF9	2.7	3205	1802	591.3	4772.4	461	8570
JF10	2.4	6660	9129	1762.1	2421.9	711.4	9458
Valor de Fondo (Talavera, et al; 2001)				64.3	25.5	29.5	2.7
Tammerman et al.(1984)				150	50	20	

Tabla 3. Parámetros físicos y concentraciones de los contenidos totales en mg/kg de Zn, Pb, As y Fe en las muestras de jales estudiadas.

muestras	pH	$\Omega(\mu S)$	SO ₄	Zn	Pb	As	Fe
JF1	2.5	3890	2518	737	12	0.2	41
JF2	6.7	2215	1377	63	0.7	0.6	ND
JF3	7	2225	1322	10	0.3	0.2	ND
JF4	2.4	5510	7809	1647	1.2	44.5	6200
JF5	2.3	4960	4707	981	0.9	12	2370
JF6	2.4	4965	4974	38	1.2	0.3	43
JF7	2.6	3385	1750	182	0.9	1	156
JF8	2.9	2615	1450	16	0.8	0.1	ND
JF9	2.7	3205	1802	29	0.9	0.3	36
JF10	2.4	6660	9129	28.3	1.2	49	5900

Tabla 4. Parámetros físicos y concentraciones de la fracción soluble en $mg \cdot kg^{-1}$ de Zn, Pb, As y Fe en las muestras de jales.

Las concentraciones de las fracciones solubles de Pb son igualmente variables oscilando entre 0.3 mg/kg y 12 mg/kg con una media aritmética de 2.0 mg/kg y una desviación estándar de 3.52 mg/kg. Los valores más elevados se encuentran en las muestras que componen el grupo I, es decir, aquellas que presentan los valores más bajos de pH.

Las fracciones solubles de As determinadas oscilan ampliamente con valores entre 0.1 mg/kg y 49 mg/kg con una media aritmética de 10.8 mg/kg y una desviación estándar de 19.3 mg/kg. En general, las muestras del grupo I tienden a presentar valores más elevados de As soluble.

Finalmente, las concentraciones solubles de Fe varían desde valores por debajo del límite de detección hasta 6 200 mg/kg con una media aritmética de 1 474.6 mg/kg y una desviación estándar de 2 823.5 mg/kg. Con la excepción de la muestra JF8, las muestras que constituyen el grupo I presentan las concentraciones solubles más elevadas. Por otro lado, las muestras que presentan pirita detectable en los difractogramas presentan valores de Fe soluble por debajo del límite de detección.

Los resultados obtenidos de las pruebas de lixiviación ponen de manifiesto la capacidad de los depósitos de jales para liberar metales con la simple interacción con el agua de lluvia. En efecto, las concentraciones detectadas en los cuatro elementos analizados demuestran que los lixiviados representan una fuente de contaminación importante de los recursos hídricos superficiales del entorno. Estas pruebas revisten especial importancia ya que los pobladores de la comunidad de El Fraile se abastecen de agua para consumo doméstico ya sea directamente del Río Cacalotenango o de norias artesanales construidas en o en las riberas del mismo río. Durante las épocas de estiaje, el volumen del río y de las norias disminuye drásticamente y obliga a muchos pobladores a abastecerse de agua directamente de los lixiviados tal y como lo demuestra la presencia de mangueras conectadas directamente a los canales de extracción de drenaje o a los tubos de ventilación. Debido a los altos contenidos de metales tóxicos, el consumo de estas aguas representa un riesgo potencial a la salud de los pobladores que la consumen.

Por otro lado, durante las épocas de lluvias, las corrientes son lo suficientemente fuertes para arrastrar particulados ricos en metales hacia el Río Cacalotenango los cuales son depositados cuando la energía del flujo disminuye aumentando la carga contaminante en los sedimentos del cauce.

II.7 Correlaciones

La tabla 5 muestra la matriz de correlación entre los parámetros químicos, contenidos totales y la fracción soluble de los metales pesados en las 10 muestras analizadas. Las correlaciones fueron determinadas por el método de mínimos cuadrados.

	pH	Ω (μ S)	SO ₄	Zn Tot	Pb Tot	As Tot	Fe Tot	Zn Sol	Pb Sol	As Sol
pH	1									
Ω (μ S)	0.447	1								
SO ₄	0.238	0.913	1							
Zn Tot	0.645	0.279	0.087	1						
Pb Tot	0.362	0.135	0.06	0.845	1					
As Tot	0.871	0.279	0.124	0.546	0.346	1				
Fe Tot	0.592	0.182	0.076	0.381	0.114	0.422	1			
Zn Sol	0.029	0.187	0.201	0.043	0.024	0.093	0	1		
Pb Sol	0.054	0.002	0.007	0.022	0.107	0.179	0.108	0.064	1	
As Sol	0.107	0.647	0.847	0.03	0.036	0.04	0.017	0.224	0.022	1
Fe Sol	0.127	0.66	0.846	0.038	0.036	0.043	0.022	0.322	0.024	0.982

Tabla 5. Matriz de correlación entre los parámetros químicos, contenidos totales y la fracción soluble de los metales pesados en las 10 muestras analizadas. Determinados por el método de mínimos cuadrados

En la tabla 5, se observa que la conductividad presenta una alta correlación con los contenidos de SO₄²⁻ sugiriendo que este parámetro está esencialmente controlado por la presencia de este ión. El SO₄²⁻ presenta sólo correlaciones importantes con las fracciones solubles de Fe y As sugiriendo que estos elementos se encuentran formando fases sulfatadas solubles. La identificación de minerales del grupo de la jarosita y argentojarosita indican que estas correlaciones pudieran deberse a la disolución de estas especies minerales.

Existe una buena correlación entre los contenidos totales de Zn y los contenidos totales de Pb. Esta correlación en depósitos de sulfuros masivos y depósitos de metales base implica relaciones genéticas entre la mineralogía primaria.

Como se puede observar en la tabla 5. la correlación entre los contenidos totales y la fracción soluble de los metales pesados y los parámetros químicos de pH, conductancia eléctrica y contenidos de sulfatos es poco apreciable. Sin embargo, al separar las muestras de los dos grupos antes mencionados (Grupo I y Grupo II) se observa una correlación importante al graficar pH, conductancia y contenidos de sulfatos contra las concentraciones totales y la fracción soluble de Zn, Pb, As y Fe.

Al graficar las concentraciones Tot de Zn, Pb, As y Fe contra pH se observa que el Grupo I presenta las más bajas concentraciones de metales pesados a pH~2 debido a la pérdida parcial de los metales durante la disolución producida por las soluciones ácidas, mientras que en el Grupo II, al no existir un medio ácido que ocasione la lixiviación de metales, estos presentan las concentraciones más elevadas. Por otro lado, al graficar las concentraciones en forma soluble se observa que el Grupo I, presenta las más altas concentraciones de metales pesados debido al pH que gobierna el sistema y el Grupo II presenta las más bajas concentraciones de metales por la presencia de calcita que neutraliza la acidez del medio evitando la formación de sustancias ácidas que ocasionan la precipitación de metales. (Fig. 21).

Al graficar las concentraciones Tot de Zn, Pb, As y Fe contra contenidos de SO₄ se observa que el Grupo I presenta las más bajas concentraciones de metales y los valores más altos de contenidos de SO₄ debido a que este ion es muy abundante en soluciones ácidas, mientras que el Grupo II muestra las concentraciones más elevadas de metales pesados y los más bajos contenidos de SO₄ ya que este ion es poco abundante en suelos neutros. Por otro lado, al graficar las concentraciones en forma soluble se observa que el Grupo I, presenta las más altas concentraciones de metales pesados y los más altos valores de SO₄ sugiriendo que este ion se encuentra formando fases sulfatadas solubles como: jarosita y argentojarosita (demostrado por el método de DRX) y el Grupo II presenta las más bajas concentraciones de metales y los valores más bajos de SO₄ (Fig. 22).

Al graficar las concentraciones Tot de Zn, Pb, As y Fe contra conductancia se observa que el Grupo I presenta las más bajas concentraciones de metales y los valores de conductancia, mientras que el Grupo II muestra las concentraciones más elevadas de metales pesados y los más bajos valores de conductancia. Por otro lado, al graficar las concentraciones en forma soluble se observa que el Grupo I, presenta las más altas concentraciones de metales pesados y altos valores de conductancia y el Grupo II presenta las más bajas concentraciones de metales y los más bajos valores de conductancia (Fig. 23).

En la tabla 6 se pueden observar los promedios de las concentraciones totales y la fracción soluble con su respectivo porcentaje de Zn, Pb, As y Fe para los dos grupos, Grupo I y Grupo II. Como se puede ver las concentraciones Tot y la fracción Sol varían considerablemente entre los dos grupos debido a la presencia de calcita y/o oxihidroxidos de Fe que adsorben cantidades considerables de metales pesados. Por otro lado Martín (2000) en el área de Zimapan demostró que la calcita es buen adsorbedor de As soluble.

Metales pesados	Grupo I	Grupo II
Zn Tot	1045	13062
Fracción soluble	457 (* 44%)	37 (* 0.3%)
Pb Tot	4089	13493
Fracción soluble	2.4 (* 0.06%)	0.5 (* 0.003%)
AsTot	571	1964
Fracción soluble	13.4 (* 2.4%)	0.4 (* 0.02%)
Fe Tot	9273	13445
Fracción soluble	1843 (* 20%)	0

Tabla 6. Promedio de contenidos totales y fracción soluble de Zn, Pb, As y Fe (ppm) en el Grupo I y Grupo II.

Fracción soluble de Zn, Pb, As y Fe en porcentaje (* %)

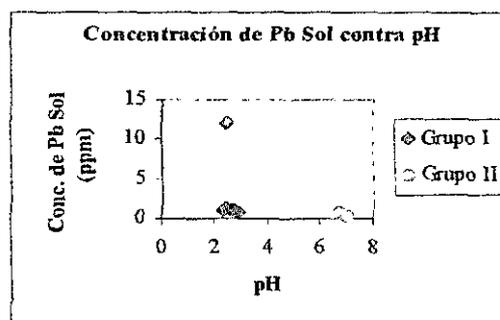
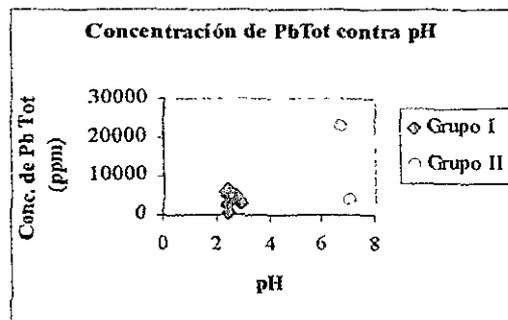
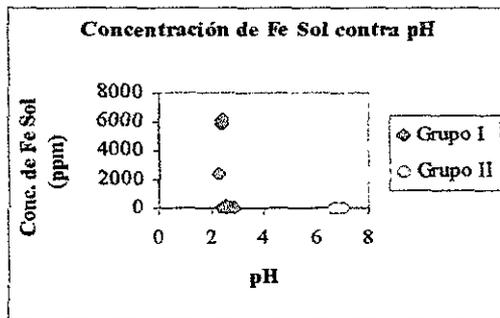
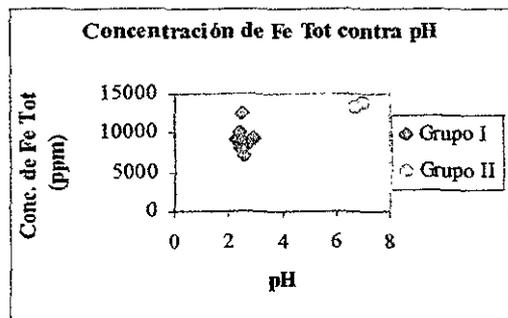
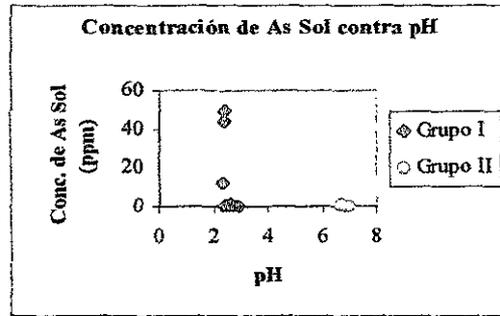
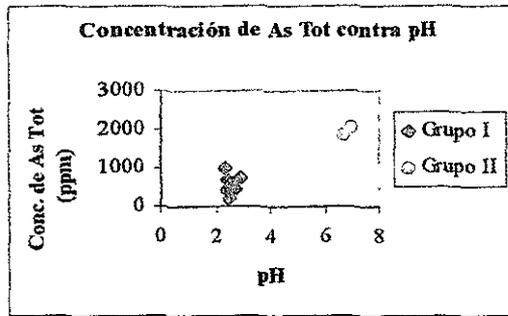
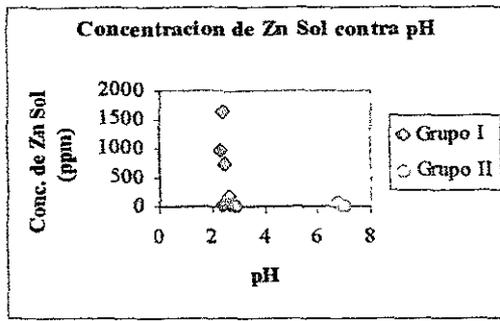
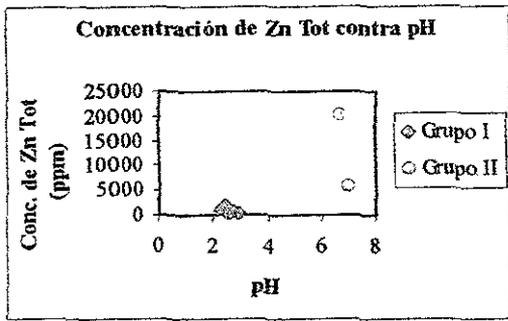


Figura 21. Concentración total y fracción soluble de Zn, Pb, As y Fe, de los Grupos I y II contra pH

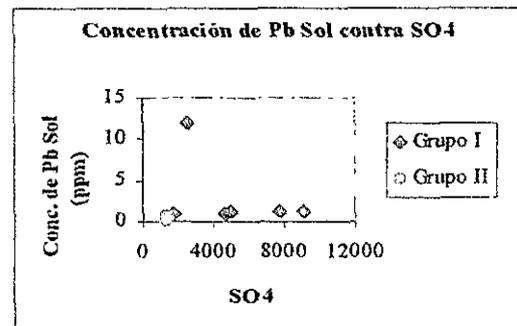
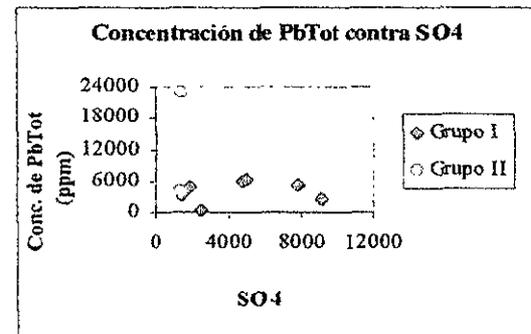
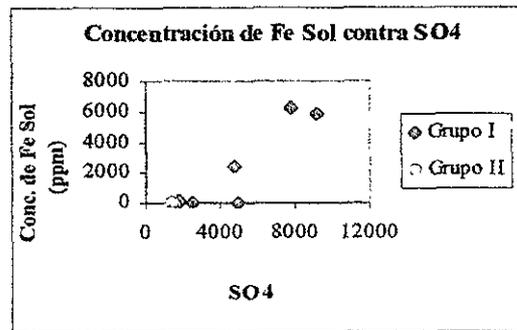
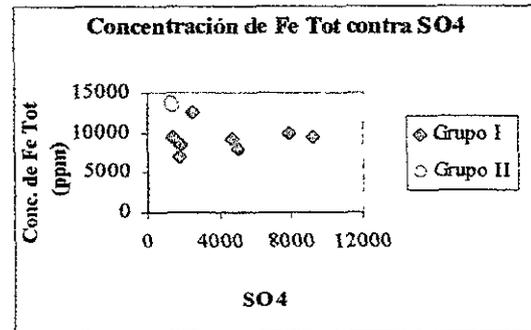
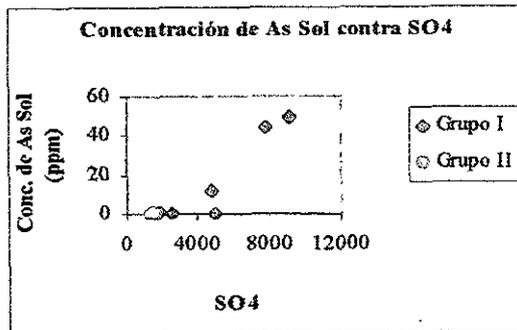
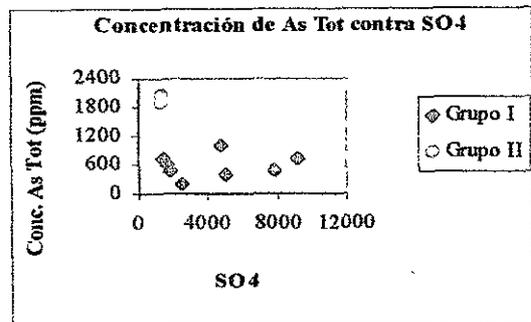
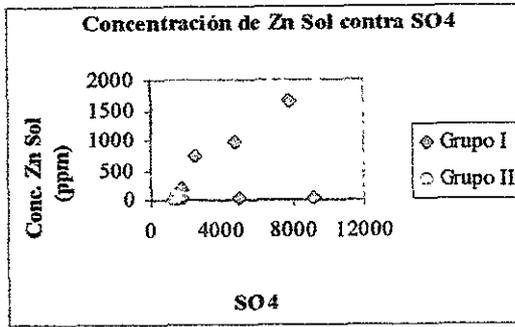
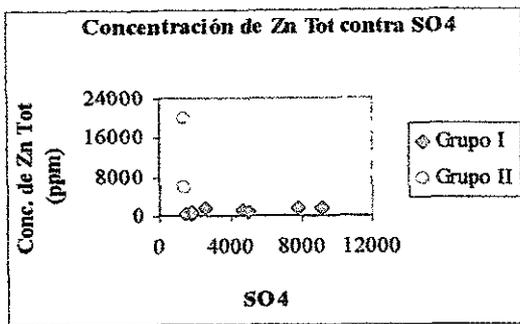


Figura 22. Concentración total y fracción soluble de Zn, Pb, As y Fe, de los Grupos I y II contra contenidos de SO4.

IV. CONCLUSIONES

Desde el siglo XVI el Distrito minero Taxco ha explotado una gran cantidad de minerales metálicos como Ag, Pb, Cu, Fe, Zn y Au liberado una gran cantidad de desechos de mina (jales) al medio ambiente. Estos desechos se caracterizan por tener altas concentraciones de minerales sulfurados como pirita, pirrotita, galena que al entrar en contacto con aire y el agua experimentan reacciones de oxido-reducción que a través del tiempo dan origen a la formación de soluciones ácidas y liberación de metales pesados.

El estudio petrográfico/minerográfico de los jales de El Fraile establece que las fases minerales transparentes dominan sobre las fases minerales opacas en una relación aproximada de 5:1. Además, se consideran al cuarzo, ferromagnesianos y fragmentos de roca como las fases transparentes mayoritarias con calcita en proporciones importantes en varias muestras. Por otro lado, las fases minerales opacas están dominadas por óxidos cristalinos y amorfos de Fe y sulfuros entre los que destacan la pirita, la galena y la esfalerita.

Existe una relación importante entre los contenidos totales y la fracción soluble en los dos grupos, Grupo I y Grupo II. El Grupo I es gobernado por pH ~ 2, los más altos valores de conductancia y los mas altos contenidos de SO₄, además, en promedio presenta las concentraciones mas bajas de los contenidos totales de Zn, Pb, As y Fe como un resultado de la pérdida parcial de los metales durante la disolución producida por las soluciones ácidas. Por otro lado, el Grupo I, presenta las más altas concentraciones solubles de los metales analizados debido a la acidez del medio.

El grupo II, presenta pH neutro, altos valores de conductancia y altos contenidos de SO₄ (menores que el grupo I), en promedio presenta las más altas concentraciones de los contenidos totales de Zn, Pb, As y Fe. Sin embargo, debido a la abundancia de calcita [CaCO₃] en este grupo, las concentraciones solubles para los cuatro metales analizados son mucho menores que en el grupo I, esto se atribuye a la disolución de la calcita ya que

neutraliza la acidez del medio, al disolverse un mol de calcita se consume un mol de ion H^+ .

El Zn del Grupo I, probablemente se encuentre formando las especies de guningita $[ZnSO_4 + H_2O]$ y zincita $[ZnO]$ que son altamente solubles. En el Grupo II, se encuentra en forma de esfalerita (ZnS) y como willemita $[(SiO_4)Zn_2]$. Ambas especies son ligeramente solubles en agua. Además, la willemita se ha encontrado en estudios de análisis de agua realizados en la zona de estudio.

El Pb del Grupo I, se encuentra en la especie de anglesita $[PbSO_4]$ característica de medios ácidos. Esta especie se forma por reacciones oxidación-reducción en la galena. En el Grupo II, el Pb se encuentra formando la especie de cerusita $[PbCO_3]$ que es la especie predominante en suelos calcáreos y es casi insoluble en agua.

El As presenta una geoquímica compleja. Sin embargo, se piensa que se encuentra como especie de escorodita $(FeAsO_4)$ formada por la disolución de la arsenopirita. Las bajas concentraciones de arsénico en el Grupo II indican que podría estar adsorbido a la calcita y/o oxihidroxidos de Hierro que se encuentran en cantidades considerables en jales neutros.

El Fe en forma soluble del Grupo I, es un producto de la solubilidad de la pirita $[FeS_2]$, jarosita $[KFe_3(SO_4)_2(OH)_6]$ y argentojarosita $[Ag_2Fe_6(SO_4)_4(OH)_{12}]$. En el grupo II, el Fe se encuentra en forma de hidróxido férrico $[Fe(OH)_3]$, ya que esta especie es insoluble a pH neutro, y se forma como un producto de oxidación de la pirita

Todos los jales analizados (Grupo I y Grupo II), tienen concentraciones totales por arriba de los valores de fondo regionales y los niveles máximos permitidos para suelos de cultivo y urbanos. El Grupo I, en promedio presenta: Zn (1045 mg/kg), Pb (4089 mg/kg), As (571 mg/kg) y Fe (9273 mg/kg). El Grupo II, contiene: Zn (13069 mg/kg), Pb (13493 mg/kg), As (1964 mg/kg) y Fe (13445 mg/kg). Las altas

concentraciones de los cuatro metales pesados son potencialmente peligrosos, ya que por erosión eólica o fluvial son depositados en el entorno, y al llevarse a cabo reacciones oxido-reducción en los suelos pueden pasar a ser biodisponibles a través de diferentes cultivos.

Todos los jales analizados (Grupo I y II) presentan altas concentraciones solubles de Zn, Pb, As y Fe. Sin embargo, el Grupo I, presenta los más altos valores de Zn (457 mg/kg), Pb (2.4 mg/kg), As (13.4 mg/kg) y Fe (1843 mg/kg), estos elementos al encontrarse en estas concentraciones representan un riesgo a la población de El Fraile y a comunidades cercanas, puesto que los lixiviados drenan directamente al río Cacalotenango, del cual se abastece la población. Por otro lado, en tiempo de sequía, los pobladores de El Fraile por medio de mangueras se abastecen directamente del agua que es almacenada dentro de los jales.

Las altas concentraciones solubles de Zn, Pb, As y Fe pueden traer efectos adversos a la salud de los integrantes de la comunidad. El As dependiendo de la duración y niveles de exposición puede causar efectos agudos como: gastroenteritis, efectos hepáticos neurológicos y hematológicos, convulsiones y parálisis. Exposiciones crónicas inducen hiperqueratosis y neoplasia. Al encontrarse en forma inorgánica (arsénico trióxido; sales de ácido arsenoso) el arsénico es carcinogénico. En forma trivalente afecta la piel, el tracto respiratorio y el sistema nervioso.

Por otro lado el Zn, aunque se encuentra en altas concentraciones solubles, no tiene mucha relevancia, puesto que no es muy tóxico a los seres humanos. Se cree que el ZnO es la especie probablemente más tóxica.

Al ingerir Fe en tiempos prolongados por cualquier ruta puede ocasionar un alza a la depositación patológica de Fe en tejidos, el cual puede ser asociado con fibrosis del páncreas, diabetes melitus y cirrosis en el hígado.

BIBLIOGRAFÍA

Abernathy C.O, Calderon R,L and Chapman W.R (1992). Arsenic exposure and health effects.

Alloway B.J. A. (1990). Heavy Metals in soils, first edition Blackie Glasgow and London.

Armienta M.A., Rodríguez R., Cruz O (1997 b) Arsenic content in hair of people exposed to natural arsenic polluted ground water at Zimapan Mexico. Bull Environ Contam Toxicol.

Beatty R. (1978) Concepts, Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry. PERKIN- ELMER.

Blowes D.W. Jambor J.L., Hanton-Fong (1998) Geochemical, Mineralogical characterization of a Sulphide-bearing carbonate-rich gold-mine tailing impoundment, Joutel, Quebec, Applied Geochemistry. Vol. 13, No. 6

C.R.M. (1999), "Monografía Geológico-minera del Estado de Guerrero". Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Coordinación General de Minería, Consejo de Recursos Minerales., Primera Edición.

Campa y Coney (1983) Tectonostratigraphic terranes and mineral resources distribution in Mexico. Can J Earth Sci C.

Campa y Ramirez, (1979) Evolución Geológica y Metalogénesis del noroccidente de Guerrero. UAG., Serie técnico-científica No 1.

Dótor (2001) Métodos de Digestión de Metales Biodisponibles en Suelos como una Guía para Evaluar la Calidad de los Suelos de Cultivo. V Foro de estudio sobre el Edo. de Gro.

- Evangelou V. P (Bill), Ph, D. (1995) Pyrite oxidation and its control.
- Evangelou V.P. (1998) Environmental Soil and Water Chemistry. A Wiley-Interscience Publication.
- Fergusson J. E. (1990) The Heavy Metals: Chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press.
- Fries Carl (1960) Geologia del estado de Morelos y partes adyacentes de Mexico y Guerrero, region central meridional de Mexico. Boletin 60 UNAM, Mexico D. F.
- Garibay-Romero, L. M., Beltrán-Salinas A. y Torres de León R.H. (1998). "Nueva Localidad con Inocerámidos (Mollusca Bivalvia) del Cretácico Superior del Estado de Guerrero. In Alaniz-Alvarez S. A., Luca Ferrari y Nieto-Samaniego A.F. (Ed.), Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. Conjunto Amoxcalli, Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F.: Sociedad Geológica Mexicana, A.C.
- Gregorich and M.R. Carter (1997) Soil quality for Crop Production and Ecosystem Health.
- Hans G. Seiler & Helmut Sigel with Astrig Singel (1988) Handbook on toxicity of inorganic compounds. MARCEL DEKKER. INC.
- Lawrence Richard W and Wandg Y (1997) Determination of neutralization potential in of prediction of acid rock drainage.
- Maiz I, Arambarri I, Garcia R, Millan E (1999) Evaluation of heavy metal availability polluted soils by two sequential extraction procedures using factor analysis. Environmental Pollution 110 (2000) 3-9.

Martín F.(2000) Interacción de aguas contaminadas con arsénico en rocas calizas de Zimapan, Hidalgo.

Richard D. Beaty (1978) Concepts, Instrumentacion and techniques in atomic Absorption Spectrophotometry, PERKIN-ELMER.

Richard H. Guy, Jurij J. Hostynek, Robert S. Hinz (1999) Topical effects and systemic absorption.

Ritcey G. M. (1989) Tailings management. Problems and solutions in the mining. Elsevier.

Skoog and Leary (1992) Principles of instrumental analisis. Four Edition.

Talavera M. O.et. al. (2001) Metales pesados generados por la Industria minera en la region de Taxco-Iguala, Gro: Focos de contaminacion, Dispersion e impacto a la salud. Primera etapa, estudio preliminary.

Tarango G. (1973) Estudio estratigráfico de la porción Noroccidental de la cuenca Morelos-Guerrero.

Tessier André and Turner David. (1995) Metal spetiation and bioavaiability in Aquatic systems. IUPAC Series on analytical and physical Chemistry of environmental systems.

Uribe (1986) VI Informe, Industrial Minera Mexico S.A de C.V., Taxco, Gro.

Zhixun Lin (1997) Mobilitation and retention of heavy metals and mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. The Science of the total environment 198 (1997) 13-