

00550
8

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



ESPECIACIÓN Y MOVILIDAD DE METALES
PESADOS EN SEDIMENTOS
DEL RÍO TAXCO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
**MAESTRO EN CIENCIAS
(QUIMICA ACUÁTICA)**

P R E S E N T A :
ERIK ESPINOSA SERRANO

DIRECTORA DE TESIS: DRA. MA. AURORA ARMIENTA HERNÁNDEZ
COMITÉ TUTORIAL: DRA. ARACELI PEÑA ALVAREZ
DR. JAVIER ALCOCER DURAND

MEXICO, D.F.

2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

A Diana Sofía y Gerardo Damián

A Vicky

A mis padres: Concepción y Enrique

A mis hermanos: Rocío, Delia, Enrique y Fernando

A Juan Antonio, María Eugenia, Miguel A., Claudia Aided, Rosalba,
Marycarmen, Dacia Edith, Cinthia Lizbeth y Mariana Jimena

A mis amigos y amigas de siempre

Por TODO lo que significan para mí

A todos los maestros que aportaron su granito de arena en mi
formación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por su guía, protección y la enésima oportunidad de seguir vivo.

A la Dra. Ma. Aurora Armienta Hernández por haberme dado la oportunidad de realizar esta tesis, sus acertadas críticas, su apoyo, amistad y confianza hacia mi trabajo.

Para el Dr. Oscar Talavera Mendoza por su amistad, comentarios y guía durante los muestreos en la ciudad de Taxco.

Para: Dr. Javier Alcocer y la Dra. Araceli Peña por su amistad, además de las acertadas críticas, observaciones y paciencia hacia mi trabajo.

Para: Dra. Leticia Rosales y Dr. Jesús Gracia; por sus críticas y correcciones hacia mi tesis y trabajo en general.

A Olivia, Alejandra, Nora y a la señora Aurelia, quienes me brindaron su amistad, apoyo y compañía durante mi estancia en el laboratorio.

A todas las personas del posgrado de Ciencias del mar y Limnología por su amistad, paciencia y apoyo en las cuestiones administrativas.

A mis amigos y compañeros del Instituto de Geofísica: Francisco, Elsa, Hipólito, Silvia, Isabel, Guadalupe, Flor, Abel, Héctor, Galia y Liz por los momentos y experiencias que compartieron conmigo.

A mis amigos de la maestría: Mario, Benigno, Angélica, Carmen, Maribel, Víctor Martínez, Fabiola, Mayeli, Rodolfo, Emiliano, Francisco y Mayumi; por su amistad, compañerismo y apoyo dentro y fuera de las clases.

A todos mis amigos de Toluca, por su apoyo y palabras de aliento. En especial a Carmen, Alfredo R. Vilchis, Miguel Guerrero y Alejandro Guillén, quienes me animaron a realizar esta maestría.

A la Dra. Guadalupe Villaseñor por sus valiosos comentarios y ayuda.

A la Q.I. Cecilia Salcedo L. por su ayuda en los análisis por Difracción de RX

A Eduardo A. Morales del Lab. de Sedimentología del ICMYL por sus valiosos comentarios

Al CONACYT por la beca otorgada y sus aportaciones en general.

A la Dirección General del Personal Académico por el apoyo a través del proyecto: DGAPAIN104300.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

C

RESUMEN

La minería es la principal actividad económica desde el siglo XVI en el distrito de Taxco, estado de Guerrero; sin embargo, en este lugar se generan alrededor de 500 000 Ton/año de jales, que han estado impactando el entorno con metales pesados.

Esta investigación consistió en estudiar los sedimentos de un afluente del río Taxco, que es contaminado por agua residual de la mina Guerrero, derrumbes de jales y escurrimientos que percolan por tales residuos. El objetivo consistió en la evaluación de la movilidad ambiental y la biodisponibilidad del zinc, plomo y hierro presentes en sedimentos superficiales del afluente mencionado. Los métodos utilizados fueron: la determinación de concentraciones totales y la especiación por extracción secuencial, mediante la técnica definida por Tessier (1979) en la que se separaron las siguientes fracciones geoquímicas operacionalmente definidas: Intercambiable, Carbonatada, Oxo-hidróxidos de hierro-manganeso ([Fe-Mn]Ox), Materia orgánica y Sulfuros (M.O./S) y Residual.

Se determinó que las cantidades de hierro, plomo y zinc son hasta 5, 100 y 390 veces más altas, respectivamente, que las concentraciones de fondo establecidas para la región, comparables con sitios contaminados históricamente por metales pesados. Para la época de sequía la concentración de zinc y plomo aumenta río abajo lo cual demuestra su movilidad, esta tendencia se pierde en la época de lluvias; mientras que la concentración de hierro permaneció constante en tiempo y espacio.

Los resultados de la especiación revelaron que el zinc estuvo principalmente asociado a la fracción de Carbonatos (25-39%), [Fe-Mn]Ox (15-25%) y M.O./S (14-18%); el plomo se cuantificó mayoritariamente en las fracciones [Fe-Mn]Ox (49-59%)

y Residual (22-39%); y el hierro se presentó especialmente en las fracciones Residual (65-78%) y [Fe-Mn]Ox (15%).

Por lo tanto, se concluye que la mayor proporción de zinc, plomo y hierro no está biodisponible. Sin embargo, aproximadamente una quinta parte de estos metales está susceptible a cambios de pH y condiciones de óxido-reducción, lo cual sí representa un peligro potencial para el ambiente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I N T R O D U C C I Ó N

Un hombre va al saber como a la guerra: bien despierto, con miedo, con respeto y con absoluta confianza. Ir en cualquier otra forma al saber o a la guerra es un error y quien lo cometa vivirá para lamentar sus pasos.

Las enseñanzas de don Juan (pág. 72)

Desde la época de la Colonia hasta nuestros días, México se ha distinguido por una importante actividad minera en ciertas zonas del país; la Ciudad de Taxco de Alarcón, en el Estado de Guerrero, es un ejemplo donde la extracción de oro, cobre, zinc, plomo y, principalmente, plata ha tenido lugar desde el siglo XVI. Actualmente esta actividad tiene gran importancia económica. Sin embargo, a pesar de los beneficios económicos que genera esta industria, en todas las fases de la actividad minera se producen grandes cantidades de residuos sólidos, por ejemplo: terreros, material de obras, jales, escorias y lodos.

Tal es el caso del mineral extraído en el Distrito minero de Taxco, el cual se procesa por flotación selectiva en la planta "El Solar" propiedad de Industria Minera México S. A. de C.V (IMMSA) y, de acuerdo con los datos más recientes, de las 525 072 Ton tratadas en 1996 se obtuvieron 26 674 Ton de concentrado (5.08% del material original) (COREMI, 1999). Lo anterior indica que a la año se generan alrededor de 500 000 Ton de residuos sólidos -conocidos técnicamente como jales de la planta de beneficio o simplemente jales- los cuales se ocupan generalmente para relleno de algunos sistemas de minado (COREMI, 1999) y en mayor cantidad se acumulan al aire libre como relleno de barrancas (Talavera *et al.*, 2001) en los alrededores de las minas. El riesgo potencial hacia el ambiente de estos materiales ha sido señalado, por ejemplo, como liberadores de metales pesados¹ (debido a efectos del intemperismo) entre los que se pueden mencionar el Zn, Pb, As, Cd, Cr, Fe y Cu,

¹ Para los fines de este trabajo un metal pesado es aquel metal cuya densidad es mayor o igual a la del hierro, en tanto que un metal traza es aquel que se presenta en concentración menor a 1000 mg/Kg o 0.1% (Alloway, 1995).

principalmente (dependiendo de la mineralogía del yacimiento mineral) (Ferguson, 1990).

Algunos de los depósitos de jales se encuentran sin protección contra los efectos del intemperismo, lo cual, hace que sea muy alta la movilidad de sus componentes peligrosos (metales pesados) hacia los alrededores.

En la región minera de Taxco se han reconocido y analizado siete depósitos de jales así como el impacto de estos residuos en los suelos, aguas superficiales y subterráneas de los alrededores (Talavera *et al.*, 2001; Armienta *et al.* 1999; Armienta *et al.*, 2000, Pérez, 2002). Por otro lado, Castro (2002) realizó la caracterización químico-mineralógica de los sedimentos del río Taxco que tiene su origen en la ciudad del mismo nombre, dentro de la región y recibe las descargas de aguas residuales de este importante centro urbano, de las minas y también se ve afectado por los depósitos de jales que se encuentran en el área.

Junto a los jales provenientes de la mina Guerrero, depositados desde hace más de 50 años, tiene su origen un pequeño río que es afluente del río Taxco y se ubica a unos 51 Km al sureste de la población del mismo nombre. Éste es alimentado por la descarga de aguas residuales provenientes de esta misma mina; además, en su ribera oeste se encuentran los jales que desde ese entonces han significado un aporte de metales pesados a este río, debido a deslaves del material por lluvia o transporte de elementos disueltos a través de los mismos escurrimientos. Dicho ramal tiene la peculiaridad de no estar impactado por aguas residuales urbanas, que implicarían un aporte de materia orgánica que afecta tanto al pH como al Eh² y, por lo tanto, el comportamiento general de los metales pesados.

Tanto el agua del afluente (Armienta *et al.* 1999; Armienta *et al.*, 2000) como los jales adyacentes (Pérez, 2002) ya fueron analizados; sin embargo, para conocer su

² Eh = Potencial de óxido reducción respecto al hidrógeno.

estado ambiental resulta de fundamental importancia evaluar los sedimentos pues son una parte integral de cualquier río e intervienen de manera decisiva en el comportamiento de los metales pesados en este medio.

El análisis de los sedimentos es indispensable en todo estudio de contaminación en un medio acuático porque juegan un papel muy importante en el proceso de contaminación por metales pesados; funcionan como almacén temporal de tales contaminantes dependiendo de las condiciones físicas (temperatura, velocidad del flujo de la corriente de agua), químicas (pH, Eh, mineralogía, concentración de oxígeno disuelto) y biológicas (materia orgánica) con las que estos elementos pueden ser atrapados o liberados del lecho sedimentario.

Sin embargo, no es suficiente conocer la concentración de metales totales para evaluar su biodisponibilidad y movilización en el ambiente acuático, sino que muchos investigadores (Alloway, 1995; Bordas y Bourg, 1998; Elsokkary, 1992; Förstner, 1993; Quevauviller *et al.*, 1993; Rubio y Ure, 1993; Singh *et al.*, 1999; Tessier *et al.*, 1979; Ure *et al.*, 1993) concuerdan en que es necesario conocer la distribución cuantitativa de estos elementos en las distintas formas o fases químicas (intercambiable, carbonatada, reducible, orgánica/sulfuros y residual) en las que se encuentran bajo condiciones naturales. En este estudio se analizaron por digestión total y extracción secuencial, los siguientes metales en los sedimentos del río Taxco (Bodek, 1988):

1. Zinc: es uno de los metales con mayor movilidad en medio acuoso y suelo, además de que puede ser un indicador del aporte de materiales contaminados al río.
2. Plomo: es considerado tóxico para plantas y animales y en el ser humano se ha establecido su carácter venenoso y dañino para la salud.
3. Hierro: aunque no es considerado un elemento tóxico, tiene gran importancia ambiental ya que interacciona con los metales que sí lo son, por ejemplo, mediante reducciones químicas, adsorción, complejación y coprecipitación.

4. El arsénico no se analizó debido a que presenta pérdidas por volatilidad durante la extracción secuencial por la formación de AsF_3 o AsCl_3 con puntos de fusión menores (-63°C y 130.2°C respectivamente) a los 200°C alcanzados en el proceso (Potts, 1992), el cual no fue llevado a cabo en reactores sellados, disminuyendo la efectividad del análisis químico de este elemento.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la concentración y especiación del zinc (Zn), plomo (Pb) y hierro (Fe) presentes en los sedimentos superficiales del río Taxco, con el fin de evaluar su movilidad ambiental y su biodisponibilidad bajo las condiciones de lluvia y estío.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Determinar la variación de la concentración de Zn, Pb y Fe en los sedimentos a lo largo del afluente estudiado del río Taxco.
2. Determinar la especiación del Zn, Pb y Fe en sedimentos del río Taxco.
3. Comparar la concentración total y la especiación del Zn, Pb y Fe antes y después de la temporada de lluvias, con el fin de determinar la variación temporal.

HIPÓTESIS

1. Los metales pesados considerados para esta investigación se concentrarán en las fases menos móviles de los sedimentos.
2. En el muestreo posterior a la época de lluvias se encontrará un mayor contenido de metales pesados debidos al arrastre fluvial.
3. Los carbonatos presentes en los sedimentos impiden la concentración de metales pesados en las fracciones móviles del sedimento debido principalmente a su efecto sobre el pH de la fase acuosa.

CAPÍTULO I ANTECEDENTES

I. 1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Taxco se localiza en la zona noreste del estado mexicano de Guerrero (Figura 1). Sus principales actividades económicas radican en el turismo, comercialización de platería artesanal y la actividad minera.

El clima dominante en el lugar es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Acw según la clasificación climática de Koeppen) (INEGI., 1999). La época de lluvias abarca los meses de mayo a septiembre, con una precipitación anual promedio de 227.5 mm y una máxima de 275 mm, mientras que en la época de sequía la precipitación promedio es de 21.2 mm (Fuente: www.smn.cna.gob.mx).

Esta región es drenada por el río Taxco que nace en la zona oriente de la ciudad homónima, es alimentado por varios afluentes, algunos de ellos estacionales y se extiende hasta la ciudad de Iguala ubicada a unos 100 Km hacia el sur. El efluente estudiado del río Taxco se ubica al sureste de la ciudad del mismo nombre y se une al cauce principal cerca del lugar denominado Xochula. El área de estudio abarca desde las coordenadas 18°33,876' N, 099° 36000'O hasta 18°31.831'N, 099°35.373'O⁴ como se muestra en la Figura 1.

El problema de contaminación más importante se ha identificado en la parte norte de este río donde, además de la carga de aguas residuales proveniente de los centros urbanos y de algunas instalaciones mineras, se cuenta con el aporte de residuos mineros sólidos o jales que, a lo largo de medio siglo, han significado una fuente de metales pesados hacia este sistema de drenaje.

⁴ Coordenadas equivalentes a 2048887 N, 437452 O hasta 2048526 N, 437729 O en unidades de la cuadrícula Universal Transversa de Mercator o UTM.

-  Río Taxco (efluente principal)
-  Jales
-  Laguna
-  Área de estudio

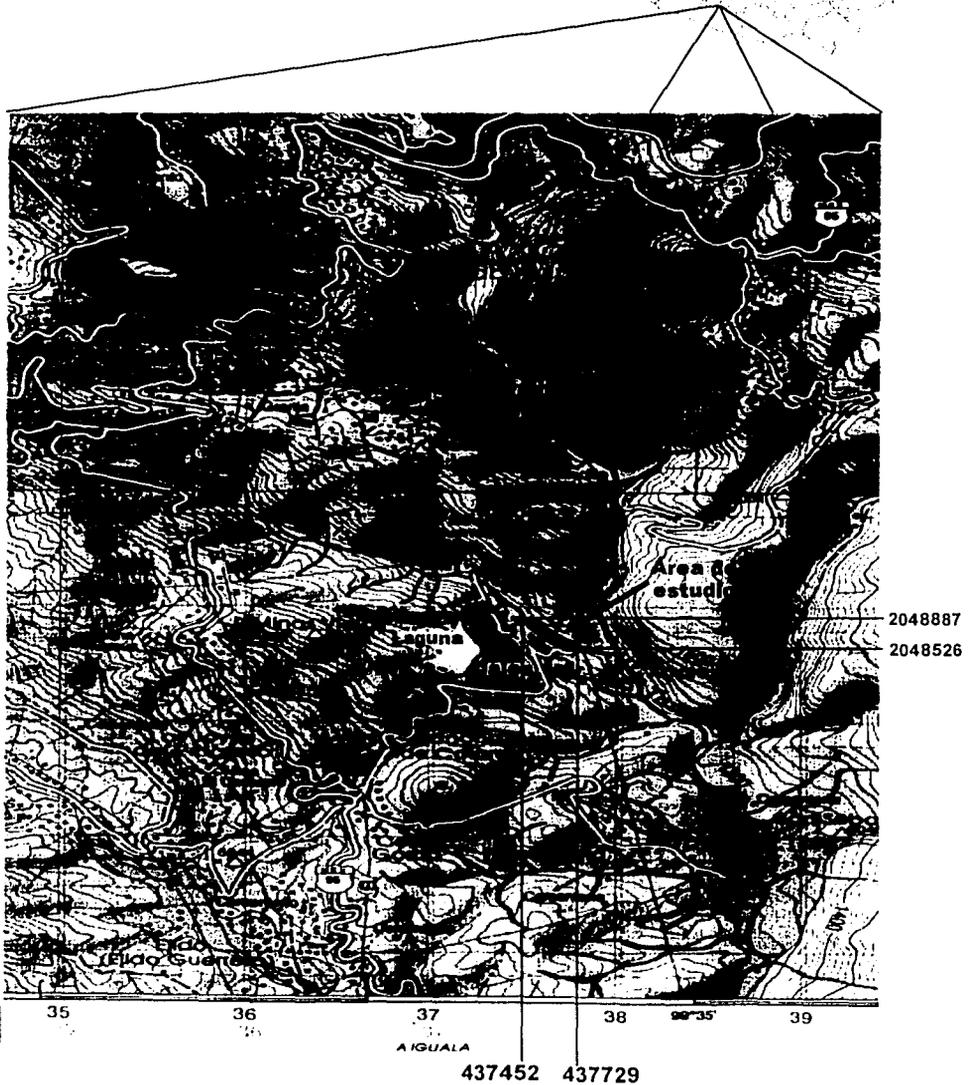


Figura 1. Ubicación del área de estudio (Imagen modificada de INEGI, 2001).

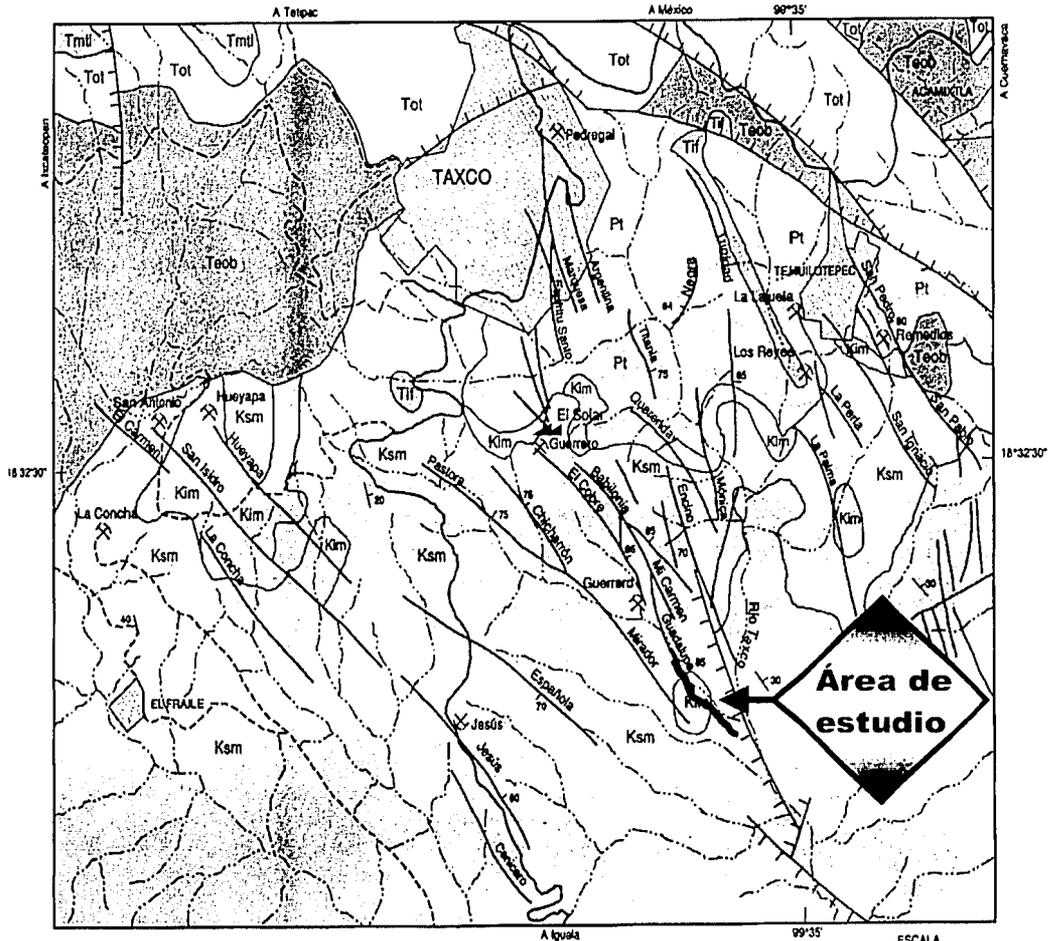
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Este afluente tiene una longitud aproximada de dos kilómetros, un ancho promedio de 50 cm, su profundidad media es de unos 12 cm y su caudal es variable (características obtenidas mediante observaciones *in situ*). Este ramal del río Taxco es alimentado por aguas residuales provenientes de la mina Guerrero y por escurrimientos de una laguna de estabilización ubicada sobre una pequeña colina al oeste, de la cual está separado por depósitos de jales de la mina antes mencionada, que han sido acumulados ahí desde hace varias décadas, por lo que son una fuente de metales pesados para el río debido a derrumbes, arrastres por lluvia y viento además de los mismos escurrimientos.

La parte inicial del río se encuentra en el límite de la formación Mexcala (**Ksm**) mientras que el resto del río se ubica en la formación Morelos (**Kim**), como se observa en la Figura 2.

La formación Mexcala se caracteriza por la presencia de lutitas, limonita, areniscas y un conglomerado de calizas de origen marino que corresponden al Cretácico superior; mientras que la formación Morelos se compone principalmente de calizas de plataforma con algunos horizontes dolomitizados (montículos arrecifales) que pertenecen al Cretácico inferior (Cserna y Fries, 1981).

En la actualidad los tiros El Solar y Guerrero (pertenecientes al grupo IMMSA) son las únicas minas activas en el área y explotan la veta El Cobre, una de las más importantes en el distrito de Taxco, y varios mantos que se encuentran entre ésta y la veta Babilonia (Figura 2). Estos mantos se localizan en calizas dolomíticas de la formación Morelos. Los minerales presentan una ley alta en plata (200-300 g/Ton) y menor para el plomo, zinc, cobre y oro (idem).



EXPLICACIÓN

| | | | | | |
|-------------------|--|----------------------------------|--|-----------------------|--|
| Toba y lahar | | Rocas ígneas intrusivas félsicas | | Mina y prospecto | |
| Riolita Tizapota | | Rumbo e inclinación de estratos | | Carretera pavimentada | |
| Formación Balsas | | Contacto | | Camino de terracería | |
| Formación Mexcala | | Falla normal | | Río o arroyo | |
| Formación Morelos | | Veta | | Población | |
| Esquisto Taxco | | Planta de beneficio | | | |

Figura 2. Geología del área de estudio. Imagen tomada de COREMI (1999).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En las vetas explotadas, por lo general, se presentan los siguientes minerales (Cserna y Fries, 1981):

1. Epidota, ilvaíta, actinolita y tremolita (evidencia de silicatización).
2. Minerales argentíferos como: polibasita, proustita, pirargirita y plata nativa.
3. Los sulfuros consisten en galena, esfalerita, pirita y calcopirita.
4. Se presentan también magnetita y especularita.

Un rasgo importante de los mantos es la presencia de hematita, además de los minerales antes mencionados para las vetas.

El mineral que se extrae en el distrito de Taxco se procesa por flotación en la planta "El Solar" que tiene una capacidad de 1682 Ton / mes (COREMI, 1999). Sin embargo, sólo 5% del mineral es separado en el proceso, por lo que el resto pasa a formar parte de los jales.

Estos datos dan una idea del tipo y cantidad del material que se extrae de las minas y que, finalmente, pasará a formar parte de los jales.

Finalmente, en las orillas del río estudiado se observaron depósitos de carbonatos⁵ provenientes del suelo calcáreo propio de la región. El material carbonatado también representa aportes al río; pero, al contrario de los jales, significa una dilución en la concentración de metales pesados, considerando que el contenido de estos metales de manera natural es muy bajo (Talavera *et al.*, 2001) en comparación con los resultados obtenidos (las cantidades obtenidas de hierro, plomo y zinc son hasta 5, 100 y 400 veces mayores que los valores de fondo respectivamente).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁵ Identificados por su color blanco y la efervescencia *in situ* ante el tratamiento con gotas de ácido nítrico y que confieren al agua del río una capacidad amortiguadora.

I. 2 PROCESO DE BENEFICIO DE LA PLATA

Las fases de la actividad minera se dividen en el orden siguiente:

1. Prospección. Estudios de campo en el área seleccionada (gravimetría, geología superficial, densidad, etc.).
2. Exploración. A grandes rasgos incluye: barrenación, obras y perforaciones directas, construcción de caminos e instalación de campamentos.
3. Explotación. Transformación del ambiente para los objetivos mineros (tiros, socavones, zonas de acumulación de materiales, entre otros).
4. Beneficio. Procesado de minerales con el fin de regular y disminuir su tamaño, remover constituyentes no requeridos, mejorar la calidad o pureza del producto deseado.
5. Fundición y refinación. Uso de técnicas electroquímicas o de hornos industriales para obtener metales y/o aleaciones para uso industrial, o bien para la eliminación de impurezas para alcanzar una ley alta de metal.

El beneficio de cualquier mineral se refiere a aquel método usado para su concentración (vía cianuración, flotación y concentración por gravedad, principalmente) posterior a la reducción del tamaño de grano mediante la trituración o molienda, y previo a una fusión primaria o electrodeposición (U.S.E.P.A.⁶, 1995).

El mineral extraído en el Distrito minero de Taxco se procesa por *flotación selectiva*. Este método consiste en colocar el mineral o mena en un tanque con agua y una serie de reactivos químicos especiales para que, mediante agitación o aereación, se formen burbujas o espuma en la que se adhiere el mineral deseado y se le separe del resto (ganga).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁶ U.S.E.P.A.: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

Los reactivos químicos incluyen recolectores, antiespumantes, activadores, espumantes, entre otros. La utilización de uno o un grupo en específico de reactivos depende principalmente de las características del mineral, de tal manera que tales agentes pueden contener dióxido de azufre, ácido sulfúrico, compuestos de cianuro, cresoles, gomas de xantatos, hidrocarburos, ácido clorhídrico, compuestos de cobre y polvo de zinc.

En este proceso de beneficio de la plata se generan los siguientes residuos (U.S.E.P.A., 1995): a) agua de mina; b) soluciones del proceso de extracción del mineral; c) roca residual; d) mineral agotado (al que se le extrajo casi todo el metal o mineral principal), y e) otros residuos.

Los jales técnicamente están constituidos por dos partes:

1. La primera está formada por roca y suelo removido del sitio de excavación.
2. La segunda parte está formada por residuos generados en los procesos de beneficio y contienen una mezcla de impurezas, metales traza y residuos de sustancias químicas empleadas en el proceso. Éstos son considerados como presunta fuente de metales pesados. (U.S.E.P.A., 1995; Alloway, 1995; Ferguson, 1990).

Finalmente ambos tipos son depositados en sitios cercanos dependiendo de la topografía, las condiciones propias del sitio y factores económicos (U.S.E.P.A., 1995). En el distrito minero de Taxco los jales se ocupan en el relleno de ciertos sistemas de minado (COREMI, 1999) o de barrancas al aire libre (Talavera *et al.*, 2001).

I. 3 SEDIMENTOLOGÍA

Un sedimento está formado por agua intersticial (más de 50% en volumen) y por una mezcla de materiales proveniente principalmente de la erosión de rocas y suelos. La siguiente es una definición típica para un sedimento: "una matriz de materiales orgánicos, inorgánicos, agua intersticial; que puede ser relativamente heterogénea en términos de sus características químicas, físicas y biológicas y a demás actúan como transporte y fuente potencial de contaminantes en los ambientes acuáticos" (Power y Chapman, 1992, p. 4).

En la actualidad las descargas de aguas residuales y emanaciones a la atmósfera por parte de las industrias y vehículos son consideradas como la fuente principal de metales pesados hacia la hidrosfera.

El primer y principal mecanismo de entrada de un metal en el ambiente acuático es su adsorción sobre la superficie del sedimento y otras fases sólidas. Este proceso heterogéneo tiene lugar con sustancias químicas tales como (Kabata-Pendias y Pendias, 1992):

1. Arcillas. Los minerales arcillosos o arcillas son productos del intemperismo de las rocas. Se consideran dentro del grupo de los aluminosilicatos y presentan una estructura cristalina en forma de hojas. En sus bordes exteriores presentan grupos oxhidrilo (OH⁻) que le sirven para adsorber cationes. Pueden tener cantidades insignificantes de metales pesados como componentes estructurales, pero su capacidad de adsorción de estos elementos representa su función más importante.

2. Materia orgánica. La materia orgánica de los suelos o sedimentos consiste en una mezcla de productos de plantas y animales en varios estados de descomposición, los cuales son: sustancias húmicas, ácidos orgánicos de alto y bajo peso molecular, carbohidratos, proteínas, péptidos, aminoácidos, lípidos, ceras, hidrocarburos

poliaromáticos (HPAs), fragmentos de lignina, entre otros. Los cuales contienen en sus estructuras varios tipos de grupos funcionales [$-\text{OH}$, COOH , CO_2^- , $\text{C}=\text{C}$, $-\text{SH}$, $-\text{NH}$, entre otros] que tienen la capacidad de interactuar con los iones metálicos mediante intercambio iónico, adsorción, complejación, coagulación, peptización, etc.

3. Oxo-hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio. En suelo y sedimentos se presentan óxidos e hidróxidos de aluminio, titanio, silicio, hierro y manganeso; son estos dos últimos los que tienen mayor influencia sobre los metales traza, ya que, además de ser los más abundantes (en formas cristalinas y amorfas), están expuestos a reacciones de reducción, complejación, oxidación-precipitación, procesos microbiológicos, y tienen una alta capacidad de sorción⁷ pH-dependiente que se manifiesta mediante:

- a. Sustitución isomórfica de cationes de Fe y Mn por aquellos que tienen similares dimensiones físicas [Co^{2+} , Co^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{4+} y Ag^+].
- b. Reacciones de intercambio de cationes.
- c. Adsorción de aniones (fosfatos, molibdatos y seleniatos) dependiendo de los cambios en la carga superficial, principalmente en los compuestos de hierro.

4. Carbonatos. Éstos se presentan en los sedimentos y suelos de manera cristalina, asociados o adheridos a otros minerales. Su principal influencia es sobre el pH y, por lo tanto, sobre el comportamiento de ciertos metales traza como el Co, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, U y Zn; los cuales pueden co-precipitar con los iones CO_3^{2-} y ser incorporados dentro de la estructura cristalina, o bien pueden reaccionar y sustituir isomórficamente cationes de Ca y Mg de la calcita y la dolomita respectivamente (los minerales carbonatados más abundantes). Además, al generar altos valores de pH (por ejemplo de 7 a 8), otras especies como los $[\text{Fe}, \text{Mn}]\text{Ox}$ también llegan a precipitarse.

⁷ Sorción se refiere a todos los fenómenos que ocurren en la frontera solución-sólido e incluye a grandes rasgos dos procesos: adsorción y absorción.

5. Sulfuros. Son compuestos escasos en suelos de clima húmedo, pero en zonas áridas controlan predominantemente el comportamiento de los metales pesados. Principalmente los cationes de Fe, Mn, Hg y Cu pueden formar sulfuros relativamente estables, mientras que otros metales como Cd, Co, Ni, Sn, Ti y Zn pueden coprecipitar fácilmente con la pirita (FeS, el sulfuro más común en los suelos).

La capacidad de adsorción de estas fracciones minerales depende de su abundancia, reactividad, superficie de contacto y el tiempo de permanencia del agua contaminada en el sitio (Ferguson, 1990; Kabata-Pendlas y Pendlas, 1992).

Para reconocer las propiedades del sedimento es necesario llevar a cabo la caracterización de muestras representativas. La manera más común de realizar esto es mediante su análisis por tamaño de partícula. Esto es: tamizar la muestra para separar fracciones de tamaño de acuerdo a las diferentes escalas que existen. La escala más simple divide a los sedimentos en dos fracciones (Saheurs *et al.*, 1993):

1. Sedimentos de grano grueso (gravas y arenas mayores de $62\mu\text{m}$) compuestos principalmente por materiales silicatados estables, no cohesivos que, por lo general, no son asociados con contaminación química.
2. Sedimentos de grano fino (limos, arcillas y minerales menores de $62\mu\text{m}$) compuestos por partículas que poseen un área superficial relativamente alta con respecto a su volumen y cargas eléctricas superficiales que les confiere mayor reactividad química que los materiales gruesos e incrementan la probabilidad de sorción y desorción de contaminantes (Saheurs *et al.*, 1993, Power, 1992).

Sin embargo, como las partículas del sedimento se presentan en un intervalo de tamaño que abarca desde algunos metros hasta unos cuantos micrómetros, es necesaria una escala con divisiones uniformes de tamaño para darle igual énfasis a las fracciones gruesas y a las finas.

En la Figura 3 se presenta la clasificación de sedimentos de acuerdo a la escala de Udden-Wentworth en unidades ϕ y su equivalencia a mm, la cual ha sido más ampliamente usada por los sedimentólogos.

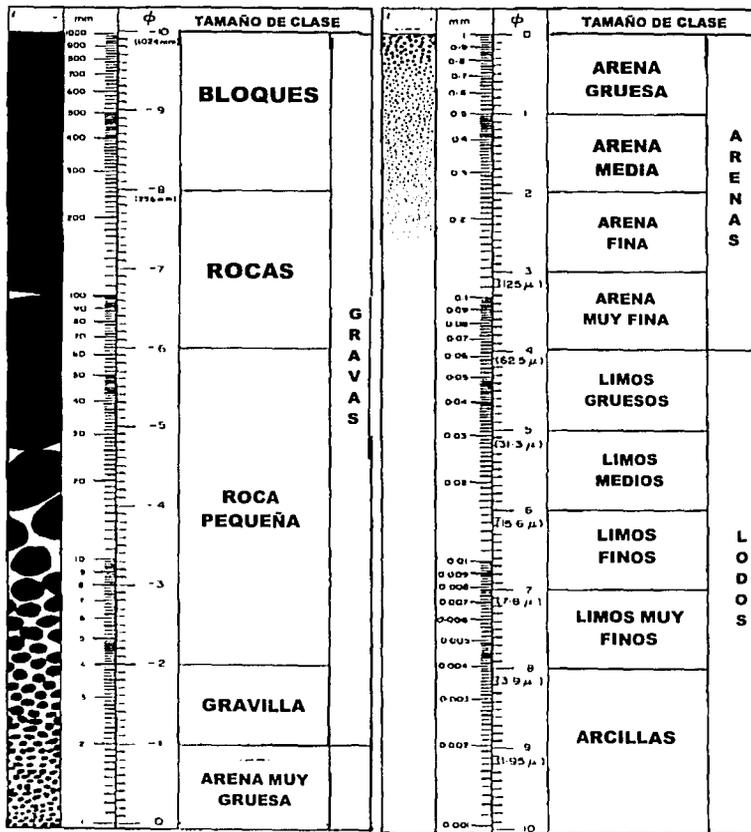


Figura 3. Escala Udden-Wentworth (ϕ) para tamaño de grano y la equivalencia a mm (imagen modificada de Dowglas y McConchie, 1994).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I. 4 DEFINICIÓN DE ESPECIACIÓN

La especiación ha sido una herramienta ocupada para conocer el comportamiento de los metales en suelo o sedimento.

Los procesos y factores que controlan el atrapamiento de metales traza por los sedimentos y su liberación hacia la capa superior de agua cuando las condiciones ambientales cambian, deben ser entendidos y si impactan en el ambiente, deben ser pronosticados (Tessier *et al.*, 1985. p 183).

La ecotoxicidad y movilidad de metales en el ambiente depende fuertemente de su forma química específica o método de enlace a la matriz sólida (especiación) más que del contenido total del elemento; consecuentemente Quevauviller *et al.* (1993) recomienda que ambas sean determinadas.

El término "especie" se define como "la forma química en que se encuentra un elemento en el ambiente" y fue operacionalmente definido por Tessier *et al.* (1979) y, en este caso, se refiere a "los procedimientos, reactivos o extractores usados para aislar una especie"; por ejemplo, el uso de oxalato ácido de amonio para extraer metales asociados con componentes o fases de suelo o sedimento "moderadamente reducibles", a pesar de que la fase puede ser parcialmente indefinida o el procedimiento insuficientemente específico. Otra definición de especiación es "el proceso de identificación y cuantificación de diferentes especies, formas o fases definidas presentes en un material" (Förstner, 1993, p. 5).

Los reactivos extractores pueden ser usados individualmente, pero, para que el procedimiento se vuelva más selectivo, se emplean varios de ellos en una secuencia definida a lo cual se denomina "extracción secuencial" (Ure *et al.*, 1993; Förstner, 1993).

La especiación en este trabajo consiste en la cuantificación de zinc, plomo y hierro asociados a las siguientes fases sedimentarias operacionalmente definidas (Tessier *et al.*, 1979, Fergusson, 1990):

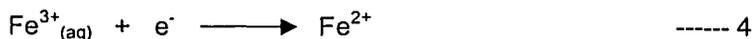
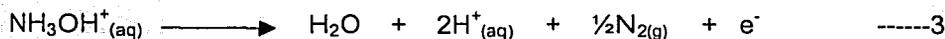
1. Metales (M) intercambiables. Son aquellos que, estando adsorbidos a la superficie de minerales, se liberan mediante intercambio iónico tras cambiar la composición de la solución posteriormente a la adición de cationes tales como: Mg^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ o Li^+ , como se observa en la ecuación 1:



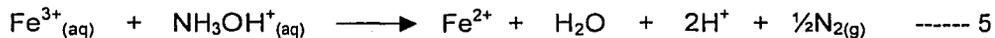
2. Metales asociados a carbonatos. Son liberados tratando el sedimento con una solución amortiguadora de acetato de sodio (ajustada a $pH \cong 4.7$ con ácido acético) que disuelve estos compuestos sin alterar las demás fracciones, como se muestra en la ecuación 2.



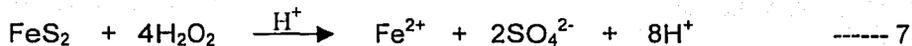
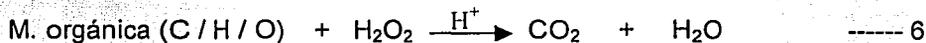
3. Metales asociados a óxidos de hierro y manganeso ($[Fe-Mn]Ox$). Para liberar metales pesados asociados con óxidos hidratados de hierro y manganeso se ocupa un agente reductor como el clorhidrato de hidroxilamina ($NH_2OH.HCl$) que en solución produce la especie $NH_3OH^+_{(ac)}$ (reacción 3), la cual reduce al $Mn(IV)$ y $Mn(III)$ a $Mn(II)$ y el $Fe(III)$ a $Fe(II)$ (reacciones 4 y 5). Como las sales reducidas de estos metales son solubles los cationes asociados a esta fase se liberan en la solución:



Sumando las semireacciones de las ecuaciones 3 y 4:



4. Metales asociados a la materia orgánica y sulfuros [M.O./S⁻]. Son aquellos metales que se liberan al descomponer material orgánico vía oxidación ocupando H₂O₂ / HNO₃ (pH= 2). La ecuación 6 es la representación general de este proceso. En la ecuación 7 se muestra la oxidación de la pirita que también ocurre en este proceso. Al final del tiempo de extracción se ocupa acetato de amonio para evitar la precipitación de los cationes de la solución.



5. Metales asociados a una fase residual, formada principalmente por silicatos y aluminosilicatos. Los cuales son descompuestos mediante un tratamiento con una mezcla de HF-HClO₄ (10:1), donde ocurren varias reacciones, por ejemplo, las ecuaciones 8 y 9 donde se considera al piroxeno y feldespato respectivamente.



CAPÍTULO II METODOLOGÍA

II. 1 UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO

En esta investigación se realizaron dos muestreos tomando en consideración el régimen de lluvias en el área de estudio. En ambos se colectaron un total de siete muestras en similar ubicación geográfica⁸, como se muestra en la Tabla 1 y en la Figura 4; en esta última se presentan los siguientes puntos:

- a) Las siglas **MT1 – MT7** se refieren a la ubicación de las muestras para ambos muestreos, ya que las coordenadas son similares. Las características de cada sitio se presentan en la Tabla 22 (Anexos).
- b) **"A"** señala la ubicación de una laguna en una cota más alta que el río estudiado y del cual se separa por un depósito de jales, ésta representa el origen de un escurrimiento que va a desembocar en la parte inicial de la zona de muestreo.
- c) **"B"** indica el área donde se depositaron jales provenientes de la mina Guerrero desde hace algunas décadas, y (d) **"C"** representa instalaciones de la mina antes mencionada.

| Tabla 1. Ubicación de los puntos de muestreo en el afluente estudiado del río Taxco | | | |
|---|---|-----------------|----------|
| Muestreo 1 (17-III-01) Época de estiaje | Muestreo 2 (1-XII-01) Época de lluvias | Ubicación (UTM) | |
| | | Latitud | Longitud |
| MT11 | MT21 | 2048887 | 0437452 |
| MT12 | MT22 | 2048884 | 0437464 |
| MT13 | MT23 | 2048741 | 0437532 |
| MT14 | MT24 | 2048661 | 0437549 |
| MT15 | MT25 | 2048581 | 0437654 |
| MT16 | MT26 | 2048442 | 0437791 |
| MT17 | MT27 | 2048526 | 0437729 |

⁸ Las coordenadas se obtuvieron mediante un GPS (Global Position System) marca Garmin.



Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo en el afluente estudiado del río Taxco

II. 2 METODOLOGÍA DE MUESTREO

Las características del afluente del río Taxco estudiado que se consideraron para establecer los puntos de muestreo son:

1. Las condiciones naturales del ambiente acuático (flujo lento de la corriente de agua, presencia de bancos de sedimentos), las fuentes de contaminación del área, la naturaleza de las entradas de los contaminantes y los puntos de muestreo de agua que han sido realizados con anterioridad (Armienta *et al.*, 1999 y Armienta *et al.*, 2000).

2. Por ser un río con flujo lento y cantidad irregular de agua, las muestras se colectan de "bancos" donde hay menos turbulencia y el flujo es lento (cerca de la orilla), ya que el tiempo de permanencia es mayor y, por tanto también el tiempo de sedimentación o de la reacción de precipitación (Rubio y Ure, 1993). Al colectar de éstos lugares se asegura que el tamaño del sedimento sea lo más fino posible, ya que de esta manera se asegura la mayor superficie de contacto reactiva para la incorporación de los metales pesados en el sedimento (Quevauviler *et al.*, 1993, Rubio y Ure, 1993, Singh *et al.*, 1999 ; Elsokkary, 1992; Power, 1992; Allen, 1992).

Se colectaron en total siete muestras a lo largo del cauce (la imagen con la ubicación se presenta en la sección de resultados). Se ocupó una pala de plástico para tomar de 1-3 cm de la capa superficial, ya que ésta es la zona óxica (como se muestra en la Figura 4), la cual no requiere de cuidados excesivos en su manejo (Singh *et al.*, 1999; Burgess y Scott, 1992; Bordas y Bourg, 1998, Rubio y Ure, 1993). Los sedimentos colectados fueron guardados en bolsas de polietileno HD i identificadas con marcador indeleble y lo más pronto posible fueron puestos a secar a temperatura ambiente en el laboratorio.

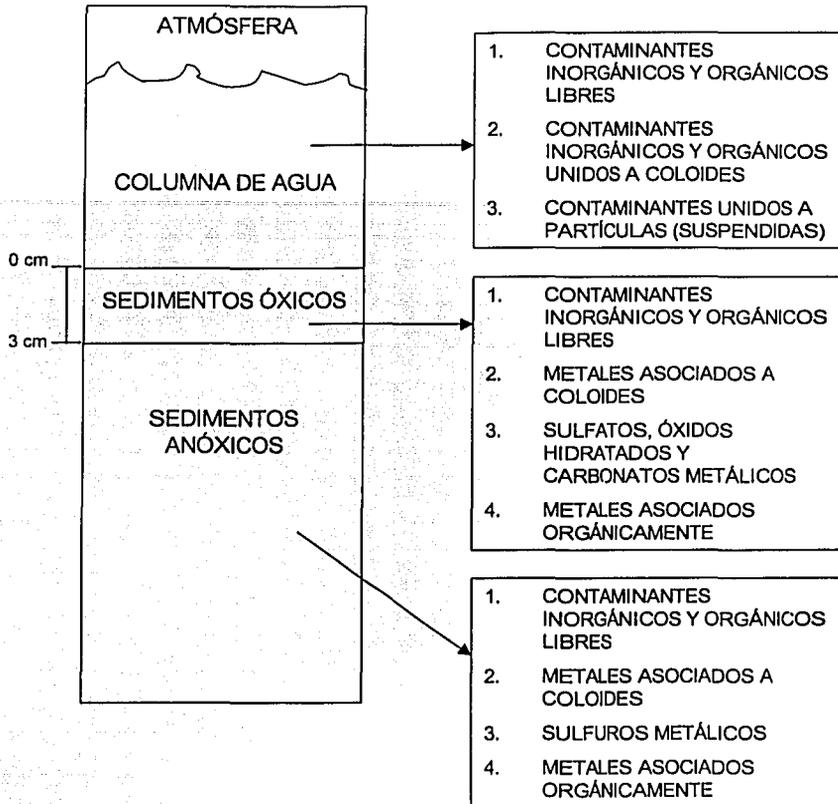


Figura 5. Sección transversal de las interfaces atmósfera/columna de agua/sedimento óxico/sedimento anóxico y formas prevalentes de contaminantes (modificada de Burgess y Scott, 1992).

El pH del agua del río fue medido *in situ* con un potenciómetro digital de electrodo combinado, el del agua intersticial del sedimento se determinó en el laboratorio con el mismo instrumento posteriormente a la filtración de una porción de la muestra.

II. 3 PRETRATAMIENTO Y ALMACENADO DE LAS MUESTRAS

El primer paso para el pretratamiento de las muestras es el secado; por lo que en este caso se optó por secar los sedimentos durante dos semanas a temperatura ambiente cubiertos con papel (para evitar contaminación con polvo y favorecer la evaporación del agua), con ocasional agitación manual para homogeneizar el secado y destruir los terrones. Este método no altera la estructura mineral del sedimento (Bordas y Bourg, 1998; Rubio y Ure, 1993).

El segundo paso es la separación de fracciones por tamaño de partícula ocupando tamices de acero⁹ de 1.7 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.292 mm y 0.063 mm de abertura de la malla para obtener seis fracciones. Aunque este tipo de tamices libera metales a las muestras, por ejemplo 17 ppm para el Fe y 1.5 ppm para el zinc (Potts, 1987), éstas se pueden considerar insignificantes respecto a la cantidad de estos elementos cuantificados en las muestras. En el proceso de tamizado (15 min / muestra) se consideraron las siguientes precauciones establecidas por Saheurs y Wilson (1993) y Mc Manus (1995):

1. Deshacer manualmente los aglomerados formados durante el proceso de secado.
2. Evitar lo más posible la pérdida de materiales finos debido a la adherencia a las paredes del tamiz o bien debida a su volatilidad, y sobrecargar con muestra los tamices para asegurar una separación eficaz.
3. Se limpiaron meticulosamente los tamices luego de cada separación para evitar tanto la obstrucción de la malla como la contaminación entre las muestras.

El siguiente paso consistió en la división o "cuarteo" de las muestras con el fin de disminuir su volumen y obtener una muestra representativa del lote original (Saheurs, 1993).

⁹ ASTM: American Standards and Testing Methods (Patrones y métodos de prueba Americanos).

II. 4 GRANULOMETRÍA DE SEDIMENTOS

El análisis granulométrico por tamizado se basa en calcular (pesar) qué cantidad de material (sedimento) es retenido por tamices fabricados de acuerdo a la escala Wentworth y contruidos con base en las normas ASTM¹⁰ de Estados Unidos (Douglas y McConchie, 1994) con lo cual se separan fracciones por tamaño de partícula.

En el análisis granulométrico de los sedimentos secos se usaron tamices de acero inoxidable con los cuales se separaron las fracciones descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de fracciones sedimentarias por su tamaño de partícula¹¹

| Fracción | Tamaño (T) |
|--------------------------|-------------------------|
| Gravas | (T) > 1.7 mm |
| Arenas muy gruesas | 1.7 mm > T > 1 mm |
| arenas gruesas | 1 mm > T > 0.5 mm |
| Arenas medias | 0.5 mm > T > 0.292 mm |
| Arenas finas y muy finas | 0.292 mm > T > 0.064 mm |
| Limos y arcillas | T < 0.064 mm |

La fracción de T < 0.064 mm es la que se va a ocupar para los análisis de esta investigación.

Existen diferentes formas de representar gráficamente los datos de la granulometría. Visher (1969) propuso la siguiente: graficar en una escala semi-logarítmica la frecuencia acumulada de cada fracción obtenida (eje Y) contra el tamaño de grano en mm o unidades ϕ (eje X) que, por convención, presenta a la izquierda los tamaños

¹⁰ ASTM: American Standards and Testing Methods (Patrones y métodos de prueba Americanos)

¹¹ La escala completa se presenta en la Figura 3, pág. 16.

gruesos y a la derecha los finos como se muestra en la Figura 6. De esta manera se obtiene una curva formada por 2, 3 o 4 segmentos lineales delimitados por cambios en su pendiente (de más de 20°).

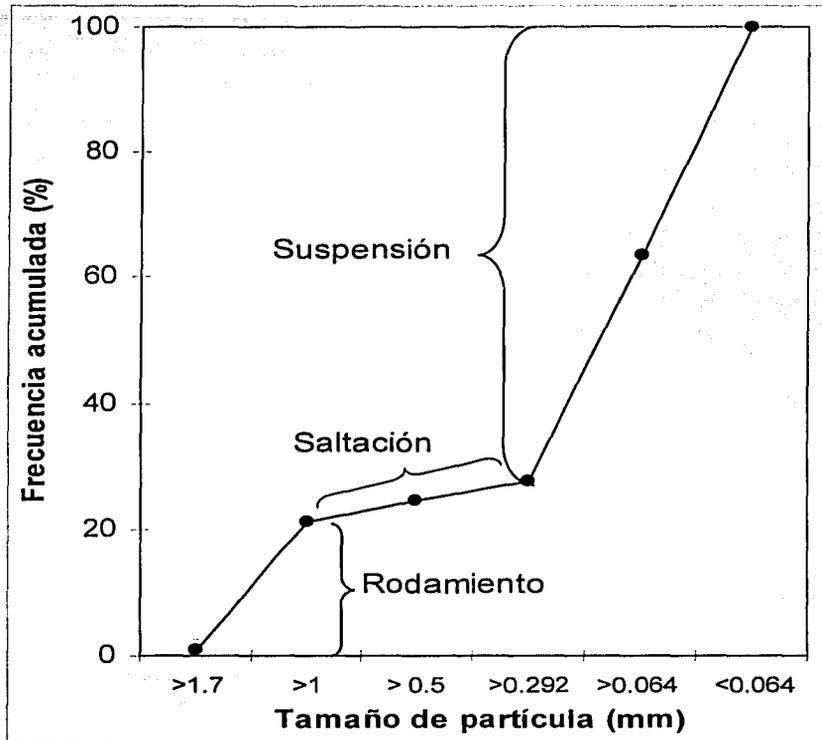
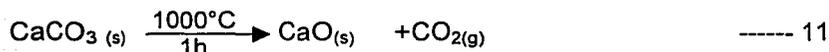
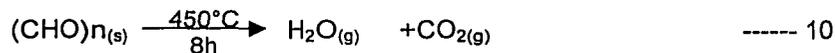


Figura 6. Gráfica de tamaño de partícula contra frecuencia acumulada (Visher, 1969).

Cada segmento representa una población de sedimentos por lo que, al extrapolar sus extremos contra los ejes Y y X se obtiene la proporción (%) de cada una con respecto al sedimento total y las fracciones por tamaño de partícula que comprende cada intervalo respectivamente. Visher (1969) al estudiar de esta manera muestras provenientes de distintos ambientes sedimentarios encontró que la población de tamaño de partícula fino, se relacionaba con el modo de transporte por suspensión, la intermedia con el modo de saltación y la gruesa con el modo de rodamiento.

II. 5 DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO E INORGÁNICO POR PÉRDIDA A LA IGNICIÓN (LOI)

La cuantificación de carbonatos se llevó a cabo gravimétricamente por pérdida a la ignición (LOI por sus siglas en inglés) (Loeppert y Suarez, 1996). Este método de combustión seca se basa en la precombustión de materia orgánica a 450°C/8 horas como se muestra en la reacción 10 (Nelson y Sommers, 1996) y la subsecuente combustión de los carbonatos a 1000°C/1 hora (Loeppert y Suarez, 1996) proceso donde ocurre la reacción 11. Las cantidades de ambos parámetros se determinan por diferencia de peso con la cantidad de muestra original seca.



Para la determinación de materia orgánica, no se contó con un material patrón para verificar la técnica. Sin embargo, Nelson y Sommers (1996) describen este método como muy preciso (reportan un coeficiente de variación menor de 5%). Además, asumen que “el contenido de materia orgánica es igual al peso perdido por ignición (%LOI) de la mayoría de los suelos superficiales” (Nelson y Sommers, 1996, p. 1004). Las cantidades de ambos parámetros se determinaron por diferencia de peso con la cantidad de muestra original seca (llevada en crisoles de porcelana a peso constante).

Para validar la técnica de determinación de carbonatos se usaron 9 muestras de carbonato de calcio anhidro grado reactivo (99% de pureza, J.T. Baker), llevados previamente a peso constante en crisoles de porcelana. Las cuales se trataron de igual manera que las muestras de sedimentos.

II. 6 DETERMINACIÓN DE MINERALOGÍA POR DIFRACCIÓN DE RX

Para conocer cómo afecta la mineralogía de los sedimentos (fracción < 0.063 mm) el comportamiento de los metales pesados se utilizó la técnica de difracción de rayos X (RX). Para esto se tomaron dos gramos de cada muestra y fueron molidas en un mortero de ágata (para favorecer la penetración de la radiación en las estructuras cristalinas), aproximadamente 1 gramo de cada una fue montado en un portamuestras de vidrio y analizado durante una hora en un difractómetro Siemens D5000, utilizando radiación $K\alpha$ de Cu ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) y filtro de Ni, en un intervalo de $2^\circ < 2\theta > 80^\circ$.

II. 7 CUANTIFICACIÓN DE METALES PESADOS

La cuantificación de metales pesados se llevó a cabo por espectroscopia de absorción atómica (EAA) ya que es un método muy preciso y tiene la ventaja de la rapidez y comodidad del análisis además de ser muy selectivo (Skoog, 1994).

II. 7.1 Procedimiento de digestión para metales totales

Para el análisis de metales totales se pesó por triplicado 1 g de muestra seca (tamaño de partícula < 0.063 mm) y se colocó en un vaso de teflón de 250 mL. La digestión se llevó a cabo agregando 2 mL de HClO_4 y 10 mL de HF concentrados, esta mezcla se llevó casi a sequedad en una parrilla de calentamiento. A continuación se le agregó 1 mL de HClO_4 y 10 mL de HF; nuevamente se llevó la mezcla hasta sequedad. Finalmente, fue añadido 1 mL de HClO_4 y se continuó el calentamiento hasta la aparición de humos blancos. El residuo obtenido en la digestión fue disuelto con 5 mL de HCl concentrado y diluido hasta 50 mL¹².

¹² Las soluciones obtenidas se almacenaron en botellas de polietileno previamente lavadas con HNO_3 0.1 N y se mantuvieron en refrigeración (<4°C) hasta su análisis. Para todas las diluciones se ocupó agua desionizada tipo milliQ ($\leq 18 \text{ M}\Omega/\text{cm}$).

II. 7.2 Validación del método

Para las determinaciones de los metales por EAA se utilizó un equipo marca Perkin-Elmer AAnalyst 100 equipado con una lámpara de cátodo hueco del elemento a determinar en cada caso y se analizaron de acuerdo con los siguientes parámetros (Perkin Elmer, 1996):

1. Zinc. (Flama aire-acetileno), $\lambda = 213.9$ nm, con un intervalo linear de 0.1-1.0 ppm, L.D. = 0.016 ppm.
2. Plomo. (Flama aire-acetileno), $\lambda = 217.00$ nm, con un intervalo linear de 1-9 ppm, L.D. = 0.169 ppm.
3. Hierro. (Flama aire-acetileno), $\lambda = 248.3$ nm, con un intervalo linear de 1-6 ppm, límite de detección (L.D.)¹³ = 0.264 ppm.

La exactitud y la precisión se evaluaron ocupando los siguientes suelos patrón:

1. **2710** Montana soil highly elevated trace element concentration. NIST Standard Reference Material. U. S. Department of commerce. National Institute of standards and technology. Gaithesburg, MD. 20899.
2. **2711** Montana soil moderately elevated trace element concentration. NIST Standard Reference Material. U. S. Department of commerce. National Institute of standards and technology. Gaithesburg, MD. 20899.

Además se utilizaron soluciones patrón de los elementos analizados (marca Sigma) y un blanco (agua desionizada) con el fin de ajustar el equipo a la curva de calibración y la línea base respectivamente. La cuantificación de metales se efectuó por triplicado.

¹³ L. D. = Concentración promedio del blanco + 3 veces la desviación estándar.

II. 8 CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Existen varias formas para cuantificar el impacto ambiental de los contaminantes en los sedimentos, ya sea mediante comparación con datos publicados u obteniendo el "Índice de Geoacumulación" (I_{geo}) que es descrito como "una medida cuantitativa de la contaminación por metales en sedimentos" (Salomons y Förstner, 1984).

Este índice de Geoacumulación se calcula con la siguiente fórmula (Salomons y Förstner, 1984):

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{(1.5) (B_n)}$$

Donde:

C_n = La concentración del elemento "n" en la fracción de muestra con menor tamaño de partícula (generalmente < 0.063 mm).

B_n = Valor geoquímico de fondo para el elemento "n" en el sedimento que puede ser obtenido de tablas (Salomons y Förstner, 1984) o a partir del valor de fondo regional descrito por Talavera *et al.* (2001).

El multiplicar el resultado por 1.5 se usa para corregir posibles variaciones de los valores de fondo debido a efectos litogénicos.

Los resultados obtenidos se pueden agrupar en siete categorías dependiendo del grado de intensidad de la contaminación, los cuales pueden quedar como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Interpretación de los intervalos del Igeo para sedimentos contaminados con metales pesados

| Grado | I _{geo} | Interpretación | Intensidad de la contaminación ¹⁴ |
|-------|------------------|-----------------------------|--|
| 0 | 0 - 1 | Contaminación nula o ligera | 0 |
| 1 | 1 - 2 | Poco contaminado | 3 |
| 2 | 2 - 3 | Moderadamente contaminado | 6 |
| 3 | 3 - 4 | Medianamente contaminado | 12 |
| 4 | 4 - 5 | Contaminado | 24 |
| 5 | 5 - 6 | Altamente contaminado | 48 |
| 6 | >6 | Contaminación severa | 96 |

II. 9 ESPECIACIÓN DE Zn, Pb y Fe POR EXTRACCIÓN SECUENCIAL

II. 9.1 Metodología

Considerando que un sedimento se compone de materiales sólidos que pueden dividirse en fracciones específicas, las cuales pueden extraerse mediante el uso de reactivos adecuados, se han desarrollado varios procedimientos experimentales para conseguirlo y darle una aplicación en la evaluación de contaminación en un ambiente acuático (Bordas y Bourg, 1998; Förstner, 1993; Izquierdo *et al.*, 1997; Quevauviller, 1993; Rubio y Ure, 1993; Tessier *et al.*, 1979; Ure *et al.*, 1993). Estos métodos se han llegado a dividir en: a) aquellos que sólo separan dos fracciones (residual y no residual) y b) extracciones secuenciales.

La técnica utilizada en esta investigación fue la descrita por Tessier *et al.* (1979) que, en términos generales, analiza cinco fracciones de sedimentos operacionalmente definidas: intercambiable, carbonatada, oxo-hidróxidos de hierro-manganeso, materia

¹⁴ La intensidad de la contaminación es obtenida de la siguiente manera: $(2^6)(1.5) = 96$, los resultados significan el número de veces que se supera la concentración de fondo.

orgánica-sulfuros, y residual. El método de extracción secuencial empleado se describe a continuación:

1. De cada muestra se pesaron por triplicado dos gramos de sedimento seco (tamaño de partícula $< 0.063\text{mm}$) y se colocaron en vasos de precipitados de vidrio junto con un agitador magnético.
2. Para extraer la fracción intercambiable se agregó a cada muestra 16 mL de una solución de cloruro de magnesio $[\text{MgCl}_2]$ 1 M ($\text{pH}=7$) y se agitaron por 1 h a temperatura ambiente. El extracto se separó mediante centrifugación¹⁵ y se llevó a un volumen de 25 mL¹⁶.
3. Al residuo del paso anterior se le agregaron 16 mL de solución de acetato de sodio $[\text{AcONa}]$ 1 M, la cual se llevó a $\text{pH} = 5$ con ácido acético $[\text{AcOH}]$ para disolver la fracción de carbonatos. Se colocó la mezcla en un vaso de precipitados y se agitó constantemente durante 5 h a temperatura ambiente. El extracto se separó bajo iguales condiciones de centrifugación y se llevó al mismo volumen que el paso anterior.
4. El residuo obtenido en el paso 3 fue tratado con 40 mL de solución 0.04 M de clorhidrato de hidroxilamina $[\text{NH}_2\text{OH.HCl}]$ en ácido acético $[\text{AcOH}]$ al 25% V/V y mantenido en baño de agua a 89°C por 4 h con agitación ocasional. El extracto se separó por centrifugación y se llevó a un volumen de 50 mL.
5. Al residuo del tratamiento anterior se le agregaron 6 mL de HNO_3 0.02M y 10 mL de H_2O_2 al 30%, ajustada a $\text{pH} = 2$ con HNO_3 . La mezcla se mantuvo en baño de agua a 85°C aproximadamente durante 2 h con agitación ocasional. Después se le

¹⁵ Las condiciones de centrifugación fueron: 5000 rpm/15 min.

¹⁶ Las diluciones se realizaron ocupando agua desionizada y los extractos se almacenaron en botellas de polietileno previamente lavadas con ácido clorhídrico y agua desionizada.

agregó otra alícuota de 6 mL de H₂O₂ al 30% y ajustada a pH = 2 con HNO₃; nuevamente se mantuvo a 85°C durante 3 h y a agitación ocasional. Al término, se dejó enfriar la mezcla y se le agregó 10 mL de solución de acetato de amonio [AcONH₄] 3.2M en HNO₃ al 20% V/V, se diluyó hasta un volumen de 40 mL y se agitó constantemente durante 30 min. El extracto se separó por centrifugación y se llevó a un volumen de 50 mL.

6. El residuo del paso anterior fue digerido con una mezcla de HF y HClO₄ siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para el análisis de metales totales (pág. 29); con la diferencia de haber usado el doble de los reactivos por ser dos veces la cantidad de muestra que se usó en comparación con la técnica original.

II. 9.2 Validación del método

Existen ciertos inconvenientes relacionados con la validación de este tipo de métodos. Entre los cuales se pueden mencionar la dificultad de encontrar una muestra patrón de suelo o sedimento que se asemeje a las muestras investigadas.

De acuerdo con Nirel y Morel (1990), Ure *et al.* (1993) e Izquierdo *et al.* (1997), no existe un patrón para definir si el procedimiento de extracción secuencial está obteniendo los datos exactos, han habido intentos por obtenerlo, pero se enfrentan con los siguientes obstáculos:

1. La heterogeneidad de los sedimentos impide obtener un patrón ideal (factor más importante).
2. Existen intercambios entre fases durante el proceso.
3. Se presentan interferencias por efecto de matriz.
4. Las condiciones fisicoquímicas durante el proceso de extracción (reactivos fuertes y cinéticas rápidas) no son comparables con la realidad (reactivos débiles y cinéticas lentas).

Aun así, estos autores concluyen que los métodos de extracción secuencial no son herramientas carentes de validez sino que los resultados deben interpretarse como "una mera caracterización de la especiación de elementos traza en sedimentos de acuerdo con las fracciones definidas operacionalmente" (Nirel y Morel, 1990, pág. 1055).

Por lo anterior, el criterio para validar el procedimiento es la comparación entre la suma de las concentraciones de cada elemento, obtenidas en la extracción secuencial, y el valor obtenido de la digestión total de la muestra.

CAPÍTULO III PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

III. 1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la granulometría para las muestras colectadas en los sedimentos del efluente estudiado del río Taxco.

| Tabla 4. Resultados del análisis granulométrico | | | | | | |
|---|--|--------|----------|----------|----------|----------|
| Muestra | Peso (g) de cada fracción por tamaño de partícula (T) y % respectivo entre () | | | | | |
| | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
| MT11 | 166 (18) | 26 (3) | 30 (3) | 26 (3) | 326 (36) | 333 (37) |
| MT12 | 135 (15) | 42 (5) | 53 (6) | 26 (3) | 345 (39) | 295 (33) |
| MT13 | 56 (5) | 27 (2) | 47 (4) | 124 (11) | 521 (47) | 329 (30) |
| MT14 | 98 (10) | 40 (4) | 68 (7) | 190 (19) | 326 (33) | 268 (27) |
| MT15 | 77 (8) | 30 (3) | 55 (6) | 186 (19) | 310 (32) | 318 (33) |
| MT16 | 86 (19) | 20 (5) | 30 (7) | 13 (3) | 76 (17) | 218 (49) |
| MT17 | 26 (5) | 19 (3) | 56 (10) | 63 (11) | 131 (23) | 276 (48) |
| MT21 | 23 (2) | 11 (1) | 30 (2) | 83 (6) | 704 (51) | 23 (38) |
| MT22 | 6 (1) | 5 (1) | 16 (2) | 41 (5) | 547 (71) | 150 (20) |
| MT23 | 2 (0) | 4 (0) | 21 (2) | 105 (10) | 623 (59) | 291 (28) |
| MT24 | 309 (21) | 70 (5) | 157 (11) | 192 (13) | 461 (32) | 309 (18) |
| MT25 | 72 (7) | 72 (6) | 125 (11) | 156 (14) | 394 (36) | 72 (26) |
| MT26 | 17 (2) | 45 (4) | 72 (7) | 116 (11) | 372 (36) | 17 (39) |
| MT27 | 220 (20) | 42 (4) | 42 (4) | 57 (5) | 376 (35) | 220 (32) |

T1 > 1.7 mm, 1.7 mm > T2 < 1.0 mm, 1.0 mm > T3 < 0.5 mm, 0.5 mm > T4 < 0.292 mm, 0.292 mm > T5 < 0.064 mm y T6 < 0.064 mm.

Para estimar la tendencia de las fracciones sedimentarias por tamaño de partícula a transportarse río abajo, los datos obtenidos fueron graficados como describió Visher (1969) (Figuras 24, 25 y 26 en Anexos) y con ello se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 5.

| Tabla 5. Porcentajes de sedimento en relación con tres medios de transporte | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Transporte | Muestra | | | | | | | | | | | | | |
| | MT 11 | MT 12 | MT 13 | MT 14 | MT 15 | MT 16 | MT 17 | MT 21 | MT 22 | MT 23 | MT 24 | MT 25 | MT 26 | MT 27 |
| Rodamiento | 27 | 26 | 11 | 21 | 17 | 35 | 8 | 11 | 9 | 1 | 26 | 39 | 6 | 32 |
| Saltación | 36* | 42* | 59* | 52* | 50* | 16 | 44* | 51* | 71 | 72* | 56 | 36 | 54* | 36 |
| Suspensión | 37 | 32 | 30 | 27 | 33 | 49 | 48 | 38 | 20 | 27 | 18 | 25 | 40 | 32 |

Con estos datos se estima que en promedio el 20% de las muestras tiende a transportarse por rodamiento, el 50% está sujeto a moverse por saltación, y el 30% restante por suspensión debida a la turbulencia de la corriente.

III. 2 CARBONO ORGÁNICO

La precalcincación de carbono orgánico (C.O.) en los sedimentos generó los resultados presentados en la Figura 7.

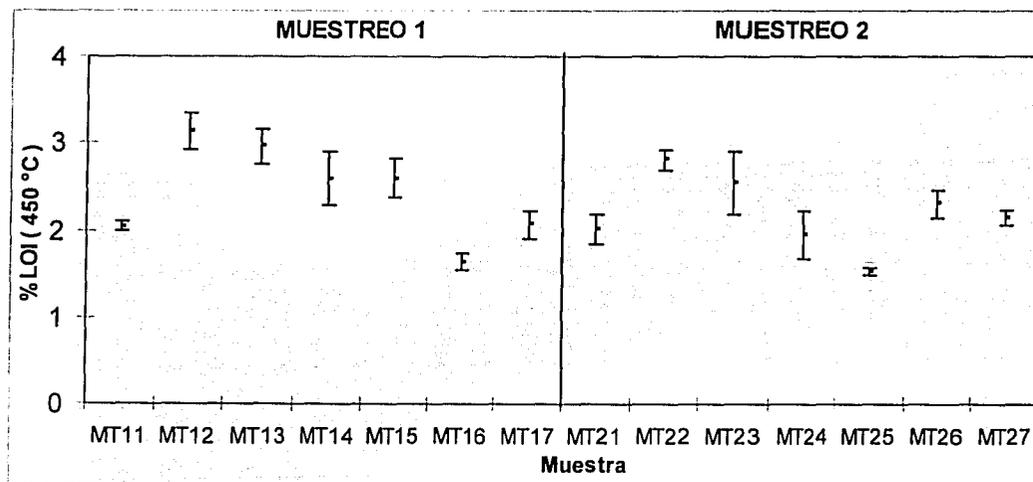


Figura 7. Concentración de Carbono Orgánico¹⁷ en sedimentos.

¹⁷ Para las Figuras que presentan "intervalos de confianza", éstos simbolizan \pm la desviación estándar.

Se observa que el C.O. para el primer muestreo tuvo valores dentro del intervalo 1.64 - 3.13 %LOI¹⁸, y para el segundo se encontró en el siguiente 1.52 - 2.81 %LOI. Sin embargo, al aplicar una prueba de t student¹⁹ a los resultados obtenidos se determina que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores obtenidos para ambos muestreos.

III. 3 CARBONO INORGÁNICO

Los resultados que se presentan en la Tabla 6 indican la validez del método empleado para la determinación de carbono inorgánico en los sedimentos, teniendo en cuenta el error generado por la heterogeneidad de las muestras en el análisis.

| Parámetro analizado | Resultado |
|---|-------------------------------|
| Humedad | 0.13% |
| Pérdida de C.O. (primera calcinación a 550°C) | 0.07% |
| C.I. cuantificado (como CaO) | 96.1% ± 0.096 |
| Precisión | ±0.13 (error absoluto = - 4%) |

Los resultados obtenidos de %C.I. (como CaCO₃) se encontraron dentro de los intervalos 8.41 - 14.61 %C.I. y 7.5 - 14.87 %C.I. para el primer y segundo muestreo respectivamente (Figura 8). Estos porcentajes reflejan la presencia de minerales carbonatados muy abundantes en la mayoría de las muestras. Para confirmar la semejanza entre ambos muestreos se utilizó la prueba de t student, y a partir de sus resultados²⁰, se determina que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores obtenidos en ambos muestreos.

¹⁸ Las mayores cantidades de carbono orgánico (hasta 3.13%) se obtuvieron en la época de estiaje debido a la caída natural de hojas de plantas y árboles caducifolios ubicados cerca del río.

¹⁹ Resultado: $t_{(0.05, 26)} = 1.706 > t_{calculada} = -0.582$, por lo tanto se acepta la hipótesis Ho (Ho = No existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos).

²⁰ Resultado: $t_{(0.05, 26)} = 1.706 > t_{calculada} = 1.228$, por lo tanto se acepta la hipótesis Ho.

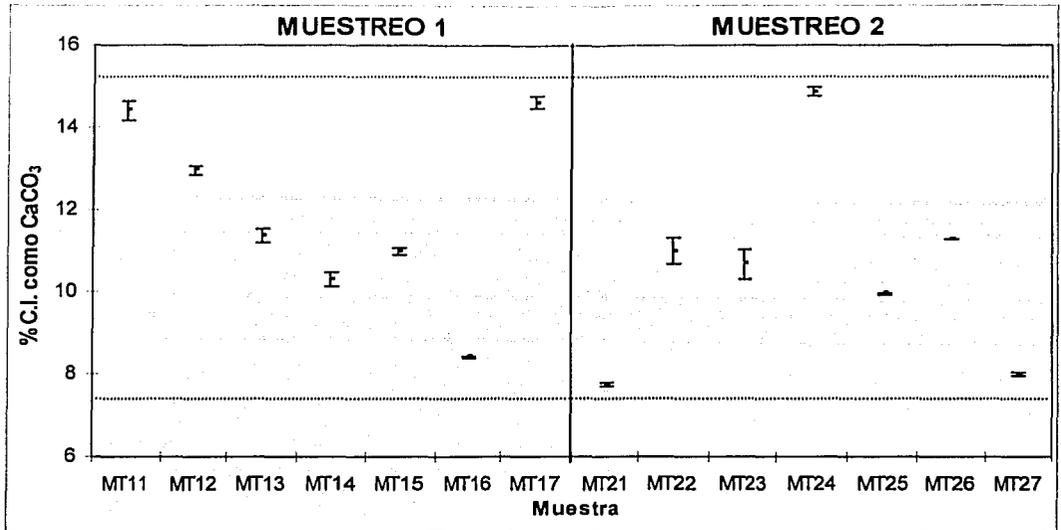


Figura 8. Concentración de Carbono Inorgánico en sedimentos.

III. 4 MINERALOGÍA

A partir de la interpretación cualitativa computarizada de las líneas de difracción identificadas en los difractogramas obtenidos (Figuras 27-40, Anexos), se obtiene la información de la Tabla 7 para las catorce muestras analizadas, en la que se observa que los minerales predominantes son el cuarzo, la calcita y, en una menor proporción, las arcillas Clorita-Vermiculita-Montmorilonita o CVM²¹ y la Ilvaita.

El criterio empleado en la interpretación de los difractogramas fue considerar la intensidad de las líneas de difracción observadas y asignarles un valor relativo de abundancia.

²¹ CVM son las siglas con las que se identifican estas tres arcillas en los difractogramas

Tabla 7. Interpretación computarizada de los difractogramas de las muestras MT11-MT27

| Mineral | MT11 | MT12 | MT13 | MT14 | MT15 | MT16 | MT17 | MT21 | MT22 | MT23 | MT24 | MT25 | MT26 | MT27 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cuarzo | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ |
| Calcita | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□ | □□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ | □□□□ |
| Magnetita | □□ | □□ | □□ | □□ | □□ | □□ | □□ | | □□□ | □□ | □□ | □□□ | □□ | □□ |
| Natrón | □ | □□ | □□ | | | | | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □□ |
| Ca ₃ Al ₂ O ₃ | | | | | | | | □ | | | | | | |
| Nacauriita | □ | | | | | | | | | | | | | □ |
| CaSO ₃ | | | □□ | | | | | | | □ | | | | |
| Zn(SO ₄)(OH).4H ₂ O | | □ | | | | | | □□ | □ | □□ | □ | □□ | □□ | □□ |
| Zabuyelita | | | | | | | | □□□ | | | | | | |
| C-V-M | □ | □□□□ | □□□□ | □ | □□ | □□ | | □□□□ | □□ | □□ | □□ | □ | □ | □ |
| Ilvaita | □□□ | □□□ | □□□ | □□□ | □□□ | □□□ | □□□ | □□□ | □□□ | □□□ | □□□ | □□ | □□ | □□□□ |
| Caolinita | | | | | | | | | □□□□ | □□□ | □□ | □□ | □□□ | |
| Silhidrita | □ | | | | | | | □ | □ | | | | | |

Interpretación:

| | |
|------|----------------|
| □□□□ | Predominante |
| □□□□ | Muy abundante |
| □□□ | Abundante |
| □□ | Poco abundante |
| □ | Detectable |

Fórmula química de los minerales

| | |
|--|---|
| Cuarzo (Qz) | SiO ₂ |
| Calcita (Ca) | CaCO ₃ |
| Magnetita (Mag) | FeFe ₂ O ₄ o Fe ₃ O ₄ |
| Natrón (Nat) | Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O |
| Nacauriita (Nac) | Cu ₉ (SO ₄) ₄ (CO ₃)(OH) ₆ ·48H ₂ O |
| Zabuyelita (Zab) | Li ₂ CO ₃ |
| Sulfato hidróxido de zinc tetra hidratado (SHZH) | Zn(SO ₄)(OH).4H ₂ O |
| Ilvaita (Ilv) | Ca[Fe, Mn, Mg] ₂ (Fe, Al)(SiO ₄) ₂ OH |
| Caolinita (Ka) | Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₂ |
| Silhidrita (Sil) | Si ₃ O ₅ ·H ₂ O |
| Clorita (C) | Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈ |
| CVM | |
| Vermiculita (V) | (Mg, Ca, K, Fe) ₃ (Si, Al, Fe) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O |
| Montmorilonita (M) | Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂ ·H ₂ O |

Los siguientes difractogramas se analizaron particularmente para identificar especies sulfuradas.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

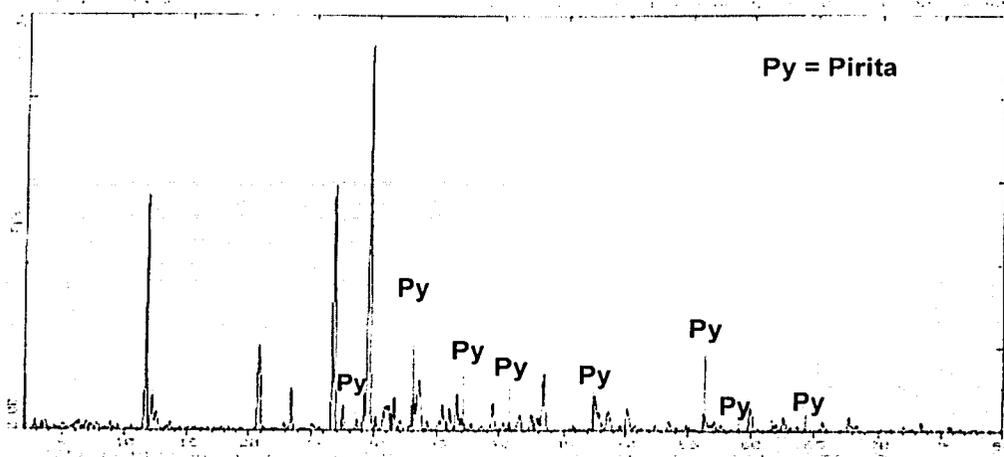


Figura 9. Difractograma de la muestra MT13.

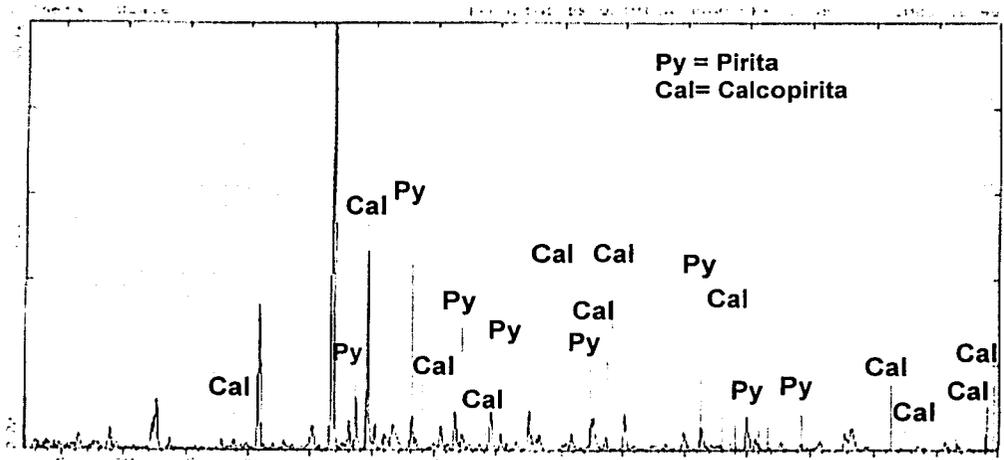


Figura 10. Difractograma de la muestra MT23.

En el difractograma de la muestra MT13 (Figura 9) se identificó la señal de la pirita; sin embargo, el de la MT23 (Figura 10), además de presentar con mayor intensidad la misma señal, se señala la correspondiente a la calcopirita (CuFeS_2).

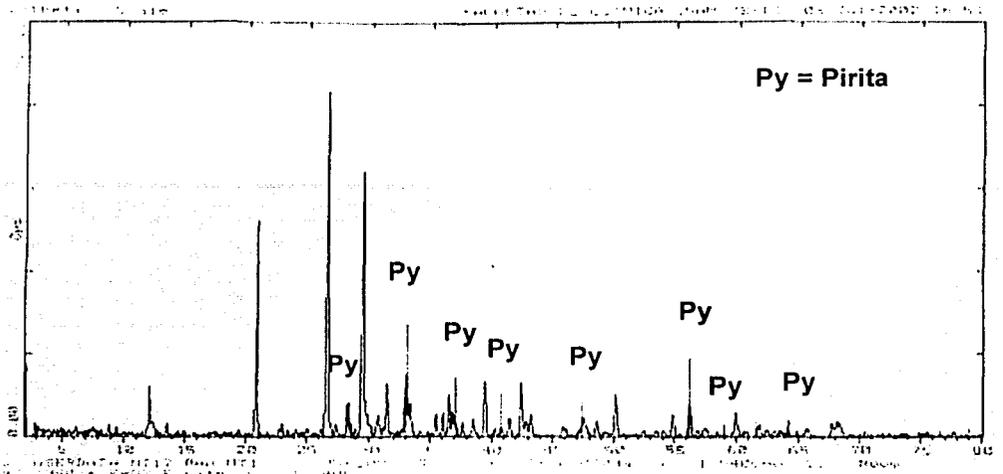


Figura 11. Difractograma de la muestra MT17.

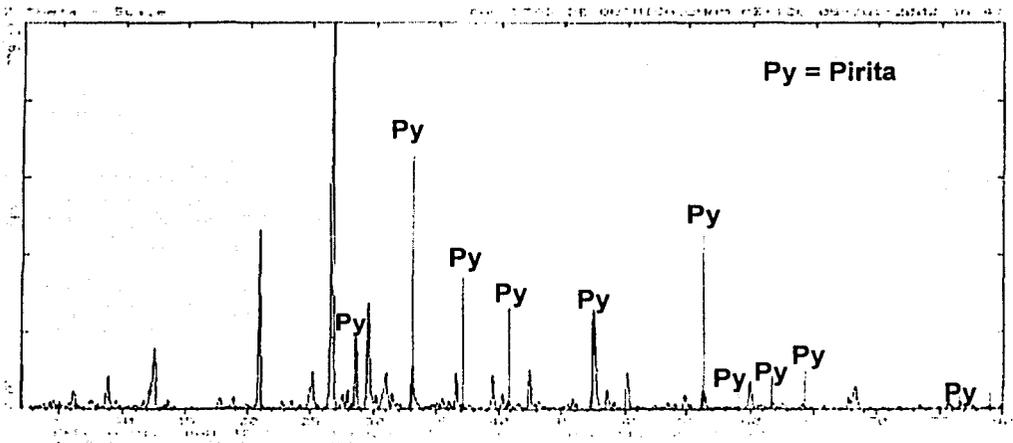


Figura 12. Difractograma de la muestra MT27.

Las muestras MT17 y MT27 también presentan la señal de la pirita (con mayor intensidad en la Figura 12).

III. 5 CONTENIDO DE Zn, Pb y Fe TOTALES

III. 5.1 Validación de la técnica

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos en la validación de la técnica de determinación de zinc, plomo y hierro por EAA.

| Tabla 8. Concentraciones establecidas para Zn, Pb y Fe en suelos patrón y las obtenidas en laboratorio (LAB) | | | | |
|--|-------|-------------|--------------|------------------|
| ELEMENTO | SUELO | [PATRÓN] | [LAB.] | RECUPERACIÓN (%) |
| ZINC (mg/Kg) | 2711 | 350.4 ± | 349.9 ± 17 | 99 |
| | 2710 | 6952 ± | 6080 ± 328 | 87.5 |
| PLOMO (mg/Kg) | 2711 | 1162 ± 31 | 991.5 ± 14.7 | 85.3 |
| | 2710 | 5532 ± 80 | 4723 ± 30 | 85.4 |
| HIERRO (mg/Kg) | 2711 | 2.89 ± 0.06 | 2.4 ± 0.028 | 83.2 |
| | 2710 | 3.38 ± 0.1 | 3.08 ± 0.28 | 91 |

Los porcentajes de recuperación de metales son considerados como aceptables para los objetivos de esta investigación (83.2 - 99%), considerando que las condiciones de trabajo no fueron iguales a las descritas para los suelos patrón, además del error obtenido al realizar diluciones hasta de 1/1 000. Los mejores resultados (% recuperación) se obtuvieron para el zinc en comparación con los otros metales. Las concentraciones obtenidas para cada metal se presentan en la Tabla 22 (Anexos).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III. 5.2 Zinc

Las concentraciones obtenidas de zinc total se presentan en la siguiente Figura.

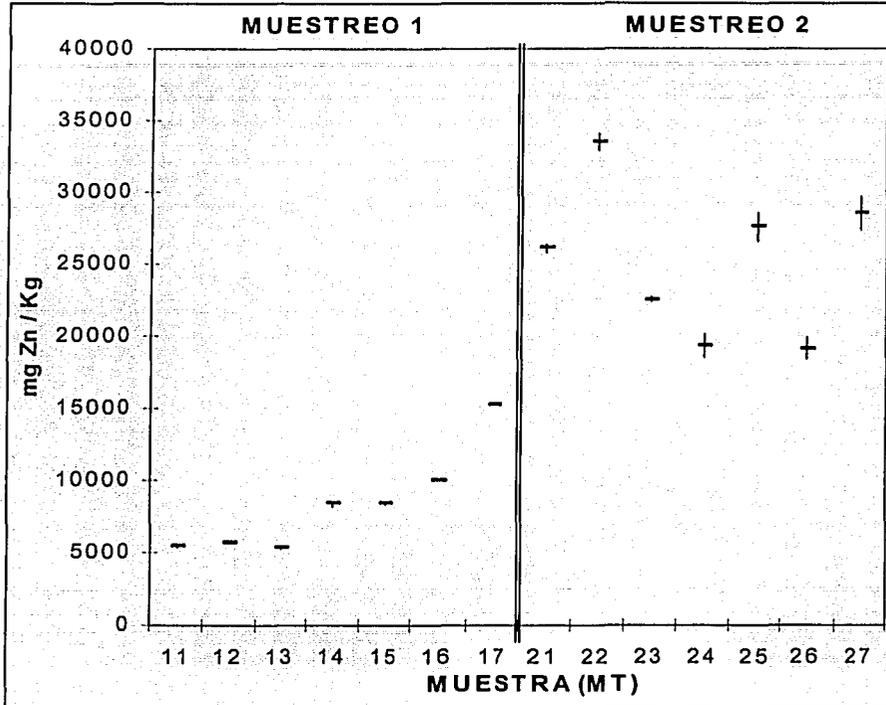


Figura 13. Concentración de zinc total para cada muestra de sedimento

En los datos referentes al primer muestreo se observa que la concentración de zinc aumenta en dirección río abajo, mientras que para el muestreo 2 las concentraciones presentaron alta variación. Para confirmar la diferencia entre ambos muestreos se aplicó una prueba de Análisis de varianza de un factor (ANOVA)²² y a partir de los resultados obtenidos se establece que sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de zinc obtenidas.

²² Resultado: $F_{(0.05, 1, 40)} = 4.08 < F_{calculada} = 169.4$, por lo tanto se rechaza la hipótesis H_0 (H_0 = No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos). Tratamientos = Muestreo 1 y Muestreo 2.

III. 5.3 Plomo

En la Figura 14 se muestran los resultados del análisis del plomo en los sedimentos. La concentración de plomo resulta ser mayor para el segundo muestreo (intervalo de 1 673 – 5 279 mg Pb/Kg) en comparación con en el primero (716 – 2 151 mg Pb/Kg).

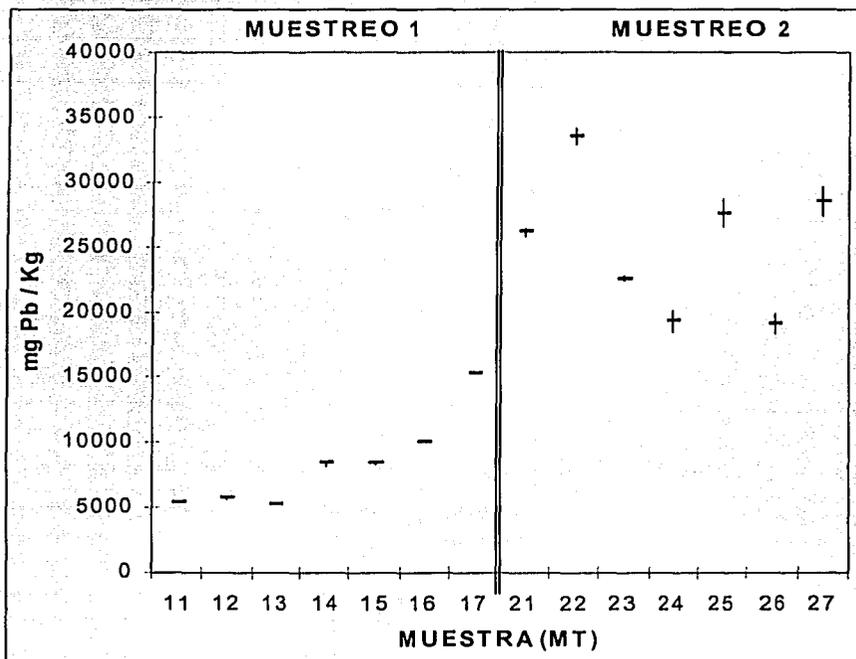


Figura 14. Concentración de plomo total para cada muestra de sedimento

A partir de la comparación estadística mediante la prueba de ANOVA²³, se determina que sí existen diferencias significativas entre ambos muestreos.

²³ Resultado: $F_{(0.05, 1, 40)} = 4.08 < F_{calculada} = 41.289$, por lo tanto se rechaza la hipótesis H_0 (H_0 = No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos). Tratamientos = Muestreo 1 y Muestreo 2.

III. 5.4 Hierro

Las concentraciones de hierro total obtenidas se presentan en la Figura 15. Se observa que la concentración de hierro en los sedimentos varía de 169 162 a 189 083 mg Fe/Kg en el primer muestreo; en tanto que en el segundo, el intervalo abarca de 137 610 a 168 299 mg Fe/Kg.

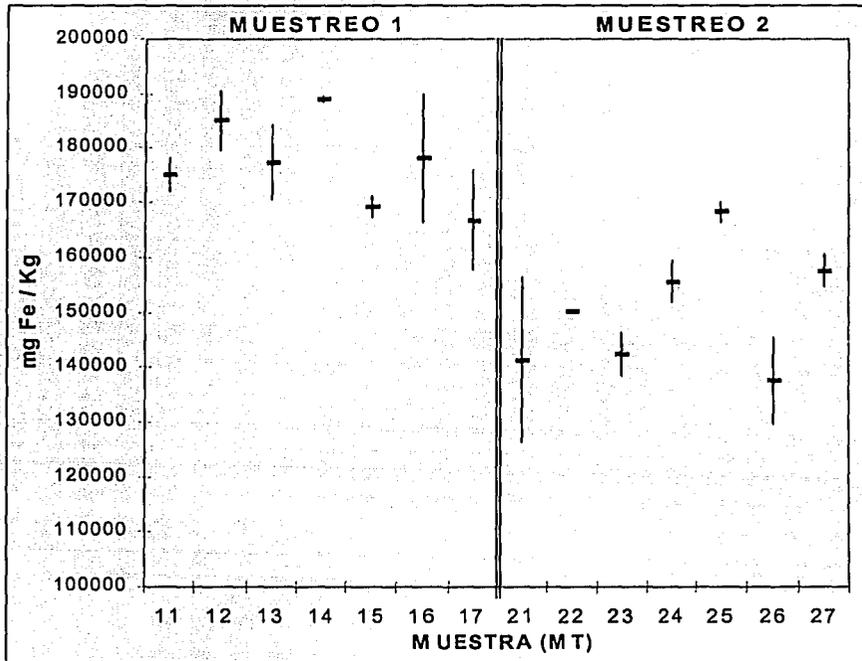


Figura 15. Concentración de hierro total para cada muestra de sedimento

Al comparar estadísticamente las concentraciones obtenidas de hierro total para ambos muestreos mediante la prueba de ANOVA²⁴; se establece que sí existen diferencias significativas.

²⁴ Resultado: $F_{(0.05, 1, 40)} = 4.08 < F_{calculada} = 78.0$, por lo tanto se rechaza la hipótesis H_0 (H_0 = No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos). Tratamientos = Muestreo1 y Muestreo 2.

III. 6 CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

En la Tabla 9 se presentan los valores del Igeo promedio por elemento y muestra, con el fin de reconocer el estado ambiental de los sedimentos del río Taxco.

Tabla 9. Cuantificación del I_{geo} por elemento y muestra

| Muestra | Igeo Zinc | Igeo Hierro | Igeo Plomo |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| MT11 | 5.8 ± 0.021 | 2.1 ± 0.017 | 4.2 ± 0.056 |
| MT12 | 5.9 ± 0.009 | 2.2 ± 0.029 | 4.5 ± 0.104 |
| MT13 | 5.8 ± 0.021 | 2.1 ± 0.039 | 4.3 ± 0.049 |
| MT14 | 6.4 ± 0.020 | 2.2 ± 0.002 | 4.8 ± 0.008 |
| MT15 | 6.5 ± 0.015 | 2.1 ± 0.011 | 5.2 ± 0.118 |
| MT16 | 6.7 ± 0.001 | 2.1 ± 0.081 | 5.8 ± 0.026 |
| MT17 | 7.3 ± 0.002 | 2.0 ± 0.055 | 4.9 ± 0.146 |
| MT21 | 8.1 ± 0.076 | 1.8 ± 0.108 | 6.5 ± 0.017 |
| MT22 | 8.4 ± 0.042 | 1.9 ± 0.002 | 7.1 ± 0.093 |
| MT23 | 7.9 ± 0.007 | 1.8 ± 0.027 | 6.2 ± 0.037 |
| MT24 | 7.6 ± 0.041 | 1.9 ± 0.024 | 5.5 ± 0.074 |
| MT25 | 8.2 ± 0.037 | 2.1 ± 0.011 | 6.3 ± 0.006 |
| MT26 | 7.6 ± 0.026 | 1.8 ± 0.058 | 5.5 ± 0.090 |
| MT27 | 8.2 ± 0.040 | 2.0 ± 0.019 | 6.1 ± 0.029 |

III. 7 RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN SECUENCIAL

III. 7.1 Validación del método

Las comparaciones (%) entre la suma de las fracciones geoquímicas y la concentración total de cada elemento se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 10. Diferencia (Dif. en %) entre la concentración de metales totales y la suma de las concentraciones en las fracciones geoquímicas extraídas

| Muestra | Hierro ($\times 10^4$ mg/Kg) | | | Zinc (mg/Kg) | | | Plomo (mg/Kg) | | |
|---------|-------------------------------|-------|------|------------------|-------|------|------------------|-------|------|
| | Σ [Frac.] | Total | Dif. | Σ [Frac.] | Total | Dif. | Σ [Frac.] | Total | Dif. |
| MT11 | 17.54 | 17.51 | -0.2 | 4776 | 5436 | 12 | 751 | 716 | -5 |
| MT12 | 17.28 | 18.50 | 6 | 5802 | 5737 | -1 | 961 | 885 | -8 |
| MT13 | 14.45 | 17.74 | 18 | 5527 | 5312 | -4 | 977 | 762 | -26* |
| MT14 | 14.61 | 18.90 | 22* | 7897 | 8392 | 6 | 1081 | 1060 | -2 |
| MT15 | 16.07 | 16.91 | 5 | 6734 | 10022 | -18 | 1459 | 1434 | -2 |
| MT16 | 16.16 | 17.81 | 9 | 9812 | 9989 | 2 | 2072 | 2151 | 4 |
| MT17 | 15.96 | 16.67 | 4 | 11469 | 15275 | 25* | 1573 | 1153 | -17 |
| MT21 | 11.98 | 14.12 | 15 | 24591 | 26128 | 14 | 3455 | 3351 | -3 |
| MT22 | 15.82 | 15.0 | -5 | 32166 | 33500 | -0.5 | 4670 | 5279 | 11 |
| MT23 | 15.11 | 14.23 | -6 | 24693 | 22547 | -9 | 3410 | 2850 | -19 |
| MT24 | 12.33 | 15.55 | 21* | 18889 | 19312 | 2 | 1985 | 1685 | -15 |
| MT25 | 17.0 | 16.82 | -1 | 6551 | 27566 | 2 | 3027 | 2930 | -4 |
| MT26 | 14.48 | 13.76 | -5 | 23223 | 15294 | -20* | 1915 | 1673 | -14 |
| MT27 | 16.98 | 15.75 | -7 | 31733 | 28525 | -11 | 2548 | 2711 | 14 |

Resultados aceptables (Dif. $< /20/$), *Resultados deficientes (Dif. $\geq /20/$) (Blasco et al., 2000).

Las diferencias menores de $\pm 20\%$ entre las concentraciones de metal total y la suma de las fracciones extraídas se consideran aceptables de acuerdo con los objetivos de este trabajo, y el resto son deficientes debido a que implican fallas puntuales en la parte experimental (preparación de diluciones 1/1 000) o bien efectos de matriz (la

naturaleza heterogénea del sedimento). Resultados análogos han sido publicados (Tessier *et al.*, 1979; Blasco *et al.*, 2000) y son considerados aceptables por expertos en Geoquímica Analítica (Ramsey y Potts, 2002). Los resultados se presentan en las Tablas 24, 25 y 26 (Anexos).

III. 7.2 Zinc

III. 7.2.1 Variación estacional

Los resultados de la extracción secuencial para el zinc en ambos muestreos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Concentración promedio de Zn y su porcentaje en cinco fracciones geoquímicas

| FRACCIÓN | Muestreo 1 (estío) | | Muestreo 2 (lluvias) | |
|----------------------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| | Concentración (mg/Kg) | % | Concentración (mg/Kg) | % |
| INTERCAMBIABLE | 7 | 0.1 | 52 | 0.2 |
| CARBONATOS | 2912 | 36.9 | 6449 | 25 |
| (Fe, Mn) Ox | 1970 | 25 | 3919 | 15 |
| M. O./S ⁻ | 1844 | 24 | 11 003 | 41.8 |
| RESIDUAL | 1099 | 14 | 4751 | 18 |

Para comprobar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la época de lluvias y la de estiaje, se analizaron los datos mediante la prueba de ANOVA (los datos se presentan en la Tabla 12).

Tabla 12. Resultados del ANOVA para las concentraciones de zinc en ambos muestreos

| Fracción | Intercambiable | Carbonatos | [Fe, Mn]Ox | M.O./S ⁻ | Residual |
|--------------------------|----------------|------------|------------|---------------------|----------|
| Valor de $F_{calculada}$ | 24.993** | 4.982** | 9.288** | 73.87** | 6.198** |

$$F_{(0.05, 1, 12)} = 4.75.$$

H_0 = No existen diferencias significativas entre los tratamientos (muestreo 1 y 2).

* $F_{(0.05, 1, 12)} > F_{calculada}$ = Se acepta H_0 , no existen diferencias significativas.

** $F_{(0.05, 1, 12)} < F_{calculada}$ = Se rechaza H_0 , sí existen diferencias significativas.

Los resultados describen que sí existen diferencias estadísticamente significativas para ambos muestreos considerando las cinco fracciones geoquímicas analizadas.

III. 7.2.2 Variación espacial

La variación espacial está relacionada con la movilidad de los metales pesados a lo largo del río. Para evaluar este aspecto se presentan las Figuras 16 y 17.

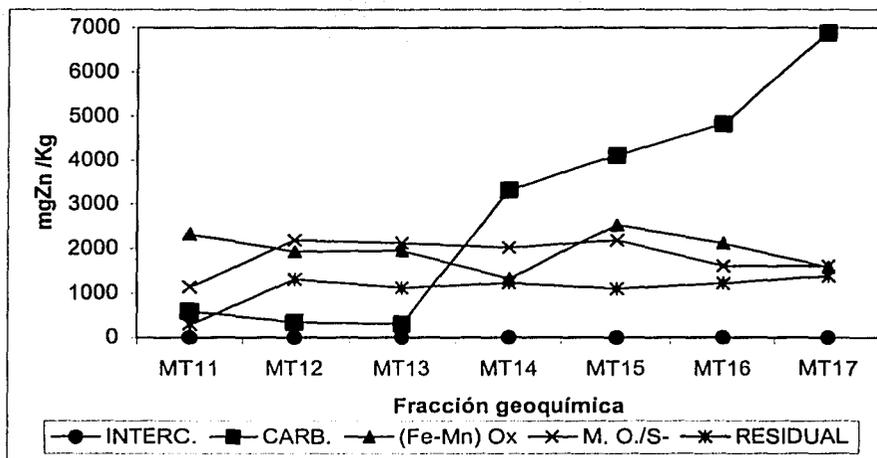


Figura 16. Concentración de zinc por muestra y fracción geoquímica (muestreo 1).

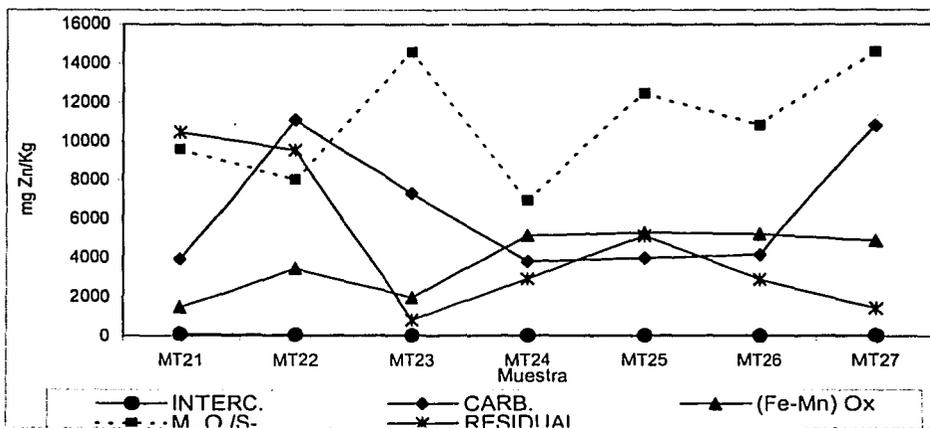


Figura 17. Concentración de zinc por muestra y fracción geoquímica (muestreo 2).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III. 7.3 Plomo

III. 7.3.1 Variación estacional

Los resultados de la especiación del plomo en los sedimentos del afluente estudiado para ambos muestreos se presentan en la siguiente Tabla.

| Tabla 13. Concentraciones promedio de Pb y su porcentaje en cinco fracciones geoquímicas | | | | |
|--|-----------------------|----|-----------------------|----|
| FRACCIÓN | Muestreo 1 (estío) | | Muestreo 2 (lluvias) | |
| | Concentración (mg/Kg) | % | Concentración (mg/Kg) | % |
| INTERCAMBIABLE | N. D. | 0 | N. D. | 0 |
| CARBONATOS | 150 | 12 | 381 | 13 |
| (Fe, Mn) Ox | 618 | 49 | 1758 | 59 |
| M. O./S ⁻ | N.D. | 0 | 215 | 7 |
| RESIDUAL | 1263 | 39 | 647 | 22 |

Para comparar los datos de un muestreo a otro, se aplicó la prueba de ANOVA. Los resultados se presentan en la Tabla 14.

| Tabla 14. Resultados del ANOVA para los valores de plomo en ambos muestreos | | | | | |
|---|----------------|------------|------------|---------------------|----------|
| Fracción | Intercambiable | Carbonatos | [Fe, Mn]Ox | M.O./S ⁻ | Residual |
| Valor de $F_{calculada}$ | N.C. | 4.413* | 33.09** | 4.263* | 0.931* |

$$F_{(0.05, 1, 12)} = 4.75.$$

H_0 = No existen diferencias significativas entre los tratamientos.

Tratamientos: Muestreo 1 y Muestreo 2.

* $F_{(0.05, 1, 12)} > F_{calculada}$ = Se acepta H_0 , no existen diferencias significativas.

** $F_{(0.05, 1, 12)} < F_{calculada}$ = Se rechaza H_0 , si existen diferencias significativas.

N.C. = No calculado.

IV. 7.3.2 Variación espacial

A continuación se muestran las tendencias del plomo a acumularse en las fracciones geoquímicas del sedimento que fueron analizadas para los muestreos 1 y 2 (Figura 18 y 19 respectivamente).

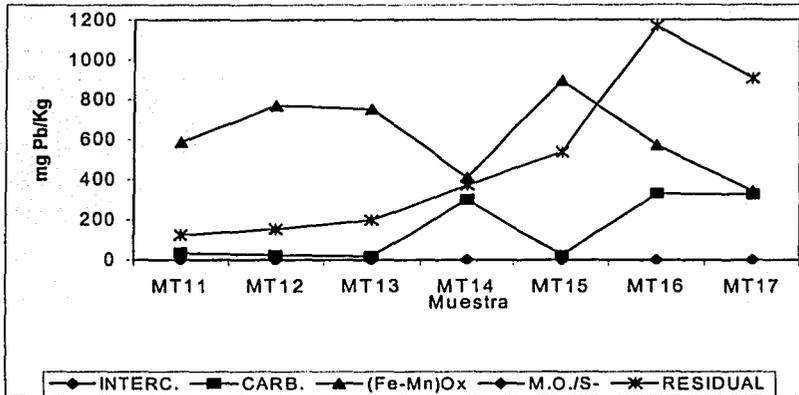


Figura 18. Concentración de plomo por muestra y fracción geoquímica (muestreo 1).

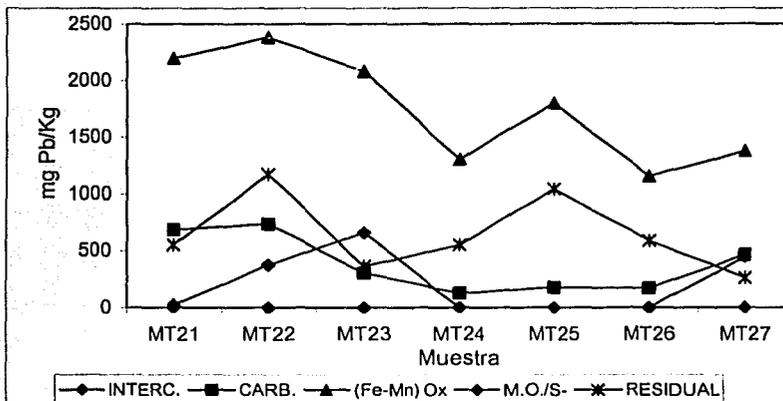


Figura 19. Concentración de plomo por muestra y fracción geoquímica (muestreo 2).

III. 7.4 Hierro

IV. 7.4.1 Variación estacional

Los resultados de la especiación del hierro en los sedimentos analizados se presentan en la Tabla 15.

| FRACCIÓN | Muestreo 1 (sequía) | | Muestreo 2 (lluvias) | |
|------------------------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| | Concentración (mg/Kg) | % | Concentración (mg/Kg) | % |
| INTERCAMBIABLE | N. D. | 0 | N. D. | 0 |
| CARBONATOS | 2576 | 2 | 2330 | 2 |
| (Fe, Mn) Ox | 23199 | 15 | 22868 | 15 |
| M. Org./S ⁻ | 8128 | 5 | 26572 | 18 |
| RESIDUAL | 125968 | 78 | 96411 | 65 |

Los valores de la prueba de ANOVA, para comprobar las diferencias entre los muestreos para las cinco fracciones geoquímicas analizadas, se presentan en la Tabla 16.

| Fracción | Intercambiable | Carbonatos | [Fe, Mn]Ox | M.O./S ⁻ | Residual |
|------------|----------------|------------|------------|---------------------|----------|
| Valor de F | N.C. | 0.019* | 0.019* | 4.902** | 7.040** |

$$F_{(0.05, 1, 12)} = 4.75.$$

Ho = No existen diferencias significativas entre los tratamientos.

Tratamientos: Muestreo 1 y muestreo 2.

* $F_{(0.05, 1, 12)} > F_{calculada}$ = Se acepta Ho, no existen diferencias significativas.

** $F_{(0.05, 1, 12)} < F_{calculada}$ = Se rechaza Ho, sí existen diferencias significativas.

N.C. = No calculado.

Las diferencias en la concentración de hierro para las fracciones M.O./S⁻ y residual para los dos muestreos son estadísticamente significativas.

IV. 7.4.2 Variación espacial

En la Figura siguiente se muestran las concentraciones de hierro obtenidas en cada fracción geoquímica para ambos muestreos.

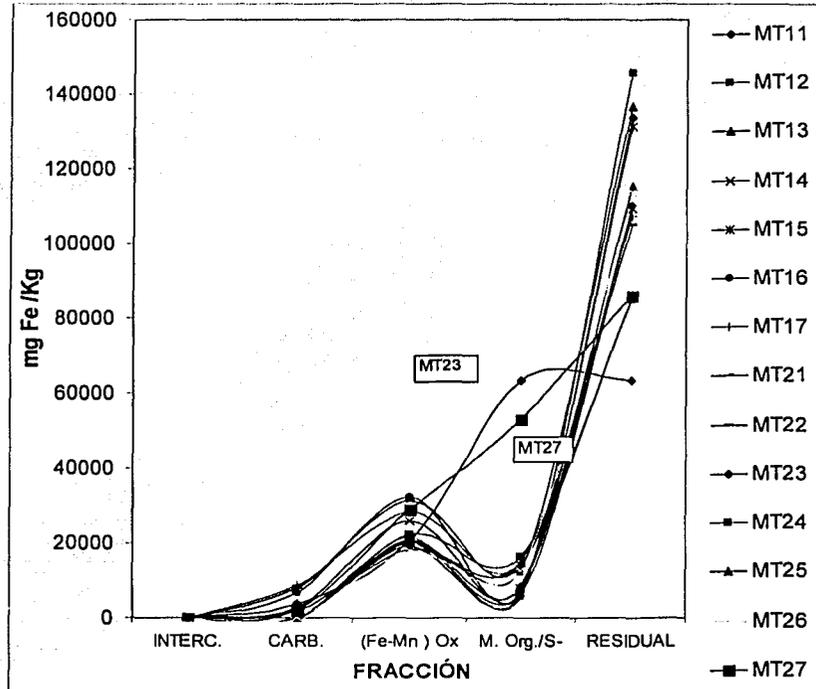


Figura 20. Concentración de hierro en cinco fases geoquímicas de sedimento.

III. 8 RESULTADOS ADICIONALES

El pH del agua del río en el primer muestreo resultó ser predominantemente neutro (7.0 - 7.08); en el segundo muestreo disminuyó a menos de 7.0 (6.8 - 7.01); mientras que el pH del agua intersticial de los sedimentos se obtuvo dentro de los intervalos 6.91 - 7.16 y 6.7 - 7.0, para el primer y segundo muestreo respectivamente. Estos valores indican que los metales pesados en los sedimentos no son liberados por efecto del pH debido a esta condición de neutralidad.

CAPÍTULO IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS

IV. 1 GRANULOMETRÍA DEL SEDIMENTO

En el primer muestreo la fracción de limos y arcillas se cuantificó en el intervalo de 38 - 49% de la muestra, mientras que en el segundo abarcó de 18 - 39%; esta disminución de los intervalos es provocada por las corrientes generadas durante la época de lluvias que arrastraron los materiales finos acumulados en las orillas del río. Esto coincide con Salomons y Förstner (1984) quienes establecen que la cantidad de sedimentos finos depende, por lo general, de las variaciones estacionales de la corriente de agua.

Castro (2002) determinó que el contenido promedio de limos y arcillas en los sedimentos que representan la zona norte del cauce principal del río Taxco es de $20.8\% \pm 9.5\%$, esta diferencia se debe a que se manejaron distintos criterios en la elección del sitio de muestreo.

Asimismo, se estima que un 18 - 49% del total del sedimento tiende a ser acarreado por suspensión, que es el modo más importante de transporte (Salomons y Förstner, 1984), lo cual es un indicativo de la alta movilidad de los limos y arcillas y, de esta manera, se confirma su potencial como contaminante (acarreado metales pesados) hacia la parte baja del río.

IV. 2 CARBONO ORGÁNICO

Los intervalos de carbono orgánico cuantificados en los sedimentos analizados (1.52 - 3.13%) son comparativamente menores que el promedio descrito por Castro (2002) para el cauce principal del río Taxco ($4.1\% \pm 2.0\%$), debido a que este recibe las aguas residuales de la ciudad homónima.

Asimismo, Rosales-Hoz y Carranza-Edwards (1998) cuantificaron carbono orgánico dentro de los intervalos 0.02 - 0.85% para el trayecto del río Coatzacoalcos que no era afectado por actividad industrial y 2.15% (en promedio) para la parte baja del río que sí está impactada por contaminantes industriales y urbanos. Del mismo modo, Tessier *et al.* (1982) obtuvieron el siguiente intervalo de carbono orgánico para dos arroyos en la provincia boscosa al este de Québec, Canadá: 1.69 - 10.60 % C.I.

Por lo tanto, los valores obtenidos en esta investigación son comparables con los obtenidos por Rosales-Hoz y Carranza-Edwards (1998) para los sedimentos ubicados en una zona que no estaba afectada por contaminación industrial. En cambio, se nota la diferencia (cuatro veces más) en el intervalo obtenido por Tessier *et al.* (1982) para los sedimentos de un arroyo ubicado en una zona templada y boscosa a comparación con la cantidad de C.O. cuantificado en esta investigación para una región cálida subhúmeda.

Finalmente, el intervalo de C.O. cuantificado en esta investigación es inferior que el promedio establecido para suelos agrícolas de los Estados Unidos y de Inglaterra, los cuales son 4.18% C.O. y 3.6% C.O. respectivamente (Alloway, 1995). Estas diferencias se deben a que los países mencionados son de clima templado principalmente y, por lo tanto, la composición del suelo es distinta.

IV. 3 CARBONO INORGÁNICO

La abundante presencia de carbonatos en los sedimentos (7.5 - 14.87 %C.I.) confirma el origen marino del suelo en la región de Taxco (Cserna y Fries, 1981) lo cual concuerda con la difracción de RX donde se identificaron los minerales calcita (muy abundante), natrón y zabuyellita (ambos detectables). Por lo tanto, estos valores son comparativamente mayores que los obtenidos por Tessier *et al.* (1982) dentro del intervalo de 1.69 - 10.60 %C.I. quienes estudiaron los sedimentos de dos arroyos alimentados por materiales sedimentarios graníticos y carbonatados.

Talavera *et al.* (2001) mencionan que la calcita es un mineral omnipresente en los jales muy recientes en tanto que los más antiguos se encuentra a bajas concentraciones o ausente. La importancia de estos minerales carbonatados en el efluente estudiado del río Taxco es que han funcionado como atenuantes para el DAM que se presenta típicamente en este tipo de depósitos mineros sulfurados (U.S.E.P.A., 1995). Asimismo, al mantener un pH amortiguado ha provocado la precipitación de especies de metales disueltos y su incorporación hacia los sedimentos (fase carbonatada), con lo cual se disminuye el efecto tóxico de los metales pesados (Talavera *et al.*, 2001).

IV. 4 MINERALOGÍA

La mineralogía de los sedimentos analizados es similar a la descrita por Castro (2002) para el cauce principal del río Taxco: cuarzo, calcita, montmorilonita, caolinita, yeso, ortoclasa²⁶ y albita²⁷.

Las arcillas son de los minerales que más intervienen en el comportamiento de los metales pesados en suelos y sedimentos (Kabata-Pendlas y Pendlas, 1992). Por ejemplo, se confirmó la alta capacidad de las arcillas Clorita-Vermiculita-Montmorilonita (CVM) para almacenar metales pesados en su estructura²⁸ (propiedad descrita por Ferguson, 1990), ya que estos minerales mostraron mayor abundancia en el muestreo 1, en el que también se cuantificó mayor concentración de hierro (78%) y plomo (39%) en la fracción residual, en comparación con el muestreo 2 (Fe = 65%, Pb = 22%); con excepción de la muestra MT21 donde la señal de tales minerales (CVM) es la única predominante.

²⁶ Ortoclasa o feldespato potásico = $KAlSi_3O_8$

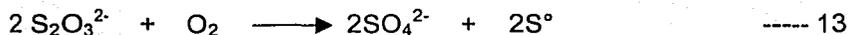
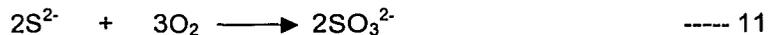
²⁷ Albita = $NaAlSi_3O_8$

²⁸ Es decir, la fracción residual de los sedimentos.

Por lo tanto, el origen de tales concentraciones de hierro y plomo no estuvo relacionado con procesos antropogénicos y tampoco representan un peligro al ambiente ya que estas especies no son solubles bajo condiciones naturales (Singh *et al.*, 1999).

Asimismo, al considerar los resultados de la extracción secuencial en relación con la fracción intercambiable, se observó que no se detectó hierro ni plomo y sólo un 0.1 –0.2% de zinc. Estos resultados indican que al menos los metales analizados no se encuentran adsorbidos a la superficie de las arcillas a pesar de que esta es una de las características principales de los minerales mencionados (Kabata-Pendlas y Pendlas, 1992; Tessier *et al.*, 1979 y Tessier *et al.*, 1982). Posiblemente esto se deba a que los sitios de intercambio iónico se encuentran ocupados por elementos que son adsorbidos con mayor fuerza, por ejemplo: Na, K y Ca (Tessier *et al.*, 1982; Salomons y Förstner, 1984).

Un aspecto importante obtenido es que el sulfato hidróxido de zinc tetra hidratado se identificó en la muestra MT12 y en todas las correspondientes al segundo muestreo, lo cual es un posible indicativo del arrastre de material de los jales en forma de sulfuro (por ejemplo ZnS) que, al entrar en el medio acuoso y, dependiendo de la cinética de reacción, se oxida e hidrata hasta esta forma mineral, de acuerdo con las siguientes reacciones (Moses *et al.*, 1987):



Asimismo, la reacción 11 también puede servir como referencia para explicar la identificación de sulfito de calcio (CaSO_3) en las muestras MT13 y MT23, de tal manera que puede ser catalogado como un producto de la oxidación de materiales sulfurados como pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS), galena (PbS) y calcopirita (CuFeS_2) los cuales también fueron identificados por Talavera *et al.* (2001) en los jales del distrito de Taxco.

Considerando la información anterior y las opiniones del Dr. Oscar Talavera Mendoza y del M. en C. Francisco Martín Romero (comunicación personal) acerca de los jales, se sabe que estos materiales están oxidados debido al intemperismo (considerando su coloración café-rojiza y la ausencia de sulfuros en la difracción de RX como afirma Pérez (2002).

Tal proceso de oxidación, principalmente de minerales sulfurados a sulfatos, genera iones H^+ los cuales disminuyen el pH y, por lo tanto, promueven la disolución de otros minerales presentes, generándose así el llamado "drenaje ácido de mina" (DAM); el cual, a falta de minerales en los jales que los neutralicen, puede escurrir hacia los alrededores generando un aumento en la concentración de metales pesados (U.S.E.P.A., 1995).

Lo anterior coincide con un escurrimiento proveniente de los jales que desemboca en esta zona del río (punto de muestreo MT3, Figura 4, pág. 25) donde se identificó el CaSO_3 , por lo que es un posible indicativo de DAM; sin embargo, por la abundancia de carbonatos en el área, su efecto es atenuado vía reacciones de neutralización, oxidación, precipitación y coprecipitación.

IV. 4 CONTENIDO DE Zn, Pb Y Fe TOTALES EN SEDIMENTOS

IV. 4.1 Zinc

En esta investigación se obtuvieron los siguientes intervalos de concentración de zinc total: 5 313 - 15 276 mg Zn/Kg para el primer muestreo y 19 117 - 33 500 mg Zn/Kg para el segundo (Figura 13, pág. 44). El aumento de la concentración de zinc es un indicio de que en la época de lluvias se producen arrastres de los jales hacia el río.

Las concentraciones obtenidas superan hasta 300 veces el valor de 75-80 mg Zn/Kg, promedio asignado a la corteza terrestre por Kabata-Pendlas y Pendlas (1992) y la concentración de fondo de la región de Taxco, la cual es 64.3 mg Zn/Kg (Talavera *et al.*, 2001). Con lo cual se reafirma el efecto contaminante de los jales.

También resulta ser menor el contenido de zinc total cuantificado en los suelos de la región: 6.7 – 4 280 mg Zn/Kg (Talavera *et al.*, 2001). Esto se debe a que los depósitos de jales tienen alrededor de cinco décadas impactando el río.

Por otra parte, Kloke (1982) estableció las siguientes concentraciones de zinc en suelos de uso agrícola: 3-50 mg Zn/Kg es la concentración normal, 300 mg Zn/Kg es el límite tolerable y, finalmente, 20 000 mg Zn/Kg es la base para considerar un suelo como altamente contaminado. Considerando tales intervalos se establece que los sedimentos analizados en esta investigación exceden 17.6 veces o más el límite tolerable de Zn para suelos de cultivo; además, para el segundo muestreo, la mayor concentración supera en 50% la concentración establecida para suelos altamente contaminados, por lo que los sedimentos pueden ser catalogados con este adjetivo.

En sedimentos de los ríos Coatzacoalcos y Blanco, Veracruz, se cuantificó 16.34 – 165 mg Zn/Kg (Rosales y Carranza, 1998) y 61.7 – 158.3 mg Zn/ Kg (Álvarez, 1983), respectivamente. Ambos intervalos son inferiores a los obtenidos en los sedimentos del afluente del río Taxco. Esta diferencia se debe a que son

afectados por distintas fuentes de contaminación (descargas de aguas residuales de una refinería en el primer caso).

Además de la región de Taxco, existen otras en el país que también cuentan con más de 200 años de actividad minera. Por ejemplo, el estado de Zacatecas donde González *et al.* (2000) cuantificaron 9.27 - 1 856 mg Zn/Kg en 747 muestras de sedimentos de arroyos ubicados en zonas naturalmente mineralizadas.

El estado de San Luis Potosí es un caso similar debido a que las concentraciones de zinc (obtenidas a partir de 600 muestras de arroyos) abarcaron el siguiente intervalo 1.90 – 5 690 mg Zn/Kg (Cárdenas, 2002). Por lo tanto, estas concentraciones, a pesar de ser representativas de áreas naturalmente mineralizadas e históricamente mineras (sin embargo, no mencionan la presencia de jales), tampoco son comparables a las obtenidas en esta investigación.

Elsokkary (1992) da una concentración promedio de 854 mg Zn/Kg y un rango de 105-2 850 mg Zn/Kg para sedimentos del río Nilo, estos valores a pesar de ser indicios de contaminación (natural y antropogénica), no son comparables debido a que las fuentes son distintas (industria cementera, de fertilizantes, hierro, acero, azucarera, textil y química en general).

Sims y Morgan (1988) estudiaron los suelos de una villa minera en Inglaterra que opera desde el siglo XVIII y cuantificaron zinc dentro del siguiente intervalo 250 - 3 7 200 mg Zn/Kg. Estos datos sí son comparables a los obtenidos en esta investigación, no por la presencia de jales, sino por el indiscriminado acumulamiento de escorias por todo el lugar.

En resumen, se establece que los sedimentos del efluente estudiado del río Taxco están seriamente contaminados con zinc, principalmente en el segundo muestreo donde se triplicó la concentración de este elemento.

En el análisis de la variación espacial se observa que durante el muestreo 1, la concentración de zinc aumentó en dirección río abajo de tal manera que en la estación MT17 la concentración de este elemento es tres veces mayor que en la MT11. Lo cual es un indicativo de la movilidad de los sedimentos contaminados y su acumulación hacia las zonas bajas del río.

Para el segundo muestreo no se encontró una tendencia similar en dirección río abajo, esto se atribuye a los aportes de suelo o jales hacia el río ocurridos en época de lluvias, los cuales modifican puntualmente las concentraciones de metales pesados en los sedimentos.

IV. 4.2 Plomo

Los siguientes intervalos fueron obtenidos para el primer y segundo muestreo, respectivamente: 716 - 2 151 mg Pb/Kg y 1 673 - 5 279 mg Pb/Kg (Figura 14, pág. 45). Estas concentraciones son aproximadamente cien veces más elevadas que la cantidad promedio de la corteza terrestre (13-14 mg Pb/Kg según Kabata-Pendias y Pendias, 1992) y que la concentración de fondo para la región de Taxco (25.5 mg Pb/Kg establecida por Talavera *et al.*, 2001).

El intervalo de plomo obtenido concuerda con el cuantificado por Talavera *et al.* (2001) en los suelos de la región de Taxco, el cual abarca de 7.0 – 5 640 mg Pb/Kg. Esto indica que los jales están impactando las áreas cercanas con la emisión de metales pesados; en el caso del afluente estudiado, es el zinc el principal elemento aportado hacia el río y almacenado en los sedimentos.

Además, Kloke (1982) menciona que en tierras de uso agrícola el plomo se encuentra en el rango de 0.1-20 mg Pb/Kg de suelo seco y considera el límite de tolerancia hasta 100 mg Pb/Kg. Asimismo estableció una concentración límite de 4 000 mg Pb/Kg para considerar un suelo como altamente contaminado. La mayoría

de las muestras analizadas en esta investigación no rebasan este límite, excepto la MT22 (con 5 279 mg Pb/Kg); sin embargo, todas exceden el límite de tolerancia para suelos de uso agrícola establecido por este autor.

En los sedimentos del río Coatzacoalcos se cuantificó plomo en el siguiente intervalo 21.2 - 53.48 mg Pb/Kg (Rosales-Hoz y Carranza-Edwards, 1998); en el río Blanco desde 18.2 mg Pb/Kg hasta máximo 48.8 mg Pb/Kg (Álvarez, 1983). Para sedimentos de arroyos ubicados en zonas mineralizadas de los estados de San Luis Potosí y Zacatecas se obtuvieron los siguientes intervalos 1.90 – 4 872 mg Pb/Kg en 600 muestras (Cárdenas, 2002) y 20.67 a 8 438 mg Pb/Kg para 746 muestras (González *et al.*, 2000), respectivamente.

Por lo tanto, la cantidad de plomo en los sedimentos del afluente estudiado del río Taxco superan cien veces los datos obtenidos en ríos veracruzanos. Sin embargo, son comparables a las concentraciones obtenidas en regiones mineralizadas e históricamente mineras de los estados de Zacatecas y San Luis Potosí; así como las obtenidas por Talavera *et al.* (2001) en los suelos de la región .

Otros investigadores cuantificaron 177 mg Pb/Kg para sedimentos de un río afectado por una electrorefinería de zinc (Bordas y Bourg, 1998); en tanto que un intervalo de 15-231 mg Pb/Kg se obtuvo para sedimentos del río Nilo (Elsokkary, 1992). MasKall y Thornton (1998) mencionan que para suelos contaminados con escoria proveniente de fundidoras de plomo en Inglaterra que han funcionado desde hace varios siglos la concentración promedio más alta fue de 51 678 mg Pb/Kg²⁹ la cual sobrepasa por 10 veces los límites establecidos para suelos altamente contaminados (Kloke, 1982).

²⁹ Valor obtenido al sumar los promedios que obtuvieron de la extracción secuencial de suelos contaminados con escorias (Tabla 3, pág. 396).

En resumen, se establece que los sedimentos analizados se encuentran altamente contaminados con plomo en el periodo de estiaje, en tanto que, la contaminación aumenta en más de 50% para la época de lluvias (de un promedio de 1 166 mg Pb/Kg hasta 2 926 mg Pb/Kg) debido a los aportes de jales.

La variación espacial del plomo es similar a la del zinc para ambos muestreos: en el muestreo 1 se demuestra la movilidad de los materiales contaminados con plomo ya que la concentración aumentó del punto MT11 al MT16 (la excepción de la muestra MT17, se debió a que el sitio de muestreo fue impactado con material terrígeno). En cambio, no se identifica la movilidad de los materiales contaminados con plomo a lo largo del afluente analizado durante el muestreo 2, ya que las concentraciones resultaron muy variables, lo cual puede deberse a factores como: el derrumbe de los jales o de suelo lo que provoca un proceso de enriquecimiento y dilución (respectivamente) de la cantidad de este metal en los sedimentos.

IV. 4.3 Hierro

Las concentraciones de hierro total obtenidas en los sedimentos variaron de 169 162 - 189 083 mg Fe/Kg para el muestreo 1; en tanto que, en el segundo el intervalo abarca de 137 610 - 168 299 mg Fe/Kg (Figura 15, pág. 46). Esta disminución puede ser explicada a partir de la difracción de RX en donde se detectó mayor abundancia de magnetita durante el primer muestreo en comparación con el segundo.

La concentración de fondo en Taxco es de 27 000 mg Fe/Kg (Talavera *et al.*, 2001), la cual es 7 veces menor que la obtenida en los sedimentos del afluente estudiado. Asimismo, Kabata-Pendlas y Pendlas (1992) establecieron que la concentración para el hierro en la corteza terrestre es de 50 000 mg Fe/Kg (línea base), con lo cual se demuestra que las cantidades de este elemento en los sedimentos están poco más que triplicadas con respecto a esta concentración.

Rosales-Hoz y Carranza-Edwards cuantificaron hierro en sedimentos del río Coatzacoalcos, Veracruz, en el intervalo 25 000 – 74 000 mg Fe/Kg; en tanto que Álvarez (1983) obtuvo concentraciones de este elemento en sedimentos del río Blanco, Veracruz, que abarcaron desde 25 500 – 60 000 mg Fe/Kg. Por otro lado, González *et al.* (2000) analizaron este elemento en 746 muestras de sedimentos de arroyos en zonas mineralizadas del estado de Zacatecas, y obtuvieron el intervalo siguiente: 3 000 – 73 300 mg Fe/Kg.

Singh *et al.* (1999) establecieron que la concentración promedio de hierro en la fracción de limos y arcillas de los sedimentos del río Damodar (India) es de 66 000 mg Fe/Kg. Por otro lado, Izquierdo *et al.* (1997) cuantificaron 40 000 mg Fe/Kg y 55 000 mg Fe/Kg en sedimentos de los estuarios "Bacuta" y "Liebre"³⁰, respectivamente, ubicados en la zona minera denominada "Cinturón pirítico ibérico" al suroeste de España. Estos datos pueden ser considerados como valores típicos de zonas con abundante presencia de hierro natural y antropogénica).

Las concentraciones de hierro en los sedimentos del afluente del río Taxco estudiado fueron muy altas a comparación de las obtenidas en ríos de la zona de Veracruz, México. Tampoco son comparables con las cantidades cuantificadas en sedimentos de arroyo de zonas naturalmente mineralizadas y mineras de Zacatecas (González *et al.*, 2000) o del estuario afectado por contaminación pirítica en el suroeste de España (Izquierdo *et al.* 1997). El enriquecimiento seguramente es debido a la contaminación con jales de la mina Guerrero.

No se observa variabilidad espacial (movilidad) del hierro a lo largo del río ya que no se presentó una tendencia definida en las concentraciones de este elemento para ambos muestreos (Figura 15, pág. 46). Sin embargo, los pares de muestras MT15 - MT25 (169 182 y 168 299 mg Fe/Kg, respectivamente) y MT17 - MT27 (166 748 y 157 540 mg Fe/Kg de manera respectiva), presentaron similares cantidades de este

elemento, coincidencias que no se observaron para plomo ni zinc. Esto último se debe a que el hierro, por ser de los elementos con mayor concentración en el sedimento, no se ve afectado significativamente por los agentes del intemperismo.

Para determinar si existe relación entre los tres metales analizados se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para ambos muestreos (Tabla 17).

Tabla 17. Coeficiente de correlación de Pearson entre los datos de metales totales

| | Muestreo 1 | | | Muestreo 2 | | |
|------|------------|-------|--------|------------|--------------|--------|
| | [Zn] | [Pb] | [Fe] | [Zn] | [Pb] | [Fe] |
| [Zn] | 1.00 | 0.457 | -0.502 | 1.00 | 0.897 | 0.362 |
| [Pb] | | 1.00 | -0.148 | | 1.00 | -0.148 |
| [Fe] | | | 1.00 | | | 1.00 |

De acuerdo con los resultados observados, se establece que únicamente las concentraciones totales de Pb y Zn en el segundo muestreo generaron una correlación significativa: **0.897³¹**. Lo cual deja en evidencia la asociación entre estos metales y, por lo tanto, se puede considerar un origen común para ambos elementos (los jales).

³⁰ El estuario "Liebre" sí es afectado por las descargas de aguas residuales industriales de la ciudad española de Huelva, mientras que el estuario "Bacuta" no lo está.

³¹ Resultado mayor que /0.750/.

IV. 5 CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL (Igeo)

Con el fin de conocer el estado ambiental del afluente en estudio se cuantificó el Índice de geoacumulación (Igeo); los valores se presentan en la Tabla 9 (pág. 47).

IV. 5.1 Zinc

En el primer muestreo el Igeo para el zinc varía de 5.8 en la muestra MT11 hasta 7.3 en la MT17, esto indica que los sedimentos de la parte alta del río están altamente contaminados; para la parte baja la contaminación es severa debido a que los sedimentos finos (con alto contenido de zinc) son arrastrados y se depositan en el extremo inferior del afluente, de tal manera que en las muestras MT16 y MT17 se cuantificaron los porcentajes máximos de limos y arcillas: 49 y 48 % del total de los sedimentos, respectivamente.

Para el segundo muestreo los valores del Igeo no son homogéneos; sin embargo, las concentraciones de zinc son tan altas que superan con dos unidades el valor máximo de este índice (6) establecido por Salomos y Förstner (1984). Con lo cual se determina que la contaminación es severa en la temporada de lluvias.

IV. 5.2 Plomo

El plomo para el primer muestreo muestra una división: la parte alta del río (MT11-MT14) presentó un Igeo = 4.2-4.8 (estado de contaminación), mientras que la zona baja (MT15-MT17) el Igeo cambia a 4.9-5.8 (altamente contaminado). Para el segundo muestreo el Igeo del plomo tuvo una variación de 5.5-7.1, además no se obtuvo en un orden lógico; sin embargo, se establece que por lo general ocurre el río una contaminación severa, con excepción de las muestras MT24 y MT26 donde, probablemente, los aportes de suelo generaron un efecto de dilución en las concentraciones de este elemento.

IV. 5.3 Hierro

Los valores del lgeo para el hierro se mantuvieron homogéneos en tiempo y espacio (variación entre 1.9 y 2.1). Por lo cual el estado del río con respecto a este elemento es de poco a moderadamente contaminado.

IV. 6 RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN SECUENCIAL

Las cantidades obtenidas de Zn, Pb y Fe totales indican que ocurre contaminación en el río; sin embargo, mediante la extracción secuencial se sabrá si se ratifica o minimiza el impacto ambiental de estos metales sobre el ecosistema estudiado. Los resultados de esta técnica se presentan en las Tablas 23, 24 y 25 (Anexos).

Aunque existe un gran número de investigaciones que analizan metales pesados en sedimentos de ríos por extracción secuencial, no es posible la comparación con los datos obtenidos en la presente investigación debido a que existen diferencias entre las técnicas analíticas y las fracciones por tamaño de partícula utilizadas para los análisis. Por lo tanto, las comparaciones se hacen únicamente con los datos generados en metodologías similares.

IV. 6.1 Zinc

III. 6.11 Variación estacional

De acuerdo con los resultados obtenidos, el zinc tiende a asociarse con cada fracción geoquímica de los sedimentos analizados en el siguiente orden (Tabla 11, pág. 49):

Muestreo 1: **Carbonatos > [Fe-Mn]Ox > M.O./S⁻ > Residual > Intercambiable**

Muestreo 2: **M.O./S⁻ > Carbonatos > Residual > [Fe, Mn]Ox > Intercambiable**

Las tendencias descritas no concuerdan con los resultados obtenidos por los siguientes investigadores:

1. Singh *et al.* (1999): Residual>[Fe, Mn]Ox>M.O./S->Carbonatos>Intercambiable.
2. Tessier *et al.* (1979): Residual>[Fe, Mn]Ox>Carbonatos>M.O./S->Intercambiable.
3. Tessier *et al.* (1982): Residual>[Fe, Mn]Ox>M.O./S->Carbonatos>Intercambiable.

Estas diferencias son debidas a las contrastes que existen entre los ambientes analizados: Singh *et al.* (1999) en India y Tessier *et al.* (1979 y 1982) en Canadá; sitios donde, según los investigadores, predominan los suelos graníticos (residuales).

El zinc resultó ser el único elemento que se cuantificó en la fracción intercambiable (7-52 mg Zn/Kg), con lo cual se comprueba por qué es uno de los metales pesados con mayor movilidad.

Este elemento tiende a asociarse principalmente a carbonatos (25-36.9 %), la segunda fase geoquímica más lábil del sedimento. Esto es importante debido a que esta fracción es susceptible a condiciones de pH ácido, bajo las cuales se disolvería dejando biodisponible la cantidad de zinc que contenga.

Bodek (1988) menciona que los [Fe-Mn]Ox son los mejores adsorbentes de zinc, seguidos de las arcillas (componentes de la fracción residual); sin embargo este postulado no se cumple para los sedimentos analizados donde las fracciones de carbonatos y de M.O./S- acumularon las mayores proporciones de este elemento (Tabla 13, pág. 51). Esto se atribuye a las condiciones del área: suelo calcáreo y la presencia de los jales (fases sulfuradas) que propician el acumulamiento de este metal en las fracciones mencionadas.

El aumento en la proporción de zinc en la fracción de M.O./S⁻ del primer muestreo al segundo se debe a posibles aportes de jales hacia el río, de tal magnitud que llega a representar hasta 1.1% (11 003 mg Zn/Kg) de la muestra total. Esto concuerda con la identificación de un sulfato hidróxido de zinc tetra hidratado por difracción de RX

(límite de detección de la técnica = 1%) únicamente en los lotes del segundo muestreo. Como ya se ha mencionado, este mineral puede ser considerado como un producto de la oxidación del sulfuro respectivo (esfalerita o ZnS).

Finalmente, en la fracción residual se mantiene análoga la proporción de zinc (14 – 18%) en ambos muestreos a pesar del aumento en la concentración para el muestreo 2.

De los resultados de zinc total se sabe que las concentraciones aumentaron al doble en el segundo muestreo; sin embargo, para comprobar si las proporciones de este elemento en cada fracción geoquímica se mantuvieron constantes de un muestreo a otro, se elaboró la Figura 21.

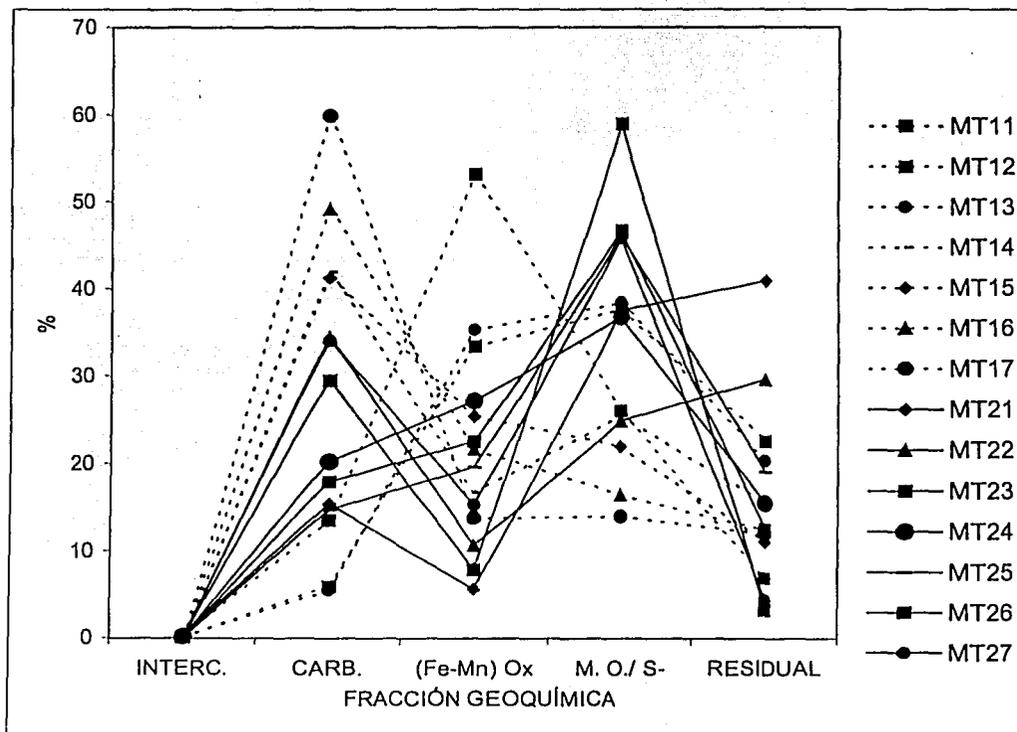


Figura 21. Comparación entre los porcentajes de zinc por muestra y fracción geoquímica.

Las proporciones observadas resultaron con mucha variación entre las muestras por lo que no se identifican tendencias claras en el comportamiento geoquímico del zinc en los sedimentos analizados. Esto es debido a la heterogeneidad natural de los sedimentos, la alta movilidad de este elemento en medio acuoso y la fuente de contaminación colindante (la presa de jales).

III. 6.12 Variación espacial

En las Figuras 16 y 17 (pág. 50) se observa que la concentración de zinc es muy variable para las muestras analizadas, sin embargo, se observan las características que a continuación se mencionan.

En el muestreo 1 la cantidad de zinc en la fracción de carbonatos aumenta a partir de la muestra MT14 a la MT17, lo cual es debido al lento arrastre de materiales carbonatados y su acumulación en la parte baja del río. Además, la concentración de este elemento en la fracción residual se mantiene casi constante a lo largo del río, con excepción de la muestra inicial (MT11). Por lo tanto, se demuestra que esta fracción no es afectada por los efectos del intemperismo o los causados en el sistema acuoso del río.

Para el muestreo 2 aumenta la variación espacial del zinc, por lo tanto, no se halla una tendencia definida para este elemento. Esto es provocado por aportes de materiales de composición heterogénea hacia el río, ya sean jales o suelo. En caso de la entrada de jales (fenómeno de enriquecimiento), se provocan los puntos máximos de las curvas; en el caso del aporte de suelo, el efecto es el contrario (dilución) y se producen de esta manera los puntos mínimos en las tendencias.

IV. 6.2 Plomo

IVI. 6.21 Variación estacional

Las proporciones de la concentración de plomo asociado a las fracciones geoquímicas de los sedimentos analizados, quedaron en el siguiente orden para ambos muestreos (Tabla 13, pág.51):

[Fe, Mn]Ox > Residual > Carbonatos > M.O./S > Intercambiable

Estas tendencias son diferentes a la que describen Tessier *et al.* (1979) y Tessier *et al.* (1982) para los sedimentos de arroyos en la provincia de Québec, Canadá, donde la proporción de plomo quedó en el siguiente orden: Residual > [Fe, Mn]Ox > M.O./S > Carbonatos > Intercambiable. Estas diferencias se deben a que en su área de estudio predomina el aporte de sedimentos graníticos y en menor cantidad carbonatados; además, mencionan la presencia de afloramientos minerales alrededor de la cuenca de drenaje analizada.

El plomo no fue detectado en la fracción intercambiable, lo cual, es la confirmación de que no se encuentra fácilmente biodisponible, coincidiendo con Tessier *et al.* (1979), Tessier *et al.* (1982) y Singh *et al.* (1999). Esto se debe a que es muy voluminoso (radio atómico = 1.75Å) y su electronegatividad es baja (1.8), por lo que presenta menor tendencia a ocupar un sitio de intercambio iónico, a comparación del calcio o potasio (Salomons y Förstner, 1984).

Los carbonatos, a pesar de predominar en los sedimentos, no acumularon similar proporción de plomo, ya que en el primer y segundo muestreos se obtuvieron los siguientes intervalos y promedios entre paréntesis: 1.25 – 28 % (12%) y 6.0-19.8% (13%) de Pb contenido en los sedimentos, respectivamente.

De acuerdo con Bodek (1988), el plomo presenta una fuerte tendencia a asociarse con los óxidos de hierro y manganeso en comparación con las arcillas y la materia orgánica. Lo cual confirma su abundancia en la fracción residual (22-42%) y en la de

[Fe, Mn]Ox (49-59%); además, se ratifica la conocida capacidad de esta última fracción para atrapar metales pesados (Tessier *et al.*, 1982).

Para la fracción de [Fe, Mn]Ox las concentraciones de plomo no presentan un orden lógico ni relación con los resultados de la difracción de RX debido a que muchos de los compuestos involucrados son teóricamente amorfos, muy poco cristalizados o bien no fueron detectados por su baja concentración (< 1%).

Únicamente se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de plomo asociado a óxidos de hierro-manganeso (Tabla 15, pág. 53) debido a que en el primer muestreo se presentó una mayor variación (21.7 - 81.5 %) comparada con la del segundo (51-65%).

A pesar del carácter calcofilico²⁶ del plomo (Ferguson, 1990), en la fracción de M.O./S⁻ sólo fue detectado en 4 lotes del segundo muestreo (en orden ascendente: MT21, MT22, MT27 y MT23). Lo cual coincide con el caso del hierro donde las muestras MT23 y MT27 mostraron valores anormalmente altos en comparación con las demás (en las cuales no se detectó el elemento en cuestión). Además, las cantidades de materia orgánica se mantuvieron relativamente constantes (1.52 - 2.81 %LOI) durante el muestreo 2.

Esto se puede explicar a partir de que se ha comprobado teórica y experimentalmente (Moses *et al.*, 1987) que los sulfuros, por ejemplo pirita y galena, en medio acuoso se oxidan a sulfato (ec. 14, pág. 58), de manera que los metales (Fe y Pb respectivamente) son liberados y posteriormente se asocian a los oxohidróxidos de hierro-manganeso. Por lo tanto, este proceso disminuye la concentración de los sulfuros con el paso del tiempo, impidiendo su identificación mediante la difracción de RX; sin embargo, haber cuantificado plomo asociado a sulfuros en el segundo muestreo (muestras MT21, MT22, MT23 y MT27) significa que estas especies aun no han sido completamente oxidadas.

²⁶ Calcofilico = Tiene alta afinidad con el azufre (sulfuro).

Por lo anterior, se puede concluir que: son los sulfuros las especies que causaron concentraciones altas de plomo para la fracción de M.O./S⁻ en el segundo muestreo, los cuales muy probablemente provienen de los jales. Sin embargo, esto no es comprobable debido a las bajas concentraciones de este elemento (215 mg Pb/Kg o 0.0215%), las cuales no son detectables en la difracción de RX.

Lo anterior indica que el plomo, el más tóxico de los metales analizados, no está concentrado en las fracciones más lábiles de los sedimentos analizados (intercambiable, carbonatos) ni asociado a materia orgánica.

La Figura 22 se presenta con el fin de verificar las proporciones de plomo en las distintas fracciones geoquímicas de los sedimentos y su comparación de un muestreo a otro.

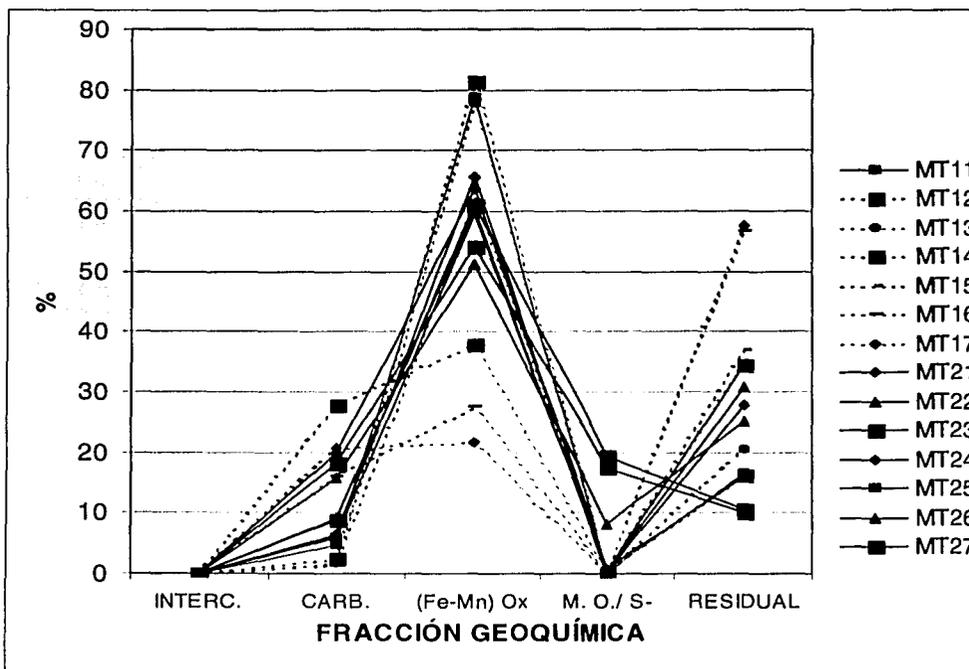


Figura 22. Comparación entre los porcentajes de plomo por muestra y fracción geoquímica.

Se observa un comportamiento estacional homogéneo (a comparación del zinc), principalmente en el segundo muestreo. Por lo tanto, el fraccionamiento geoquímico del plomo se mantiene constante (con algunas excepciones) tanto en temporada de lluvia como de estío.

IV. 6.22 Variación espacial

Para el primer muestreo (Figura 18, pág. 52) sólo se encuentra definida una tendencia: la cantidad de plomo en la fracción residual aumenta río abajo, lo cual se debe a que los minerales que forman esta fracción son más resistentes al intemperismo. Por lo tanto pueden ser considerados como un indicador de la movilidad del material de los sedimentos hacia la parte inferior del efluente.

Para el segundo muestreo (Figura 19, pág. 52) se tienen dos tendencias: la primera se refiere a la concentración de plomo en la fracción de óxidos de hierro-manganeso y la segunda se relaciona con los carbonatos; ambas disminuyen río abajo. Estos fenómenos son atribuibles a los aportes de suelo hacia la zona inferior del afluente, que diluyen el efecto de los jales que se deslavan hacia el cauce.

IV. 6.3 Hierro

La asociación del hierro con cada una de las fracciones geoquímicas de los sedimentos queda en el siguiente orden para la época de sequía y lluvias (Tabla 15, pág. 53):

Residual > [Fe, Mn]Ox > M.O./S⁻ > Carbonatos > Intercambiable.

Esto coincide con los resultados de Tessier *et al.* (1982) para arroyos en Canadá, Singh *et al.* (1999) para el río Damodar, India, y con Izquierdo *et al.* (1997) para el estuario denominado Liebre, España; con respecto a México, no se encontraron

datos comparables. Estas coincidencias son debidas a que este elemento es omnipresente en la corteza terrestre (Kabata-Pendlas y Pendlas, 1992) y, por lo tanto, sus proporciones en las fases geoquímicas se mantienen constantes en tiempo y espacio.

Se observa que este elemento no se encuentra en la fase intercambiable debido a que, en medio acuoso, tiende a formar compuestos hidratados, hidróxidos o una combinación de ambos, los cuales son muy insolubles a pH neutros y tienden a flocular y sedimentarse por gravedad (Bodek, 1988).

En las fases de carbonatos y de [Fe-Mn]Ox, los porcentajes promedio de hierro (2% y 15% respectivamente) permanecieron constantes para ambos muestreos. No obstante, para los carbonatos se encuentra una tendencia a aumentar la concentración de hierro río abajo; de tal manera que, en las primeras dos muestras (MT11 y MT12) se identificó de 14-18 mg Fe/Kg; en tanto que en la última muestra (MT17) se cuantificó el máximo de hierro asociado a carbonatos durante el primer muestreo (8 789 mg/Kg). Para el segundo muestreo la tendencia se revierte ya que las máximas concentraciones se encuentran en las primeras tres muestras.

Estas variaciones pueden deberse a que las cantidades de hierro asociado a carbonatos en el área de muestreo son constantes; sin embargo, debido a un lento arrastre de sedimentos finos durante la temporada de sequía, éstos se fueron acumulando en la parte baja del río. Para el muestreo posterior a la época de lluvias, el efecto observado es el contrario, posiblemente debido a un arrastre de materiales exógenos enriquecidos con hierro principalmente en la parte alta, en tanto que en la parte baja el efecto de aportes de suelo, predomina en el ambiente generando una disminución de este elemento en los sedimentos.

Con respecto a las últimas dos fracciones geoquímicas, los porcentajes de hierro tuvieron diferencias entre ambos muestreos. Este comportamiento se debe al

aumento de 4.5 y 3.7 veces la concentración de dicho elemento en las muestras MT23 y MT27, respectivamente, en la fracción de M.O./S⁻. Este fenómeno se explica con los difractogramas presentados en las Figuras 9, 10, 11 y 12 para las muestras MT13, MT23, MT17 y MT27 respectivamente (pág. 41-42).

El difractograma de la muestra MT23 (Figura 10) presentó dos señales intensas, la de pirita y calcopirita, lo cual confirma por qué se obtuvo la mayor cantidad de hierro para la fracción de M.O./S⁻ a comparación de la muestra MT13 (Figura 9). El difractograma de la muestra MT27 (Figura 12) también presentó una señal de pirita con mayor intensidad que la correspondiente MT17 (Figura 11).

Por lo tanto, se confirma el hecho de que los sulfuros son las especies que controlan el comportamiento del hierro en la fase M.O./S⁻.

Finalmente, queda claro que la mayor cantidad de hierro en las muestras (hasta más de 75% en el muestreo 1) se encuentra en la fracción residual y, por lo tanto, no biodisponible, lo cual también es un indicativo del origen terrígeno de este elemento en los sedimentos (sea proveniente de suelo o de jales).

La extracción secuencial revela que la cantidad de hierro en cada una de las fases geoquímicas del sedimento permanece casi constante (excepto MT23 y MT27, explicado anteriormente) en tiempo y espacio (Figura 20, pág. 54).

Asimismo, las proporciones (%) de este elemento en las cinco fracciones analizadas también son constantes en tiempo y espacio con excepción de las diferencias señaladas anteriormente (Figura 23).

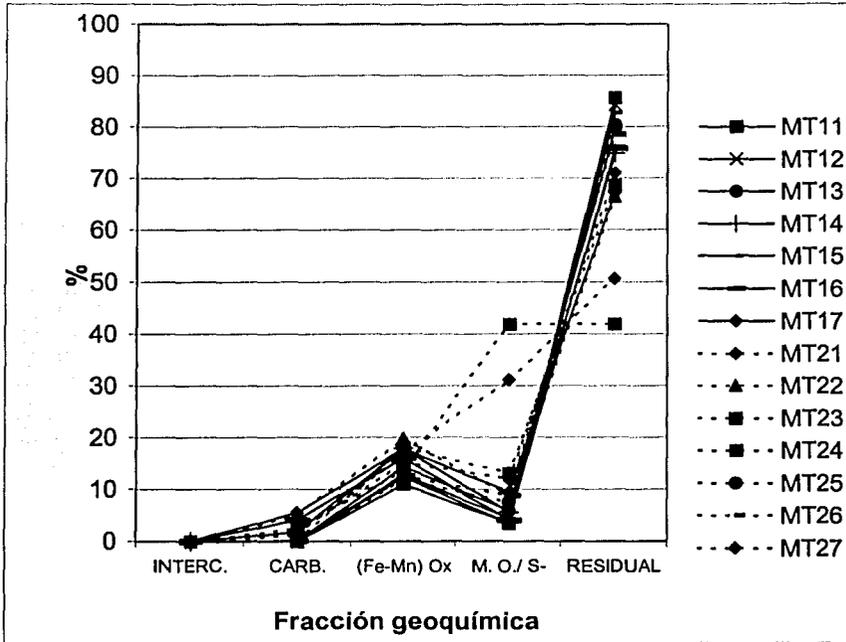


Figura 23. Porcentajes de hierro en cinco fases geoquímicas de sedimento.

IV. 7 CORRELACIÓN ENTRE Zn, Pb Y Fe EN RELACIÓN CON LA M.O., CARBONATOS Y GRANULOMETRÍA

Los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos entre la concentración de Zn, Pb y Fe en la fracción de [M.O./S] y los valores de C.O. se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Correlación entre C.O. (%LOI) y los metales asociados a la fracción de [M.O./S]

| | Muestreo 1 (estío) | | | | Muestreo 2 (lluvias) | | | |
|------|--------------------|--------|------|--------------|----------------------|-------|--------------|--------------|
| | %LOI | Fe | Pb | Zn | % LOI | Fe | Pb | Zn |
| %LOI | 1.000 | -0.196 | N.C. | 0.789 | 1.000 | 0.286 | 0.645 | -0.077 |
| Fe | | 1.000 | N.C. | -0.118 | | 1.000 | 0.861 | 0.768 |
| Pb | | | N.C. | N.C. | | | 1.000 | 0.560 |
| Zn | | | | 1.000 | | | | 1.000 |

N.C. No se calculó la correlación debido a que no se detectó plomo en esta fracción.

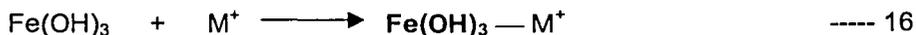
Se observan las siguientes correlaciones significativas (>0.750):

1. La correlación entre [Zn]-[%LOI] de **0.789** durante el primer muestreo refleja los resultados de la especiación, ya que se cuantificó casi un cuarto de la concentración total de zinc en la fracción de M.O./S⁻ y, por lo tanto, es muy probable que este metal se encuentre formando complejos con especies orgánicas.
2. Las correlaciones entre [Pb] - [Fe] (**0.861**) y [Zn]-[Fe] (**0.768**) para el segundo muestreo indican que la presencia del plomo y zinc presentes en la fracción de [M.O./ S⁻] se debe a que están asociados a especies de sulfuros (como pirita y calcopirita), y no necesariamente a la materia orgánica. Esta asociación se confirma con los difractogramas de las Figuras 9, 10, 11 y 12 (pág. 41 y 42) donde se presentan las señales de la pirita y, en su caso, de la calcopirita como minerales abundantes.

Por lo anterior, podemos establecer que son los sulfuros de hierro (FeS o pirita), de plomo (por ejemplo PbS o galena) y de zinc (ZnS o esfalerita por ejemplo) las especies que están presentes principalmente en la fracción de M.O./ S⁻ para el segundo muestreo. Al considerar la fuerte correlación del plomo y el zinc con el hierro, también se puede pensar que ocurre la formación, floculación y precipitación de coloides del tipo Fe(OH)₃ a pH neutro (generado por los carbonatos en el río); esto se observa en la siguiente reacción:



En el proceso de floculación, éstas especies químicas pueden adsorber o coprecipitar fácilmente cationes del medio acuoso (Kabata-Pendlas y Pendlas, 1992; Bodek, 1988; Moses, *et al*, 1987), como se muestra en la reacción 16.



Este fenómeno es determinante en el comportamiento de los metales pesados en medio acuoso.

En la Tabla 19 se muestran los resultados de la correlación entre los valores de carbono inorgánico (como CaCO_3) y las concentraciones de estos metales en la fracción de Carbonatos.

| Tabla 19. Correlación entre carbono inorgánico (% C. I. como CaCO_3) y los metales asociados a la fracción de [Carbonatos] para los dos muestreos | | | | | | | | |
|---|--------------------|--------|--------------|--------------|----------------------|--------|--------|--------------|
| | Muestreo 1 (estío) | | | | Muestreo 2 (lluvias) | | | |
| | % C.I. | Zn | Pb | Fe | % C.I. | Zn | Pb | Fe |
| % C.I. | 1.000 | -0.171 | -0.337 | -0.077 | 1.000 | -0.321 | -0.614 | -0.200 |
| Zn | | 1.000 | 0.759 | 0.853 | | 1.000 | 0.565 | 0.760 |
| Pb | | | 1.000 | 0.875 | | | 1.000 | 0.755 |
| Fe | | | | 1.000 | | | | 1.000 |

Se observa que durante ambos muestreos no existe correlación entre los tres elementos analizados y el %C.I. (carbonatos); sin embargo, [Zn]-[Fe] y [Pb]-[Fe] sí mostraron correlación significativa. Para el muestreo 1 también hubo correlación entre [Zn]-[Pb].

Por lo tanto, la importancia de los carbonatos presentes en el suelo de la región radica principalmente en ajustar el pH en el agua del río. Estos ajustes son trascendentes en el comportamiento de los metales pesados; ya que de acuerdo con Kabata-Pendias y Pendias (1992), la generación de pH neutros o básicos provocan, por ejemplo, la precipitación de especies como los hidróxidos de hierro y de manganeso, los cuales son más eficientes para adsorber y coprecipitar iones metálicos.

Con el fin de analizar la asociación de los metales totales analizados con la cantidad de sedimento transportado por suspensión (fracción <0.063 mm), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Correlación entre concentración de metales totales y la fracción<0.063 mm

| Elemento | Fracción < 0.063 mm (g) | | |
|----------|-------------------------|---------------|------------|
| | General | Muestreo 1 | Muestreo 2 |
| Zn | 0.016 | -0.538 | -0.348 |
| Pb | -0.169 | -0.796 | -0.402 |
| Fe | -0.364 | -0.232 | -0.428 |

Al considerar los resultados obtenidos se establece que no existe relación entre la concentración de metales pesados y la fracción de sedimento transportada en suspensión (tamaño de partícula < 0.063 mm), con excepción del muestreo 1 en el cual la correlación sí resultó ser significativa (**-0.796**) con respecto al plomo. Esto significa que el plomo, durante el primer muestreo, se asocia principalmente con los [Fe, Mn]Ox, los cuales tienen una gran afinidad por este metal (como demostraron Tessier *et al.*, 1982) y consecuentemente se adhieren al material grueso (arenas y gravas) por lo que no se acumulan en la fracción fina (<0.063 mm). Para el muestreo 2 el coeficiente de correlación es de tan solo -0.402, posiblemente debido a que la fuerza de la corriente, que es mayor durante la época de lluvias, arrastra más fácilmente los sedimentos finos.

IV. 8 RECOMENDACIONES

Los altos contenidos de zinc, plomo y hierro en los sedimentos del afluente del río Taxco estudiado, lo convierten en un potencial distribuidor de estos metales pesados hacia el ecosistema de la parte baja del cauce principal; por lo tanto, se proponen las siguientes medidas de atenuación para evitar, principalmente, el deslave de los jales: desviar o entubar el cauce o bien, cubrir el depósito de jales y reforestar la parte superior.

CONCLUSIONES

Al cuantificar el impacto ambiental del hierro, zinc y plomo se concluye que la contaminación de los sedimentos del efluente analizado del río Taxco es moderada con respecto al hierro y severa al considerar el plomo y el zinc. Las concentraciones son similares a aquellas cuantificadas en sitios contaminados por minas y fundidoras de plomo. Por otro lado la concentración promedio de hierro es mayor a la cuantificada en sedimentos de estuarios afectados por contaminación pirítica.

De la especiación en los sedimentos se obtienen las siguientes conclusiones:

- a) El zinc se concentra tanto en la fracción de $M.O./S^-$ (24-41.8 %) como en la carbonatada (25-36.9%); las cuales son susceptibles a condiciones oxidantes y a pH ácido respectivamente.
- b) El plomo se asocia principalmente a la fracción de oxo-hidróxidos de hierro-manganeso (49-59%) por lo que es susceptible a liberarse hacia el ambiente en cuanto se produzca un ambiente reductor.
- c) El hierro se encuentra mayoritariamente en la fracción residual (65-78%) y, por lo tanto, no está biodisponible. Sin embargo, también se presenta en la fracción de $[Fe, Mn]Ox$ (15%). Sin embargo, ésta última fracción geoquímica representa un peligro potencial de contaminación en caso de que se genere un ambiente reductor.

La asociación de los tres elementos analizados con las fases geoquímicas del sedimento operacionalmente definidas fue la siguiente:

Hierro: **Residual > $[Fe, Mn]Ox$ > $M.O./S^-$ > Carbonatos > Intercambiable**

Plomo: **$[Fe, Mn]Ox$ > Residual > carbonatos > $M.O./S^-$ > intercambiable**

Zinc (Estiaje): **Carbonatos > $[Fe, Mn]Ox$ > $M.O./S^-$ > Residual > Intercambiable**

Zinc (Lluvias): **$M.O./S^-$ > Carbonatos > Residual > $[Fe, Mn]Ox$ > Intercambiable.**

Por lo anterior, la hipótesis que propone: "los metales pesados considerados en esta investigación se concentrarán en las fracciones menos móviles de los sedimentos" se cumple para el hierro y plomo más no para el zinc ya que este último elemento se concentró en la segunda fase más móvil del sedimento.

Con respecto a la movilidad, esta queda demostrada con los datos del primer muestreo en donde se observa claramente la acumulación de los metales pesados en la parte baja del río. Para el segundo muestreo se obtuvo una distribución heterogénea de los metales pesados ya que hubo aportes de suelo y jales que generaron un efecto de dilución y enriquecimiento respectivamente.

Los datos demuestran que, salvo el caso del hierro, el plomo y zinc aumentaron su proporción durante el segundo muestreo, debido al efecto de las lluvias que provocaron acarreo de materiales provenientes de los jales, lo que confirma la hipótesis donde se propone que: "para el muestreo posterior a la época de lluvias se encontrará un mayor contenido de metales pesados debido al arrastre fluvial".

Se comprobó que los carbonatos sí ejercen su influencia sobre los metales pesados que se analizaron; sin embargo, su efecto no es mediante la formación de compuestos carbonatados, sino a través de la amortiguación del pH del agua (neutralidad a $\text{pH} = 7$). Por tal razón, también fue confirmada la hipótesis acerca de que: "los carbonatos impiden la concentración de metales pesados en las fracciones más móviles del sedimento, principalmente a su efecto sobre el pH de la fase acuosa".

Tomando en cuenta la fuerte correlación entre el $[\text{Pb}] - [\text{Fe}]$ y $[\text{Zn}] - [\text{Fe}]$ y que no la hubo con las cantidades de materia orgánica, se puede inferir que la concentración de estos elementos en la fracción de $[\text{M.O./S}]$ se debe más a los sulfuros.

REFERENCIAS

1. ALLEN Burton Jr., G. 1992. **Sediment collection and processing: factors affecting realism**. En sediment toxicity assessment. Edited by G. Allen Burton Jr. . Lewis Publishers. Boca Raton Florida, pp. 37-66.
2. ALLOWAY, B. J. 1995. **Heavy metals in soil**. 2nd ed. Blackie Academic and Professional, London, U. K., pp. 11-51, 39-44, 206-223 y 284-305.
3. ÁLVAREZ R., Ma. U. del Rosario. 1983. **Distribución de metales pesados en sedimentos del río Blanco, Veracruz**. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del mar y Limnología. U.N.A.M. México, D.F.; 68p.
4. ARMIENTA H. M. A.; *et al.* 1999. **Caracterización geoquímica de cuerpos de agua en la zona de Taxco-Taxco el Viejo, Gro.** IX Congreso Nacional de Geoquímica. Linares, Nuevo León.
5. ARMIENTA H. M. A.; *et al.* 2000. **Hydrogeochemistry of metals in Taxco., México**. 31 International Geological Congress. Río de Janeiro, Brasil.
6. BLASCO, J.; *et al.* 2000. **Heavy metal fluxes at the sediment-interface of three coastal ecosystems from south-west of the Iberian Peninsula**. The Science of Total Environment. Vol. 247, pp. 189-199.
7. BODEK, I. 1988. **Environmental Inorganic Chemistry**. P Press. U.S.A., pp. 6.8-1 – 6.8-9, 7.8-1 – 7.8-9 y 7.15-1 – 7.15-11.
8. BORDAS, F. Y A. C. M. Bourg. 1998. **A critical evaluation of sample pretreatment for storage of contaminated sediments to be investigated for the potential movility of their heavy metal load**. Water, air and soil pollution. Vol. 103, No. 1-4. Kluwer Academic Press, The Netherlands. pp. 137-149.
9. BURGESS, R. M. & J. Scott. 1992. **The significance of In- place contaminated marine sediments on the water column: process and effects**. En sediment toxicity assessment. Edited by G. Allen Burton Jr. . Lewis Publishers. Boca Raton Florida, pp. 129-165.

10. CÁRDENAS V., J. 2002. **Análisis Geológico-Minero Carta San Luis Potosí F14-4 Escala 1:250 000**. Boletín Técnico del COREMI. Consejo de Recursos Minerales. Año VIII, No. 46, México, D.F.; pp. 19-38.
11. CASTRO De Dios, M. 2002. **Caracterización químico mineralógica de los sedimentos de los ríos Taxco y Cacalotenango en la región minera de Taxco, Gro., como una guía para evaluar los mecanismos de dispersión de desechos mineros**. Tesis de licenciatura (Ing. Geólogo), U. A. de Guerrero. Taxco el Viejo, Gro. 80 p.
12. COREMI. 1999. **Monografía Geológico-Minera del Estado de Guerrero**. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Coordinación general de minería. Consejo de Recursos Minerales. 1ª ed. México, D.F.; pp. 180-185.
13. CSERNA, Z. y C. Fries. **Resumen de la Geología de la Hoja Taxco, Estados de Guerrero, México y Morelos**. Carta geológica de México. Instituto de Geología, U. N. A. M., pp. 37-38.
14. DOUGLAS, W. L. y D. McConchie. 1994. **Practical Sedimentology**. Chapman & Hall. N. Y., U.S.A. pp. 115.
15. ELSOKKARY, I. H. 1992. **Trace metals in sediments and waters: case study from Egypt in Impact of the heavy metals on the environment**. Edited by J. P. Vernet. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands. pp. 355-369.
16. FERGUSSON, J. E. 1990. **The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects**. Pergamon Press. Oxford, England, pp. 57-63, 143-166, 243-327.
17. FÖRSTNER, U. 1993. **Metal speciation – general concepts and applications**. Intern. J. Environ. Anal. Chem. Vol. 51. pp. 5-23.
18. GONZÁLEZ A., A., *et al.* 2000. **Análisis Económico de la Carta Zacatecas Clave F13-6 Escala 1:250 000**. Boletín Técnico del COREMI. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Consejo de Recursos Minerales. Año VII, No. 37, México, D.F.; pp. 11-27.
19. I.N.E.G.I. 1999. **Anuario estadístico del Estado de Guerrero ed. 1999**. I.N.E.G.I. Aguascalientes, Ags. México. pp. 16-18

20. I.N.E.G.I. 2001. **Carta topográfica Taxco E14A68**. 1:50 000. 2ª impresión.
21. IZQUIERDO, C., *et al.* 1997. **Speciation of heavy metals in sediments from salt marshes on the southern atlantic coast of Spain**. Marine pollution bulletin. Vol. 34, No. 2, pp. 123-128.
22. KABATA-PENDLAS, A. & H. Pendlas. 1992. **Trace elements in soils and plants**. 2nd ed. CRC Press. Boca Ratón, pp. 23-88, 120-125, 187-198 y 271-274.
23. KLOKE A. 1982. **Re-use of sludges and treated wastewater in agriculture**. Water Science and technology. Vol. 14, pp. 61-72.
24. LOEPPERT, R.H. y D.L. Suarez. 1996. **Carbonate and gypsum** en *Methods of soil analysis*, D. L. Sparks (editor). Soil Science Society of America & American Society of Agronomy. Madison, Wi, U.S.A. pp. 437-474.
25. MASKALL, J. E. e I. Thornton. 1998. **Chemical partitioning of heavy metals in soils, clays and rocks at historical lead smelting sites**. Water, air and soil pollution, Vol. 108, pp. 391-409.
26. McMANUS J. 1995. **Grain size determination and interpretation**. En *Techniques in Sedimentology*. Editado por Maurice Tucker. Blackwell Science. Cambridge, MD. pp. 63-85.
27. MOSES, M. O.; *et al.* 1987. **Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and ferric iron**. *Geochimica et Cosmochimica acta*. Vol. 51, pp. 1561-1571.
28. NELSON, D. W. Y D. W. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. En *Methods of soil analysis*, D. L. Sparks (editor). Soil Science Society of America & American Society of Agronomy. U.S.A. pp. 961-1010.
29. NIREL, P. M. V. And F. M. M. Morel. 1990. **Pitfalls of sequential extractions**. Technical note. Water Research. Vol. 24, No. 8, pp. 1055-1056.
30. PÉREZ M., Isabel. (2002). **Características químicas y mineralógicas de los jales de la mina Guerrero en Taxco, Guerrero**. Tesis de licenciatura (Ing. Geólogo), Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. México, D.F. 50p.
31. PERKIN ELMER. 1996. **Analytical methods: Atomic Absorption Spectroscopy**. Perkin Elmer. U.S.A., pp. 73, 96 y 125.

32. POTTS, P. J. 1992. **Handbook of silicate rock analysis**. Blackie & Son Ltd. Glasgow. 622p.
33. RAMSEY M. y Potts P. **Sampling and Analysis of Contaminated Land**. Imperial College. Curso 2002, Inglaterra.
34. POWER, E. A. y P. M. Chapman. 1992. **Assessing sediment quality**. En Sediment Toxicity assessment. Lewis Publishers Inc. U.S.A. pp. 1-6.
35. QUEVAUVILLER, *et al.* 1993. **Single and sequential extraction in sediments and soils. Conclusions of the workshop**. Intern. J. Environ. Anal. Chem. Vol. 51. pp. 231-235.
36. ROSALES-Hoz L. y A. Carranza-Edwards. 1998. **Heavy metals in sediments from Coatzacoalcos river, México**. Bull. Environmental Contamination & Toxicology. Vol. 60, pp. 553-561.
37. RUBIO R. & A. M. Ure. 1993. **Approaches to sampling and sample pretreatments for metal speciation in soils and sediments**. Intern. J. Environ. Anal. Chem. Vol. 51. pp. 205-217.
38. SAHEURS, J. G., *et al.* 1993. Sample preparation. En **Analysis of geological materials**. Edited by Chris Riddle. Marcel Dekker Inc., New York, pp.65-123.
39. SALOMONS, W. y U. Förstner. 1984. **Metals in the Hydrocycle**. Springer-Verlag. Berlín, Germany, pp.80-81.
40. SIMS, D. L. y Morgan H. 1988. Sci. Total Environ. Vol. 75, pp. 1.
41. SINGH, A. K., *et al.* 1999. **Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodart River a tributary of the lower Ganga, India**. Environmental Geology. Vol. 39, No. 1. pp. 90-98.
42. SKOOG, D. A. & J. J. Leary. 1994. **Análisis instrumental**. 4ª edición. McGraw Hill/Interamericana. Madrid, España, pp. 228-260.
43. TALAVERA Mendoza, O., *et al.* (2001). **Impacto ambiental de los metales pesados en la región minera de Taxco, Guerrero, México**. XI Congreso Latinoamericano de Geología, Montevideo Uruguay, 23-27 de noviembre.

44. TESSIER, A., *et al.* 1979. **Secuential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals.** Analytical Chemistry, Vol. 51, No. 7. American Chemical Society, U. S. A., pp. 844-851.
45. TESSIER, A., *et al.* 1982. **Particulate trace metal speciation in stream sediments and relationships with grain size: implications for geochemical exploration.** Journal of Geochemical Exploration. Vol. 16, pp. 77-104.
46. TESSIER, A., *et al.* 1985. **Trace metals in oxic lake sediments: posible adsorption onto iron hydroxides.** Geochimica et Cosmochimica acta. Vol. 49, pp. 183-194.
47. URE, A. M., *et al.* 1993. **Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities.** Intern. J. Environ. Anal. Chem. Vol. 51. pp. 135-151.
48. U.S.E.P.A., 1995. **Profile of the Metal Mining Industry.** E.P.A. Office of Compliance Sector. Notebook project. Washington, pp. 16-54.
49. URL: <http://www.smn.cna.gob.mx/productos/normales/precme.html>
(consultados el día 26-IX-2001 a las 13:35h)
50. VISHER, G. S. 1969. **Grain size distributions and depositional process.** Journal of Sedimentary Petrology. Vol. 39. No. 3, pp. 1074-1106.

ANEXOS

CONDICIONES GENERALES DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

| Tabla 22. Descripción de la muestra y punto de muestreo | | | | |
|---|-------|--------|-------------|---|
| Muestra | Color | Olor | Humedad (%) | Observaciones |
| MT11 | N | Normal | >100% | Comprende material arrastrado desde la mina Guerrero y un escurrimiento desde los jales, predominan los sedimentos finos (arenas, limos y arcillas) |
| MT12 | N | Normal | >100% | Predominan los sedimentos de grano fino, poca cantidad de gravas |
| MT13 | N | Normal | >100% | Cerca se presenta un segundo escurrimiento de agua desde los jales |
| MT14 | N | Normal | >100% | Afloramiento de carbonatos cercano |
| MT15 | N | Normal | >100% | Afloramiento de carbonatos cercano |
| MT16 | N | Normal | >90% | Afloramiento de carbonatos cercano |
| MT17 | N | Normal | >90% | Mayor cantidad de gravas mezcladas con el sedimento en ciertas zonas |
| MT21 | N | Normal | >100% | Comprende material arrastrado desde la mina Guerrero y un escurrimiento desde los jales, predominan los sedimentos finos (arenas, limos y arcillas) |
| MT22 | N | Normal | >100% | Presencia masiva de fragmentos minerales silicatados (brillantes) |
| MT23 | NCO | Normal | >100% | Presenta escurrimiento de agua desde los jales |
| MT24 | NCO | Normal | >100% | Afloramiento de carbonatos cercano. La profundidad del banco en ciertas partes llegaba hasta 25 cm |
| MT25 | NCO | Normal | >100% | Afloramiento de carbonatos cercano |
| MT26 | NCO | Normal | >100% | Afloramiento de carbonatos cercano |
| MT27 | NCO | Normal | >100% | Sedimento más compacto. Se presenta aglomeración de gravas por debajo de 3 cm de la superficie |

Color: Negro (N) y Negro-Café oscuro (NCO).

Olor: Normal = similar a tierra húmeda, Anormal = Olor a sulfhídrico (descomposición).

Humedad > 90% = Saturado.

Humedad > 100% = Sobresaturado.

Otras observaciones: Las muestras se tomaron de trayectos casi lineares del río. Se evitó la presencia de pequeñas caídas de agua (≈ 20 cm) previas al sitio de muestreo. En caso de encontrar rocas grandes o restos de hojas y plantas, se eliminaron manualmente.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

TABLAS DE CONCENTRACIONES PARA METALES TOTALES Y ESPECIACIÓN

Tabla 23. Concentración promedio (mg/Kg) de metales totales en los sedimentos

| Muestra | Conc. Zinc | Conc. Hierro | Conc. Plomo |
|--------------------|--------------|----------------|-------------|
| MT11 | 5437 ± 115 | 175170 ± 3074 | 716 ± 39 |
| MT12 | 5738 ± 52 | 185024 ± 5440 | 885 ± 90 |
| MT13 | 5313 ± 113 | 177420 ± 6830 | 762 ± 37 |
| MT14 | 8392 ± 166 | 189083 ± 492 | 1060 ± 8 |
| MT15 | 8442 ± 131 | 169182 ± 1911 | 1434 ± 165 |
| MT16 | 9989 ± 5 | 178143 ± 11684 | 2151 ± 58 |
| MT17 | 15276 ± 39 | 166748 ± 9053 | 1152 ± 164 |
| MT21 | 26128 ± 280 | 141239 ± 14979 | 3351 ± 56 |
| MT22 | 33500 ± 588 | 150057 ± 330 | 5279 ± 480 |
| MT23 | 22547 ± 171 | 142325 ± 3814 | 2850 ± 104 |
| MT24 | 19312 ± 783 | 155583 ± 3782 | 1685 ± 122 |
| MT25 | 27565 ± 1005 | 168299 ± 1817 | 2930 ± 18 |
| MT26 | 19117 ± 729 | 137610 ± 7861 | 1673 ± 147 |
| MT27 | 28525 ± 1138 | 157540 ± 2984 | 2711 ± 78 |
| Promedio General | 16806 | 163816 | 2046 |
| Máximo General | 33500 | 189083 | 5279 |
| Mínimo General | 5313 | 137610 | 716 |
| Promedio MT11-MT17 | 8370 | 177253 | 1166 |
| Máximo MT11-MT17 | 15276 | 189083 | 2151 |
| Mínimo MT11-MT17 | 5313 | 166748 | 716 |
| Promedio MT21-MT27 | 25242 | 150379 | 2926 |
| Máximo MT21-MT27 | 33500 | 168299 | 5279 |
| Mínimo MT21-MT27 | 19117 | 137610 | 1673 |

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 24. Concentración de zinc (mg / kg) en cinco fases geoquímicas de sedimento

| Muestra | FASES GEOQUÍMICAS / % | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------------|-----|-------------|------|------------|------|--------------|------|-------------|------|-------|----------|----------|
| | Interc. | % | Carbonatos | % | (Fe-Mn)Ox | % | M. O. /S' | % | Residual | % | Suma | Zn Total | Dif. (%) |
| MT11 | 5.5 ± 0.4 | 0.1 | 595 ± 42.8 | 14 | 2328 ± 13 | 52.9 | 1142 ± 119 | 26 | 306 ± 49 | 7 | 4776 | 5436 | 12.4 |
| MT12 | 9 ± 0.1 | 0.2 | 350 ± 46 | 6 | 1941 ± 74 | 33.8 | 2190 ± 114 | 38 | 1311 ± 94 | 22 | 5802 | 5737 | -1.12 |
| MT13 | 9 ± 1.1 | 0.2 | 308 ± 16 | 6 | 1954 ± 59 | 35.8 | 2128 ± 102 | 38 | 1128 ± 104 | 20 | 5527 | 5312 | -4.03 |
| MT14 | 6 ± 0.1 | 0.1 | 3320 ± 74 | 42 | 1324 ± 108 | 16.9 | 2021 ± 62 | 26 | 1228 ± 145 | 15 | 7897 | 8392 | 5.9 |
| MT15 | 6 ± 0.5 | 0.1 | 4110 ± 359 | 41 | 2530 ± 147 | 25.9 | 2192 ± 268 | 22 | 1185 ± 17 | 11 | 6734 | 10022 | -18.7 |
| MT16 | 11 ± 0.8 | 0.1 | 4830 ± 67 | 49 | 2126 ± 314 | 21.9 | 1619 ± 308 | 17 | 1227 ± 616 | 12 | 9812 | 9989 | 1.77 |
| MT17 | 6 ± 0.8 | 0.1 | 6874 ± 420 | 60 | 1590 ± 13 | 13.9 | 1615 ± 74 | 14 | 1384 ± 55 | 12 | 11469 | 15275 | 24.9 |
| PROM | 7 | 0.1 | 2912 | 37 | 1970 | 25 | 1844 | 24 | 1099 | 14 | | | |
| MT21 | 99 ± 4 | 0.4 | 3945 ± 36 | 15.4 | 1461 ± 102 | 5.7 | 9584 ± 559 | 37.5 | 10472 ± 524 | 41 | 24591 | 26128 | 14 |
| MT22 | 65 ± 5 | 0.2 | 11093 ± 696 | 34.5 | 3450 ± 167 | 10.7 | 8019 ± 534 | 24.9 | 9540 ± 389 | 29.7 | 32166 | 33500 | -0.5 |
| MT23 | 44 ± 2 | 0.2 | 7301 ± 102 | 29.6 | 1965 ± 52 | 8 | 14568 ± 1114 | 59 | 815 ± 58 | 3.3 | 24693 | 22547 | -9.5 |
| MT24 | 35 ± 2 | 0.2 | 3825 ± 174 | 20.2 | 5139 ± 879 | 27.2 | 6958 ± 756 | 36.8 | 2932 ± 1349 | 15.5 | 18889 | 19312 | 2.2 |
| MT25 | 41 ± 2 | 0.2 | 3990 ± 169 | 10.9 | 5299 ± 346 | 19.7 | 12469 ± 281 | 46.3 | 5152 ± 350 | 19.1 | 6551 | 27566 | 2.2 |
| MT26 | 36 ± 0.4 | 0.2 | 4172 ± 415 | 18 | 5241 ± 378 | 22.6 | 10858 ± 438 | 46.8 | 2915 ± 174 | 12.6 | 23223 | 15294 | -20.25 |
| MT27 | 41 ± 1 | 0.1 | 10821 ± 566 | 34.1 | 4876 ± 48 | 15.4 | 14566 ± 246 | 45.9 | 1429 ± 148 | 4.5 | 31733 | 28525 | -11.2 |
| PROM | 52 | 0.2 | 6449 | 25 | 3919 | 15 | 11003 | 42 | 4751 | 18 | | | |

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 25. Concentración de plomo (mg/ Kg) en cinco fases geoquímicas de sedimento

| Muestra | FASES GEOQUÍMICAS / % | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------------|---|------------|----|------------|----|-----------|----|------------|----|------|----------|----------|
| | Interc. | % | Carbonatos | % | (Fe-Mn)Ox | % | M. O. /S | % | Residual | % | Suma | Pb Total | Dif. (%) |
| MT11 | N.D. | 0 | 35 ± 3.2 | 5 | 586 ± 14 | 79 | N.D. | 0 | 123 ± 7 | 16 | 751 | 716 | -4.84 |
| MT12 | N.D. | 0 | 23 ± 3.6 | 2 | 772 ± 3 | 82 | N.D. | 0 | 135 ± 5 | 16 | 961 | 885 | -8.54 |
| MT13 | N.D. | 0 | 17 ± 1.7 | 2 | 752 ± 16 | 78 | N.D. | 0 | 198 ± 8 | 20 | 977 | 762 | -28.33 |
| MT14 | N.D. | 0 | 300 ± 5.7 | 28 | 408 ± 43 | 38 | N.D. | 0 | 372 ± 33 | 34 | 1081 | 1060 | -1.95 |
| MT15 | N.D. | 0 | 22 ± 1.02 | 1 | 897 ± 16 | 62 | N.D. | 0 | 537 ± 45 | 37 | 1459 | 1434 | -1.67 |
| MT16 | N.D. | 0 | 330 ± 24 | 16 | 571 ± 32 | 28 | N.D. | 0 | 1170 ± 149 | 56 | 2072 | 2151 | 3.71 |
| MT17 | N.D. | 0 | 305 ± 25 | 12 | 341 ± 11 | 25 | N.D. | 0 | 699 ± 38 | 52 | 1345 | 1153 | -17 |
| PROM. | N.D. | 0 | 150 | 12 | 618 | 49 | N.D. | 0 | 1263 | 42 | | | |
| MT21 | N.D. | 0 | 685 ± 23 | 20 | 2198 ± 95 | 63 | 21 ± 3 | 1 | 551 ± 34 | 16 | 3455 | 3351 | -3 |
| MT22 | N.D. | 0 | 736 ± 33 | 16 | 2385 ± 128 | 51 | 374 ± 22 | 8 | 1174 ± 173 | 25 | 4670 | 5279 | 11.5 |
| MT23 | N.D. | 0 | 305 ± 1.8 | 9 | 2081 ± 16 | 61 | 660 ± 1.8 | 19 | 364 ± 1.76 | 11 | 3410 | 2850 | -28.33 |
| MT24 | N.D. | 0 | 127 ± 9 | 6 | 1305 ± 240 | 66 | N.D. | 0 | 553 ± 35 | 28 | 1985 | 1685 | -18 |
| MT25 | N.D. | 0 | 181 ± 8.5 | 6 | 1803 ± 112 | 60 | N.D. | 0 | 1043 ± 37 | 34 | 3027 | 2930 | -3.68 |
| MT26 | N.D. | 0 | 172 ± 31 | 9 | 1156 ± 65 | 60 | N.D. | 0 | 587 ± 29 | 31 | 1915 | 1673 | -14.8 |
| MT27 | N.D. | 0 | 465 ± 47 | 18 | 1378 ± 50 | 54 | 446 ± 8 | 18 | 259 ± 17 | 10 | 2548 | 2711 | 14 |
| PROM. | N.D. | 0 | 381 | 13 | 1758 | 59 | 215 | 7 | 647 | 22 | | | |

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 26. Concentración de hierro (mg / Kg)³³ en cinco fases geoquímicas de sedimento

| Muestra | .FASES GEOQUÍMICAS / % | | | | | | | | | | | | |
|---------|------------------------|---|-------------|-------|--------------|------|--------------|------|-------------------|------|--------|----------|----------|
| | Interc. | % | Carbonatos | % | (Fe-Mn)Ox | % | M. O. /S' | % | Residual | % | Suma | Fe Total | Dif. (%) |
| MT11 | N.D. | 0 | 14 ± 2 | 0.009 | 19261 ± 384 | 11 | 6074 ± 425 | 3.5 | 150125 ± 14520 | 85.6 | 175474 | 175170 | -0.17 |
| MT12 | N.D. | 0 | 18 ± 0.16 | 0.01 | 21510 ± 489 | 12.4 | 5781 ± 398 | 3.3 | 145565 ± 5592 | 84.2 | 172879 | 185024 | 6.56 |
| MT13 | N.D. | 0 | 17 ± 0.6 | 0.02 | 20743 ± 737 | 14.3 | 8497 ± 826 | 5.9 | 115327 ± 8259 | 79.8 | 144591 | 177421 | 18.5 |
| MT14 | N.D. | 0 | 2545 ± 299 | 1.7 | 26090 ± 813 | 17.9 | 8106 ± 342 | 5.5 | 109380 ± 15362 | 74.9 | 146122 | 189084 | 22.7 |
| MT15 | N.D. | 0 | 17 ± 3 | 0.01 | 20396 ± 1865 | 12.8 | 6914 ± 360 | 4.4 | 131482 ± 7499 | 82.8 | 160746 | 169183 | 4.99 |
| MT16 | N.D. | 0 | 6630 ± 669 | 4.1 | 25968 ± 2093 | 16.1 | 6486 ± 288 | 4.0 | 122522 ± 8641 | 75.8 | 161607 | 178143 | 9.28 |
| MT17 | N.D. | 0 | 8790 ± 1399 | 5.5 | 28423 ± 202 | 17.8 | 15038 ± 655 | 9.4 | 107376 ± 10849 | 67.3 | 159632 | 166748 | 4.27 |
| PROM. | N.D. | 0 | 2576 | 2 | 23199 | 15 | 8128 | 5 | 125968 | 78 | | | |
| MT21 | N.D. | 0 | 2047 ± 93 | 1.7 | 18275 ± 826 | 15.2 | 14408 ± 507 | 12 | 85125 ± 3023 | 71 | 119856 | 141239 | 15 |
| MT22 | N.D. | 0 | 8057 ± 469 | 5.1 | 31385 ± 814 | 19.8 | 13749 ± 477 | 8.7 | 105032 ± 13273 | 66.4 | 158223 | 150057 | -5 |
| MT23 | N.D. | 0 | 3754 ± 89 | 2.5 | 20699 ± 1170 | 13.7 | 63304 ± 2357 | 41.9 | 63382 ± 8834 | 41.9 | 151139 | 142324 | -6 |
| MT24 | N.D. | 0 | 36 ± 9 | 0.03 | 22305 ± 212 | 18.1 | 16208 ± 1588 | 13.1 | 84849 ± 9374 | 68.8 | 123398 | 155583 | 20.7 |
| MT25 | N.D. | 0 | 182 ± 5 | 0.1 | 20379 ± 2046 | 12 | 12663 ± 42 | 7.4 | 136789 ± 10288 | 80.5 | 170013 | 168299 | -1.02 |
| MT26 | N.D. | 0 | 199 ± 75 | 0.1 | 18147 ± 1626 | 12.5 | 12690 ± 1970 | 8.8 | 113770 ± 2849 | 78.6 | 144806 | 137610 | -5.2 |
| MT27 | N.D. | 0 | 2036 ± 82 | 1.2 | 28883 ± 1635 | 17 | 52980 ± 1527 | 31.2 | 85927 ± 6207 | 50.6 | 169826 | 157540 | -7.8 |
| PROM. | N.D. | 0 | 2330 | 2 | 22868 | 15 | 26572 | 18 | 96411 | 65 | | | |

³³ Para convertir de mg/Kg a % se divide entre 10 000 la cantidad deseada. En esta tabla se manejan así porque no en todas las fracciones se manejan cantidades tan altas.

FIGURAS DE SEDIMENTOLOGÍA

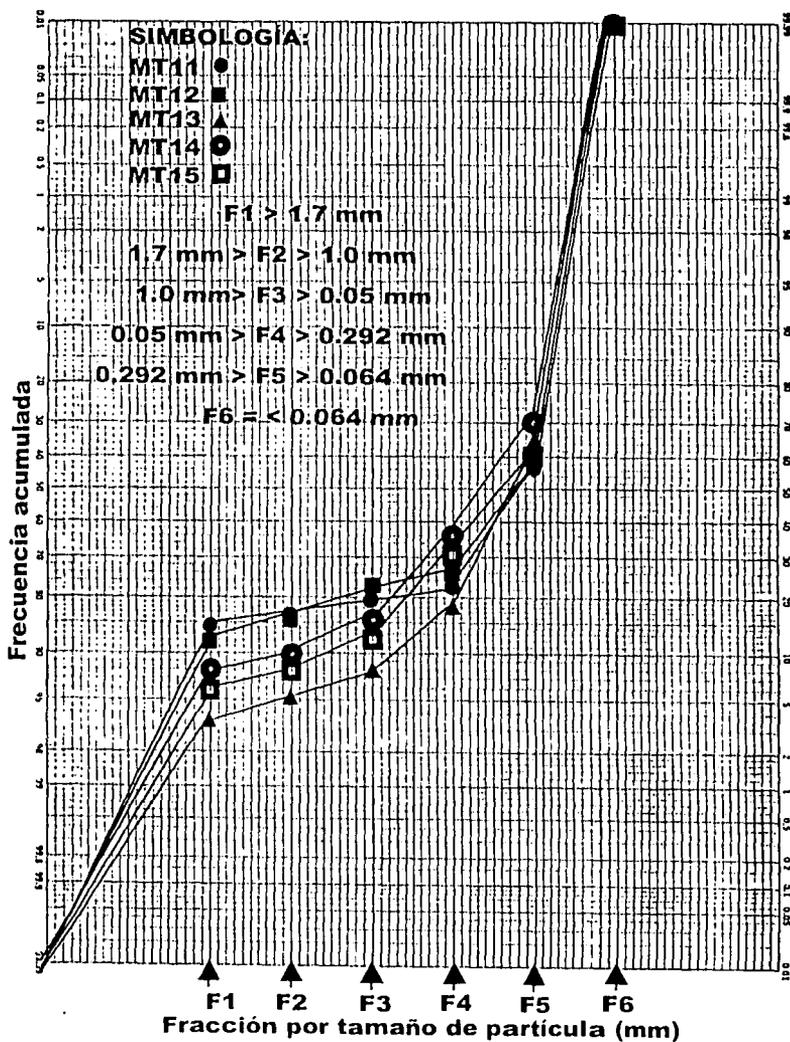


Figura 24. Modos de transporte de sedimentos de acuerdo a su tamaño de partícula según Visser (1969) muestras MT11-MT15

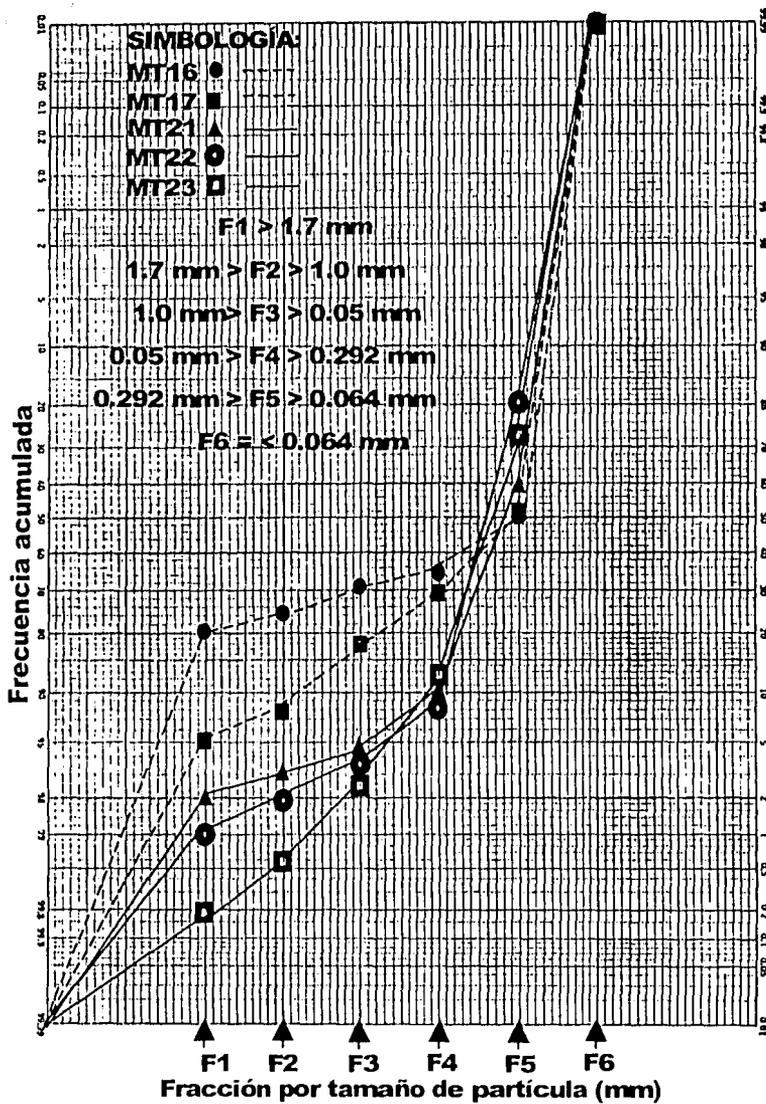


Figura 25. Modos de transporte de sedimentos de acuerdo a su tamaño de partícula según Visser (1969) muestras MT16-MT23

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

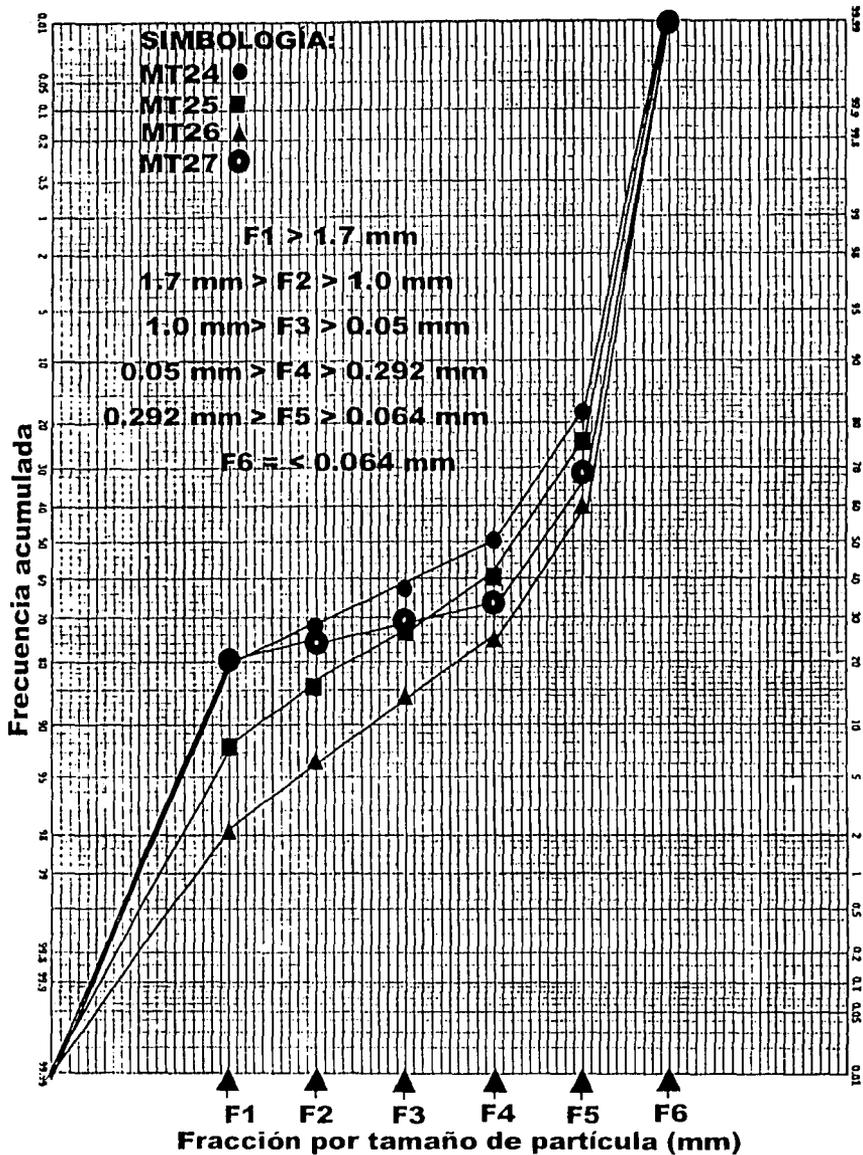
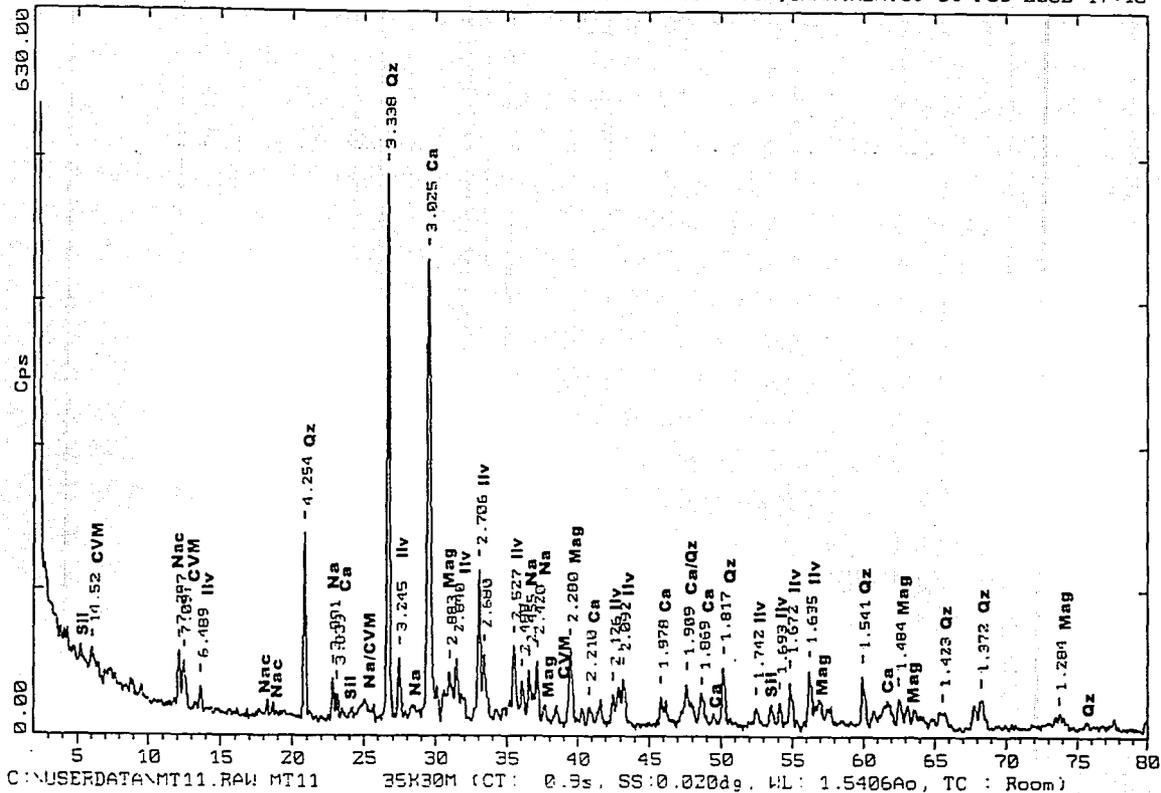


Figura 26. Modos de transporte de sedimentos de acuerdo a su tamaño de partícula según Visser (1969) muestras MT11-MT15

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



DIFRACTOGRAMAS

| | | | | | | |
|--------------|-----------------|------------------|----------------|--|--|--|
| Cuarzo (Qz) | Magnetita (Mag) | Nacaurita (Nac) | Ilvaita (Ilv) | Silhidrita (Si) | Clorita-Vermiculita-Montmorillonita o CVM | ÓXIDO DE CALCIO Y ALUMINIO (Ca ₃ Al ₂ O ₃) |
| Calcita (Ca) | Natrón (Na) | Zabuyelita (Zab) | Caolinita (Ka) | Sulfato de calcio (CaSO ₃) | Sulfato hidróxido de zinc tetra hidratado (SHZH) | |

Figura 27. Difractograma de la muestra MT11 (primer muestreo)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

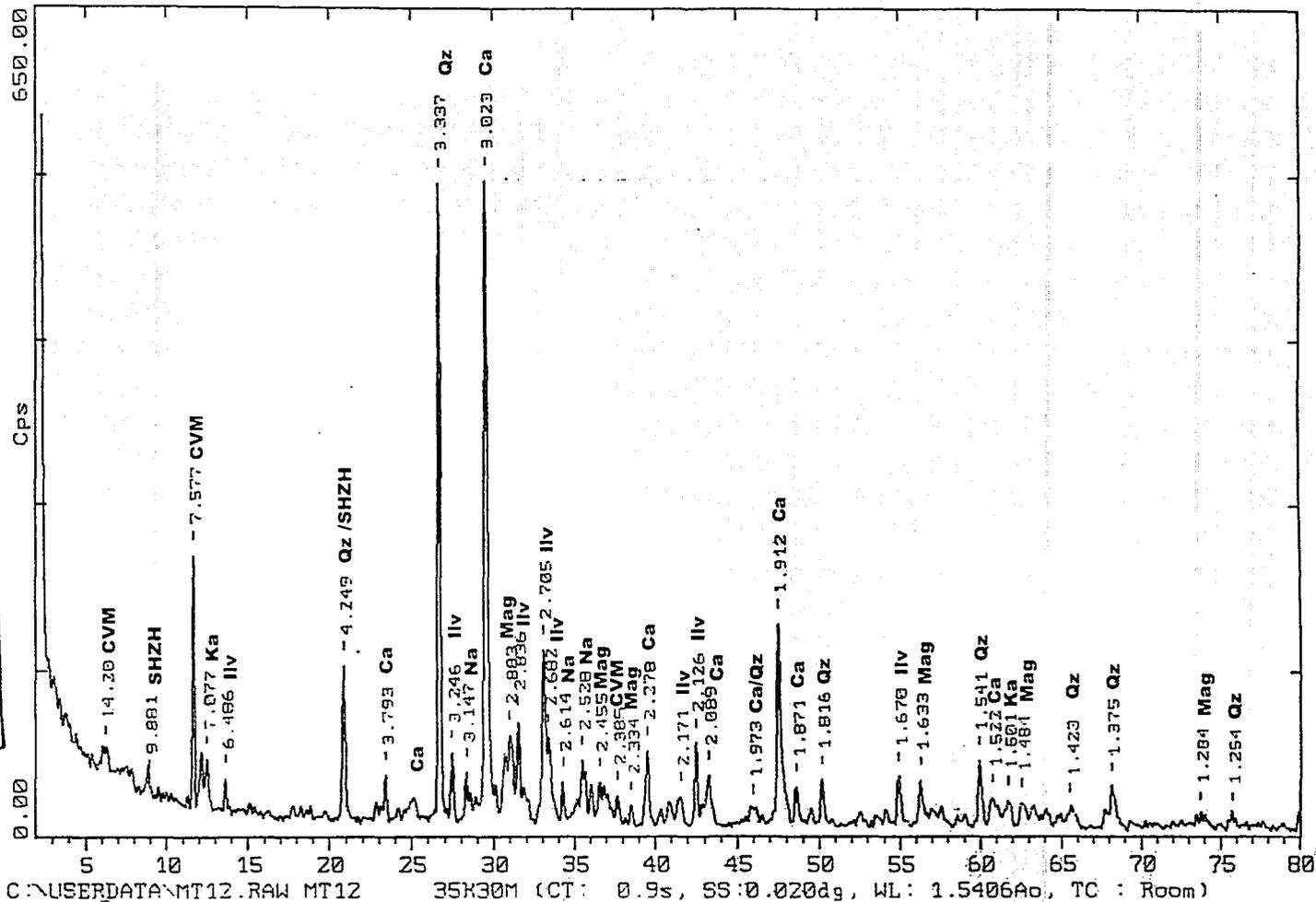


Figura 28. Difractograma de la muestra MT12

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

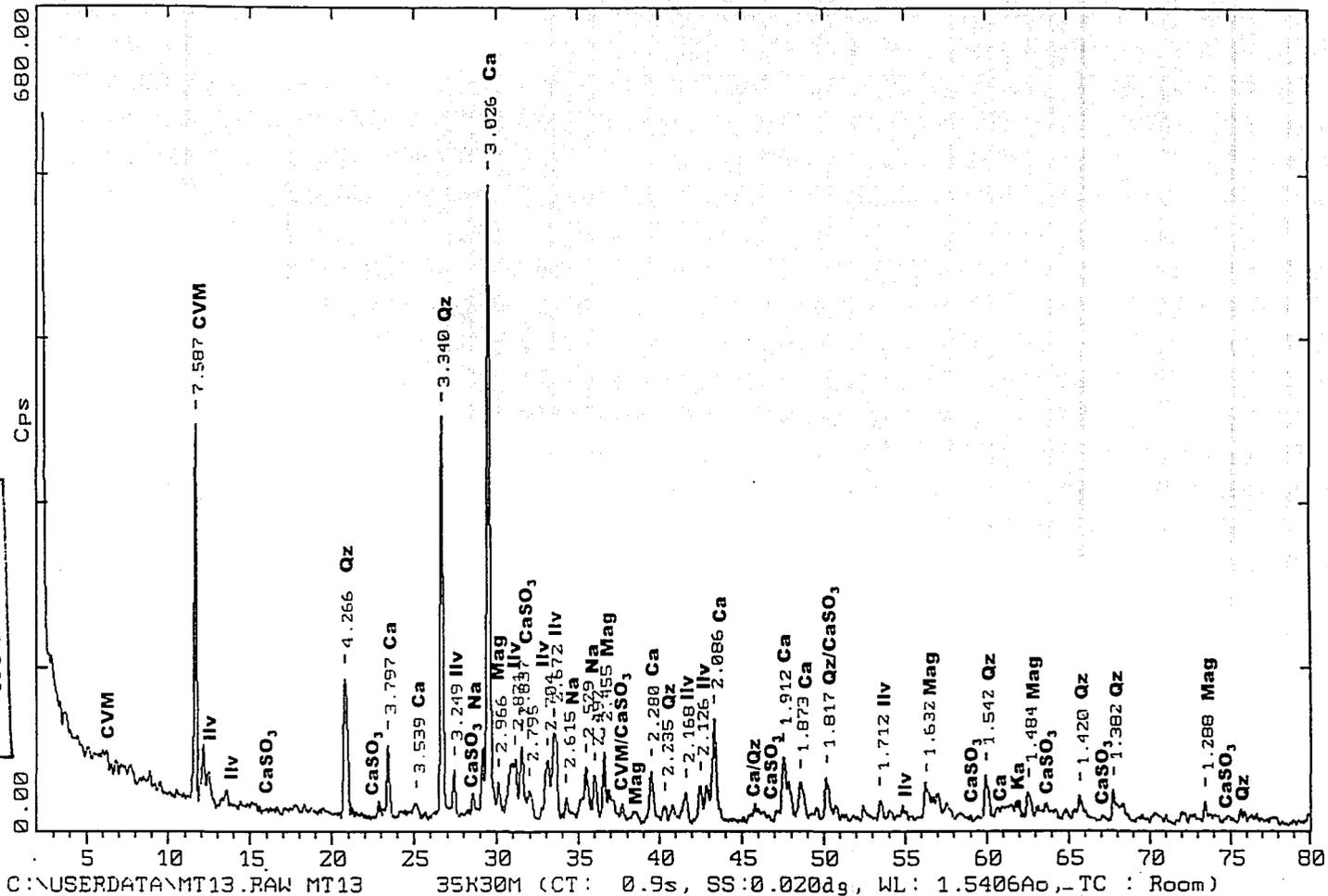


Figura 29. Difractograma de la muestra MT13

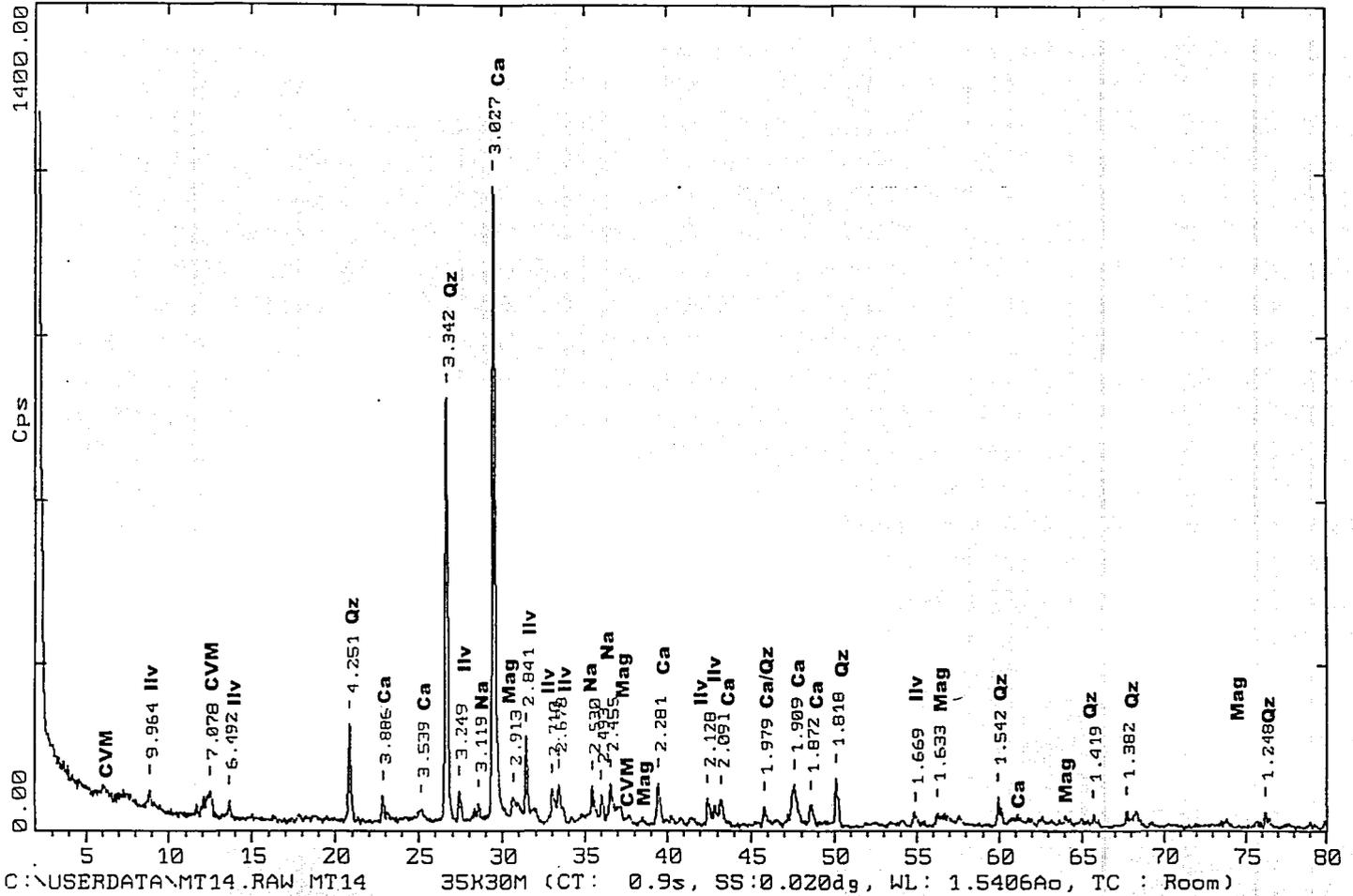
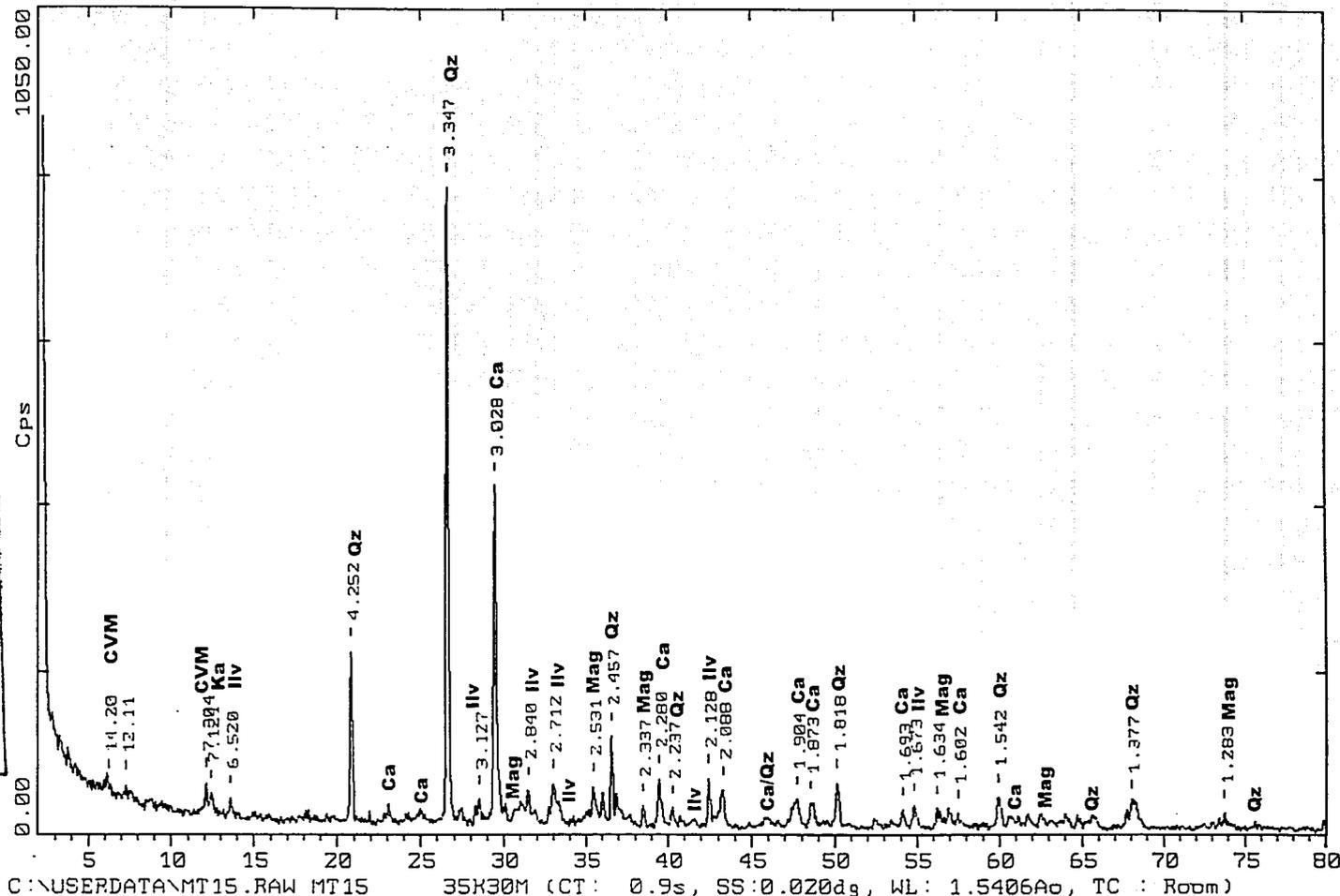


Figura 30. Difractograma de la muestra MT14

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



C:\USERDATA\MT15.RAW MT15

35K30M (CT: 0.9s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao, TC : Room)

Figura 31. Difractograma de la muestra MT15

Z-Theta - Scale

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM, MEXICO 01-Feb-2002 17:20

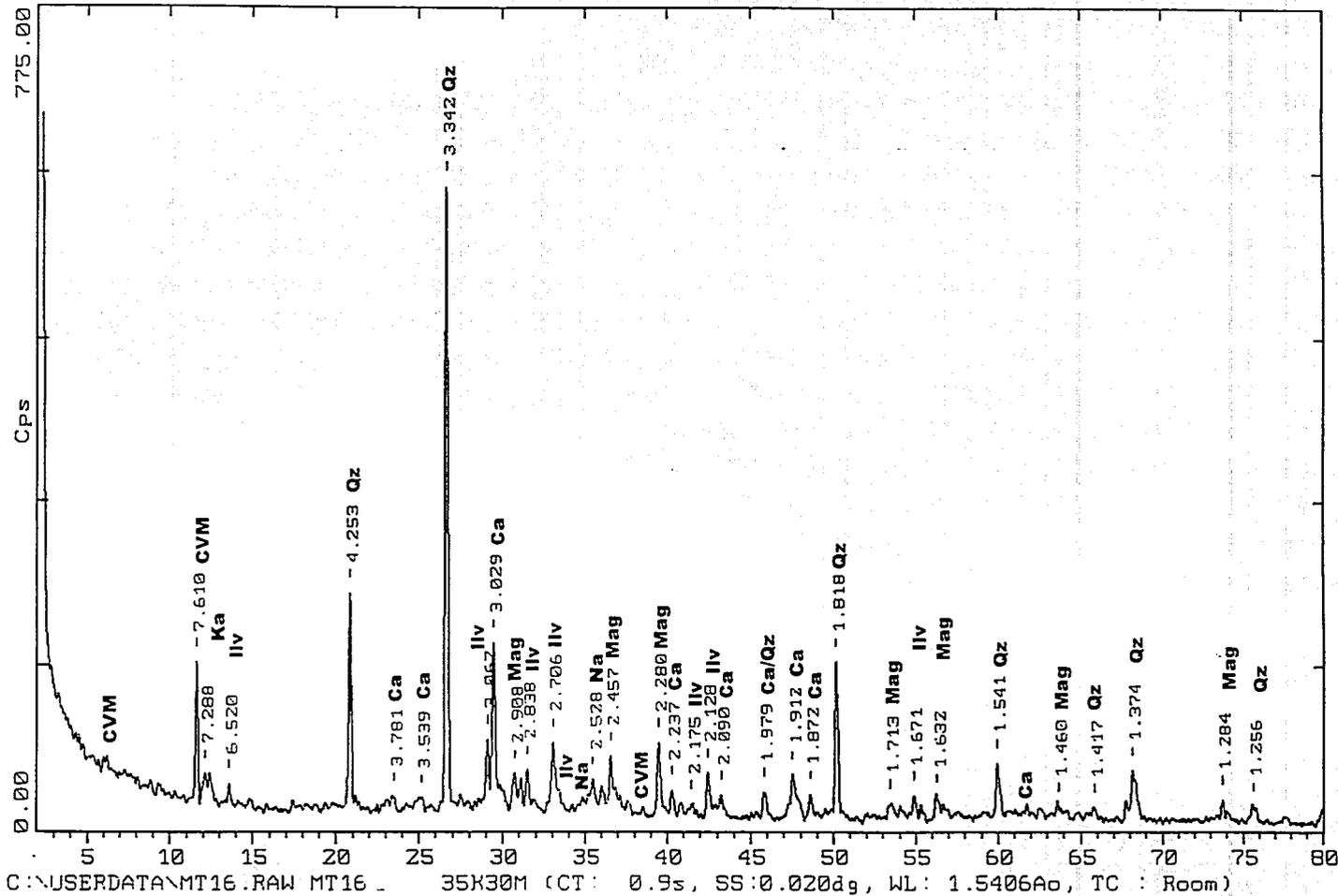


Figura 32. Difractograma de la muestra MT16

2-Theta - Scale

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM, MEXICO 07-Feb-2002 12:25

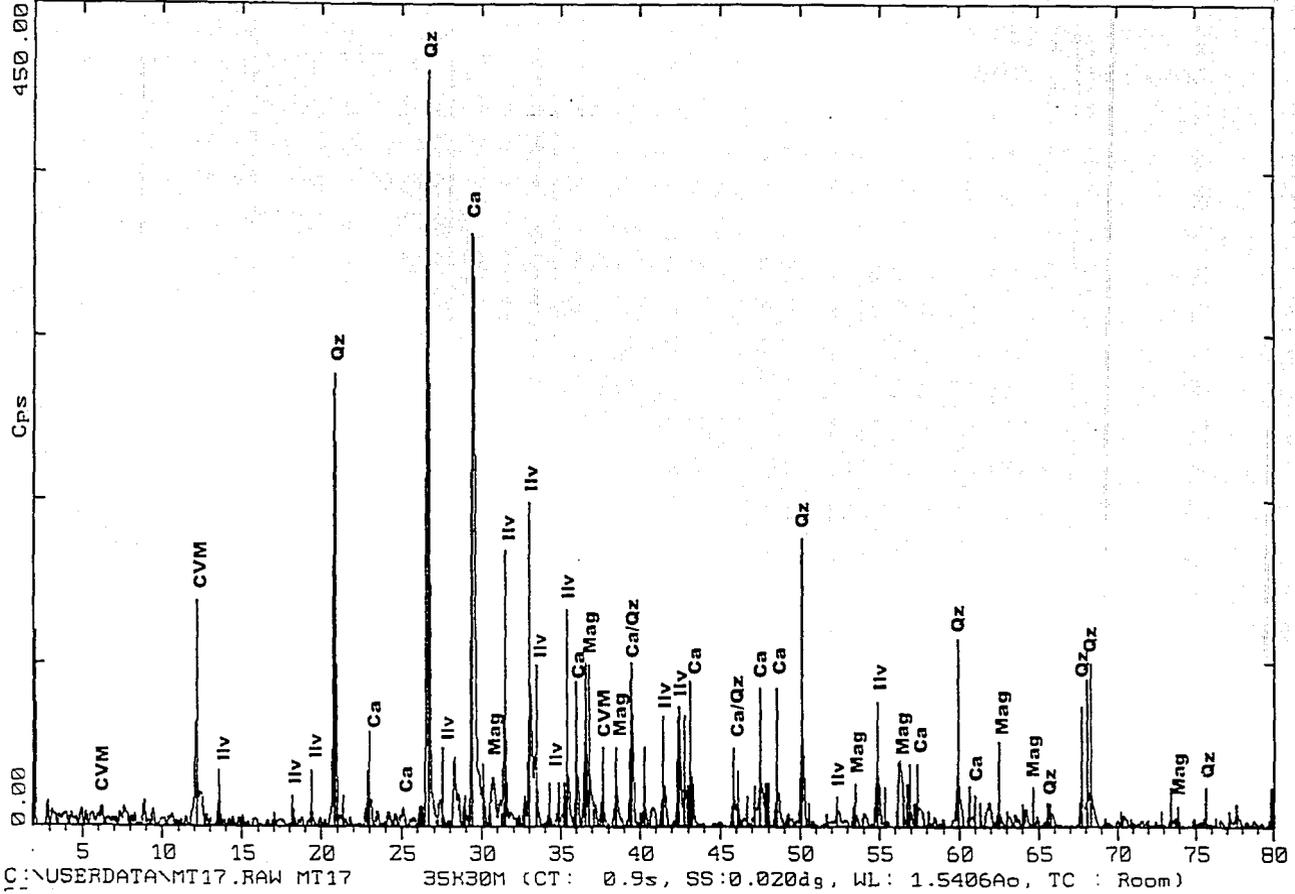


Figura 33. Difractograma de la muestra MT17

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

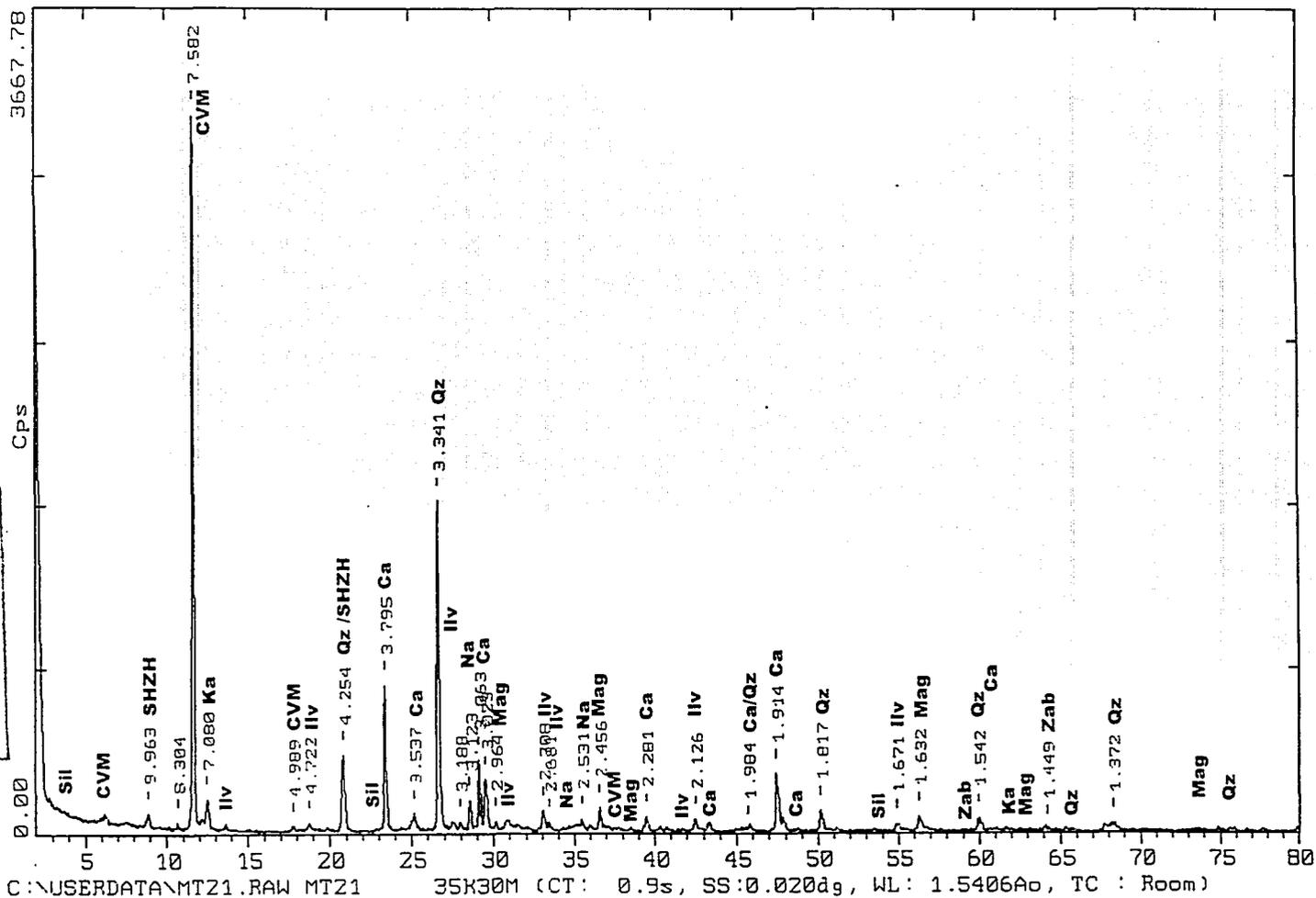


Figura 34. Difractograma de la muestra MT21 (segundo muestreo)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

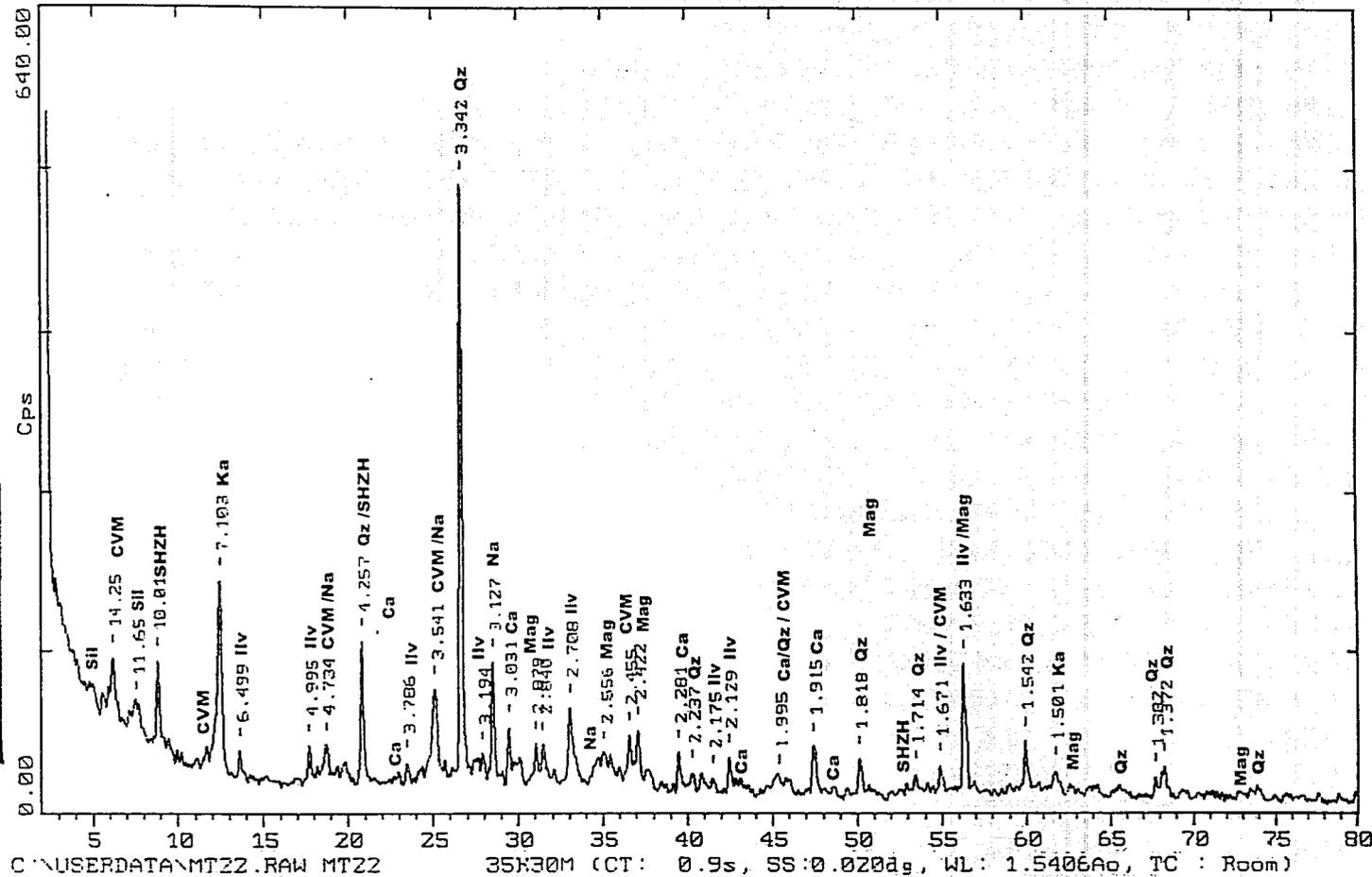


Figura 35. Difractograma de la muestra MT22

FALLA DE ORIGEN
TESIS CON

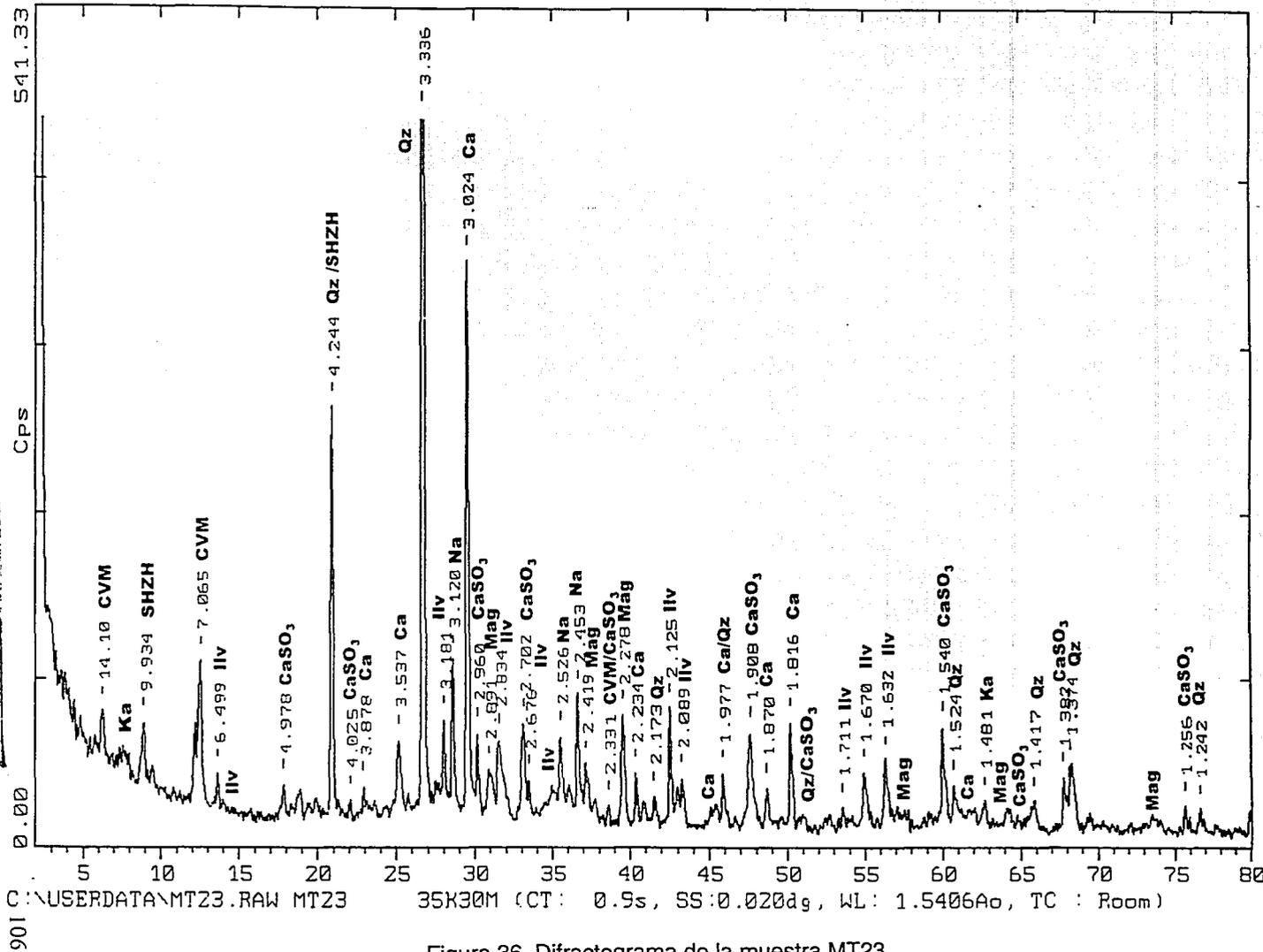


Figura 36. Difractograma de la muestra MT23

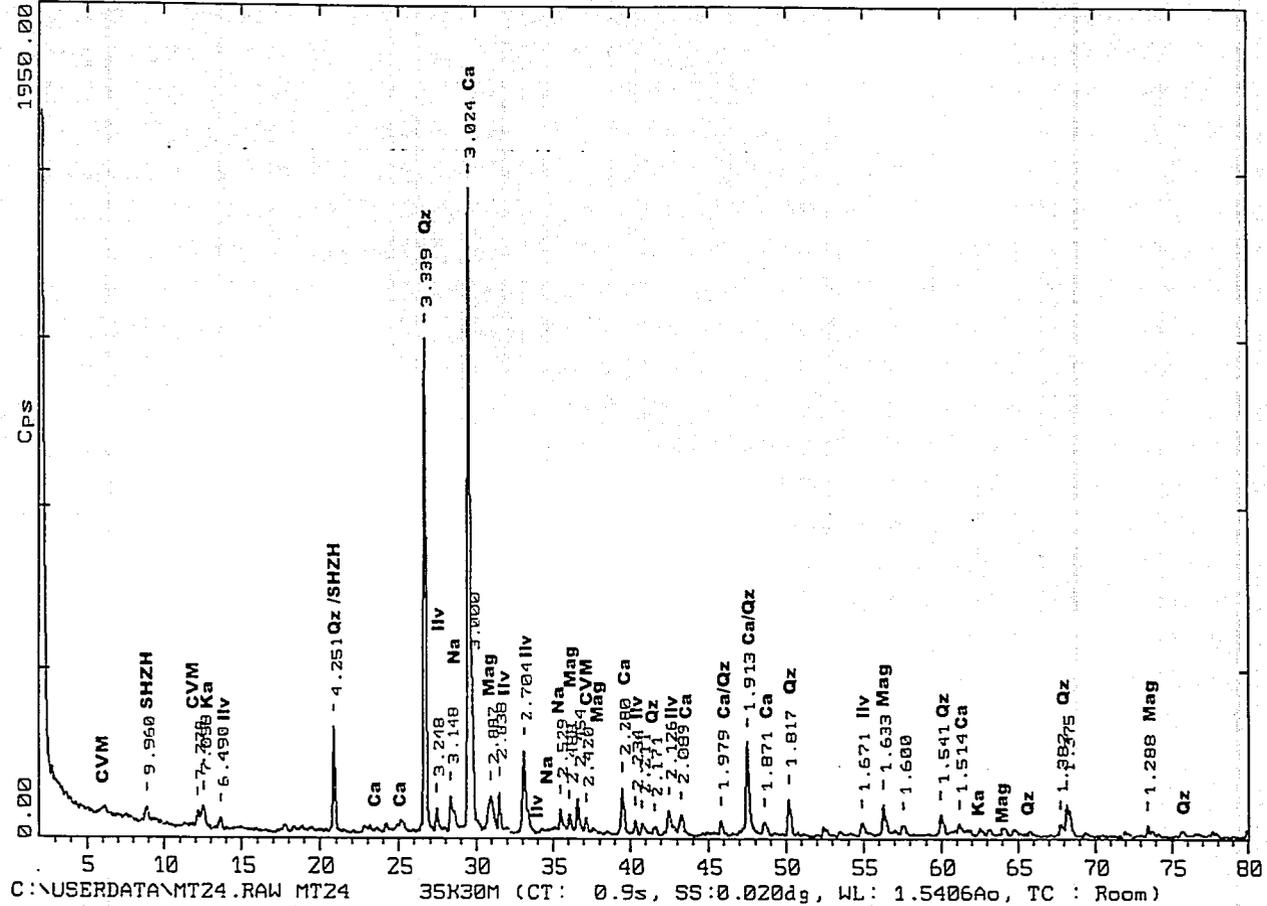
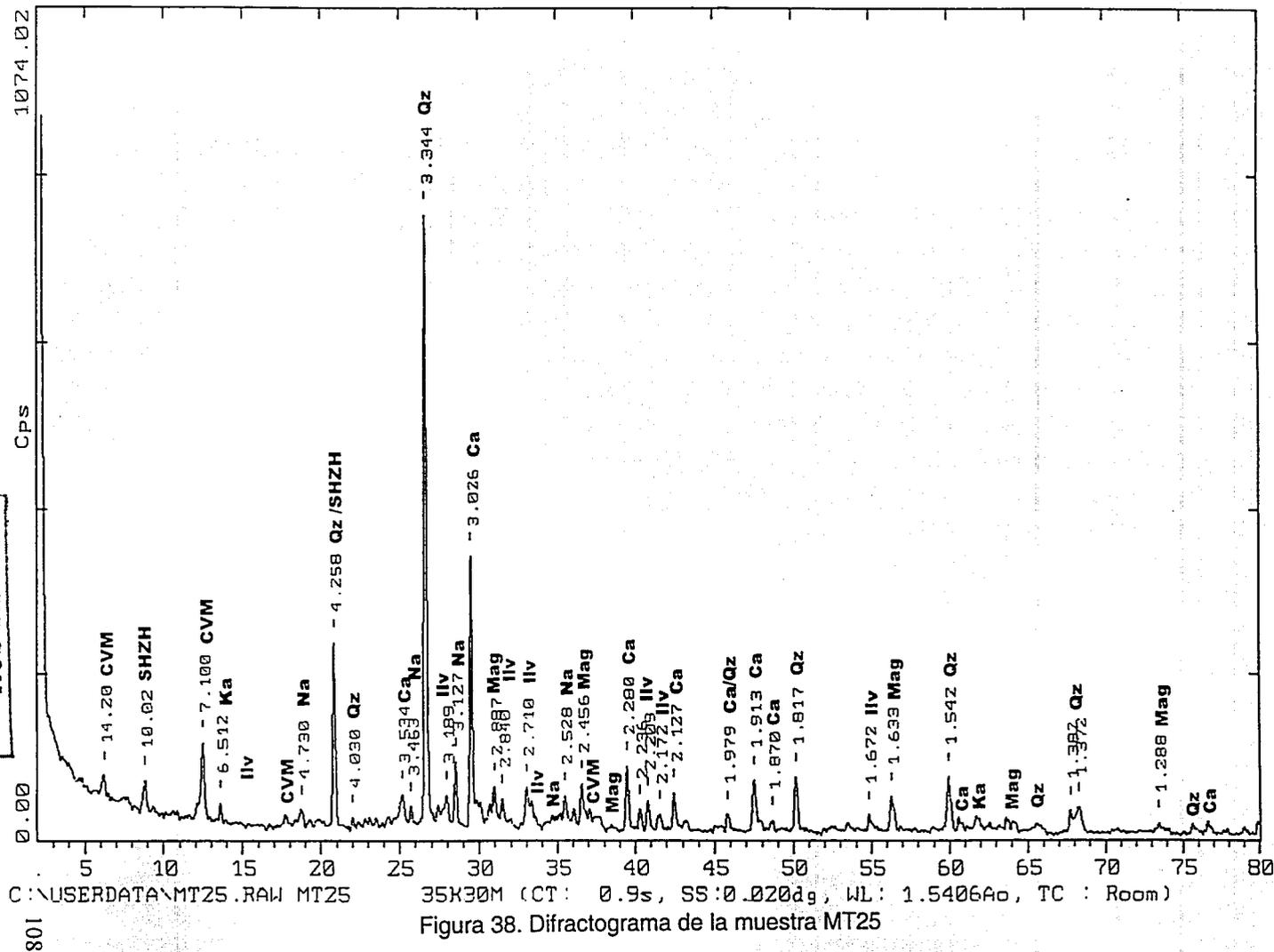


Figura 37. Difractograma de la muestra MT24

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN



C:\USERDATA\MT25.RAW MT25 35K30M (CT: 0.9s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao, TC : Room)

Figura 38. Difractograma de la muestra MT25

801

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

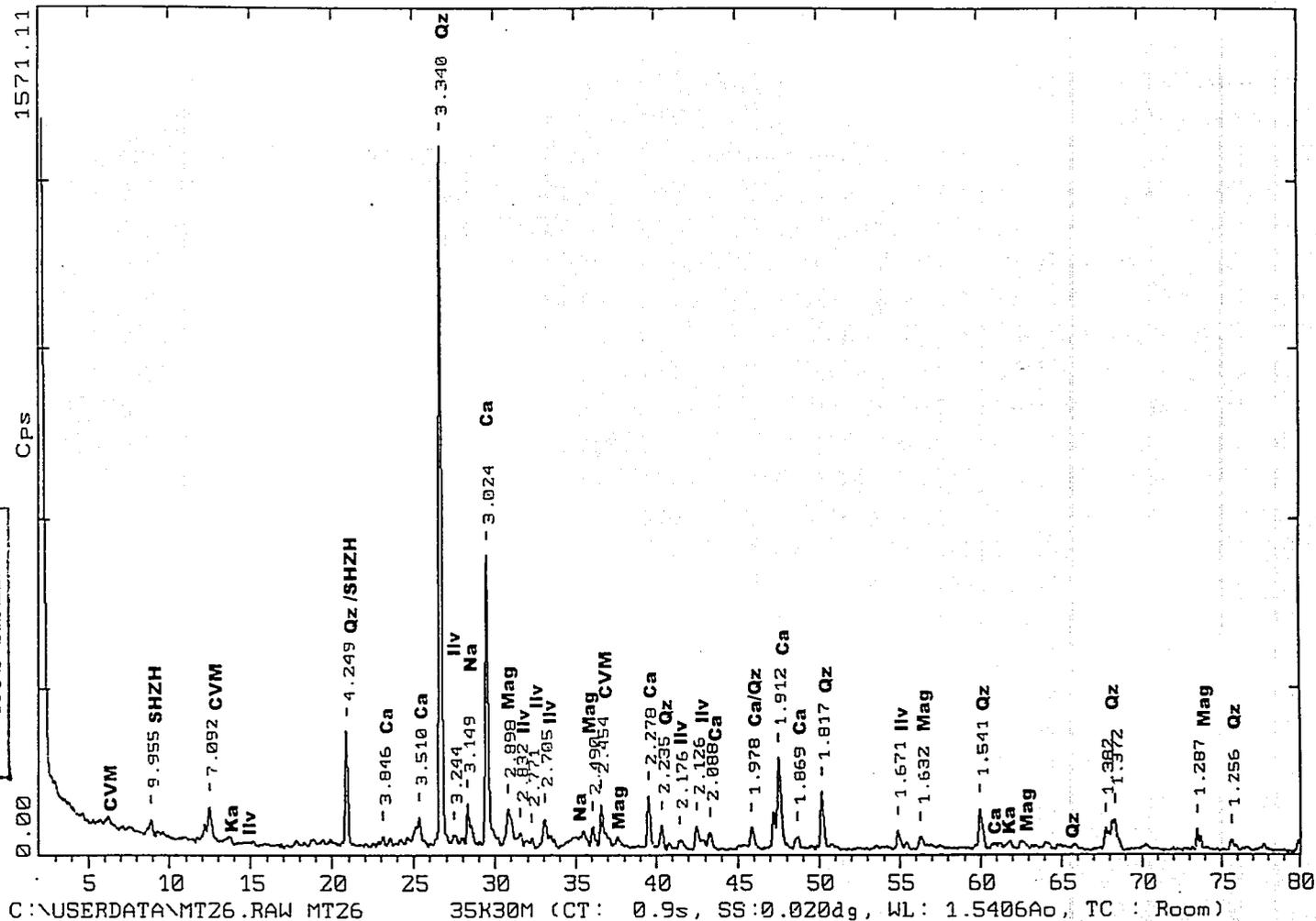


Figura 39. Difractograma de la muestra MT26

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

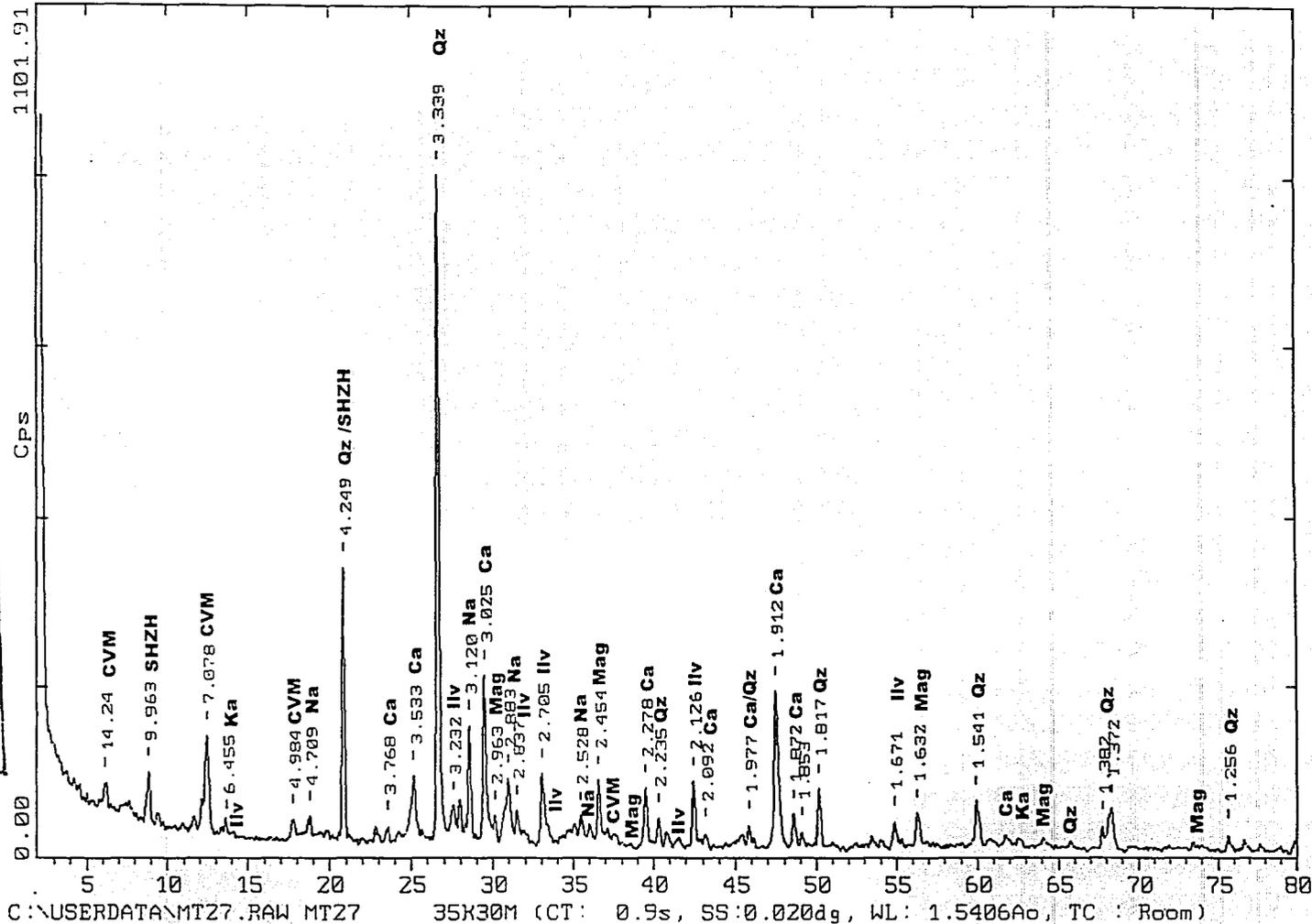


Figura 40. Difractograma de la muestra MT27

ÍNDICE

| | Pág. |
|---|------|
| RESUMEN..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 6 |
| OBJETIVOS PARTICULARES..... | 6 |
| HIPÓTESIS..... | 6 |
| | |
| CAPÍTULO I. ANTECEDENTES..... | 7 |
| I.1 Descripción del área de estudio..... | 7 |
| I.2 Proceso de beneficio de la plata..... | 12 |
| I.3 Sedimentología..... | 14 |
| I.4 Definición de especiación..... | 18 |
| | |
| CAPÍTULO II. METODOLOGÍA..... | 21 |
| II.1 Ubicación de las estaciones de muestreo..... | 21 |
| II.2 Metodología de muestreo..... | 23 |
| II.3 Pretratamiento y almacenado de las muestras..... | 25 |
| II.4 Granulometría de sedimentos..... | 26 |
| II.5 Determinación de carbono orgánico e inorgánico por pérdida a la ignición..... | 28 |
| II.6 Determinación de mineralogía por difracción de RX..... | 29 |
| II.7 Cuantificación de metales pesados..... | 29 |
| II.7.1 Procedimiento de digestión para metales totales..... | 29 |
| II.7.2 Validación del método..... | 30 |
| II.8 Cuantificación del impacto ambiental..... | 31 |
| II.9 Especiación de Zn, Pb y Fe en sedimentos por extracción secuencial..... | 32 |
| II.9.1 Metodología..... | 32 |
| II.9.1 Validación del método..... | 34 |

| | Pág. |
|--|------|
| CAPÍTULO III. RESULTADOS..... | 36 |
| III.1 Análisis granulométrico..... | 36 |
| III.2 Carbono Orgánico (C.O.)..... | 37 |
| III.3 Carbono Inorgánico (C.I.)..... | 38 |
| III.4 Mineralogía..... | 39 |
| III.5 Contenido de Zn, Pb y Fe totales..... | 43 |
| III.5.1 Validación de la técnica..... | 43 |
| III.5.2 Zinc..... | 44 |
| III.5.3 Plomo..... | 45 |
| III.5.4 Hierro..... | 46 |
| III.6 Cuantificación del impacto ambiental (Igeo)..... | 47 |
| III.7 Resultados de la extracción secuencial..... | 48 |
| III.7.1 Validación del método..... | 48 |
| III.7.2 Zinc..... | 49 |
| III.7.2.1 Variación estacional..... | 49 |
| III.7.2.2 Variación espacial..... | 50 |
| III.7.3 Plomo..... | 51 |
| III.7.31 Variación estacional..... | 51 |
| III.7.32 Variación espacial..... | 52 |
| III.7.4 Hierro..... | 53 |
| III.7.31 Variación estacional..... | 53 |
| III.7.32 Variación espacial..... | 54 |
| III.8 Resultados adicionales..... | 54 |
| CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 55 |
| IV.1 Granulometría del sedimento..... | 55 |
| IV.2 Carbono orgánico..... | 55 |
| IV.3 Carbono inorgánico..... | 56 |
| IV.4 Mineralogía..... | 57 |

| | | |
|--------|--|----|
| IV.4 | Contenido de Zn, Pb y Fe totales en sedimentos..... | 60 |
| IV.4.1 | Zinc..... | 60 |
| IV.4.2 | Plomo..... | 62 |
| IV.4.3 | Hierro..... | 64 |
| IV.5 | Cuantificación del impacto ambiental (Igeo)..... | 67 |
| IV.5.1 | Zinc..... | 67 |
| IV.5.2 | Plomo..... | 67 |
| IV.5.3 | Hierro..... | 68 |
| IV.6 | Resultados de la extracción secuencial..... | 68 |
| IV.6.2 | Zinc..... | 68 |
| | IV.6.21 Variación estacional..... | 68 |
| | IV.6.22 Variación espacial..... | 71 |
| IV.6.3 | Plomo..... | 72 |
| | IV.6.31 Variación estacional..... | 72 |
| | IV.6.32 Variación espacial..... | 75 |
| IV.6.4 | Hierro..... | 75 |
| IV.7 | Comportamiento de los metales en relación con la M.O., carbonatos y granulometría..... | 78 |
| IV.8 | Recomendaciones..... | 78 |
| | CONCLUSIONES | 82 |
| | REFERENCIAS..... | 84 |
| | ANEXOS..... | 89 |
| | Condiciones generales de los puntos de muestreo..... | 89 |
| | Tablas de concentraciones para metales totales y especiación..... | 90 |
| | Figuras de Sedimentología. | 94 |
| | Difractogramas..... | 97 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Fig. | | Pág. |
|------|--|------|
| 1 | Ubicación del área de estudio..... | 8 |
| 2 | Geología del área de estudio..... | 10 |
| 3 | Escala Udden-Wentworth (ϕ) para tamaño de grano y la equivalencia a mm..... | 17 |
| 4 | Ubicación de los puntos de muestreo en el efluente estudiado del río Taxco..... | 22 |
| 5 | Sección transversal de las interfaces atmósfera/columna de agua/sedimento óxico/sedimento anóxico y formas prevaletientes de contaminante..... | 24 |
| 6 | Gráfica de Tamaño de partícula contra frecuencia acumulada (Visher, 1969)..... | 27 |
| 7 | Concentración de Carbono Orgánico en sedimentos..... | 37 |
| 8 | Concentración de Carbono Inorgánico en sedimentos..... | 39 |
| 9 | Difractograma de la muestra MT13..... | 41 |
| 10 | Difractograma de la muestra MT23..... | 41 |
| 11 | Difractograma de la muestra MT17..... | 42 |
| 12 | Difractograma de la muestra MT27..... | 42 |
| 13 | Concentración de zinc total para cada muestra de sedimento..... | 44 |
| 14 | Concentración de plomo total para cada muestra de sedimento..... | 45 |
| 15 | Concentración de hierro total para cada muestra de sedimento..... | 46 |
| 16 | Concentración de zinc por muestra y fracción geoquímica (muestreo 1).. | 50 |
| 17 | Concentración de zinc por muestra y fracción geoquímica (muestreo 2)... | 50 |
| 18 | Concentración de plomo por muestra y fracción geoquímica (muestreo 1) | 52 |
| 19 | Concentración de plomo por muestra y fracción geoquímica (muestreo 2) | 52 |
| 20 | Concentración de hierro en cinco fases geoquímicas de sedimento..... | 54 |
| 21 | Comparación entre los porcentajes de zinc por muestra y fracción geoquímica. | 70 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Fig. | | Pág. |
|------|---|------|
| 1 | Ubicación del área de estudio..... | 8 |
| 2 | Geología del área de estudio..... | 10 |
| 3 | Escala Udden-Wentworth (ϕ) para tamaño de grano y la equivalencia a mm..... | 17 |
| 4 | Ubicación de los puntos de muestreo en el efluente estudiado del río Taxco..... | 22 |
| 5 | Sección transversal de las interfaces atmósfera/columna de agua/sedimento óxico/sedimento anóxico y formas prevalcientes de contaminante..... | 24 |
| 6 | Gráfica de Tamaño de partícula contra frecuencia acumulada (Visher, 1969)..... | 27 |
| 7 | Concentración de Carbono Orgánico en sedimentos..... | 37 |
| 8 | Concentración de Carbono Inorgánico en sedimentos..... | 39 |
| 9 | Difractograma de la muestra MT13..... | 41 |
| 10 | Difractograma de la muestra MT23..... | 41 |
| 11 | Difractograma de la muestra MT17..... | 42 |
| 12 | Difractograma de la muestra MT27..... | 42 |
| 13 | Concentración de zinc total para cada muestra de sedimento..... | 44 |
| 14 | Concentración de plomo total para cada muestra de sedimento..... | 45 |
| 15 | Concentración de hierro total para cada muestra de sedimento..... | 46 |
| 16 | Concentración de zinc por muestra y fracción geoquímica (muestreo 1).. | 50 |
| 17 | Concentración de zinc por muestra y fracción geoquímica (muestreo 2).. | 50 |
| 18 | Concentración de plomo por muestra y fracción geoquímica (muestreo 1) | 52 |
| 19 | Concentración de plomo por muestra y fracción geoquímica (muestreo 2) | 52 |
| 20 | Concentración de hierro en cinco fases geoquímicas de sedimento..... | 54 |
| 21 | Comparación entre los porcentajes de zinc por muestra y fracción geoquímica. | 70 |

| Fig. | | Pág. |
|------|---|------|
| 22 | Comparación entre los porcentajes de plomo por muestra y fracción geoquímica. | 74 |
| 23 | Porcentajes de hierro en cinco fases geoquímicas de sedimento..... | 78 |
| 24 | Modos de transporte de sedimentos de acuerdo a su tamaño de partícula según Visher (1969) muestras MT11-MT15..... | 94 |
| 25 | Modos de transporte de sedimentos de acuerdo a su tamaño de partícula según Visher (1969) muestras MT16-MT23..... | 95 |
| 26 | Modos de transporte de sedimentos de acuerdo a su tamaño de partícula según Visher (1969) muestras MT24-MT27..... | 96 |
| 27 | Difractograma muestra MT11..... | 97 |
| 28 | Difractograma muestra MT12..... | 98 |
| 29 | Difractograma muestra MT13..... | 99 |
| 30 | Difractograma muestra MT14..... | 100 |
| 31 | Difractograma muestra MT15..... | 101 |
| 32 | Difractograma muestra MT16..... | 102 |
| 33 | Difractograma muestra MT17..... | 103 |
| 34 | Difractograma muestra MT21..... | 104 |
| 35 | Difractograma muestra MT22..... | 105 |
| 36 | Difractograma muestra MT23..... | 106 |
| 37 | Difractograma muestra MT24..... | 107 |
| 38 | Difractograma muestra MT25..... | 108 |
| 39 | Difractograma muestra MT26..... | 109 |
| 40 | Difractograma muestra MT27..... | 110 |

ÍNDICE DE TABLAS

| No. | | Pág. |
|-----|--|------|
| 1 | Ubicación de los puntos de muestreo en el afluente estudiado del río Taxco..... | 21 |
| 2 | Caracterización de fracciones sedimentarias de acuerdo a su tamaño de partícula..... | 26 |
| 3 | Interpretación de los intervalos del Igeo para sedimentos contaminados con metales pesados..... | 32 |
| 4 | Resultados del análisis granulométrico..... | 36 |
| 5 | Porcentajes de sedimento en relación con tres medios de transporte | 37 |
| 6 | Resultados de la validación de la técnica para determinación de C.I. por LOI..... | 40 |
| 7 | Interpretación computarizada de los difractogramas de las muestras MT11-MT27..... | 41 |
| 8 | Concentraciones descritas para Zn, Pb y Fe en suelos patrón y las obtenidas en laboratorio (LAB)..... | 42 |
| 9 | Coefficiente de correlación de Pearson entre los datos de metales totales | 46 |
| 10 | Cuantificación del I _{geo} por elemento y por muestra..... | 46 |
| 11 | Diferencia (%) entre la concentración de metales totales y la suma de las concentraciones en las fracciones geoquímicas extraídas..... | 47 |
| 12 | Comparación entre ambos muestreos de las concentraciones promedio de zinc y su porcentaje en las cinco fracciones geoquímicas..... | 48 |
| 13 | Resultados del ANOVA para las concentraciones de zinc en ambos muestreos..... | 49 |
| 14 | Comparación entre ambos muestreos de las concentraciones promedio de plomo y su porcentaje en las cinco fracciones geoquímicas..... | 51 |
| 15 | Resultados del ANOVA para los valores de plomo en ambos muestreos.. | 51 |
| 16 | Comparación entre ambos muestreos de las concentraciones promedio de hierro y su porcentaje en las 5 fracciones geoquímicas..... | 53 |

| No. | | Pág. |
|-----|--|------|
| 17 | Resultados del ANOVA para los valores de hierro en ambos muestreos... | 54 |
| 18 | Correlación entre carbono orgánico (% LOI) y los metales asociados a la fracción de [M.O./S] | 57 |
| 19 | Correlación entre carbono inorgánico (% C. I. como CaCO ₃) y los metales asociados a la fracción de [Carbonatos] para los dos muestreos. | 58 |
| 20 | Correlación entre concentración de metales totales y la fracción <0.063 mm..... | 58 |
| 21 | Descripción de la muestra y punto de muestreo..... | 89 |
| 22 | Concentración promedio de metales totales en los sedimentos..... | 90 |
| 23 | Concentración de Zinc (mg / kg) en cinco fases geoquímicas de sedimento..... | 91 |
| 24 | Concentración de Plomo (mg/ Kg) en cinco fases geoquímicas de sedimento..... | 92 |
| 25 | Concentración de hierro (mg / Kg) en cinco fases geoquímicas de sedimento..... | 93 |