



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO
UNIDAD DE CIENCIAS DE DESARROLLO REGIONAL
DOCTORADO DE CIENCIAS AMBIENTALES



**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FITORREMEDIACIÓN DE LOS JALES MINEROS
DE "EL FRAILE", DE TAXCO DE ALARCÓN GRO. MÉXICO.**

JALES EL FRAILE



PRESENTA

MC. MARIA CRISTINA SANTIAGO DIONISIO

DIRECTOR

DR. OSCAR TALAVERA MENDOZA

ASESORES

DR. ALEJANDRO RAMIREZ GUZMÁN

DR. JOSE LUIS ROSAS ACEVEDO

DR. JUSTINIANO GONZÁLEZ GONZÁLEZ

DR. MARCO A. LEYVA VÁZQUEZ

Acapulco, Gro., Febrero del 2011



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO
UNIDAD DE CIENCIAS DE DESARROLLO REGIONAL
DOCTORADO DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FITORREMEDIACIÓN DE LOS JALES MINEROS DE “EL FRAILE”, DE TAXCO DE ALARCÓN GRO. MÉXICO.

JALES EL FRAILE



PRESENTA
MC. MARIA CRISTINA SANTIAGO DIONISIO

DIRECTOR
DR. OSCAR TALAVERA MENDOZA

ASESORES

DR. ALEJANDRO RAMIREZ GUZMÁN
DR. JUSTINIANO GONZÁLEZ GONZÁLEZ

DR. JOSE LUIS ROSAS ACEVEDO
DR. MARCO A. LEYVA VÁZQUEZ

Acapulco, Gro., Febrero del 2011



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

**UNIDAD DE CIENCIAS DE DESARROLLO REGIONAL
UNIDAD DE CIENCIAS QUÍMICO-BIOLÓGICAS**

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FITORREMEDIACIÓN DE
LOS JALES MINEROS DE “EL FRAILE”, DE TAXCO, DE
ALARCÓN, GRO., MÉXICO.**



**PRESENTA
MC. MARIA CRISTINA SANTIAGO DIONISIO**

**DIRECTOR
DR. OSCAR TALAVERA MENDOZA**

ASESORES

**DR. ALEJANDRO RAMIREZ GUZMÁN
DR. JOSE LUIS ROSAS ACEVEDO
DR. JUSTINIANO GONZÁLEZ GONZÁLEZ
DR. MARCO A. LEYVA VÁZQUEZ**

Acapulco, Gro., Diciembre del 2010



CONTENIDO		Pág.
Lista de abreviatura.....		iii
Índice de tablas.....		v
Índice de figuras.....		viii
RESUMEN.....		1
I. GENERALIDADES.....		3
I.1 Introducción		3
I.2 Planteamiento del problema y riesgo a la salud		9
I.3 Objetivos.....		10
I.3.1 Objetivo general.....		10
I.3.2 Objetivos específicos.....		10
I.4 Geología del área de estudio		11
II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS JALES MINEROS.....		14
II.1 Caracterización química-mineralógica.....		14
II.2 Importancia de la especiación química secuencial.....		15
II.3 Descripción de fracciones		17
II.3.1 Fracción intercambiable		17
II.3.2 Fracción asociada a carbonato		17
II.3.3 Fracción asociada a oxihidróxidos de Fe-Mn		17
II.3.4 Fracción asociada a sulfuros y materia orgánica (MO).....		18
II.3.5 Fracción residual		18
II.4 Metales pesados		19
II.5 Caracterización química de los jales El Fraile		19
III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FITORREMEDIACIÓN		23
III.1 Remediación de suelos por métodos químicos y físicos		23
III.2 Remediación de suelos por métodos biológicos		23
III.3 Fitorremediación.....		24
III.4 El papel de las plantas frente a los metales pesados		25
III.5 Tipos de fitorremediación de plantas hiperacumuladoras de metales.....		28
III.6 Contribución de los microorganismos en la remediación de suelos contaminados con metales.....		33
III.7 Ejemplos de aplicación de la fitorremediación en el mundo.....		35
III.8 Otros ejemplos		37
III.9 Proceso de las plantas hiperacumuladoras de metales del suelo		38
III.10 Mecanismos de resistencias a metales en las plantas		42
IV. METODOLOGÍA		44
IV.1 Trabajo de campo		44
IV.2 Trabajo de laboratorio		44
IV.2.1 Análisis de los contenidos totales de EPT		44
IV.2.2 Especiación química secuencial		45
IV.3 Identificación de plantas nativas de los jales El Fraile con mayor potencial de fitorremediación		50

IV.3.1 Lavado y secado	50
IV.4 Metodología de la digestión total	51
V. RESULTADOS	52
V.1 Caracterización química de los jales de El Fraile.	52
V.2 Análisis de la digestión total en muestras con pH ácido	52
V.3 Especiación química secuencial de los EPT en muestras con pH ácido.....	55
V.4 Análisis de la digestión total en muestras con pH neutro.....	67
V.5 Especiación química secuencial de los EPT en muestras con pH neutro ...	69
V.6 Análisis metodológico de las plantas nativas de El Fraile en Taxco de Alarcón, Gro.....	78
V.7 Especies de plantas de los jales y su grupo comparativo (plantas controles)...	80
V.8 Especies de plantas de los jales sin su grupo comparativo	80
V.9 Descripción de resultados (plantas comparativas)	81
V.10 Concentración total de los EPT en plantas colectadas en los jales y su Factor de enriquecimiento (FE) con relación al valor encontrado en las muestras comparativas	89
V.11 Descripción de resultados (plantas de los jales sin su grupo comparativo)....	95
VI. DISCUSIÓN	122
VII. CONCLUSIONES	125
VIII. LITERATURA CITADA	128
IX. ANEXOS	138

LISTA DE ABREVIATURAS

Ag	Plata
As	Arsénico
CaF ₂	Fluorita
Co	Cobalto
Cu	Cobre
CuFeS ₂	Calcopirita
Cr	Cromo
CH ₃ COONH ₄ (NH ₄ OAc)	Acetato de amonio
DAM	Drenaje ácido de mina
EPT	Elementos potencialmente tóxicos
<i>ex situ</i>	Fuera del sitio
Fe	Hierro
Fe(OH) ₃	Hidróxido férrico o Hidróxido de hierro (III)
Fe ₂ (SO ₄) ₃	Sulfato férrico o Sulfato de hierro (III)
FeS ₂	Pirita,
FeAsS	Arsenopirita
Fe ²⁺	Ion ferroso o lón hierro (II)
Fe ³⁺	Ion férrico o lón hierro (III)
FeSO ₄	Sulfato ferroso o Sulfato de hierro (II)
H ₂ O	Agua
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HNO ₃	Ácido nítrico
H ₂ O ₂	Agua oxigenada
CH ₃ COOH (HOAc)	Ácido acético
Hg	Mercurio
HCl	Ácido clorhídrico
HF	Ácido fluorhídrico o fluoruro de hidrógeno

ICP-AES	Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-AES)
<i>in situ</i>	En el mismo sitio
<i>in vitro</i>	En el vidrio (tubo, placa, matraz)
Mn	Manganeso
mL	mililitro
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel
Na ⁺ CH ₃ COO ⁻ (NaOAc)	Acetato de sodio
NH ₂ OH	Hidroxilamina
NaOH	Hidróxido de sodio
NMP	Número Más Probable
O ₂	Oxígeno molecular
pH	Potencial de hidrógeno
Pb	Plomo
PbS	Galena
SO ₄ ²⁻	Sulfato
ZnS	Esfalerita
UFC	Unidades Formadoras de colonias
USA	Estado Unidos de América
V	Vanadio
Zn	Zinc
°C	Grados centígrados

INDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Niveles normales de metales pesados en el suelo (NOM-141 SEMARNAT-2003)	14
2. Granulometría y contenidos de materia orgánica de los Jales de El Fraile. Datos de Flores-Mundo (2002)	20
3. Parámetros físicos de las muestras de jales de El Fraile	20
4. Estadística básica de los contenidos totales de los metales estudiados en muestras de jales de El Fraile. (Datos de Flores-Mundo (2002)	21
5. Valores Regionales de Fondo vs Concentración Total en los jales “El Fraile” (pH ácido)	54
6. Valores regionales de fondo, calculados para suelos de la región de Taxco de Alarcón, Gro.....	54
7. Distribución de especiación química del arsénico en muestras con pH ácidas.....	57
8. Distribución de especiación química del cadmio muestras con pH ácido.....	58
9. Distribución de especiación química del cobre en muestras con pH ácido.....	59
10. Distribución de especiación química del hierro en muestras con pH ácido.....	61
11. Distribución de especiación química del manganeso muestras con pH ácido.....	62
12. Distribución de especiación química del plomo en muestras con pH ácido.....	63
13. Distribución de especiación química de vanadio en muestras con pH ácido.....	65
14. Distribución de especiación química del zinc en muestras con pH ácido.....	66

	Pág.
15. Distribución de la especiación química de los EPT en muestras ácidas.....	67
16. Valores Regionales de Fondo vs Concentración Total en los jales El Fraile (pH neutro).....	69
17. Distribución de especiación química del arsénico en muestra con pH neutro.....	70
18. Distribución de especiación química del cadmio en muestras con pH neutro.....	71
19. Distribución de especiación química del cobre en muestras con pH neutro.....	72
20. Distribución de especiación química del hierro en muestras con pH neutro.....	73
21. Distribución de especiación química del manganeso muestras con pH neutro.....	74
22. Distribución de especiación química de vanadio en muestras con pH neutro.....	75
23. Distribución de especiación química del zinc en muestras con pH neutro.....	76
24. Distribución de la especiación química de los EPT en muestras neutras.....	77
25. Concentración de los EPT en las hojas de plantas comparativas.....	82
26. Concentración de los EPT en raíz de plantas comparativas.....	85
27. Concentración de los EPT en tallo de plantas comparativas.....	88
28. EPT en las hojas de plantas de jales y su FE con respecto a los valores encontrados en las muestras de plantas comparativas.....	95
29. EPT en la raíz de plantas de jales y su FE con respecto a los valore encontrados en las muestras de plantas comparativas.....	95
30. EPT en el tallo de plantas de jales y su FE con respecto a los valores encontrados en las muestras de plantas comparativas.....	97
31. EPT en las hojas de plantas de jales sin comparación.....	98

32. EPT en raíz de plantas de jales sin comparación.....	100
33. EPT en tallo de plantas de jales sin comparación.....	102
34. Valores permisibles en varias especies vegetales.....	124

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Mapa de la ubicación de los jales “El Fraile” de Taxco de Alarcón Gro.....	12
2. Mapa de localización geográfica y vías de acceso del área de estudio.....	13
3. Tipos de fitorremediación, indicando la zona de la planta en donde ocurre el proceso.....	25
4. Mecanismos de fitorremediación y procesos que provienen de la identificación de plantas que hiperacumulan metales.....	28
5. Mecanismos de tolerancia para contaminantes orgánicos e inorgánicos en plantas.....	39
6. Mecanismos involucrados en la acumulación de metales pesados en plantas	40
7. Transporte de minerales vía xilema.....	40
8. Componentes típicos de una célula vegetal.....	41
9. Concentración total de EPTs de los jales de El Fraile.....	55
10. Metodología para el estudio de plantas nativas en los jales “El Fraile” en Taxco de Alarcón, Gro.....	78
11. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de hojas de plantas Comparativas.....	83
12. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de hojas de plantas comparativas.....	84
13. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de raíz de plantas comparativas	86
14. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de raíz de plantas comparativas.....	87
15. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de tallo de plantas comparativas.....	89
16. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de tallo de plantas comparativas	90

	Pág.
17. Comparación de EPT en hojas de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas.....	107
18. Comparación de EPT en hojas de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas	108
19. Comparación de EPT en raíz de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas	112
20. Comparación de EPT en raíz de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas.....	113
21. Comparación de EPT en tallo de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas.....	117
22. Comparación de EPT en tallo de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas.....	118
23. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de hoja de plantas de jales sin comparación.....	121
24. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de hoja de plantas de jales sin comparación.....	122
25. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de raíz de plantas de jales sin comparación.....	125
26. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de raíz de plantas de jales sin comparación.....	126
27. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de tallo de plantas de jales sin comparación.....	128
28. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de tallo de plantas de jales sin comparación.....	129

RESUMEN

Se realizó un estudio en los jales mineros de El Fraile de Taxco, de Alarcón, Guerrero, desarrollándose en dos etapas. En la primera etapa abarcó: 1) caracterización química, concentración total y extracción química secuencial de los elementos potencialmente tóxicos de los jales con un total de 14 muestras de jales analizadas y 2) El estudio de fitorremediación.

1). Caracterización química. Los jales presentan una granulometría de arenas gruesas, finas y lodos. El Contenido de materia orgánica es bajo y oscila entre 0.2% y 4.5%. , Los valores de pH en muestras ácidas, se encuentran entre 2.4 y 5.3, con una conductividad de 1235-5180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y valores de Eh > 400 mV. En muestras neutras con valores de pH entre 7.3 y 7.9 y la conductividad de (336-2090 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y valores de Eh < 400 mV (tomados de Flores-Mundo del 2002). Las concentraciones totales de los EPT (As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, V y Zn).

La concentración total de los EPT en muestras ácidas fue la siguiente: As (374-5463 mg kg^{-1}), Cd (5.4-24 mg kg^{-1}), Cu (190-508 mg kg^{-1}), Fe (2.9-7.1 mg kg^{-1}), Mn (32-2133 mg kg^{-1}), Pb (992-16904 mg kg^{-1}), V (42.4-131 mg kg^{-1}) y Zn (333-1480 mg kg^{-1}).

En muestras neutras: As (1189-5725 mg kg^{-1}), Cd (131-251 mg kg^{-1}), Cu (558-754 mg kg^{-1}), Fe (3.5-4.4 mg kg^{-1}), Mn (5859-7656 mg kg^{-1}), Pb (4663-6065 mg kg^{-1}), V (46.5-76.8 mg kg^{-1}) y Zn (6401-11231 mg kg^{-1}). Los resultados indican que todos los elementos potencialmente tóxicos, están muy por encima de los valores regionales de fondo (VRF) y por los valores establecidos por la NOM-141-SEMARNAT-2004.

La extracción química secuencial, mostró que la distribución de los EPT, presentaron concentraciones elevadas muy variables en cada fracción analizada, lo cual se demuestra que los jales "El Fraile" representan un serio problema de contaminación para el medio ambiente.

2). Estudio de fitorremediación. (Uso de especies vegetales con características fisiológicas capaces de acumular, transformar o neutralizar elementos tóxicos presentes en los suelos contaminados).

Para esta investigación se colectaron plantas que crecen en los jales y plantas sin contaminación aparente, el cuál se identificaron taxonómicamente a través de la consulta de varias literaturas sobre florísticas general, también se contó con el apoyo de un investigador en el área de botánica de la Universidad Autónoma de Guerrero.

Se identificaron 40 especies de plantas, 30 de ellas fueron de los jales “El Fraile” de Taxco, de Alarcón, Gro., y 10 plantas comparativas (controles) de las mismas especies de los jales, estas, fueron colectadas en zonas sin afectación por residuos mineros cercanas a Taxco (Tlamacazapa, Puente Campuzano e Ixcateopan), con el propósito de comparar su desarrollo y contenido de metal. De las 40 especies de plantas, 36 fueron utilizadas para la digestión total y análisis en el ICP de los EPTs y fue debido a que el equipo automatizado dejó de funcionar, dejando sin procesar cuatro plantas de la 40 colectadas. La absorción de los EPTs en las plantas fue muy variable y dependió principalmente de cada una de las especies.

Las especies *Bursera copalifera* (copal) y *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) plantas recolectadas en los jales El Fraile, fueron las que acumularon a través de las hojas, raíz y tallo, mayores concentraciones de Fe, Zn, As y Cd. De ahí que la concentración en los diferentes órganos de las plantas fue en el siguientes orden: Fe > Zn > As > Cd.

La especie *Echinochloa colona* (zacate navajita) podría ser considerada como planta fitoacumuladora de metales, ya que absorbió cuatros metales con las más altas concentraciones, esta especie que pudiera ser seleccionada para ser utilizada en el proceso de fitorremediación en los jales El Fraile de Taxco de Alarcón, Gro.

I. GENERALIDADES

I.1 Introducción

La presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) y el inadecuado manejo hace de los jales un riesgo para los ecosistemas del entorno. El DAM generado posee un gran potencial para disolver la mayoría de los constituyentes de los jales incluidos los minerales que contienen EPTs. La puesta en solución de los metales produce la movilidad de éstos permitiendo su dispersión y afectación a los recursos naturales del entorno y afectando seriamente los ecosistemas incluyendo al ser humano. Los principales recursos naturales del entorno que sufren seria afectación son los suelos urbanos y de cultivo, los sedimentos de ríos, el agua superficial y, en algunos casos, el agua subterránea (Younger, 2000, Dold, 2002). Las plantas nativas sufren fuerte afectación y en algunos sitios éstas desaparecen por completo. Los cultivos se ven fuertemente afectados al incrementar la disponibilidad de EPT y reducir la fertilidad del suelo. El agua de los ríos y los sedimentos se ven afectados hasta varias decenas de kilómetros de la fuente.

En el año 2003, la Secretaría del medio Ambiente y Recursos naturales (SEMARNAT), aprobó una norma oficial mexicana, la NOM-141-SEMARNAT, que reglamenta las pruebas necesarias para la valoración de los jales con relación al peligro que representan para el ambiente; así como para identificar su capacidad potencial de generación de acidez y la presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) disponibles para la lixiviación (EPT solubles). En el 2004, esta misma secretaria (NOM- 147 SEMARNAT /SSA), decretó una norma que regula la depositación adecuada de jales la cual aplica a nuevos proyectos (DOF-2004). Es importante señalar que el término elemento potencialmente tóxico (EPT) fue propuesto por Alloway en 1995, para denominar a las sustancias tóxicas con efectos adversos al humano, animal o planta.

En México, la procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, 2000), estableció los niveles de referencia con base en los valores reportados en otros países. Estos niveles de referencia de PROFEPA (2000) caen dentro de los más estrictos y se aplican en forma general en todo el territorio nacional sin considerar que los suelos varían notablemente de un lugar a otro, así como la

composición y el comportamiento químico del suelo están determinados por el tipo de roca del que se origina, el clima, la cubierta vegetal, el grado de intemperismo, topografía; así como por las variaciones de recuperación en los métodos de beneficios por lo que los niveles de referencias dictados por la SEMARNAT, son los valores naturales de los EPTs que rigen los suelos Mexicanos.

De ahí que las presas de jales son uno de los sistemas para la disposición final de los residuos sólidos generados por el beneficio de minerales contemplados en el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, y deben reunir condiciones de máxima seguridad, a fin de garantizar la protección de la población, las actividades económicas y sociales y en general, el equilibrio ecológico. Por lo que la NOM-141-SEMARNAT-2003, contienen la información, requisitos, especificaciones y metodología para caracterizar los jales mineros y que las propias industrias desechan al medio ambiente.

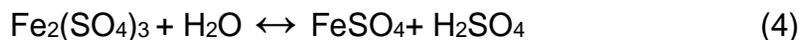
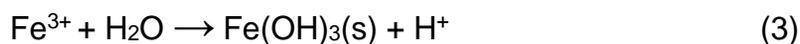
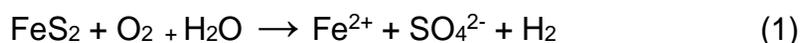
México se ha caracterizado por ser una potencia minera. En la actualidad, se encuentra en los primeros lugares del mundo en la producción de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), fluorita (CaF_2), bario (Ba) y otros. La minería ha llegado a convertirse en una actividad de gran importancia en algunos estados de la República Mexicana, incluyendo Guerrero (Taxco) como productor de plata. La industria minera ha sido pilar fundamental en el desarrollo económico y tecnológico del país al aportar gran parte de las materias primas; sin embargo, la explotación de los recursos minerales conlleva inevitablemente a la producción de grandes cantidades de desechos industriales llamados jales o simplemente desechos de mina. Al respecto, cabe mencionar que la minería genera 65% de los residuos industriales que se producen en México (SEDESOL-1993).

De acuerdo con Ritcey (1989), los jales son el producto de la trituración y molienda del mineral, es decir, son depósitos de roca molida que quedan después de que los minerales de interés económico han sido recuperados por algún proceso de beneficio (flotación selectiva, cianuración, amalgamación, electrólisis entre otros). En todos los casos, la recuperación de los metales de interés no es completa. En el caso de la flotación selectiva (método utilizado en Taxco), la

eficiencia del proceso es del 95-98% por lo que alrededor del 2-5% de los minerales de mena permanece en los residuos sólidos, formando una fuente importante de metales tóxicos (Ritcey, 1989). Aunque la eficiencia de los métodos de beneficio pudiera ser alta, una parte de los metales permanecen en los jales mineros y representan la fuente de contaminación de metales más importante en el mundo.

Los jales producidos por la explotación de depósitos metálicos contienen sulfuros residuales como la pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS) galena (PbS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS), además de las fases minerales predominantes como cuarzo, feldspatos, calcita y minerales secundarios. La oxidación de los sulfuros deriva en la generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM), que son soluciones que se caracterizan por presentar bajos valores de pH (<2) y altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) como el As, Pb, Cu, Cd, Zn, Fe, Mn, V entre otros (Jambor *et al.*, 2003).

La reacción de óxido-reducción más importantes en los jales de importancia ambiental es la conversión de la pirita (FeS_2) en hidróxido férrico [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] y iones sulfato SO_4^{2-} produciendo un medio ácido que da lugar al DAM. Las reacciones químicas gobernantes de la oxidación de la pirita son (Singer y Stumm, 1970):



En las reacciones 1 y 4 muestran que el Fe^{3+} y el O_2 son los principales oxidantes de la pirita. La reacción 1 muestra la oxidación de la pirita con O_2 produciendo Fe^{2+} , iones sulfato y iones hidronio, éstos últimos producen un ambiente ácido. La oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} por el O_2 produce agua (reacción 2),

la cual en presencia de SO_4 produce H_2SO_4 (ácido sulfúrico). Este es un ácido inorgánico fuerte con una gran capacidad de disolución de sustancias inorgánicas. El ión Fe^{3+} reacciona con el agua en condiciones ácidas para producir $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (hidróxido férrico) sólido (reacción 3). Este proceso produce la liberación adicional de iones hidronio provocando mayor acidez al medio. Otra reacción posible es la reacción del Fe^{2+} con H_2SO_4 para producir $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (sulfato férrico), el cual en presencia de agua reduce el hierro formando FeSO_4 (sulfato ferroso) y H_2SO_4 , provocando acidez adicional al medio (reacción 4) (Singer y Stumm, 1970).

En términos generales los residuos de minas no tienen condiciones propicias para el desarrollo vegetal ya que presentan bajo o nulo contenido de materia orgánica, valores extremos de pH y una baja disponibilidad de nutrientes esenciales. Cuando estos residuos son mezclados con el suelo, se causa la degradación del mismo. (Danielson, 1991). A pesar de ello, en áreas contaminadas por estos residuos existe crecimiento vegetal, y esto es debido a ciertos microorganismos como (*Thiobacillus ferroxidans*) que tiene la habilidad de desarrollarse en ambientes extremadamente contaminados y pueden ser capaces de modificar el estado químico, forma o distribución de los metales del suelo a través de procesos de oxido-reducción (Erich y Brierley, 1990).

En México, en estudio reciente, sobre evaluación geoquímico-ambiental en distritos mineros de Guanajuato (Gracia-Meza 2003; Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 1998; Carrillo-Chávez *et al.*, 2003) y otro sobre la evaluación de la situación ambiental en la Unidad Minera de Santa Bárbara Chihuahua (Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2007), evidenciaron que; en muestras de suelos y sedimentos, localizadas en los alrededores de las presas de jales, las concentraciones totales de Zn, Pb, Cu, as y Cd fueron mayores a la mediana de los valores de fondo medidos. Estos resultados indican que los suelos y sedimentos están esparcidos en los alrededores de los jales por dispersión eólica y/o fluvial; sin embargo, las concentraciones de los EPTs solubles de agua fueron bajas, inclusive inferiores al límite de detección del método analítico utilizado para medir metales como el Pb. La baja disponibilidad de los elementos potencialmente tóxicos es una evidencia de que estos suelos y sedimentos contaminados no presentan un riesgo ambiental

de consideración bajo las condiciones actuales. Esto se corrobora con el hecho de que en las aguas subterráneas someras se registraron concentraciones muy bajas de EPTs, las cuales son inferiores a los límites permisibles para aguas de consumo humano.

En México, existen también reportes de afectación de metales a la población. En Zimapán, Hidalgo existen graves problemas debido a la presencia de altos contenidos de arsénico en el agua. La presencia de arsénico en las aguas subterráneas es consecuencia de años de actividad minera que durante el proceso de fundición liberaron millones de toneladas de ese tóxico que ha contaminado suelo y mantos freáticos (Armienta *et al.*, 1997). En la Comarca Lagunera (Durango y Coahuila) se ha detectado la presencia de arsénico en los acuíferos relacionado con la actividad hidrotermal, uso de pesticidas e industria minera. (cinvestav.mx/./Publicaciones%20y%20Noticias/Revistas/Cinvestav/octdic%202006/presencia%20arsenico.pdf).

En Taxco de Alarcón, Guerrero, la explotación de la plata, plomo, cobre, hierro y zinc ha generado una gran cantidad de desechos tóxicos. Estudios recientes sobre jales mineros y su entorno, reportaron que las concentraciones de Fe, Pb, Zn, As, están por encima de las normas, provocando un grave problema a los ecosistemas y al ser humano (Talavera *et al.*, 2005).

Existen muchos casos documentados en el mundo de afectación de metales al ser humano. En la bahía de Minamata Japón (pueblo pesquero), la planta Chisso Corporation, estuvo vertiendo mercurio orgánico (un compuesto metilado de mercurio), contaminando el medio ambiente durante más de 30 años afectando a la población humana y los animales (japan.org/factsheet/es/pdf_Spanish/S43_envirp.pdf). Otro caso conocido es el de Idrija (ex-Yugoslavia) donde un incendio en una mina de mercurio provocó la generación de vapores de mercurio que afectó al menos a 900 personas y muchos animales de granja (Magos, 1975). La explotación de níquel a gran escala en Guatemala provocó una fuerte contaminación del Lago Izabal, el más grande del país, afectando severamente los ecosistemas y a los pobladores de la zona (Pérez, *et al.*, 2004. Inforpress, 2006. Minería: violento desalojo en El Estor, Izabal).

Dado el carácter tóxico de muchos elementos presentes en los residuos mineros así como las características carcinogénicas y mutagénicas de algunos de ellos (ej. As, Pb, Hg, Cd), la mayoría de los países han promulgado leyes de remediación y conservación en los sitios mineros. En México, la normatividad está establecida en las normas NOM-141-SEMARNAT-2003 (jales) y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (suelos) de reciente promulgación. Estas normas han obligado a las empresas mineras a establecer programas de saneamiento y prevención encaminados a recuperar y conservar los ecosistemas del entorno.

Aunque existen muchos métodos para remediar sitios contaminados, los métodos más utilizados incluyen tecnologías sencillas y de bajo costo que tienen un alto grado de eficiencia. Entre las más utilizadas están las llamadas técnicas de fitorremediación que incluyen a la fitoextracción, fitoestabilización y humedales entre los más conocidos y utilizados. Éstos métodos consisten en el uso de plantas (terrestres o acuáticas) con comunidades microbianas nativas (Wetzel *et al.*, 1997; Harvey *et al.*, 2002), así como la aplicación de técnicas agronómicas para metabolizar, extraer, degradar o estabilizar grandes cantidades de contaminantes (Schnoor, 1997). De ahí la importancia de probar un programa de fitorremediación como medida para reducir el impacto ambiental de los Jales mineros de “El Fraile”, en Taxco de Alarcón, Gro.

En esta investigación se evaluará la concentración total de metales potencialmente tóxicos (EPT) y se determinará la especiación de los jales de “El Fraile”, utilizando una técnica de extracción secuencial. Sin embargo los jales fueron depositados en hace aproximadamente 50 años, por lo que estas leyes no aplican debido que desde su inicio, los depósitos de jales mineros en su mayoría están altamente contaminados con elementos potencialmente tóxico (EPTs) y sus valores normales, están muy por encima de lo establecido por dichas Normas (NOM- 141 y NOM 147 SEMARNAT y NOM-052-ECOL-1993).

I.2 Planteamiento del problema y riesgo a la salud

Los depósitos mineros de “El Fraile”, presentan características de mucho interés, como son: las evidentes reacciones químicas que ocurren en los desechos, pero además se encuentran dentro de una comunidad en donde utiliza el agua que emana de ellos (jales) para su uso doméstico, lo cual representa un riesgo potencial para la salud y el medio ambiente. Otro aspecto de importancia es la presencia de múltiples minerales tanto primarios como secundarios que se encuentran expuestos al aire libre, y por lo tanto, entran en contacto con el agua meteórica. Estudios en la población indican que existe evidencia de afectación por plomo y arsénico (Soto *et al.*, 2007).

De ahí la importancia de implementar técnicas de remediación de bajo costo que pare o disminuya la afectación de los recursos naturales del entorno pero sobre todo a los pobladores de la zona. Este proyecto busca evaluar alternativas a través de la fitorremediación para el bio-mejoramiento de jales con metales pesados y generar las bases metodológicas para la recuperación del área.

I.3 Objetivos

I.3.1 Objetivo general

Caracterización química y fitorremediación de los Jales Mineros de “El Fraile”, en Taxco de Alarcón, Gro., como medida para reducir el impacto ambiental de metales pesados.

I.3.2 Objetivos específicos

- 1) Caracterización química del depósito de jales de “El Fraile” en Taxco de Alarcón, Gro.

- 2) Identificar las plantas nativas con el mayor potencial de fitorremediación.

- 3) Seleccionar la técnica de fitorremediación más apropiada para disminuir el impacto ambiental de los metales pesados a los recursos naturales del entorno y sus ecosistemas.

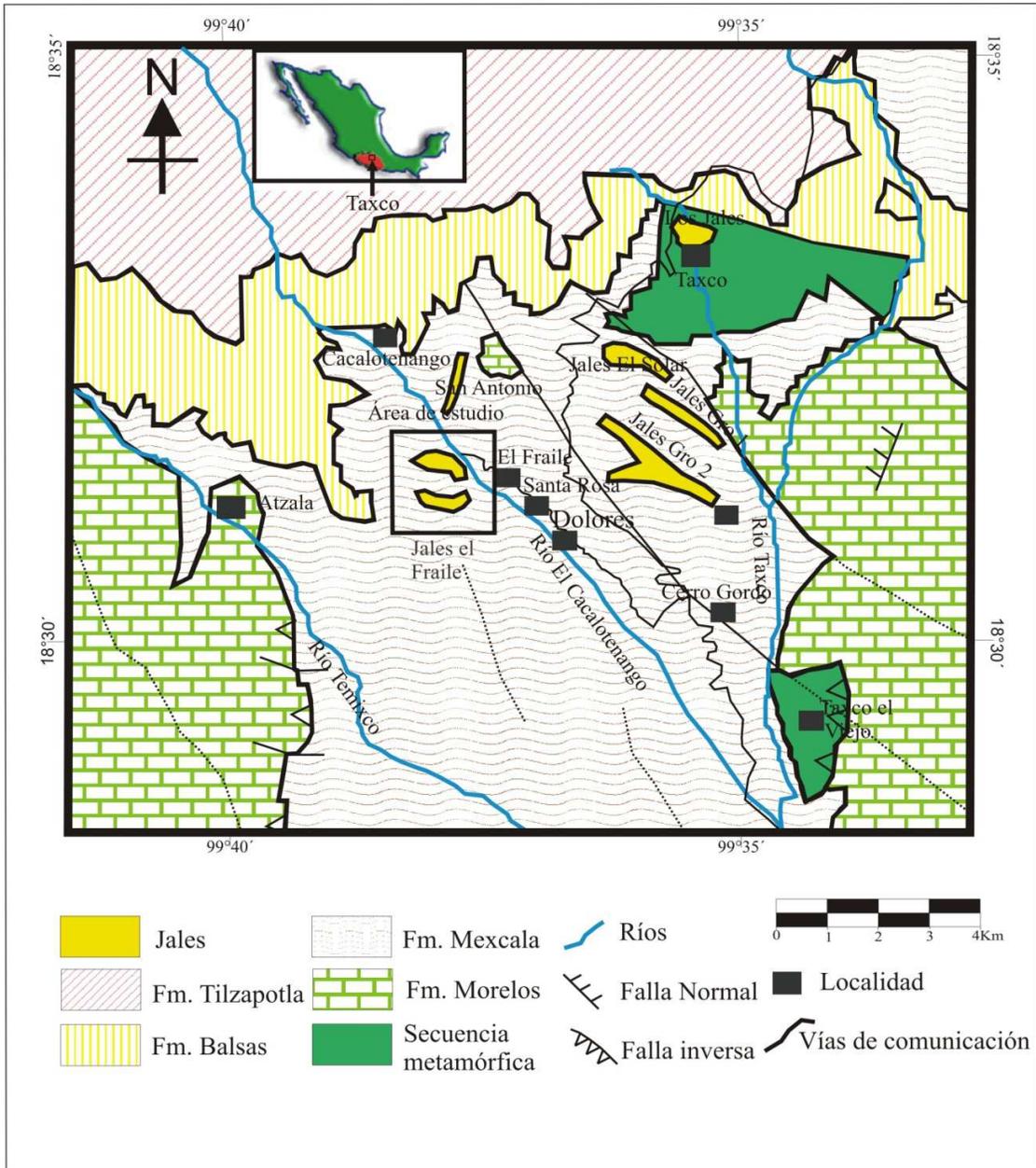
1.4 Geología del área de estudio

Los depósitos de jales mineros de “El Fraile”, de acuerdo a la Figura 1, se ubican a aproximadamente 12 Km de la ciudad de Taxco de Alarcón entre los paralelos 18° 30´ y 18° 35´ de latitud Norte y los meridianos 99°32´30" y 99°40' 00" de longitud Oeste, con una dimensión aproximada de 470 m de longitud, 372 m de ancho y 60 m de altura promedio.

Estos jales fueron depositados hace aproximadamente 50 años y se ubican entre los poblados de Santa Rosa y la comunidad de “El Fraile” y pertenecen al municipio de Taxco de Alarcón. La estructura general de los jales es en bancos horizontales escalonados, en forma piramidal. Estudio realizado por Diez en el 2006, indican que los suelos de cultivos que se encuentran alrededor de los jales están fuertemente afectados con un alto índice de contaminación por metales pesados.

En los jales se construyeron túneles con la finalidad de drenar el agua meteórica de los arroyos y parte de los lixiviados que se filtran. El color original de los jales es gris oscuro a gris claro. En la actualidad, su coloración es café amarillento debido a los procesos de oxidación a los que han estado sujetos, además presentan una costra de oxidación de aproximadamente de 3-5 cm compuesta de óxidos de Fe y precipitados blancos.

Las vías de acceso al área de estudio son: la carretera federal de cuota de Cuernavaca y la carretera federal libre No. 95 México-Acapulco. A 9 km al sur de ciudad de Taxco, existe un entronque del cual se desprende una carretera empedrada que conduce a las comunidades de Santa Rosa, El Fraile, Dolores, Cacalotenango y Hueymatla. La región de estudio se encuentra aproximadamente a 5 km del entronque antes mencionado (Figura 2).



Figuras 1. Mapa de ubicación de los jales “El Fraile” en Taxco de Alarcón, Gro.

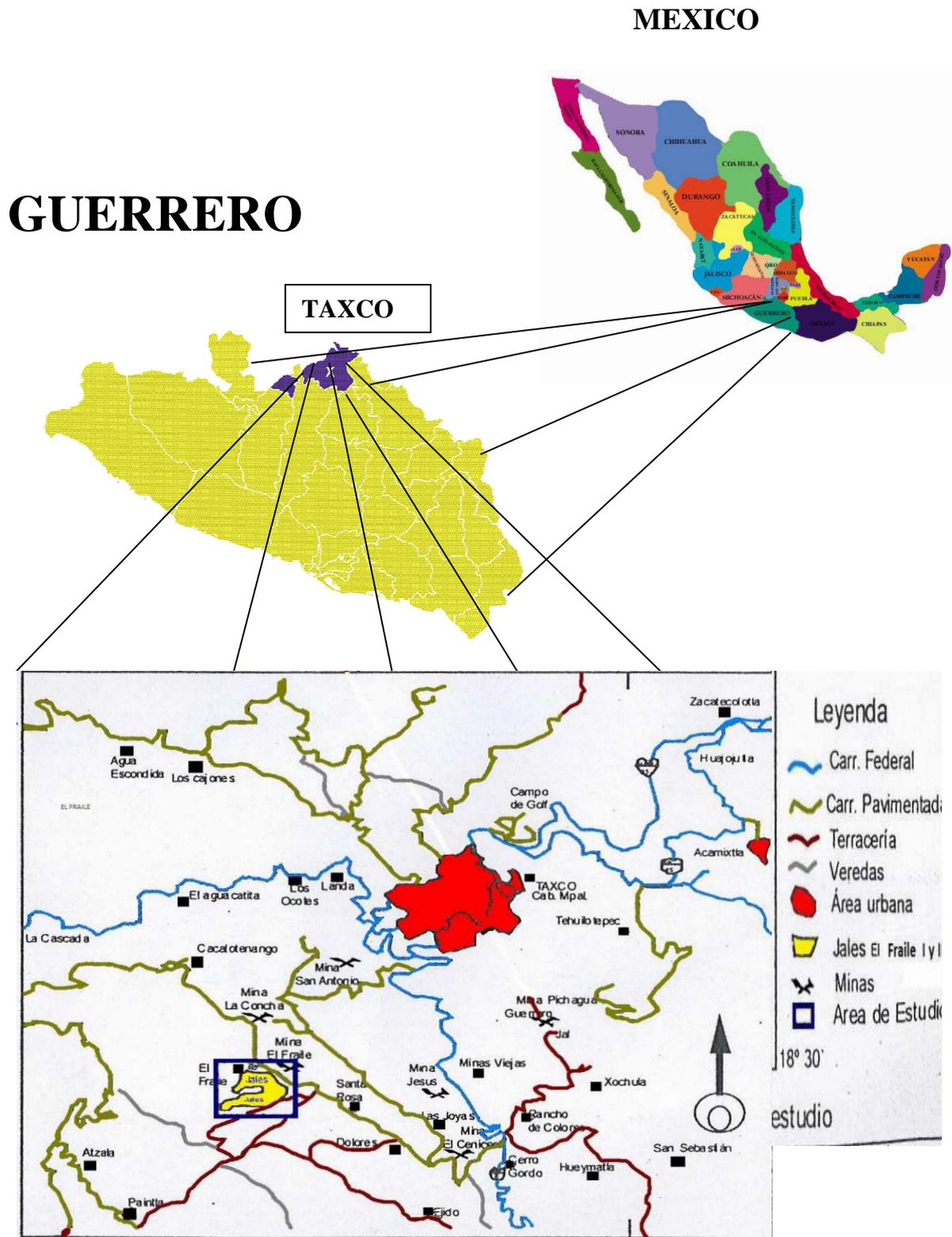


Figura 2. Mapa de localización geográfica y vías de acceso del área de estudio.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS JALES MINEROS

II.1 Caracterización química-mineralógica

Debido al desarrollo industrial de la minería en nuestro país y a la falta de normatividad sobre sus residuos tóxicos se han generado por muchos años una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país. El impacto ambiental causado por la contaminación por metales, depende de la capacidad de retención del suelo, agua, condiciones fisicoquímicas y biológicas del entorno, provocando un cambio de oxidación de los EPTs.

El cambio de estado de oxidación y el pH pueden incrementar o disminuir el riesgo potencial de biodisponibilidad de un metal en el suelo. En el caso de los suelos, si los metales se encuentran biodisponibles, pueden afectar la fertilidad, mientras que en los cuerpos de agua, son afectados seriamente el uso para el consumo humano. Muchos metales se encuentran en bajas concentraciones en el medio ambiente, aunque, como resultado de actividades antropogénicas, el ambiente suele contaminarse cuando la composición del mismo se desvía de su composición normal (Tabla 1)

Tabla 1. Los niveles normales de metales pesados en el suelo (NOM-141-SEMARNAT-2003)

Metal	Niveles normales ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Arsénico (As)	<0.1-40
Cadmio (Cd)	0,01-2,7
Cobalto (Co)	0.1-65
Cromo (Cr)	1-3000
Cobre (Cu)	1-100
Fierro (Fe)	7000-550000
Mercurio (Hg)	0.008-0.7
Manganeso (Mn)	7-4000
Molibdeno (Mo)	0.2-5.0
Níquel (Ni)	1-1000
Plomo (Pb)	2-200
Zinc (Zn)	3-300

De los 38 elementos que están conformados los EPTs (sustancia tóxica que tiene un efecto adverso sobre la salud ya sea del hombre, animales o plantas). 12 son los encontrados frecuentemente en las zonas mineras del país (Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, As y Zn). Actualmente, el número de sitios contaminados, asciende a varios miles, cuyo riesgo potencial es desconocido (USEPA, 1997).

En algunos estados de la República Mexicana se han identificado sitios contaminados con algún tipo de residuos peligrosos generados por la industria minera, siendo Nuevo León (con 22 sitios), Coahuila (15), Baja California (8), Jalisco (7), Taxco, Gro., (7), Hidalgo (6) por mencionar, en donde se han realizado acciones de control y/o correctivas (remediación) para disminuir la contaminación (Romero y Ruíz, 2010). Sin embargo, en algunos casos, dichas acciones resultan insuficientes por lo que aún existe un riesgo latente sobre la población y/o el medio ambiente (SEMARNAT, 2002).

Los suelos cercanos a los productos de la actividad minera, al hacer reacción con el oxígeno y el agua, cambian significativamente la estabilidad de los minerales provenientes de los desechos mineros que generan soluciones ácidas que a menudo pueden contener altas concentraciones de EPTs. El grado de actividad y disponibilidad de los EPTs en los depósitos de jales depende de muchos factores en particular pH, potencial de oxidación, composición química, condiciones climáticas, entre otros. Los minerales ricos en sulfuros metálicos, generalmente contienen cantidades variables de Pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS) además de las fases minerales predominantes como cuarzo, feldespatos, calcita y minerales secundarios.

II.2 Importancia de la especiación química secuencial

La existencia de las concentraciones totales elevadas por encima del valor de fondo regional y de la NOM-141- SEMARNAT-2004, evidencia potencial de afectación de los jales mineros a los recursos naturales del entorno y del

ecosistema. Debido al grado de contaminación y al impacto significativo que los residuos de plantas mineras producen al ambiente, se hace necesaria la utilización de técnicas que demuestren de manera real la afectación al medio ambiente tales como:

- a) **Concentración total de metales en los jales** .Es un procedimiento que se ha utilizado como un criterio para evaluar el potencial de contaminación. Lo anterior está basado en el principio que establece que a mayor concentración de metales en los jales, mayor será el impacto al medio ambiente (Hirner (1996).
- b) **Extracción secuencial**. Es un procedimiento analítico que se utiliza para la separación de EPTs. Sirve para conocer la concentración de los EPTs en las diferentes fracciones: intercambiables (solubles y adsorbidas), asociadas a carbonatos, a oxihidróxidos de Fe y Mn, a sulfuros y materia orgánica (MO) y, por último la fracción residual. Esta técnica es también conocida como especiación química, útil para determinar, con mayor precisión posible la distribución de los ETPs existentes en una muestra sólida entre fracciones de distinta naturaleza fisicoquímica. (Nirel y Morel, 1990).

La metodología de extracción química secuencial fue desarrollada por (Tessier *et al.*, 1979) ha servido de base para el desarrollo de otros esquemas posteriores de especiación como los métodos de Loring y Rantala (1992), Förstner (1983) y Salomons y Förstner Meguellati (1993). Las fracciones de metales pesados que comúnmente se suelen diferenciar en los sólidos mediante este tipo de metodologías son: intercambiable, asociada a carbonatos, asociada a óxidos Fe y Mn, asociada a materia orgánica y fracción residual.

II.3 Descripción de fracciones

II.3.1 Fracción Intercambiable

Fracción soluble

En esta fracción se encuentran las especies químicas que están fácilmente biodisponibles al ambiente y por lo tanto, la de mayor riesgo para la biota. La presencia de metales en esta fracción es el mayor indicativo de liberación de EPT de manera inmediata.

Fracción adsorbida

Los elementos que están asociados al sedimento a través de atracciones electrostáticas por lo que pequeños cambios en las condiciones de pH y Eh pueden romper dichas cargas y liberar los EPT adsorbidos. Se considera que la liberación de EPT ocurre en un corto plazo, esto indica que el proceso puede acontecer en un periodo menor al año (que va de días a 12 meses), lo cual representa un riesgo al medio ambiente. Según Tessier (1979), la fracción soluble y adsorbida representa a la fracción intercambiable.

II.3.2 Fracción asociada a carbonatos

Se considera que los metales unidos a ésta fracción se pueden liberar al descender el pH de los sedimentos y disolver los metales precipitados en forma de carbonatos (ácidos débiles). Estos minerales representan las especies que controlan el pH del medio, manteniéndolo entre 6.5 y 7.5. Se estima que la disolución de los carbonatos ocurre en un periodo de tiempo relativamente corto, por lo que la liberación de los EPTs podría darse en un periodo menor al año.

II.3.3 Fracción asociada a oxihidróxidos de Fe-Mn

Los metales presentes a ésta fracción pasarán al agua en condiciones reductoras. Incluye óxidos y oxihidróxidos de Fe-Mn (agentes reductores), un grado muy variado de cristalización, con alto poder de adsorción de elementos

metálicos traza y termodinámicamente inestable bajo condiciones anóxicas (valores bajos de potencial redox).

La neutralización del drenaje ácido de mina (DAM) generado por la oxidación de sulfuros de hierro como pirita o pirrotita, produce oxihidróxidos de Fe-Mn, con frecuencia poco cristalizados o amorfos, que absorben grandes cantidades de EPTs. La disolución de estos minerales requiere de condiciones moderadamente ácidas. Se estima que los minerales de esta fracción se disuelven lentamente por lo que la liberación de EPTs es a mediano plazo (1-5 años).

II.3.4 Fracción asociada a sulfuros y materia orgánica (MO)

Los materiales sulfurados y compuestos orgánicos incluidos en esta fracción, incluyen especies relativamente estables que requieren de condiciones extremas de pH (<2) y/o alta oxigenación que producen su oxidación y acidificación del medio.

Los fenómenos como disolución, precipitación, entre otros, son importantes en la liberación y transporte de EPTs. Pero la dinámica de los elementos en suelo también está influenciada por la MO (que representa la acumulación de las plantas destruidas y resintetizadas parcialmente, así como residuos de animales presentes en el suelo), esta, puede llegar a formar coloides que adsorben y/o controlan la partición de metales pesados. La MO controla, por tanto, la biodisponibilidad y persistencia de estos metales en el suelo, por esta razón que se analizan en este procedimiento los sulfuros y materia orgánica (agentes oxidantes).

Las especies de esta fracción se consideran entre las más estables ya que requieren periodos de tiempo relativamente grandes (5-20 años) para disolverse y liberar los EPT adsorbidos.

II.3.5 Fracción residual.

La liberación de los metales en ésta fracción, en un período razonable de tiempo es ciertamente improbable. Es de esperar que estos elementos ligados a la fracción residual no se solubilicen, ya que se requiere de grandes periodos de

tiempo para disolverse (cientos a miles de años). Esta fracción se considera la más estable y la menos peligrosa para el ambiente. Por lo que se considera que los ETPs contenidos en esta fracción, sólo pueden movilizarse utilizando ácidos fuertes y elevadas temperaturas.

II.4 Metales pesados

Se consideran metales pesados aquellos metales que tienen una densidad mayor que $5\text{-}6\text{ g/cm}^3$ (Wild, 1993). Los ETPs más contaminantes y tóxicos para el ambiente son: As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sb y Zn. Cuando se encuentran disponibles en la naturaleza, los metales pesados pueden sufrir cambios en su movilidad, debido a factores como el pH y Eh. En el caso del As y Hg son considerados como metaloides, sin embargo tanto los metales como los metaloides se agruparon como EPTs.

II.5 Caracterización química de los jales de El Fraile

Los jales de El Fraile contienen un cálculo de alrededor de 5 millones de toneladas de residuos mineros (Romero 2004), y están constituidos por minerales primario (minerales de sulfuros) como pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y galena (PbS), y minerales de ganga (sin valor económico) como cuarzo (SiO_2) y calcita (CaCO_3). Como minerales secundarias se han reportado, jarosita ($\text{K}_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$), basanita ($2\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), saponita ($\text{Na}_{0.33}(\text{H}_2\text{O})_4$), hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$), bernalita, ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), epsomita ($\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$), este último es el sulfato que mayor representación alcanza, acompañando a una gran variedad de minerales (Talavera *et al.*, 2005).

Estudios de Flores-Mundo (2002) y Romero (2001), los jales El Fraile se distinguen las siguientes características químicas:

Granulometría. En los jales “El Fraile” se encontró una granulometría muy variable. Como se aprecia en la Tabla 2, contienen mayoritariamente partículas de los tamaños de arenas gruesas, finas y lodos y en menor proporción de arenas medias y arenas muy gruesas. Las características observadas en la granulometría

de las muestras, indican que las partículas pueden ser fácilmente transportadas por la acción del viento y del agua y ser depositadas en los suelos y ríos cercanos.

Tabla 2. Granulometría y contenidos de materia orgánica de los Jales de “El Fraile”. Datos de Flores-Mundo (2002).

Granulometría	Mínimo % Gral.	Máximo % Gral.	Media y STD Gral.
Arenas muy gruesa	0.3	9.17	2.48 ± 2.0
Arenas gruesas	4.5	50.67	27.9 ± 11.3
Arenas medias	1.5	21.2	13.7 ± 4.6
Arenas finas	17.5	54.4	26.7 ± 8.6
Lodos	8.0	69.67	29.04 ± 15.0
Materia Orgánica	0.2	8.8	3.22 ± 1.5

Contenido de materia orgánica (MO). Es bajo y oscila entre 0.2% y 4.5% con la excepción de algunos sitios donde los jales se mezclan con suelos y el contenido de MO puede alcanzar hasta 8.8% (Flores-Mundo 2002).

pH y mineralogía. En los jales El Fraile se reconocen dos grupos de muestras con características físicas y químicas distintas (tabla 3). El grupo I incluye muestras ácidas con valores de pH entre 2.44 y 5.28 y altos valores de conductividad (1235-5180 $\mu\text{S/cm}$) y valores de Eh > 400 mV. El grupo II incluye muestras neutras con valores de pH entre 7.32 y 7.85 y con valores de conductividad de (336-2090 $\mu\text{S/cm}$) y valores de Eh < 400 mV, pero inferiores a los reportados en las muestras del grupo I.

Tabla 3. Parámetros físicos de las muestras de jales de El Fraile.

PARÁMETROS	GRUPO I (ácidas)	GRUPO II (neutras)
pH	2.44 – 5.28	7.32 – 7.85
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	1235 – 5180	336 - 2090
Eh (mV)	>400	<400

$\mu\text{S/cm}$ = micro siemens/cm mV = milivoltos Eh= Potencial óxido-reducción

Flores-Mundo (2002), en su investigación, evaluó los contenidos de metales totales de mayor concentración en los jales “El Fraile”, principalmente el Cd, Cu, Pb, Zn, As, Fe, Mn y Ag. Los resultados obtenidos por este autor se sintetizan en la Tabla 4.

Tabla 4. Estadística básica de los contenidos totales de los metales estudiados en muestras de jales de “El Fraile”. (Datos de Flores-Mundo (2002))

Elemento	Cd total mg kg ⁻¹	Cu total mg kg ⁻¹	Pb total mg kg ⁻¹	Zn total mg kg ⁻¹	As total mg kg ⁻¹	Fe total (en %)	Mn total mg kg ⁻¹
Mín	1.05	127.1	756	876	94.04	16536	24.9
Máx	429	1930	23504	20811	9532	187401	5549
Media arit	68.54	796	9546	4819	3012	68711	990
STD	91.6	485	5021	4593	6400	42655	1820
Valores de fondo	1	25	26	64	30	2.7	409
FE	1.05 -429	5.12 - 77.82	29.64 - 921.72	13.62 - 323.65	3.18 - 323.11	6124.44 - 68407.77	0.06 -13.56

FE= Factor de Enriquecimiento

Algunos estudios realizados en los jales mineros en la región de Taxco de Alarcón, Guerrero son los siguientes.

- Barrera (2001) presenta “geoquímica de metales pesados en los jales “El Fraile” municipio de Taxco, Guerrero”, y evalúa el potencial de los jales mineros de El fraile para liberar metales al ambiente en función de su composición química y mineralógica.
- Castro de Dios (2001) realizó estudios sobre “Caracterización Química-Mineralógica de los sedimentos de los Ríos Taxco y Cacalotenango en la región minera de Taxco, Guerrero, y menciona que los sedimentos se encuentran fuertemente afectados por metales tóxicos como: Ag, Cu, Zn, Cd, As y Pb.
- Dotor Almazán *et al.*, (2000). Presentan “Determinación de lixiviación de metales con diversos reactores en jales mineros como una guía para evaluar su potencial de contaminación” utilizando como caso de estudio los jales de la mina La Concha, el cual indican que las muestras presentaron alto grado de oxidación y bajos contenidos de carbonatos.

- Flores–Mundo (2002) desarrollo su investigación sobre “Caracterización Química y Mineralógica de los jales “El Fraile”. Reporta que los contenidos de metales totales (Ag, Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, As, Sr, Se, Ti y Mo) son muy variables, pero globalmente altos, por lo que estos depósitos representan una fuente emisora de metales tóxicos muy importante hacia los sedimentos, aguas superficiales del río Cacalotenango y los suelos de cultivos. Este autor estudió 34 muestras representativas, de esas, 14 fueron seleccionadas para la realización del trabajo “Caracterización Química y Fitorremediación de los jales mineros de “El Fraile”, de Taxco de Alarcón, Gro. México.
- Talavera *et al.*, (2005). “Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from, silver mines in the Taxco, México area to evaluate their potential environmental impact”. Reportando una mineralogía muy variable de minerales primarios y secundarios.
- Talavera *et al.* (2006). “Geochemistry of leachates from the El Fraile Sulfide tailings piles in Taxco Guerrero, southern México. Environmental Geochemistry and Health”,
- Muñoz *et al.* (2006). En su estudio “Hidrogeoquímica de metales en el río Taxco, en el Estado d Guerrero” y analizó elementos pesados en aguas residuales del río, producidos por la descarga urbana y la minería, y enfatiza que las rocas carbonatadas disminuyen considerablemente las concentraciones de metales pesados en el río de Taxco.

III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FITORREMEDIACIÓN

III.1 Remediación de suelos por métodos químicos y físicos

La contaminación de suelos por metales puede ser remediada por técnicas químicas, físicas y biológicas y son agrupadas en dos categorías: a) *in situ*, que remedia el suelo contaminado sin la remoción del mismo y b) técnicas *ex situ*, que requieren remoción de suelo. Las técnicas *in situ* tienen mayores ventajas que las de *ex situ* debido a su bajo costo y a su reducido impacto en el ecosistema (Chen *et al.*, 1997). La remediación del suelo es necesaria para eliminar o disminuir los riesgos a los humanos y al ambiente de la toxicidad de los metales. Las estrategias físicas y químicas de remediación más utilizadas para eliminar y/o reducir los contaminantes del suelo son: extracción, sellado, incineración, excavación, tratamiento químico y tratamiento electroquímico. No obstante, muchas de estas tecnologías son costosas ya que su precio estimado de la recuperación de suelos en el mercado en Estados Unidos de América es de aproximadamente de 1-2 millones en el año 1997 incrementándose a 15-25 millones para el 2000 y probablemente de 70-100 millones en el año 2005 (Cunningham, 1996; Glass, 2000; McGrath *et al.*, 2001).

III.2 Remediación de suelos por métodos biológicos

La bioremediación es un conjunto de técnicas que utilizan organismos vivos como plantas, hongos y bacterias para degradar, transformar o remover los contaminantes del suelo transformando los compuestos químicos nocivos a compuestos inocuos (Van Deuren *et al.*, 1997). Adecuar las condiciones físico-químicas del suelo para favorecer el crecimiento de los microorganismos es otro factor básico. Los microorganismos están presentes en los medios naturales y juegan un papel muy importante en los procesos de bioremediación. Este tipo de tratamiento es efectivo en cuanto a costos y tecnologías más benéficas para el ambiente (Volke y Velasco, 2002).

III.3 Fitorremediación

La fitorremediación (*phyto = planta y remediación= mal por corregir*) es un tipo de bioremediación que utilizan las plantas para limpiar o estabilizar un contaminante del suelo. La eficacia de la fitorremediación depende del tipo de planta utilizada, de tipo de contaminante, de la diversidad microbiana y de las propiedades del suelo. La interacción raíz-microorganismo contribuye significativamente en la reducción, remoción, degradación o estabilización de contaminantes. De esta forma la fitorremediación constituye una tecnología de bajo costo que posee un impacto regenerativo en lugares en donde se aplica y es ambientalmente amigable para sanear los suelos contaminados con metales pesados. Los beneficios derivados de esta estrategia de fitoenmienda abarcan los sectores del ambiente, la salud, industria y energía.

La fitorremediación aplicada a suelos contaminados con metales pesados, incluye, básicamente seis mecanismos (Figura 3): (i) Fitoextracción o fitoacumulación (capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus hojas, raíces y tallos). (ii) Rizofiltración (la planta utiliza las raíces, para absorber, concentrar y precipitar contaminantes). (iii) Fitoestabilización (utilización de plantas con ciertas características fisiológicas, capaz de inmovilizar el contaminante, a través de la absorción y acumulación en la raíz). (iv) Rizodegradación o fitoestimulación (las raíces de las plantas destruyen el contaminante del suelo). (v) Fitodegradación (la planta degrada los contaminantes del suelo y los transforma en un material sin riesgo para el medio ambiente) y (vi) Fitovolatilización (la planta absorbe agua junto con los metales, y después los transforma en formas volátiles, liberándolos a la atmósfera por transpiración).



-  Contaminantes en suelo, raíz, tallo y hojas
-  Contaminantes absorbidos, acumulados y degradados por la planta
-  Absorción y destrucción de contaminantes del suelo en la zona radicular

Figura 3. Tipos de fitorremediación, indicando la zona de la planta en donde ocurre el proceso.

III.4 Papel de las plantas frente a los metales pesados

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías:

- a) Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo, o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación
- b) Pueden ser absorbidos por las plantas y ahí incorporarse a las cadenas tróficas.
- c) Pueden pasar a la atmósfera por la volatilización.
- d) Pueden movilizarse por las aguas superficiales y subterráneas.

En los últimos años ha crecido espectacularmente el interés en las plantas que pueden acumular y tolerar cantidades inusualmente altas de metales en los tejidos de su parte aérea. Las investigaciones con estas plantas llamadas hiperacumuladoras de metales se han multiplicado por su potencial utilidad para el hombre como herramienta en la limpieza de suelos contaminados. La reducción del contenido de metales pesados hasta niveles óptimos, permitiría la reutilización del suelo con un fin agrícola, forestal, hortícola, entre otros.

En 1993 se realizaron los primeros experimentos utilizando plantas hiperacumuladoras para extraer metales de lugares contaminados (McGrath *et al.*, 1993 y 2006), y desde entonces se han descubiertos muchas plantas con esta

capacidad, el de acumular distintos metales (*Alyssum sp.*-Ni, *Thlaspi caerulescens*-Zn/Cd, *Melastoma malabanthricum*-Al, entre otras especies).

Actualmente, las plantas hiperacumuladoras identificadas son aproximadamente más de 400 especies distribuidas por todo el mundo. En la mayoría de los casos, no se trata de especies raras, sino de cultivos comunes que se han ensayado con éxito como posibles especies fitorremediadoras, como son la alfalfa, la mostaza, el tomate, la calabaza, el esparto, el sauce y el bambú.

Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran pero en distintos grado, dependiendo de la especie vegetal, características y contenido de metales del suelo. Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Beker, 1981; Barceló *et al.*, 2003). Unas basan su resistencia a los metales con la estrategia de una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte a la parte aérea. Otras prefieren acumular el metal en la parte aérea en una forma no tóxica para la propia planta. La exclusión es más característica de especies sensibles y tolerantes a los metales, mientras que la acumulación es más común de especies que aparecen siempre en suelos contaminados.

De acuerdo con la estrategia de acumulación de Beker (19981) las plantas hiperacumuladoras pueden superar en 100 o más veces los valores normales de metales acumulados. Estas plantas son especies muy tolerantes a uno o más metales pesados y a menudo su distribución está restringida a suelos ricos en un amplio rango de concentraciones de metales, pues no son competitivas en zonas no contaminadas. La hiperacumulación ha evolucionado en más de 400 especies de plantas repartidas en 45 familia botánica y distribuidas por todo el mundo (Beker *et al.*, 2000).

Esta capacidad de sobrevivir y crecer en suelos contaminados, acumulando gran cantidad de metales, convierte a las hiperacumuladoras en organismos muy indicados para la fitoextracción. La hiperacumulación implica la existencia de mecanismos internos de detoxificación (amortiguación) de los iones metálicos libres para evitar que puedan causar daño oxidativo a las células. La planta puede protegerse formando complejos metálicos estables menos tóxicos con quelantes.

y/o reteniendo los metales desde zonas con un metabolismo activo (citoplasma) hacia el interior de vacuolas o en la pared celular, donde no puedan ocasionar efectos adversos. En general, las hiperacumuladoras presentan una tasa de crecimiento baja, poca producción de biomasa y un sistema radicular pobre. (Schat *et al.*, 2002; Tolrá *et al.*, 1996).

Una planta ideal que pueda ser utilizada para la fitorremediación de metales pesados deberá poseer múltiples características: deben ser de rápido crecimiento, tener raíces profundas, una biomasa abundante, ser fácil de cosechar y ser capaz de tolerar y acumular una amplia gama de metales pesados en sus partes aéreas, es decir debe ser hiperacumuladora e hipertolerante (Clemens *et al.*, 2002). Hiperacumuladora es una planta que contiene una mayor concentración de metales pesados e hipertolerante que posee mecanismos internos de detoxificación (amortiguación) que le permiten retener metales y metaloides en la vacuola, estos fenómenos ocurren por lo regular en plantas terrestres.

III.5 Tipos de fitorremediación de plantas hiperacumuladoras de metales (Figura 4).

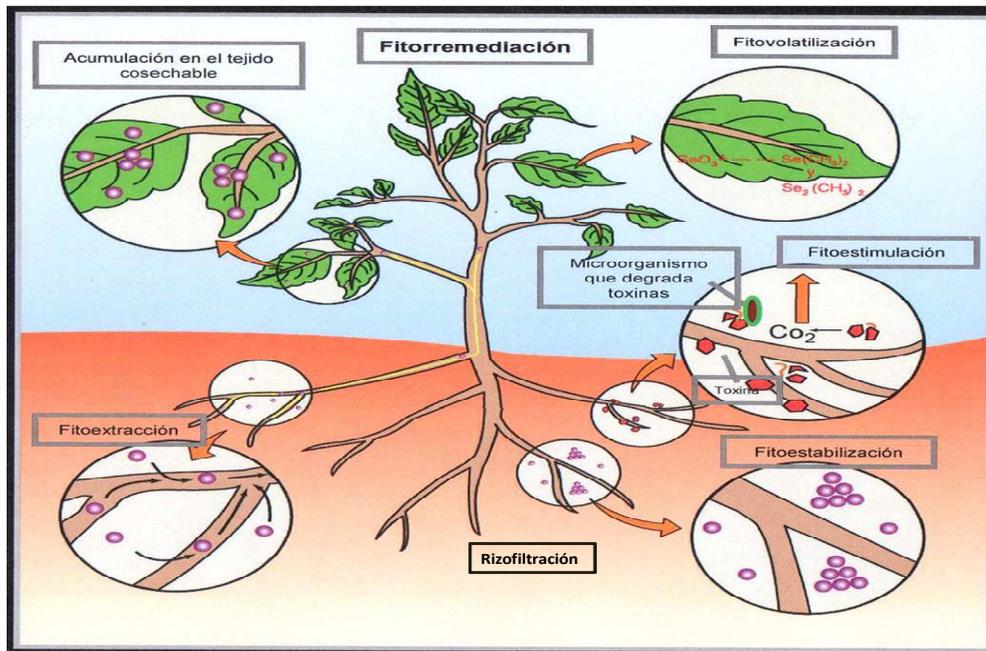


Figura 4. Mecanismos de Fitorremediación y procesos que provienen de la identificación de plantas que hiperacumulan metales.

Fitoextracción o fitoacumulación. Es una de las técnicas de fitorremediación más utilizada y consiste en la absorción de metales contaminantes del suelo a través de las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas (Ginocchio, 2004). Esta es una técnica *in situ* de muy bajo costo, ambiental y socialmente amigable cuya aplicación permite degradar, retener o reducir las concentraciones de los contaminantes a niveles aceptables. Dependiendo de la planta utilizada puede remediar sitios con altas concentraciones de As, Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn (Sellers, 1999) y ha sido también utilizada en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua.

En sitios donde los contaminantes están presentes en el agua como es el caso del DAM o lixiviados de jales y mina se utilizan especies acuáticas o semi-acuáticas como plantas extractoras o acumuladoras aplicando una variante de la técnica llamada humedales. La eliminación de metales mediante el uso de humedales es, no obstante, muy limitada y se reduce a los metales más comunes

como el Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, As y Zn (Vymazal, 2005). Por otro lado, muchos aspectos sobre el funcionamiento de los humedales no se conocen todavía, en particular, los mecanismos de eliminación de los metales y las interacciones entre ellos.

La fitoextracción o fitoacumulación requiere del uso de plantas, preferencialmente nativas, que tengan alta tolerancia a los metales y que su fisiología les permita acumular altas concentraciones de uno o varios metales en su tallo u hojas sin que represente algún daño a su funcionamiento. Todas las plantas poseen un potencial para absorber una amplia variedad de metales del suelo pero la mayor parte de las plantas tienden solamente a absorber los que son esenciales para su supervivencia y desarrollo. Existe un pequeño grupo de plantas que pueden tolerar, absorber y cambiar los altos niveles de ciertos metales, estas plantas reciben el nombre de hiperacumuladoras (Chen *et al.*, 2001).

Si una planta contiene más de 0.1% de Ni, Co, Cu, Cr y Pb o 1% del Zn en sus hojas sobre una base del peso seco, ésta puede ser llamada una “planta hiperacumuladora”. Las primeras plantas hiperacumuladoras caracterizadas son miembros de las familias *Brassicaceae* y *Fabaceae*. El primer ensayo en el campo de la fitoextracción fue en 1991. La especie *Thlaspi caerulescens* (carrespique) y *Viola calaminaria* son especies de plantas documentadas por acumular elevados niveles de metales en sus hojas (Baumann, 1985).

Se ha demostrado la tolerancia al cadmio en el diente de león (*Taraxacum officinale*) (Kabir y Koide, 2000; Kuleff y Djingova, 1991). Otras especies como *Chichorium intybus*, *Erigeron canadensis* y *Eupatorium capillifolium* han sido investigadas como especies indicadoras de Cd, Cr, Ni o V. El *Amaranthus reflexus* ha demostrado ser efectiva en absorber cesio-137 radiactivo y plomo. El helecho originario de Florida, *Pteris vittata* es capaz de absorber As (arsénico), este, crece mejor en suelos que contienen elevadas cantidades de arsénico que en los que carecen de él (Martín *et al.*, 1996). El girasol (*Helianthus annuus*) es la especie que absorbe los metales pesados en mayor cantidad en sus raíces que en sus brotes, por lo que se considera una planta hiperacumuladora favorable en la fitoextracción de Cd, Ni, Cu, Zn, Cr, Pb y elementos radiactivos (Christie *et al.*,

2004; Reeves, 2003; Davies, 2001; Cabrera *et al.*, 1999; Kumar *et al.*, 1995). Otras plantas son hiperacumuladoras de Cu, y al mismo tiempo de Co, son de la familia *Asteraceae* (Brooks 1998).

Desde el punto de vista ecológico el papel de las plantas hiperacumuladoras no está aun completamente claro, pero se ha sugerido que éstas suministran protección contra el ataque de hongos patógenos e insectos. Con esta extraordinaria habilidad las plantas hiperacumuladoras de metales están siendo usadas en actividades de remediación en el ambiente, además que constituyen un importante recurso biológico en las futuras revegetaciones y fitorremediaciones de áreas (Lovley, 1997).

En fitorremediación se necesitan plantas de rápido crecimiento con una alta capacidad de incorporación de metales y una rápida ganancia de biomasa, para que puedan interferir en la biodisponibilidad de metales tóxicos en suelos. En su gran mayoría las plantas que acumulan metales son especies silvestres pequeñas en tamaño y tienen las tasas de crecimiento lento. (Baker y Walker, 1997).

La principal desventaja de esta técnica es que una vez terminado el proceso de extracción, las plantas tienen que ser retiradas, destruidas o recicladas. La descomposición de la planta libera nuevamente los contaminantes aunque en forma más estable pero su acumulación excesiva en un solo sitio puede representar un nuevo riesgo potencial para el medio ambiente.

Rizofiltración. Implica la absorción o precipitación de los metales por las raíces de las plantas acuáticas o terrestres. Útil para remediar aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas residuales. Una vez que se ha desarrollado el sistema radicular, las plantas se aclimatan con agua contaminada y posteriormente se plantan en el área designada. Cuando las raíces de las plantas se saturan de contaminantes como Pb, Cr, Cd, As, Cu, Ni, Hg y Zn, estas se cosechan y se incineran o pueden ser recicladas.

Fitoestabilización. Las raíces de las plantas disminuyen la cantidad de metal disponible, pues lo estabilizan mediante compuestos excretados por las raíces como respuesta a la alta concentración de ellos en el medio y el riesgo

tóxico de éste en el suelo, en el ambiente y como consecuencia para el humano (Schat y Verkleij, 1998).

En este proceso las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que pueden absorber y formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfase raíces-suelo (Sellers 1999). Las limitaciones de esta alternativa surgen cuando, la alta concentración de los metales en el suelo produce la consecuente toxicidad en las plantas y afectan sus procesos metabólicos. Ante esta limitante, la selección de plantas capaces de crecer en suelos contaminados, que en ocasiones coinciden con las llamadas hiperacumuladoras, es relevante para poder utilizarlas como alternativa de recuperación. La fitoestabilización requiere de una diversidad vegetal y su mantenimiento tales como: gramíneas, plantas herbáceas, arbustos y árboles adaptados a concentraciones elevadas de los metales. Existen reportes de la aplicación de esta técnica en sitios contaminados con Pb, Cr, Cd, As, Cu, Hg y Zn. Dec y Bollang (1994) demostraron que la planta *Raphanus sp.*, desarrolló un sistema radicular en un año y durante ese tiempo la raíz absorbió compuestos fenólicos hasta en un 90 % de la concentración inicial.

Algunas especies de plantas establecidas en las pruebas de campo con fitoestabilización de suelos contaminados con metales son: *Agrostis castellana*, *Agrostis delicatula*, *Holcus lanatus*, *Cytisus striatus*, *Lotus corniculatus*, *Poa compressa*, *Agrostis gigantea*, *Poa pratensis*, *Phleum pratense*, *Festuca arundinacea*, *Festuca rubra*, *Agrostis capillaris*, *Triticum aestivum*, *Viola calaminaria*, *Brassica juncea* y *Populus sp.* (Mench, 2003, Books, 2000).

Rizodegradación o Fitoestimulación. Proceso por el cual las raíces de las plantas, su microflora asociada y los productos excretados, destruyen el contaminante del suelo en la zona radicular. Siciliano *et al.*, (2003) investigaron la capacidad de degradación y la composición de las comunidades microbianas mediante la fitoestimulación en la raíz de *Festuca arundinacea* expuesta a hidrocarburos. Encontraron que la máxima tasa de degradación fue de 38 mg de hidrocarburos/kg mes, resultando el doble de lo que se encontró en el testigo.

Fitodegradación. Esta consiste en que las plantas acuáticas o terrestres captan, almacenan y degradan los contaminantes del suelo y los metabolizan, transformándolos en un material sin riesgos para el medio natural. Estos productos de degradación le sirven a la planta para acelerar su crecimiento. Por ejemplo, Marjories *et al.*, 2001, Newman *et al.*, 1999 y Kassel *et al.*, 2002, encontraron que el álamo fitodegradó moléculas como el éter metil terbutílico y el tricloroetileno presentes en acuíferos.

Fitovolatilización. Esta se produce a medida que las plantas en crecimiento absorben agua junto con los metales pesados o compuestos orgánicos con alta volatilidad. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse a la atmósfera con la transpiración. Este proceso se aplica generalmente en aguas subterráneas, o también en suelos contaminados con Se, Hg o As (USEPA, 1999, USEPA, 2000, Wong, 2003). Por ejemplo, las raíces de *Populus deltoides* fueron expuestas a una solución de tricloroetileno (70 mg/L) durante 26 días y el 90 % del tricloroetileno fue volatilizado a través de las hojas (Orchard *et al.*, 2000).

Este grupo de *fitotecnologías* reúne un gran número de ventajas. 1) Se pueden realizar *in situ*, es decir sin necesidad de transportar el suelo o sustrato contaminado, 2) son de bajo coste, 3) permiten su aplicación, tanto a suelos como a aguas, 4) sólo requieren prácticas agronómicas convencionales, 5) actúan positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, 6) no utilizan reactivos químicos peligrosos y 7) son especialmente útiles para su aplicación en grandes superficies. (Cunningham *et al.*, 1995).

Desventajas. 1) El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas, 2) Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados, 3) No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano y 4) La bio-disponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación.

III.6 Contribución de los microorganismos en la remediación de suelos contaminados con metales

El suelo provee un hábitat para una gran variedad de organismos desde microbios hasta especies superiores como plantas. Las propiedades biológicas del suelo incluyen la actividad y diversidad de microorganismos del suelo. Las bacterias son los organismos más pequeños y numerosos en el suelo con más de 400 géneros y un estimado de 10,000 (diez mil) especies. En un gramo de peso seco de suelo rizosférico existe una gran cantidad de microorganismos de aproximadamente más de 100,000,000 (cien millones) para bacterias, 1000,000 (un millón) actinomicetos (microorganismo del suelo, ayuda a la fertilidad del mismo), y 100,000 (cien mil) para otros hongos (Karthikeyan *et al.*, 2003). La profundidad es una variable que afecta a los microorganismos. En zonas templadas, casi todos se encuentran en el primer metro de profundidad, principalmente en los primeros 3 a 8 centímetros. En la parte más superficial de los campos de cultivo, la comunidad es escasa, como resultado de una inadecuada humedad y la posible acción bactericida de la luz solar.

De acuerdo a la profundidad de los suelos minerales, la distribución de microorganismos/g, se presenta de la siguiente manera:

De 3 a 8 cm, el número de bacterias aerobias es de aproximadamente 7800, para actinomicetos es de 2080, hongos 119 y algas 25. De 20 a 25 cm, el No. de bacterias es 1800, actinomicetos 245, hongos 50 y algas 5. De 35 a 40 cm, el No. de bacterias es 472, actinomicetos 49, hongos 14 y algas 0.5. De 65 a 75 cm, el No. de bacterias es 10, actinomicetos 5, hongos 6 y algas 0.1. De 135 a 145 cm, el No. de bacterias es 1, actinomicetos 0, hongos 3 y algas 0 (Alexander, 1980).

La densidad de las poblaciones microbianas varía significativamente verticalmente y horizontalmente en el suelo. La dispersión de la biomasa microbiana dentro de una muestra de suelo está relacionada con diversos factores como la distancia de la superficie del suelo debido a la difusión de oxígeno, la locación y disponibilidad de materiales orgánicos como fuentes potenciales de comida (Lovley, 2000). El término “rizósfera” fue introducido por primera vez en

1904 para descubrir la interacción específica entre la bacteria y las raíces de las leguminosas, es decir la influencia de las raíces de plantas donde haya una abundante población microbiana (Karthikeyan *et al.*, 2003).

Dentro de la amplia diversidad microbiana, existen microorganismos resistentes y microorganismos tolerantes a metales. Los resistentes se caracterizan por poseer mecanismos de destoxificación codificados genéticamente, inducidos por la presencia del metal. En cambio, los tolerantes son indiferentes a la presencia o ausencia de metal. Tanto los microorganismos resistentes como tolerantes son de particular interés como captoreadores de metales en sitios contaminados, debido a que ambos pueden extraer los contaminantes. La resistencia o tolerancia experimentada por microorganismos es posible gracias a la acción de diferentes mecanismos. Estos fenómenos son: bioabsorción, bioacumulación, biomineralización, biotransformación y quimiosorción mediada por microorganismos. Por lo que los microorganismos se han considerados como reactores bioquímicos que conducen el proceso de biodegradación de contaminantes del suelo (Lovley, 2000).

Muy poco se conoce acerca de la enorme diversidad de las poblaciones microbianas del suelo, sus propiedades, su comportamiento en el entorno del suelo, los microorganismos que habitan en la rizófora y cómo interactúan con las raíces de las plantas formando útiles asociaciones simbióticas que hacen posible la supervivencia de las plantas, (Khan, 1997). El efecto de los metales pesados a las comunidades microbianas han despertado la atención en la recuperación de suelos contaminados (Simonton *et al.*, 2000). Algunos microorganismos pueden digerir sustancias orgánicas tales como combustibles o solventes, que son peligrosas para los seres humanos, y descomponerlas en productos inocuos mediante un proceso llamado biodegradación. Las sustancias naturales liberadas por las raíces de las plantas (azúcar, alcohol y ácidos) contienen carbono orgánico, del cual se alimentan los microorganismos del suelo, y los nutrientes adicionales intensifican su actividad. Además, las plantas aflojan el suelo y transportan agua al lugar, facilitando así la biodegradación (Karthikeyan *et al.*, 2003).

Debido al gran número y variedad de las bacterias en el suelo (aerobias y anaerobias) no ha sido posible describir a todos los tipos. Entre los géneros más comunes o que tienen un interés mayor, se incluyen: *Acinetobacter*, *Achromobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Caulobacter*, *Cellulomona*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*, *Hiphomicrobium*, *Metallogenium*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Pedomicrobium*, *Pseudomonas*, *sarcina*, *Xanthomona*, *Staphylococcus*, *Streptococcus* y otros. (Alexander, 1980, Eweis, *et al.*, 1999)

III.7 Ejemplos de aplicación de la Fitorremediación en el mundo

Sangabriel *et al.*, (2006) reportaron un estudio de fitorremediación de suelos contaminados con combustóleo y su capacidad de reducir el contenido de hidrocarburos. Se evaluó la tolerancia y crecimiento de seis especies vegetales, tres de leguminosas (*Clitoria ternatea*, *Phaseolus coccineus* y *Cicer arietinum*) y tres gramíneas (*Brachiaria híbrido*, *Brachiaria brizantha* y *Panicum máximum*). Siendo *P. coccineus*, la única leguminosa con tolerancia y crecimiento, presentando mayor población microbiana mientras que las tres gramíneas no fueron afectadas y la degradación de combustóleo fue mayor en *B. brizantha* y *P. máximum*.

En un estudio realizado en Aznalcóllar Madrid, sobre fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados. La especie *Brassica juncea*, conocida como mostaza de la India, fue la planta seleccionada, capaz de acumular en mayor concentración Zn y en especial Pb en las distintas partes de la planta (raíz, tallo y hoja). Además del Zn y Pb, encontraron As, Cd, y Cu como principales elementos responsables de la contaminación junto con la acidificación de los suelos causada por la oxidación de los sulfuros metálicos (Bernal *et al.*, 2007).

Castillo *et al.*, (2007) evaluaron la eficiencia mediante fitoextracción de Pb, Cr y Zn utilizando dos especies de *Pelargonium*, como estrategia de restauración de suelos contaminados en el estado de Morelos. Los resultados mostraron que la especie de *Pelargonium citronellum* presentó mayor capacidad de fitoextracción de Cr, Pb y Zn, respecto a *Pelargonium* sp. Ambas especies no presentaron

síntomas de toxicidad, lo que sugiere que bajo estas condiciones experimentales, estas especies podrían ser utilizadas en procesos de restauración de suelos contaminados con metales pesados.

Maier *et al.*, (2007) investigaron el potencial de fitoestabilización de Plomo y Zinc de jales abandonados utilizando plantas nativas (*Atriplex lentiformis*). Los resultados mostraron que la planta seleccionada es útil para los procesos de fitoestabilización de los desechos de las minas acumulando un nivel elevado de otros minerales como Na, K, Mn y Zn.

Torres *et al.*, (2007) demostraron que *Pistia stratioides* (lechuga de agua) es capaz de descontaminar aguas residuales con contenido de cobre, hasta un 70% en un tiempo de seis horas.

Puga *et al.*, (2006) analizaron la concentración de arsénico As y Zn en vegetación nativa cercana a una presa de jales, en el estado de Chihuahua. Los resultados mostraron que las plantas que estaban más alejadas de las presas de jales, los niveles de As y Zn disminuyeron al igual que en el suelo. Encontrándose que en las hojas de las plantas siguientes: el huizache (*Acacia farnesiana*), el táscate (*Juniperu deppeana*), la jarilla (*Baccharis glutinosa*), el mezquite (*Prosopis juliflora*) y el zacate pata de gallo (*Cynodon dactylon*), fue en donde más se concentraron estos elementos.

Cusato *et al.*, (2007), demostraron que *Discaria americana*, hiperacumula Zn hasta 6,000 ppm.

Becerril *et al.*, (2003) investigaron sobre especies nativas de suelos contaminados por metales y su uso en fitorremediación en España, identificaron 50 especies nativas hiperacumuladoras de metales, algunas de estas, presentaron altos niveles de metales en sus hojas, como *R. acetosa* y *Jasione montana*. Los niveles más altos de Zn se encontraron en la especie hiperacumuladora, *Thlaspi caerulescens*.

III.8 Otros ejemplos

Fitoextracción. En zona descubierta de Boston el uso de plantas de mostaza de la India eliminó hasta el 45% del exceso de plomo existente en el suelo, aumentando así la seguridad de la población infantil que solía utilizarlo como campo de juego. <http://www.boletinrural.com.ar/a2/index.cfm?fuseaction=MUESTRA&campo=htm0010&ext=htm&codcontenido=490&aplicacion=app112&canal=14,2>

Rizofiltración. Cultivos de girasoles, usados para eliminar radio nucleótidos presentes en aguas superficiales de la zona cercana al accidente nuclear de Chernobyl. http://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/biorremediacion.htm

Fitoestabilización. Álamos híbridos fueron utilizados para descontaminar suelos con cantidades grandes de metales pesados. [://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/biorremediacion.htm](http://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/biorremediacion.htm)

Fitodegradación. Cultivo de lentejas de agua para eliminar en depósitos acuosos ciertos residuos de explosivos. (Lozano-Teruel, 1998. Medio ambiente y vida saludable. Ciencia y Salud. http://servicios.laverdad.es/cienciaysalud/4_3_52.html

Rizodegradación. Cultivos de algodón se utilizaron para eliminar los disolventes clorados en aguas superficiales. (Lozano-Teruel, 1998. Medio ambiente y vida saludable. Ciencia y Salud. http://servicios.laverdad.es/cienciaysalud/4_3_52.html

Fitovolatilización. Los álamos han sido utilizados para eliminar el tricloroetileno hasta en un 90% mediante el mecanismos de volatilización (Núñez *et al.* 2004).

III.9 Proceso de las plantas hiperacumuladoras de metales del suelo

Aunque las plantas hiperacumuladoras tienen una extraordinaria capacidad para absorber metales pesados, esta capacidad depende de la biodisponibilidad de los metales en el suelo y, particularmente, del suministro a partir de formas menos disponibles para la planta (McGrath, *et al.*, 1997, Wenzel, *et al.*, 2003). Los metales aparecen en el suelo unidos a fracciones con distinto grado de labilidad: cambiables, ligados a materia orgánica, a óxidos de hierro y manganeso, y a estructuras minerales.

El concepto de biodisponibilidad se encuentra íntimamente relacionado con las condiciones fisicoquímicas del ambiente, que determinan las relaciones entre las formas disueltas, lábiles y no lábiles de los elementos. Por ello es fundamental al determinar el grado de contaminación por metales pesados de un ambiente, conocer su biodisponibilidad, es decir, la concentración del metal libre y lábil presente en la muestra (Brown *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2002; Krishnamurti y Naidu, 2000; Lussier *et al.*, 1999; Manson y Lawrence, 1999).

De acuerdo a Clemens y Col. (2002), el proceso de acumulación de metales, involucra en general los siguientes mecanismos:

- a) Los metales alcanzan la zona de absorción de la raíz por difusión y a través de la solución salina del suelo son arrastrados por el movimiento del agua hacia la raíz o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece (Fernández y Maldonado, 2000). Los iones metálicos son movilizados por secreción de quelantes o por la acidificación de la rizósfera.
- b) Las raíces capturan a los metales hidratados o a los complejos (metal-quelante) por medio de sistemas de transporte (canales iónicos, transportadores, entre otros) de ahí que las plantas pueden protegerse formando complejos metálicos estables menos tóxicos con quelantes, principalmente por fitoquelatinas. Una de las aplicaciones de los agentes quelantes es evitar la toxicidad de los metales pesados para los seres vivos (McGrath & Zhao, 2006) (Figura 5).

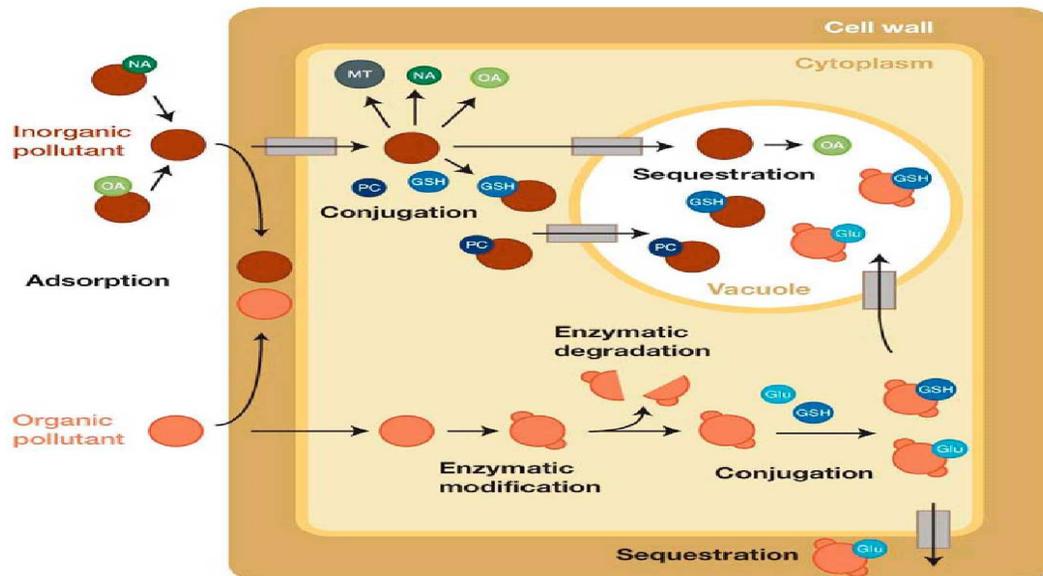


Figura 5. Mecanismos de tolerancia para contaminantes orgánicos e inorgánicos en plantas.
 La detoxificación (amortiguación) generalmente involucra la conjugación (unión) seguida del secuestro activo en la vacuola y el apoplasto, donde el contaminante hace el menor daño. Los quelantes son: glutatión (GSH), glucosa (Glu), metalotioneínas (MT), nicotinamina (NA), ácidos orgánicos (OA), fitoquelatinas (PC), entre otros. Los transportadores se representan por cajas con flechas.

- c) Los metales al ser retenidos en las raíces de las plantas, son transportados al tallo vía xilema (tejido leñoso de vegetales superiores, conduce agua y sales inorgánicas en forma ascendente por toda la planta) hasta la parte aérea, después llegan al apoplasto (compartimientos que se encuentran en el exterior de la membrana plasmática) de las hojas, entran a la célula en donde finalmente son acumulados en la vacuola por la acción de los diferentes transportadores. Baghour *et al.*, 2001; Xiong, 1997) (Figuras 6 y 7).



Figura 6. Mecanismos involucrados en la acumulación de metales pesados en plantas. Modificado por Clemens et al., 2002.

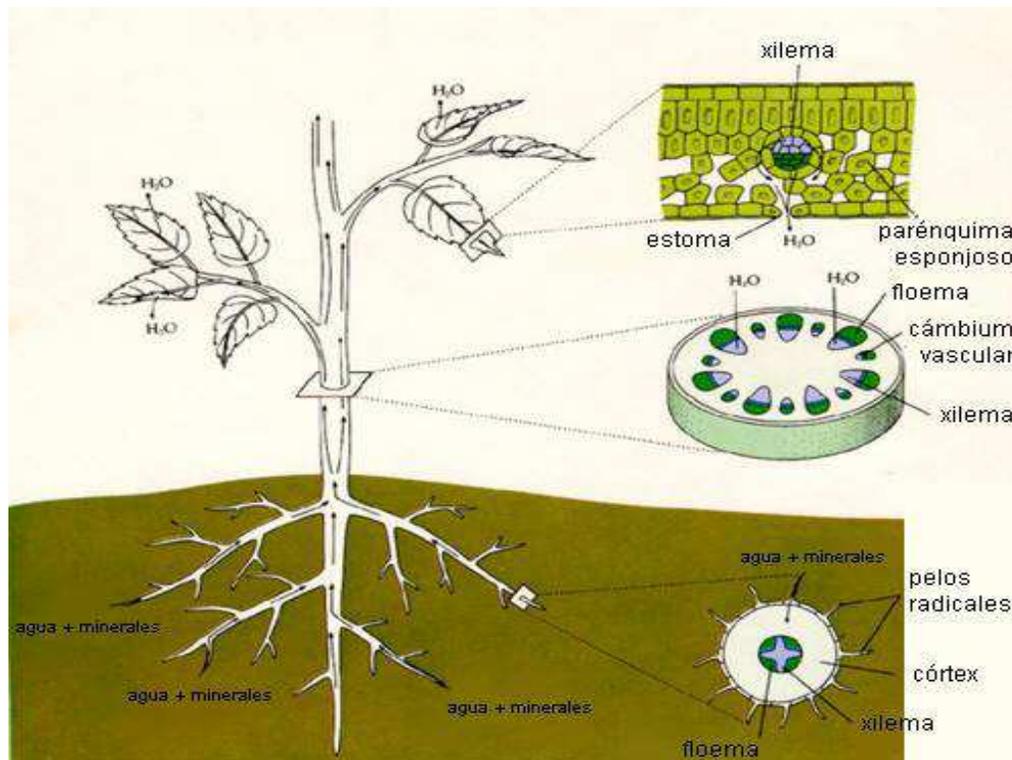


Figura 7. Transporte de minerales vía xilema.

La vacuola es el compartimiento más grande de una célula de planta madura, ocupando hasta el 95% del volumen total de la célula, posee varias funciones dentro de la célula, por ejemplo recicla componentes celulares, regula el pH citoplasmático, almacena Ca^{2+} y CO_2 en forma de malato y retiene xenobióticos (Na^+ y metales pesados, entre otros) (Maeshima, 2001; Neuhaus & Martinoia, 2001) (Figura 7).

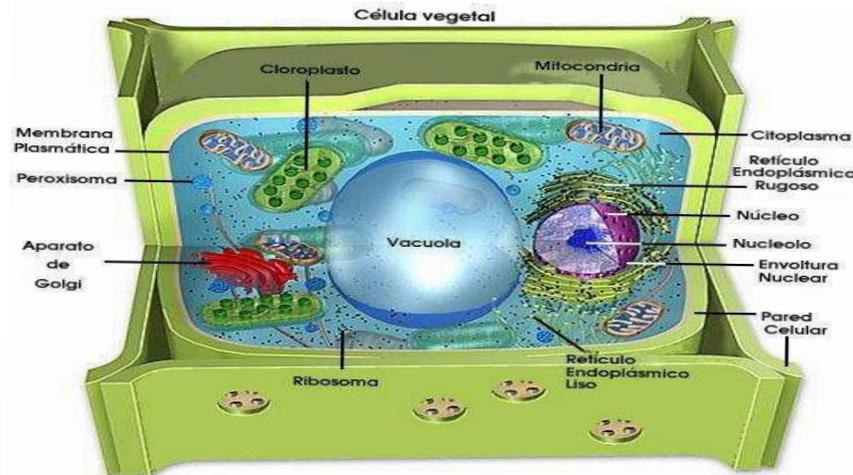


Figura 8. Componentes típicos de una célula vegetal.

Anteriormente se mencionó que las plantas utilizan este mecanismo de complejación en el interior de la célula para detoxificar (amortiguar) los metales pesados uniéndolos a ellos ligandos para formar complejos. De esta manera el metal queda inmerso en una interacción química que le mantiene en equilibrio electrónico (acomplejado) pero que no le deja fuera del metabolismo, no se ha eliminado de la célula, por lo tanto sigue siendo potencialmente tóxico. Los metales pesados muestran gran afinidad por determinados grupos funcionales como principales ligandos, como grupos sulfhidrilo, radicales amino, fosfato, carboxilo e hidroxilo. Los ligandos que utiliza son pues básicamente: aminoácidos y ácidos orgánicos, entre los aminoácidos y los ácidos orgánicos se encuentran: ácido cítrico, málico, histidina, cisteína, entre otros.

III.10 Mecanismos de resistencias a metales en las plantas

Los vegetales que crecen en sitios contaminados han desarrollado mecanismos de tolerancia a su medio ambiente, a la fecha dichos mecanismos no han sido comprendidos en su totalidad; sin embargo, las posibles estrategias se clasifican dentro de dos categorías.

- **Inclusión y acumulación.** Comprende la captura en el interior de las células donde no tienen efectos tóxicos como en las vacuolas y la pared celular; destoxificación interna de los metales a través de la incorporación de proteínas, ácidos orgánicos, histidina y péptidos ricos en grupos tiol denominados Fitoquelatinas; reacciones de óxido-reducción las cuales cambian el estado reactivo del metal a una forma menos tóxica (Chaney y col. 1997; Garbisu y Alkorta. 2001; Lasat, 2002; Maiti y col. 2002; McGrath y col. 2001; Mejáre y Bülow, 2001; Salt y col.1998).
- **Exclusión.** Implica la formación de compuestos bioquímicos complejos en el medio ambiente o en la pared celular de las plantas; precipitación de metales en el exterior, a través de secreción de mucílagos y otros compuestos orgánicos; alteración de los sistemas de membrana del transporte para reducir la entrada de metales y aumento en la actividad de ciertas bombas iónicas (Lasat, 2002; Maiti y col. 2002; McGrath y col. 2001; Mejáre y Bülow, 2001; Salt y col.1998).

El uso de estos mecanismos naturales de tolerancia a los metales es la base de la selección de especies para la fitoextracción de metales contaminantes o metales valiosos.

En general, hay plantas como *Helianthus annuus* (girasol) o *Athyrium yokoscense* (helecho), por mencionar, que convierten los productos que extraen del suelo a componentes inocuos, o volátiles. Pero cuando se plantea realizar un esquema de fitorremediación de un cuerpo de agua o un área de tierra contaminados, se siembra la planta con capacidad (natural o adquirida por ingeniería genética) de extraer el contaminante particular, y luego del período de tiempo determinado, se cosecha la biomasa y se incinera. De esta forma, los

contaminantes acumulados en las plantas no se transmiten a través de las cadenas alimenticias a otros organismos.

IV. METODOLOGÍA

El método de trabajo se desarrolló, en tres etapas: trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete.

IV.1 Trabajo de campo

Se realizaron cuatro visitas al área de estudio, en la primera fue con la finalidad de conocer y entender la problemática ambiental de los desechos mineros de El Fraile, y en las siguientes visitas se realizaron la tomas de muestras y colección de diferentes especies de plantas nativas que crecen en las cercanías de los jales. Las muestras para la caracterización química de los jales mineros de El Fraile, fueron tomadas por Flores-Mundo (2002), de 34 muestras tomadas por este autor, 14 fueron seleccionadas para su procesamiento, (datos tomados de Galarza-Brito, 2009), considerando algunas características fisicoquímicas como: pH, conductividad eléctrica y Eh). Para el trabajo de fitorremediación (uso de plantas nativas hiperacumuladoras de metal), se colectaron 40 diferentes especies de plantas de los alrededores de los jales y 10 plantas de estas mismas especies se colectaron en zonas sin afectación (plantas comparativas) de metales por jales (datos tomados de Olea-Zúñiga, 2009).

IV.2 Trabajo de laboratorio

El procesamiento y análisis de las muestra se realizó en el laboratorio de Geoquímica de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Guerrero. Las muestras obtenidas se les realizaron las siguientes determinaciones.

IV.2.1 Análisis de los contenidos totales de EPTs

Se pesó 100 mg de muestra de jales en bomba Savilex, y se mezcló con HNO₃-HCl-HF de la siguiente manera: 3 mL de HNO₃ grado reactivo, más 9 mL de HCl del mismo grado, las bombas se taparon, agitaron suavemente y se calentaron en plancha térmica a 90 °C. Al terminar el tiempo la plancha fue

apagada y las muestras se dejaron enfriar. Enseguida las bombas fueron destapadas para su evaporación (casi sequedad) en plancha térmica a 90 °C. A cada bomba se les agregó a aproximadamente 10 mL de HF (ác. fluorhídrico al 48 %), estas, fueron tapadas y calentadas una noche en plancha térmica a 90 °C. La plancha fue apagada y las muestras se dejaron enfriar. Nuevamente fueron destapadas y sometidas a evaporación (casi sequedad) y después se les agregó aprox. 10 mL HF (ác. fluorhídrico al 48 %), se taparon y se volvieron a calentar por una noche en plancha a 90 °C, se apagó la plancha y las muestras se dejaron enfriar, de nuevo se destaparon y se evaporaron (casi a sequedad). A cada bomba se les agregó aprox. 10 ml de HNO₃ (ác. nítrico), estas fueron tapadas y calentadas en plancha térmica por 2 hrs y 30 minutos a 90 °C. De igual manera, se apaga, se deja enfriar y se evaporan las muestras (casi sequedad). De nuevo apagar y enfriar. La mezcla obtenida en cada bomba se filtra con papel whatman no. 42 en matraz volumétrico de 50 mL y se aforan sin necesidad de acidificar. La solución obtenida se transfirió a una botella de polipropileno y se refrigeró hasta el momento de su análisis.

IV.2.2 Especiación química secuencial.

Como ya se ha mencionado en este estudio, el método utilizado para realizar la especiación química secuencial fue el desarrollado por Tessier *et al*; (1979), útil para separación de EPTs. Generalmente está en cinco fracciones que son: fracción intercambiable, elementos asociados a carbonatos, a oxihidróxidos de Fe-Mn, a sulfuros y materia orgánica y fracción residual. A continuación se describen los procedimientos de cada fracción

Fracción Intercambiable

a) Fracción soluble

Se pesó 1g de muestra en un tubo para centrifuga de 50 mL, se agregó 8 mL de agua desionizada, se agitó con ayuda de un vortex durante 15 segundos para homogenizar la muestra. En seguida se centrifugó 5 minutos a 6 000 revoluciones por minuto (rpm). Se midió el pH con tiras reactivas. El tubo se agitó de nuevo por 15 seg en vortex, y después se agitó en agitador orbital durante 1

hora a 350 rpm. Para separar nuevamente la solución del sedimento se centrifugó durante 30 minutos a 6 000 rpm. Una vez separado el sobrenadante, se filtró con papel Whatman No. 42 en matraz de 25 mL. El residuo se lavó agregando 8 mL de agua desionizada, agitando en vortex 30 segundos, hasta homogenizar la muestra y después se agitó en el agitador orbital por 5 minutos a 350 rpm., en seguida el tubo se centrifugó por 20 minutos bajo las mismas condiciones, la solución resultante se filtró en el mismo sistema de filtrado y la solución se acidificó agregando 5 gotas de HNO₃ (ác. nítrico) Ultrex II y se aforó con agua desionizada en matraz de 25 mL. La solución se guardó en botella de polipropileno y en seguida se guardó en botella de polipropileno para su refrigeración hasta su análisis por Espectrometría (ICP-AES).

b) Fracción adsorbida

El NaOAc (acetato de sodio), es un reactivo extractante para la determinación de EPTs en suelos ácidos y en esta fracción se utilizó agregando 8 mL de NaOAc 1M (acetato de sodio) al tubo con residuo de la fracción anterior, se agitó en vortex durante 15 segundos para homogenizar la mezcla. Para separar el sedimento de la solución se centrifugó 5 minutos a 6 000 a rpm. Se agregó al sobrenadante 2 gotas de fenolftaleína para ajustar a pH de 8.

Nota: Si al agregar fenolftaleína se torna de color rosa o ligeramente rosa se agregará 1 gota de HOAc 1M (ác. acético) hasta que se torne ligeramente amarillo. Si se torna amarillo, se agregará NaOH (hidróxido de sodio) 1 ó 2 gotas hasta que se torne rosa. El color rosa se elimina agregando 1 o más gotas de NaOAc (acetato de sodio) para ajustar el pH de 8.

Se agitó nuevamente el tubo en vortex por 15 segundos y posteriormente se agitó con el agitador orbital durante 1 hora a 350 rpm. Para separar nuevamente la solución del sedimento la muestra se centrifugó durante 30 minutos a 6 000 rpm. Al término del tiempo se filtró la solución a través de papel filtrante Whatman No. 42. El residuo se lavó nuevamente agregando 8 mL de NaOAc, se agitó en vortex por 30 segundos hasta lograr una mezcla homogénea, se agitó en agitador orbital por 5 minutos a 350 rpm y posteriormente se centrifugó por 20

minutos bajo las mismas condiciones. El sobrenadante se filtró con papel Whatman No. 42 en matraz de 25 mL. Se acidificó la solución La solución recuperada se acidificará agregando 5 gotas de ácido nítrico últrex II La solución resultante se aforó con agua desionizada en matraz de 25 mL y se guardó en refrigeración hasta ser analizada por Espectrometría (ICP-AES).

Fracción Asociados a carbonatos

Se le agregó 8 mL de NaOAc (acetato de sodio) 1M, al tubo con residuo de la fracción anterior, la mezcla se agitó durante 30 segundos con un vórtex y en seguida se centrifugó por 5 minutos a 6 000 rpm. Se ajustó el pH a 5, agregando 3 gotas de rojo de metilo (si se tornó rosa, agregó NaOH 1M (hidróxido de sodio) gota a gota hasta obtener una tonalidad ligeramente amarillo y después agregar HOAc (Ác. Acético) gota a gota hasta obtener ligeramente rosa; pero, si al agregar el rojo de metilo se tornó ligeramente amarillo, se agregó HOAc (ác. Acético) gota a gota hasta obtener una tonalidad ligeramente rosa; el rosa indica pH 5). Después se agitó 15 segundos en vórtex, posteriormente se agitó en el agitador orbital durante 5 horas a 350 rpm, terminado el tiempo la muestra se centrifugó a 30 minutos a 6,000 rpm. La solución sobrenadante se filtró con papel Whatman No. 42.

Lavado. Al residuo se le adicionó 8 mL de NaOAc 1M, se agitó nuevamente en vórtex por 15 segundos y 5 minutos en el agitador orbital. En seguida se centrifugó por 20 minutos a 6,000 rpm. El sobrenadante fue filtrado con papel Whatman No.42 y después se aforó con agua desionizada en matraces de 25 mL. La solución recuperada fue acidificada agregando 5 gotas de HNO₃ últrex II y se guardó en botella de polipropileno para su refrigeración hasta su análisis por Espectrometría (ICP-AES).

Fracción Asociados a óxidos de Fe-Mn

Al residuo de la fracción II se le agregó 20 mL. de NH₂OH. .HCl 0.04 M (cloruro de hidroxilamina) en 25% (v/v) HOAC. Primero se le agregó 10 mL y se agitó por 30 segundos en vórtex para remover el sedimento y se vertió en un

vaso de precipitado de 250 mL. Se agregó otros 10 mL para pasar los residuos de sedimento al vaso y se tapó con papel parafilm para su calentamiento durante 6 horas en una plancha térmica a 95 ± 3 °C, con agitación intermitente cada 30 minutos. Si en el proceso se perdió solución, se agregó un poco de cloruro de hidroxilamina. Transcurrida las 6 horas se dejó enfriar (a 30 °C) y se pasó la muestra del vaso de precipitado al tubo de centrifuga y se enjuagó el vaso con agua desionizada para evitar que queden residuos de sedimento. Se centrifugó la muestra por 30 minutos a 6, 000 rpm. La parte líquida se filtró con papel Whatman No. 42. A continuación La muestra se le agregó 10 mL $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 0.04 M (cloruro de hidroxilamina), se agitó por 15 segundos con vórtex y en seguida se agitó en el agitador orbital durante 5 minutos a 350 rpm. Se filtró el sobrenadante con papel Whatman No. 42 y se aforó en un matraz de 50 mL. La solución fue acidificada con 5 gotas de HNO_3 últrex II y se guardó en botella de polipropileno para su refrigeración hasta su análisis por Espectrometría (ICP-AES).

Fracción Asociados a sulfuros y materia orgánica

Al residuo de la fracción III se le adicionó 3 mL de HNO_3 0.02 M (ácido nítrico) y 5 mL de H_2O_2 (agua oxigenada) al 30%. Se agitó en vórtex durante 30 segundos para homogeneizar la mezcla, que fue transferida a un vaso de precipitado de 250 mL., se agregó otro mL de NHO_3 al tubo para remover el sedimento y se vació al vaso. La muestra se ajustó a pH de 2 con una gota de NHO_3 últrex II, el vaso fue tapado con papel parafilm y calentado durante dos horas en plancha térmica a 85 ± 3 °C, y se agitó ocasionalmente cada 20 min. Después de dos horas de calentamiento las muestras se dejó enfriar (30 °C) y se les agregó 3 mL de H_2O_2 al 30%. Se ajustó de nuevo el pH a 2, agregando una gota de HNO_3 últrex II. Se volvió a calentar nuevamente el vaso en plancha térmica (cubierto con papel parafilm) durante 3 horas con agitación intermitente (cada 15 minutos). Se dejó enfriar y nuevamente la muestra fue colocada en tubos para centrifugar, y se agregó al tubo 5 mL de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 3.2 M (acetato de amonio) en 20% (v/v) de NHO_3 . Se agitó el tubo en el agitador orbital durante 30 minutos a 350 rpm. Al término del tiempo se centrifugó durante 30 min a 6, 000

rpm. La solución sobrenadante se filtró con papel Whatman No. 42. La muestra fue lavada por segunda vez con 10 mL de H₂O desionizada más 3 gotas de NHO₃ últrex II y se agitó por 5 minutos en el agitador orbital a 350 rpm, se centrifugó por 20 minutos a 6,000 rpm. Filtrar el sobrenadante con papel Whatman No. 42, y aforar en matraces de 50 mL. La solución recuperada se acidificó con 5 gotas de ácido nítrico últrex II y se guardó en botella de polipropileno para su refrigeración hasta su análisis por Espectrometría (ICP-AES).

Fracción Residual

El residuos de tubo de la fracción IV, se le agregó 3 mL de H₂O desionizada y se agitó con vórtex 15 segundos para remover el sedimento. Se transfirió la muestra diluida del tubo a una bomba savilex, se repitió el enjuague con H₂O desionizada, hasta no dejar residuos en el tubo. Se colocó la bomba sobre plancha térmica para evaporar (el agua) hasta casi sequedad. Una vez evaporada se procedió a la digestión de esta última fracción. Se agregó a la bomba sávilex 3 mL (60 gotas) de HNO₃ (ác. nítrico) más 9 mL de HCl (ác. clorhídrico) (180 gotas), se tapó y se agitó con la mano levemente para mezclar. Posteriormente, la bomba se calentó en plancha térmica y se dejó una noche a 90 °C. Se apagó la plancha, se dejó enfriar (30 °C) y se destapó para su evaporación casi a sequedad en plancha térmica. Se agregó a la bomba aproximadamente 10 mL de HF (ác. fluorhídrico al 48 %) se tapó y calentó la bomba una noche en plancha térmica a 90 °C., al término del tiempo se dejó enfriar (30°C). y se destapó para evaporar. Nuevamente se le agregó a la bomba aproximadamente 10 mL de HF (ác. fluorhídrico al 48 %) y se dejó en plancha térmica una noche a 90 °C, al término se apagó la plancha, se dejó enfriar para su evaporación (casi sequedad) y enfriar. Se agregó a la bomba aproximadamente 10 mL de HNO₃, se tapó y calentó en plancha térmica por 2 horas y 30 minutos a 90 °C., Se dejó enfriar y se filtró la mezcla con papel filtro Whatman No. 42. Se aforó en un matraz volumétrico de 50 mL (no fue necesario acidicar) y se transfirió la solución la solución a una botella de polipropileno. Finalmente la solución de todas las fracciones se

analizaron por Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-AES).

IV.3 Identificación de plantas nativas en los jales mineros de “El Fraile” con el mayor potencial de fitorremediación.

El trabajo de campo consistió en la realización de cuatro visitas a los jales mineros de El Fraile, con la finalidad de conocer el área de estudio, llevar a cabo la toma de muestra de suelo con jales mineros y la colección de plantas nativas que crecen en los alrededores de los jales, es importante mencionar que 10 de estas mismas especies de plantas se colectaron en zonas cercanas donde no existe afectación de metales por jales mineros (datos tomados de Olea-Zúñiga 2009). Con ayuda de pala, tijeras de podar y hacha, se colectaron dos ejemplares de especie vegetal, un ejemplar fue colocado en prensa de madera con periódico y hojas de cartón, para el herbario e identificación taxonómica. El otro ejemplar, se guardó en bolsas de polietileno, para ser procesadas en el laboratorio de Geoquímica de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAG. En el laboratorio se realizó el lavado y secado de las plantas colectadas, así como la separación de hoja, raíz y tallo de cada planta, molienda y tamizado y finalmente se les realizó la digestión total y el análisis de las muestras en el ICP.

IV.3.1 Lavado y secado

De cada planta se separó la raíz, hoja y tallo para determinar la capacidad de la planta para acumular metales en los diferentes órganos. Cada muestra, se lavó con agua corriente, tallando con cepillo dental o escobeta principalmente la raíz o el tallo para quitar el exceso de tierra, una vez eliminada la tierra, las hojas, tallo y raíz se lavaron con agua desionizada, posteriormente fueron cubiertas con papel aluminio y secadas en horno marca Oven de Pelkin Elmer a 60-65 °C por 48 horas o hasta su deshidratación total. Las plantas ya secas fueron molidas en un molino eléctrico marca IKA, A11 Basic y después se tamizaron con malla 10 (< a 2 mm) hasta obtener una muestra pulverizada. El tamizado se colocó en bolsas pequeñas de polietileno, se etiquetaron y se guardaron para posteriormente realizárseles la digestión total y el análisis de metales en el ICP.

IV.4 Metodología de la digestión total

El método de digestión de las plantas se realizó pesando 200 mg de muestra en papel weighing en la balanza analítica. El pesado se colocó en un tubo de teflón de 100 mL. Con el uso de guantes, se adicionó a cada tubo 4 mL (80 gotas) HNO₃ más 2 mL (40 gotas) de HCl con agitaron suave. Cada tubo se le colocó una chaqueta (tubo protector) y cerrados herméticamente, en seguida fueron puestos en el rotor (centrífuga) y este fue cerrado herméticamente y colocado en el horno de microondas Multiwave 3000, para el procesamiento total de las muestras.

Al termino del proceso (aproximadamente 80-90 minutos de duración). Se sacó el rotor y colocó en la campana de extracción de humos y se esperó 10 minutos hasta su enfriamiento total. Se aflojó las válvulas de venteo con llave metálica para eliminar los gases y en seguida se quitó la tapa del rotor. Se sacaron los tubos de las chaquetas y se observó el resultado. Al terminar, el aparato fue apagado.

A través de un embudo de vidrio la solución resultante se pasó a un matraz volumétrico de 50 mL y se aforó con agua desionizada, posteriormente se colocó en botella de polipropileno para su análisis en el (ICP-AES) de Perkin Elmer (marca Optima 3200 DV. La calibración del equipo se realizó con un blanco reactivo (agua desionizada), estándares certificados multielementales, (LG CAL A, B y C), para evaluar la calidad analítica de los resultados se utilizó el material certificado Corn 8412 (Zea Mays) Stalk.

V. RESULTADOS

V.1 Caracterización química de los jales de “El Fraile”

Estudios de Flores-Mundo (2002), Martín-Romero (2001), Talavera *et al.*, (2005); Talavera *et al.* (2006) y Galarza-Brito (2009) reportan de los jales “El Fraile” las siguientes características químicas: Una granulometría muy variable, contiene partículas de los tamaños de arenas gruesas, finas y lodos. El contenido de materia orgánica (MO) osciló entre 0.2 y 4.5%.

Flores-Mundo (2002) reporta haber encontrado dos grupos de muestras: Muestras ácidas con un pH de 2.44 y 5.28 y en muestras neutras de 7.32 y 7.85. En la caracterización mineralogía que realizó, menciona que el 79% de sus muestras fueron ácidas. Este mismo autor, reporta, que los jales “El Fraile” contienen altas concentraciones de As, Ag, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, V y Zn.

V.2 Análisis de la digestión total en muestras con pH ácido

En la tabla 5 y 6, se muestran los datos obtenidos de la concentración total de EPTs en muestras con pH ácidas de los jales “El Fraile”, reportados por Talavera *et al.*; (2005) y Galarza-Brito (2009) y su comparación con los VRF (Alloway, 1990; Talavera *et al.*; 2005) calculados para suelos de la región de Taxco y los contenidos permisibles para suelos urbanos y de cultivo.

El análisis de los datos, se reportan de la siguiente manera:

Se encontró que la concentración del arsénico oscila entre 374 y 5463 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 1929 ± 1430.1 mg kg⁻¹. El VRF para este elemento es de 30 mg Kg⁻¹. Los resultados indican que sobrepasan el límite permisible (Tabla 6).

El cadmio, reportó concentraciones que van 5.42 y 23.97 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 12.97 ± 5.52 mg kg⁻¹ y el valor de fondo es 1.0 mg kg⁻¹ es decir es 23 veces más elevada la muestra por este metal.

El cobre, obtuvo concentraciones que van 190 y 508 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 340.63 ± 78.92 mg kg⁻¹ y su valor de fondo es de 25 mg kg⁻¹. Los resultados indican que están muy por encima de este valor.

El hierro, se encontró con concentraciones que van 2.89 y 7.11%, una media aritmética \pm STD de $59.76 \pm 1.31\%$ de Fe. Es importante mencionar que el Fe, fue uno de los elementos con valores mucho muy elevados, por lo cual la concentración no se reporta en mg kg^{-1} , sino en porcentaje. Los resultados indican que los valores obtenidos sobrepasó el VRF que es de 25 mg kg^{-1}

El manganeso, reportó concentraciones que van 32 y 2133 mg kg^{-1} , una media aritmética \pm STD de $404.6 \pm 616.3 \text{ mg kg}^{-1}$ y su valor de fondo es 409 mg kg^{-1} , este metal rebasó los límites establecidos.

El plomo, acumuló concentraciones que van 999 y 16904 mg kg^{-1} , una media aritmética \pm STD de $8373.5 \pm 49882 \text{ mg kg}^{-1}$. Los resultados indican que todas las muestras sobrepasaron el VRF que es de 26 mg kg^{-1}

El vanadio, presentó concentraciones que van 42.40 y 131 mg kg^{-1} , una media aritmética \pm STD de $79.94 \pm 20.17 \text{ mg kg}^{-1}$. Tiene un VRF de 40 mg kg^{-1} y los valores reportados están por arriba de este valor.

El zinc, reportó concentraciones que van 333 y 1480%, una media aritmética \pm STD de $718 \pm 358.3\%$ de Zn. Los valores regionales de fondo, están muy por arriba del VRF (64 mg kg^{-1}).

Tabla 5. Valores Regionales de Fondo vs Concentración Total en los jales “El Fraile” (pH ácido). Datos de Galarza-Brito (2009).

Muestras	As mg kg ⁻¹	Cd Mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Fe (en %)	Mn mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹	V mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
VRF*	30	1.0	25	2.7	409	26	40	64
JF 04	5463	6.30	350	6.55	130	3993	75.2	623
JF 06	2713	13.04	360	6.58	206	4632	82	686
JF 08	1099	5.42	362	5.88	95	15020	42.40	448
JF 11	1308	23.97	401	5.65	818	5941	62.7	1480
JF 14	614	14.65	364	6.07	144	16904	59.0	849
JF 17	2605	8.99	281	6.21	305	5506	86.0	741
JF 19a	374	20.55	190	2.89	2133	992	131	1204
JF 22	827	12.05	309	5.20	86	13679	48.60	403
JF 24	2575	14.03	302	7.04	71	7383	76.5	375
JF 26	1732	<LD	508	7.11	32	8828	104	333
JF 31	1910	10.77	320	6.48	431	9231	101	756
Mín.	374	5.42	190	2.89	32	992	42.4	333
Máx.	5463	23.9	508	7.11	2133	16904	131	1480
Media	1929	12.9	340.6	59.7	404.6	8373.5	79.9	718
STD	1430.1	5.52	78.9	1.31	616.3	49882	20.1	358.3

Tabla 6. Valores regionales de fondo, calculados para suelos de la región de Taxco de Alarcón, Gro., y límites permisible de metales pesados en suelos.

Elemento	As mg kg ⁻¹	Ag mg kg ⁻¹	Cd mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Cr mg kg ⁻¹	Fe (%)	Pb mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Sb mg kg ⁻¹	V mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
Valores reg.de fondo (VRF)	30	2.2	1.0	25	21	2.7	26	409	9.0	40	64
Máximo permisible	20.0	2.0	3.0	100.0	100.0	-	100.0	100.0	-	75.0	100.0

- Valores regionales de fondo para suelo (VRF), del distrito minero de Taxco (Talavera *et al.*, (2005).
- Valores permisible. Tomados de la NOM-141-SEMARNAT-2003 y Alloway, B.J. (1990)

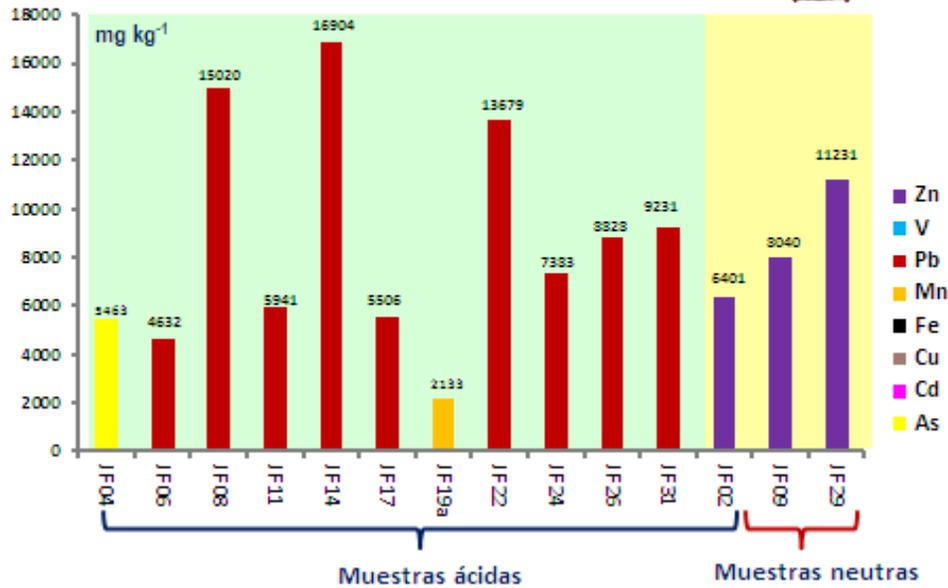


Figura 9. Concentración total de EPT de los jales de El Fraile

V.3 Especiación química secuencial de los EPTs en muestras con pH ácido

El análisis de resultados reportados anteriormente, es acerca de la digestión total, este procedimiento se realizó con la finalidad de conocer el potencial de contaminación de los EPT y principalmente para darle soporte a la extracción química secuencial.

La metodología de la extracción química secuencial se aplicó con el objetivo de determinar la especiación de los metales traza en los jales el Fraile, de Taxco, Gro., información que no se logró conseguir a partir únicamente de un análisis químico convencional (digestión total). El método a desarrollar en esta investigación fue el de Tessier *et al.* (1979), que consistió en la determinación de las siguientes fracciones:

Fracción I: La fracción soluble y fracción adsorbida representan la Fracción intercambiable. Fracción II: asociada a carbonatos y/o extraíble a pH 5. Fracción III: asociada a oxihidróxidos de hierro y manganeso. Fracción IV: asociada a sulfuros y materia orgánica y Fracción V: fracción residual.

El empleo de esta metodología ha permitido obtener información sobre el origen y el modo de presentarse los metales traza en los suelos, sedimentos y jales.

Arsénico (As)

Las concentraciones de As de cada una de las fracciones analizadas en las muestras ácidas se presentan en la Tabla 7.

Se encontró que el arsénico, mostró mayor concentración en la fracción residual, con rango de que va 553 a 7,229 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 3,046 ± 2,094 mg kg⁻¹, acumulando un 99.35% del total este metal. La fracción soluble se reporta en seguida con valores de <LD a 2.09 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 0.73 ± 0.72 mg kg⁻¹ y representa un 0.02% del total. La fracción de oxihidróxido Fe-Mn y de sulfuros y MO, presentaron baja concentración a este metal. La fracción adsorbida y asociada a carbonato presentaron <LD. Los resultados indican que el arsénico se concentró en la fracción residual (99%), esta fracción es la más estable y, por consiguiente la menos peligrosa para el ambiente ya que requiere condiciones extremas de acidez y/o grandes periodo de tiempo para disolver el metal (de cientos a miles de años).

De acuerdo con los resultados, la distribución de As en las muestras con pH ácido, se encuentra en el orden siguiente:

Residual >Sulfuros y MO >Oxihidróxidos de Fe-Mn >Soluble> Carbonatos>Adsorbida

Tabla 7. Distribución de especiación química del arsénico en muestras con pH ácidas.

As	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-04	0.38	<LD	<LD	<LD	<LD	7229
JF-06	0.59	<LD	<LD	<LD	<LD	3582
JF-11	1.55	<LD	<LD	129	24	1634
JF-17	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	3628
JF-19a	0.25	<LD	<LD	<LD	<LD	553
JF-22	2.09	<LD	<LD	<LD	<LD	1167
JF-24	0.74	<LD	<LD	<LD	<LD	3884
JF-31	0.25	<LD	<LD	<LD	<LD	2692
Mín	<LD	-	-	<LD	<LD	553
Máx	2.09	-	-	129	24	7229
% total	0.02	-	-	-	-	99.35
Media	0.73	-	-	-	-	3046
STD	0.72	-	-	-	-	2094

<LD= menor límite de detección

Cadmio (Cd)

Las concentraciones de Cd de cada una de las fracciones analizadas en las muestras ácidas se presentan en la Tabla 8.

La fracción soluble es la que presenta mayores concentraciones de Cd con un rango entre 0.93 y 16.18 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 5.17 y \pm 5.2 mg kg⁻¹, con promedio 36.8%. La fracción residual fue la segunda de mayor concentraciones muy variables, con un rango de <LD a 10.6 mg kg⁻¹ con una media aritmética \pm STD de 4.10 \pm 3.3 mg kg⁻¹ que representa 32.5%. Posteriormente sigue el oxihidróxidos de Fe y Mn con 0.87-4.54 mg kg⁻¹ y una media aritmética \pm STD de 2.35 \pm 1.3 mg kg⁻¹ que representa 16.74% del total de Cd. Otra fracción es la adsorbida, con menor concentración y un rango entre <LD y 3.23 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 0.57 \pm 1.0 y presenta el 5.09% del total. Las fracciones asociadas a sulfuros y MO y carbonatos presentaron bajos contenidos de Cd. Los sulfuros y MO presentaron un rango de <LD y 0.69 mg kg⁻¹, con una media \pm STD de 0.24 \pm 0.2 (2.80 % del total) mientras que las concentraciones de Cd en la fracción de carbonatos oscilan entre <LD a 1.18 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 0.20 \pm 0.41 mg kg⁻¹ que representa 1.5% del total. Los resultados refieren un mayor riesgo de este elemento, por su elevada

concentración en la fracción soluble, la más biodisponible, liberando grandes cantidades de Cd al ambiente de manera inmediata.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Cd en las muestras con pH ácido, se encuentra en el orden siguiente:

Soluble > Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Adsorbida > Sulfuros y Mo > Carbonatos

Tabla 8. Distribución de especiación química del cadmio muestras con pH ácido.

Cd	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-04	4.98	0.14	0.02	1.33	0.25	<LD
JF-06	9.73	0.09	<LD	2.53	0.33	<LD
JF-08	0.93	0.8	<LD	0.87	<LD	3.09
JF-11	16.18	0.99	0.19	4.28	0.28	2.52
JF-14	5.50	0.71	0.30	1.83	<LD	4.75
JF-17	1.28	<LD	<LD	1.26	0.39	5.43
JF-19a	9.57	3.23	1.18	4.53	<LD	1.54
JF-22	1.36	0.26	0.2	1.35	0.42	6.4
JF-24	1.15	<LD	<LD	2.99	<LD	10.6
JF-31	1.00	0.12	0.06	2.52	0.69	6.68
Mín	0.93	<LD	<LD	0.87	<LD	<LD
Máx	16.18	3.23	1.18	4.54	0.69	10.59
% total	36.8	5.0	1.98	18.6	1.9	32.53
Media	5.17	0.57	0.20	2.34	0.24	4.10
STD	5.2	1.0	0.41	1.3	0.2	3.3

<LD= menor límite de detección

COBRE (Cu)

Las concentraciones de Cu de cada una de las fracciones analizadas en las muestras ácidas se presentan en la Tabla 9.

La fracción residual presentó la mayor concentración Cu, con un rango de 57.2 y 284 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 204.79y ± 78.1 mg kg⁻¹ y representa el 64.8% del total de este metal. La siguiente fue la fracción de oxihidróxidos de Fe-Mn, con valores de concentración menor que la fracción residual con 25.60 y 193 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 71.5 y ± 55.6 mg/kg y corresponde al 22.6% del total Por otra parte, la fracción asociada a sulfuros y MO, presentó una concentración baja en comparación con las dos anteriores, con un rango de 11.56 y 60.7 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de

23.20 y $\pm 15.5 \text{ mg kg}^{-1}$, un promedio de 7.33%. La fracción soluble, reportó una concentración baja, con valores de 2.37-41.44 mg kg^{-1} , un media aritmética \pm STD de 15.6 y $\pm 11.2 \text{ mg kg}^{-1}$, con un promedio de 4.92%. Las fracciones asociadas a carbonatos y adsorbida, como se aprecia en la Tabla 9, obtuvieron muy bajo contenido de este elemento. Los carbonatos, oscilan entre <LD a 1.87 mg kg^{-1} , la media aritmética \pm STD de 0.7 y $\pm 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$, representando un 0.2%. Los adsorbidos van de <LD y 0-1.47 mg kg^{-1} , la media aritmética \pm STD de 0.74 y $\pm 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$, y representa el 0.23 % del total de Cu. Los resultados indican que el Cu se concentró principalmente en la fracción residual, por lo que la mayor proporción de este elemento estará ambientalmente disponible en un largo periodo de tiempo. Pero las fracciones de oxihidróxidos de Fe-Mn y sulfuros y MO entre otras, pueden llegar a representar un riesgo mayor en un corto o mediano plazo, por ser este un medio ácido.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Cu en las muestras con pH ácido, se encuentra en el orden siguiente:

Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Carbonatos > Adsorbida

Tabla 9. Distribución de especiación química del cobre en muestras con pH ácido.

Cu	Soluble mg kg^{-1}	Adsorbida mg kg^{-1}	Carbonatos mg kg^{-1}	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg^{-1}	Sulfuros y MO mg kg^{-1}	Residual mg kg^{-1}
JF-04	21.1	0.69	0.26	119	14.72	194
JF-08	13.9	0.61	0.30	193	27.53	109
JF-11	41.44	0.78	0.63	85.93	11.56	246
JF-14	14.33	0.60	0.68	34.54	12.63	284
JF-17	11.10	0.59	0.57	26.16	30.50	185
JF-19a	2.37	1.47	1.87	72.0	60.7	57.2
JF-22	18.18	<LD	<LD	58.24	16.47	225
JF-24	10.16	<LD	<LD	28.9	19.25	266
JF-31	7.59	1.20	0.62	25.60	15.56	276
Mín	2.37	<LD	<LD	25.60	11.56	57.2
Máx	41.44	1.47	1.87	193	60.7	284
% total	4.92	0.23	0.2	22.6	7.33	64.8
Media	15.6	0.74	0.7	71.5	23.20	204.79
STD	11.2	0.5	0.5	55.6	15.5	78.1

<LD= menor límite de detección

Fierro (Fe)

Las concentraciones de Fe de cada una de las fracciones analizadas en las muestras con pH ácido se presentan en la Tabla 10.

La fracción residual presentó la mayor concentración, con valores de 18,217 y 34,380 mg kg⁻¹, una media \pm STD de 28,088 y \pm 6,571 mg kg⁻¹, lo que representa 59.80%. El alto valor de la STD refleja la gran variación de las concentraciones encontradas en las muestras (Tabla 10). Seguida de la fracción asociada a oxihidróxidos de Fe-Mn con una concentración menor a la fracción residual, con un rango de 8,345 y 21,105 mg kg⁻¹ con una media aritmética \pm STD de 16,641 y \pm 5,640 mg kg⁻¹, lo que representa un 35.43%. La fracción asociada a sulfuros y MO, es otra de las fracciones que presenta niveles regulares en comparación a las fracciones 4 y 6 de la Tabla 10 con un rango de 757 y 3,836 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 2,095 y \pm 1,303 mg kg⁻¹, y un promedio de 4.5% del total de Fe. Muy por abajo de la fracción asociada a sulfuros y MO, se encuentra la fracción soluble, con valores que va de 5.33 y 245 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 140.1 y \pm 102 mg kg⁻¹, con un valor promedio 0.3%. Con muy escasa o <LD de concentración de Fe, se encuentran las fracciones asociada a carbonatos y adsorbida. Los carbonatos, con un rango <LD y 0.15 mg kg⁻¹, con una media \pm STD de 0.08 y \pm 0.06 mg kg⁻¹, y un promedio de <0.01%. La fracción adsorbida, que va <LD y 0.26 mg kg⁻¹, media aritmética \pm STD de 0.1 y \pm 0.11 mg kg⁻¹, con un promedio <LD. Los resultados indican que el Fe se presentó principalmente en la fracción residual, por lo que este elemento estará ambientalmente disponible en un largo periodo de tiempo. Pero las fracciones de oxihidróxidos de Fe-Mn y sulfuros y MO entre otras, podrían llegar a representar un riesgo mayor en un corto o mediano plazo, debido a la acidez del medio.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Fe en las muestras con pH ácido, se encuentra en el orden siguiente:

Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Carbonatos > Adsorbida

Tabla 10. Distribución de especiación química del hierro en muestras con pH ácido.

Fe	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-04	245	0.26	0.15	19471	1350	32257
JF-06	218	0.15	0.13	21013	757	30804
JF-11	167	0.04	0.06	21105	3091	24784
JF-19a	5.33	0.05	0.08	8345	1441	18217
JF-31	65.2	<LD	<LD	13270	3836	34380
Mín	5.33	<LD	<LD	8345	757	18217
Máx	245	0.26	0.15	21105	3836	34380
% total	0.30	<0.01	<0.01	35.43	4.5	59.80
Media	140.1	0.10	0.08	16641	2095	28088
STD	102	0.11	0.05	5640	1303	6571

<LD= menor límite de detección

Manganeso (Mn)

Las concentraciones de Mn de cada una de las fracciones analizadas en las muestras ácidas se presentan en la Tabla 11.

El Mn presentó una mayor concentración en la fracción asociada a oxihidróxidos de Fe-Mn, valores que van entre 2.20 y 1,208 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 126 y \pm 359 mg kg⁻¹ y un valor promedio de 30.9 % del total de Mn. En seguida resultó la fracción soluble con una concentración que va de 2.83 y 642 mg kg⁻¹ con una media aritmética \pm STD de 147 y \pm 202 mg kg⁻¹, lo que representa 36.22%. La fracción residual presenta una concentración baja en relación a las dos fracciones anteriores, con un rango de 23.91 y 354 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 108 y \pm 112 mg kg⁻¹, un promedio de 26.61% del total de Mn. La fracción de los sulfuros y MO reportó concentraciones muy variadas con un rango 0.43 y 107 mg kg⁻¹, un media aritmética \pm STD de 16 y \pm 32.1 mg kg⁻¹, y un promedio de 3.93%. Las fracciones de carbonatos y la adsorbida presentaron muy bajo contenido de Mn en comparación con las fracciones 1, 4, 5 y 6 de la Tabla 11. Los carbonatos reportaron valores de 0.02 y 24.23 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 2.47 y \pm 7.22 mg kg⁻¹ lo que representa el 0.60% del total del Mn. La fracción adsorbida presenta valores que va de 0.10 y 67.51 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 6.98 y \pm 20.14 mg kg⁻¹, y representa el 1.71% del total de este metal. Se puede explicar que el Mn representa un menor riesgo para el

ambiente en la fracción de oxidihidróxidos de Fe-Mn, sin embargo, prevalece muy de cerca la fracción soluble, lo que implica un peligro para el medio al estar soluble, lo cual representaría un riesgo a corto o mediano plazo para el ambiente.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Mn en las muestras con pH ácido, se encuentra en el orden siguiente:

Oxihidroxidos de Fe-Mn > Soluble > Residual > Sulfuros y MO > Carbonatos > Adsorbida

Tabla 11. Distribución de especiación química del manganeso muestras con pH ácido.

Mn	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-04	79.50	0.40	0.02	24.80	5.15	23.91
JF-06	158	0.25	0.03	15.80	1.30	38.7
JF-08	25.3	1.07	0.43	8.87	1.59	67
JF-11	422	5.69	0.95	35.54	5.00	354
JF-14	88.53	0.72	0.53	11.74	1.49	43
JF-17	62.9	0.31	0.13	31.12	13.20	214
JF-19a	642	67.51	24.23	1208	107	60.7
JF-22	22.2	0.13	0.39	5.90	1.36	51.44
JF-24	12.3	0.12	0.22	8.16	1.74	50.33
JF-26	2.83	0.10	0.04	2.20	0.43	31.5
JF-31	103	0.47	0.23	28.56	37.60	255
Min	2.83	0.10	0.02	2.20	0.43	23.91
Máx	642	67.51	24.23	1208	107	354
% total	36.22	1.71	0.60	30.9	3.93	26.61
Media	147	6.98	2.47	126	16	108
STD	202	20.14	7.22	359	32.1	112

Plomo (Pb)

Las concentraciones de Pb, solo pudo ser recuperado en muestras con pH ácido y se presentan en la Tabla 12. Y la distribución de este metal se presenta en las gráficas de la figura 9. En las muestras neutras, las concentraciones rebasaron los parámetros establecidos 80-120 mg kg⁻¹.

La fracción residual mostró una concentración elevada en comparación a las demás, fracciones, con valores de 3,736 y 17,444 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 8,612 y ± 4,546 mg kg⁻¹ con un promedio de 90.3% del total del plomo. En seguida la fracción de sulfatos y MO con una concentración menor que la residual con un rango de <LD y 5,934 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD

de 772 y $\pm 1,827 \text{ mg kg}^{-1}$ y un promedio de 8.1 %. La fracción asociada a oxihidróxidos de Fe-Mn, el rango va de 0.75 y 324 mg kg^{-1} , una media aritmética 148 y $\pm 103 \text{ mg kg}^{-1}$ y representa el 1.6 %. La fracción soluble presenta una concentración mucho muy por debajo de las fracciones 4, 5 y 6 de la tabla 12, con un rango de <LD y 1.80 mg kg^{-1} , una media aritmética \pm STD de 0.62 y $\pm 0.72 \text{ mg kg}^{-1}$, con <0.01% de promedio. Las fracciones adsorbidas y asociada a carbonatos reportaron <LD. Por lo tanto el resultado refiere que el Pb se presentó principalmente en la fracción residual, lo indica que este elemento estará ambientalmente disponible en un largo periodo de tiempo.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Pb en las muestras con pH ácido, se encuentra en el orden siguiente:

Residual>Sulfuros y MO>Oxihidróxidos de Fe-Mn>Soluble>Adsorbida (<LD)>Carbonatos

Tabla 12. Distribución de especiación química del plomo en muestras con pH ácido.

Pb	Soluble mg kg^{-1}	Adsorbida mg kg^{-1}	Carbonatos mg kg^{-1}	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg^{-1}	Sulfuros y MO mg kg^{-1}	Residual mg kg^{-1}
JF-04	0.45	<LD	<LD	118	261	3736
JF-06	0.08	<LD	<LD	158	515	3764
JF-08	0.09	<LD	<LD	144	5934	8679
JF-11	<LD	<LD	<LD	0.75	<LD	6767
JF-14	<LD	<LD	<LD	324	4.57	17444
JF-17	1.80	<LD	<LD	101	76.8	4714
JF-22	0.79	<LD	<LD	280	224	14984
JF-24	1.48	<LD	<LD	231	624	7960
JF-26	<LD	<LD	<LD	48.54	<LD	8447
JF-31	1.50	<LD	<LD	72.3	80.7	9631
Mín	<LD	-	-	0.75	<LD	3736
Máx	1.80	-	-	324	5934	17444
% total	0.01	-	-	1.6	8.1	90.3
Media	0.62	-	-	148	772	8612
STD	0.72	-	-	103	1827	4546

<LD= menor límite de detección

Vanadio (V)

Las concentraciones del Vanadio de cada una de las fracciones analizadas en las muestras con pH ácido se presentan en la Tabla 13.

La fracción residual, concentró la mayor concentración, con un rango de 26.9 a 122 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 59.5 y ± 26.9 mg kg⁻¹, estos valores representan 75.7%, del total de V. La fracción asociada a sulfuros y MO, es la siguiente con valores de concentración que van de 0.08 y 2.22 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 0.88 y ± 0.56 mg kg⁻¹, y representan 1.1%, del total de este elemento. Cercana a la fracción de los sulfuros y MO, se encuentra la fracción de los oxihidróxidos de Fe-Mn, con un rango de 8.70 y 32 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 18.2 y ± 6.95 mg kg⁻¹, con un promedio 18.2% del total de Vanadio. Por abajo de los oxihidróxidos de Fe-Mn, se encuentra la fracción de carbonatos que va de <LD y 0.02 mg kg⁻¹, una media de aritmética ± STD de <0.01 y ± <0.01 mg kg⁻¹, con un promedio de 0.01%. La fracción soluble presenta una concentración muy baja de V con relación a las fracciones 4, 5 y 6 de la Tabla 13 con un rango de <LD y 0.23 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 0.05 y ± 0.07 mg kg⁻¹, con un valor promedio 0.06% del total de V. La fracción adsorbida, que va de <LD y 0.02 mg kg⁻¹, una media de aritmética ± STD de <0.01 y ± <0.01 mg kg⁻¹, con un promedio de 0.01%. Los resultados muestran que la fracción residual acumuló un mayor porcentaje de V, aunque en su mayoría este elemento reportó concentraciones muy bajas, puede haber riesgo menor para el ambiente pero a largo plazo.

De acuerdo con los resultados, la distribución de V en las muestras con pH ácido, se encuentra en el orden siguiente:

Residual >Sulfuros y MO >Oxihidróxidos de Fe-Mn>Carbonatos>Soluble> Adsorbida

Tabla 13. Distribución de especiación química de vanadio en muestras con pH ácido.

V	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-04	0.08	0.01	0.01	22	0.72	50.7
JF-06	0.06	<LD	0.01	32	0.79	47.83
JF-08	0.03	0.01	0.01	8.70	0.32	26.9
JF-11	<LD	0.02	0.01	26.2	1.38	37.5
JF-14	0.01	0.01	0.01	11.34	0.79	47.33
JF-17	0.04	0.01	0.02	16.53	0.61	68.23
JF-19a	<LD	<LD	0.01	14.14	1.04	122
JF-22	0.23	<LD	<LD	15.0	2.22	34.2
JF-24	0.06	<LD	<LD	13.1	0.08	70.2
JF-26	0.03	0.01	0.01	18.1	1.03	66
JF-31	<LD	<LD	<LD	22.9	0.78	84.33
Mín	<LD	<LD	<LD	8.70	0.08	26.9
Máx	0.23	0.02	0.02	32	2.22	122
% total	0.06	0.01	0.01	23.1	1.1	75.7
Media	0.05	<0.01	<0.01	18.2	0.88	59.5
STD	0.07	<0.01	<0.01	6.95	0.56	26.92

<LD= menor límite de detección

Zinc (Zn)

Las concentraciones de Zn de cada una de las fracciones analizadas en las muestras ácidas se presentan en la Tabla 14.

La fracción soluble presentó la mayor concentración, en un rango de 9.81 y 888 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 279 y \pm 292 mg kg⁻¹, con un valor promedio 32.2%, con un alto valor de STD (Tabla14). La segunda de mayor concentración es la fracción residual, con valor de 91.8 y 562 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 315 y \pm 178 mg kg⁻¹, y representa un 36.3% del total de este metal. La fracción asociada a oxihidróxidos de Fe-Mn, reportó niveles de concentración cercanos a los solubles con 46.6 y 527 mg kg⁻¹ y una media aritmética \pm STD de 203 y \pm 156 mg kg⁻¹ con un 23.4%. Los sulfuros y MO, es otra de las fracciones que presenta niveles de concentración muy variado en comparación a las fracciones 1, 4 y 6 del (Tabla 14), con un rango de 16.9 y 299 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 59.7 y \pm 97.2 mg kg⁻¹, un promedio de 6.9% del total de Zn. Con bajo contenido se reportaron las fracciones asociadas a carbonatos y adsorbida. Los carbonatos con valores de 0.67 y 41.12 mg kg⁻¹, una

media aritmética \pm STD de 6.23 y \pm 14.1 mg kg⁻¹ y promedio 0.7% del total de Zn. La fracción adsorbida, va de 0.34 y 27.82 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 4.49 y \pm 9.45 mg kg⁻¹, con 0.5% del total de este metal. Como la fracción soluble reportó mayor concentración, indica que el Zn representa un riesgo a corto o mediano plazo para el ambiente.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Zn en las muestras con pH ácido, y el orden es el siguiente:

Soluble >Residual >Oxihidróxidos de Fe-Mn >Sulfuros y MO>Carbonatos > Adsorbida

Tabla 14. Distribución de especiación química del zinc en muestras con pH ácido.

Zn	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-04	341	1.76	1.53	221	22.5	163
JF-08	58.3	0.93	0.67	270	18.2	137
JF-11	888	2.51	1.05	254	24.23	474
JF-14	311	0.34	1.30	83.7	30.74	562
JF-19a	444	27.82	41.12	527	299	91.81
JF-22	76.71	0.73	1.53	72.44	22.11	304
JF-26	09.81	0.73	1.92	46.6	16.8	294
JF-31	105	1.08	0.71	152	43.4	493
Mín	9.81	0.34	0.67	46.6	16.9	91.8
Máx	888	27.82	41.12	527	299	562
% total	32.2	0.5	0.7	23.4	6.9	36.3
Media	279	4.49	6.23	203	59.7	315
STD	292	9.45	14.1	156	97.2	178

Tabla 15. Distribución de la Especiación Química de los EPT en muestras ácidas

<u>As</u>
<i>Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Absorbida y Carbonatos</i>
<u>Cu</u>
<i>Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Carbonatos > Adsorbida</i>
<u>Fe</u>
<i>Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Carbonatos > Adsorbida</i>
<u>V</u>
<i>Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Carbonatos > Soluble > Adsorbida</i>
<u>Pb</u>
<i>Residual > Sulfuros y MO > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Soluble > Adsorbida > Carbonatos</i>
<u>Cd</u>
<i>Soluble > Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Adsorbida > Sulfuros y Mo > Carbonatos</i>
<u>Zn</u>
<i>Soluble > Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Carbonatos > Adsorbida</i>
<u>Mn</u>
<i>Oxihidroxidos de Fe-Mn > Soluble > Residual > Sulfuros y MO > Carbonatos > Adsorbida</i>

En la Tabla 15, se muestra una síntesis de la distribución de la especiación química de los EPTs en muestras con pH ácido, y el análisis es el siguiente:

En cuanto a los contenidos de los EPTs en los jales “El Fraile”, se puede decir que el As, Cu, Fe, V y Pb, presentaron mayor proporción en la fracción residual, mientras que el Cd y Zn, la tendencia fue hacia la fracción soluble y el Mn, acumuló mayor concentración en los oxihidróxidos de Fe-Mn. Resultando cada uno de estos elementos, con niveles altos de concentración, rebasando los límites permisibles (Tabla 6).

V.4 Análisis de la digestión total en muestras con pH neutro

En la Tabla 16, se presentan los datos obtenidos de las concentraciones totales de EPT de los jales El Fraile en muestras con pH neutras comparados con los VRF proporcionados por Talavera *et al.*, (2005) y Galarza-Brito (2009) y los valores que establecen los contenidos permisibles para suelos urbanos y de cultivo (Alloway, 1990) (ver tabla 5 y 6). El análisis de los datos, se reportan de la siguiente manera

Muestras neutras

El contenido del arsénico, se encontró en concentraciones que van 1189 y 5725 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 3,261.7 ± 2,293.1 mg kg⁻¹. El VRF para este elemento es de 30 mg Kg⁻¹, indicando que los resultados están por encima de este valor.

El cadmio, reportó concentraciones que van 131 y 251 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 203.7 ± 63.9 mg kg⁻¹. con un valor de fondo de 1.0 mg kg⁻¹, lo cual indica que todas las muestras rebasaron este valor.

El cobre, acumuló concentraciones que van 558 y 754 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 664.3 ± 99.1 mg kg⁻¹. El valor de fondo es de 25 mg kg⁻¹ y el resultado indica que muestras se encuentran por arriba del valor máximo reportado.

El fierro, presentó concentraciones relativamente bajas con un rango de 3.49 y 4.44 mg kg⁻¹ una media aritmética ± STD de 4.10 ± 0.53 mg kg⁻¹ de Fe. Por su alto nivel de concentración el valor se reportó (%) y el VRF que es de 2.7 %. Por lo que todas las muestras sobrepasaron el nivel de fondo.

El manganeso, reportó concentraciones que van 5,859 y 7,656 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 6,708.3 ± 902.5 mg kg⁻¹ y su valor de fondo es de 409 mg kg⁻¹. Los resultados indican que rebasaron los límites permisibles.

El plomo, presentó concentraciones que van 4,663 y 6,065 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 5,280.7 ± 715.7 mg kg⁻¹. Este elemento reportó concentraciones muy elevadas con respecto al VRF que es de 26 mg kg⁻¹. Es decir los valores obtenidos rebasaron el valor de fondo.

El vanadio, presentó concentraciones que van 46.5 y 76.8 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 56.8 ± 17.3 mg kg⁻¹. La concentración reportada por este metal es baja comparada con los valores anteriores, pero sobrepasan el VRF que es de 40 mg kg⁻¹

El zinc, presentó concentraciones que van 6,401 y 1,1231 mg kg⁻¹ una media aritmética ± STD de 8,557.3 ± 2,456.2 mg kg⁻¹ de Zn. Los resultados indican que los valores reportados están muy altos comparados con el valor de fondo de 64 mg kg⁻¹.

Tabla 16. Valores Regionales de Fondo vs Concentración Total en los jales El Fraile (muestras con pH neutro)

Muestras	As mg kg ⁻¹	Cd mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Fe (en %)	Mn mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹	V mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
VRF*	30	1	25	2.7	409	26	40	64
JF 02	5725	131	558	4.36	5859	5114	47.3	6401
JF 09	1189	229	754	3.49	6610	6065	46.5	8040
JF 29	2871	251	681	4.44	7656	4663	76.8	11231
Mín.	1189	131	558	3.49	5859	4663	46.5	6401
Máx.	5725	251	754	4.44	7656	6065	76.8	11231
Media	3261.7	203.7	664.3	4.10	6708.3	5280.7	56.8	8557.3
STD	2293.1	63.9	99.1	0.53	902.5	715.7	17.3	2456.2

V.5 Especiación química secuencial de los EPT en muestras con pH neutro

En los párrafos siguientes se describen los resultados de la especiación química de las muestras neutras y en orden decreciente de concentración.

Arsénico (As)

Las concentraciones de As de cada una de las fracciones analizadas en las muestras con pH neutro se presentan en la Tabla 17.

En muestras neutras, el arsénico fue mayor en la fracción residual con valores de 1,293 a 4,350 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 2,822 ± 2,161 mg kg⁻¹. En seguida la fracción asociada a sulfuros y MO con intervalos de 485 a 3,629 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 2,057 ± 2,223 mg kg⁻¹. Después la fracción de los oxihidróxidos de Fe-Mn con un rango de 50 a 691 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 370 ± 453 mg kg⁻¹. La fracción soluble tuvo un rango de <LD a 0.06 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 0.03 ± 0.04 mg kg⁻¹. Las fracciones adsorbidas y asociadas a carbonatos presentaron <LD. Los resultados indican que la fracción residual concentró mayor parte de As, es decir la fracción menos peligrosa. Sin embargo, prevalecen muy de cerca las fracciones de los sulfuros y los oxihidróxidos, lo que implica un peligro a corto o mediano plazo para el ambiente.

De acuerdo con los resultados, la distribución del As en las muestras con pH neutro, se encuentra en el orden siguiente:

Residual > Sulfuros y MO > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Soluble > Carbonatos > Adsorbida

Tabla 17. Distribución de especiación química del arsénico en muestra con pH neutro

As	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-02	0.06	<LD	<LD	691	3629	4350
JF-09	<LD	<LD	<LD	50	485	1293
Mín	<LD	-	-	50	485	1293
Máx	0.06	-	-	691	3629	4350
% total	<0.01	-	-	7	39	54
Media	0.03	-	-	370	2057	2822
STD	0.04	-	-	453	2223	2161

<LD= menor límite de detección

Cadmio (Cd)

Las concentraciones de Cd de cada una de las fracciones analizadas en las muestras con pH neutro se presentan en la Tabla 18.

La fracción de oxihidróxidos de Fe-Mn reportó mayor concentración con intervalos de 102 y 158 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 121 y \pm 32 mg kg⁻¹, y con mayor porcentaje (64 %). La fracción carbonatos es la segunda de mayor concentración con valores de 0.34 y 75.72 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 26.5 y \pm 42.7 mg kg⁻¹, con un promedio de 14% del total de este metal. En seguida la fracción asociada a sulfuros y MO con rango de 6.56 y 27.46 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 19.1 y \pm 11.07 mg kg⁻¹ y representa 10.12 %. La fracción residual presentó concentraciones muy por debajo de las fracciones anteriores que va de 1.51 y 18.53 mg kg⁻¹, con una media aritmética de \pm 11.02, STD \pm 8.69 mg kg⁻¹ con porcentaje de 5.83%. Las fracciones soluble y adsorbida, reportaron menor concentración. En este caso la soluble tuvo un rango de 0.39 y 2.59 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 1.40 y \pm 1.11 mg kg⁻¹, y un promedio de 1% del total de Cd y la adsorbida va de 3.11-12.87 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 7.14 y \pm 5.1 mg kg⁻¹ con un porcentaje de el 3.78%. Debido a que el 64 % de CD se concentró en la fracción de los oxihidróxidos, por lo que su

liberación al ambiente puede ser a mediano plazo, esto puede deberse a al pH del medio.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Cd en las muestras con pH neutro, se encuentra en el orden siguiente:

Oxihidróxidos de Fe-Mn > Carbonatos > Sulfuros y MO > Residual > Soluble > Adsorbida

Tabla 18. Distribución de especiación química del cadmio en muestras con pH neutro.

Cd	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-02	0.39	3.11	0.34	102	6.56	1.51
JF-09	1.22	5.45	3.32	158	23.36	18.53
JF-29	2.59	12.87	75.72	103	27.46	13.04
Mín	0.39	3.11	0.34	102	6.56	1.51
Máx	2.58	12.87	75.72	158	27.46	18.53
% total	1.0	3.78	14	64	10.3	5.83
Media	1.4	7.14	26.5	121	19.1	11.02
STD	1.11	5.1	42.7	32	11.07	8.69

<LD= menor límite de detección

COBRE (Cu)

Las concentraciones de Cu de cada una de las fracciones analizadas en las muestras con pH neutro se presentan en la Tabla 19.

La fracción asociados a sulfuros y MO acumuló mayor concentración de Cu, con intervalos entre 287 y 508 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 418 y ± 117 mg kg⁻¹ y un porcentaje de 67.90 %. La siguiente fracción fueron los oxihidróxidos de Fe-Mn, que va de 72.82 a 158 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 125 y ± 45.80 mg kg⁻¹, con un promedio de 20.34% del total de Cu. La fracción residual, presentó concentraciones muy variadas de 47.75 y 93.93 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 64.07 y ± 25.89 mg kg⁻¹, lo que representa el 10.40%. La fracción de carbonatos reportó una concentración muy por debajo, de las fracciones 4, 5 y 6, con un rango de <LD a 23.11 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 7.72 y ± 13.33 mg kg⁻¹ con un 1.3% del total de este metal. Las concentraciones muy bajas de Cu, están representadas por las fracciones soluble y adsorbida. La soluble con un rango de 0.06 y 0.35 mg kg⁻¹, una media aritmética

± STD de 0.19 y ± 0.15 mg kg⁻¹, con un promedio de 0.03%. La adsorbida, presenta un rango de 0.16 y 0.69 mg kg⁻¹, una media aritmética de ± STD de 0.40 y ± 0.27 mg kg⁻¹, con un promedio de 0.06% del total de Cu. Los resultados muestran que los sulfuros y oxihidróxidos reportaron elevadas concentraciones de este elemento. Lo cual representa un riesgo al medio ambiente en un corto y mediano plazo.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Cu en las muestras con pH neutro, se encuentra en el orden siguiente:

Sulfuros y MO > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Residual > Carbonatos > Soluble > Adsorbida

Tabla 19. Distribución de especiación química del cobre en muestras con pH neutro.

Cu	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-02	0.35	0.34	0.04	145	285	50.54
JF-09	0.16	0.69	<LD	72.82	508	93.93
JF-29	0.05	0.16	23.11	158	461	47.75
Mín	0.06	0.16	<LD	72.82	287	47.75
Máx	0.35	0.69	23.11	158	508	93.93
% total	0.03	0.06	1.3	20.34	67.90	10.40
Media	0.19	0.40	7.72	125	418	64.07
STD	0.15	0.27	13.33	45.80	1167	25.89

<LD= menor límite de detección

Fierro (Fe)

Las concentraciones de Fe de cada una de las fracciones analizadas en las muestras neutras se presentan en la Tabla 20.

El Fe se concentró principalmente en la fracción residual, con un rango de 19,960 y 2,3037 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 2,1405 y ± 1,547 mg kg⁻¹, con un valor promedio 48.9 % del total de Fe. Por debajo de la fracción anterior se encontró la fracción asociada a oxihidróxidos de Fe-Mn, que va de 9,924 y 1,3940 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 11,531 y ± 2,125 mg kg⁻¹, y un valor promedio 26.31%. Se sigue la fracción asociada a sulfuros y MO, con una concentración cercana a la fracción antes señalada en la Tabla 20, con un rango de 8,650 y 12,538 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 10,879 y ± 2006 mg kg⁻¹, con un porcentaje de 24.82%. La fracción soluble, presentó una

concentración baja en relación a las otras fracciones, con valor de 0.79-1.71 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 1.14 y ± 0.50 mg kg⁻¹ y con <0.01%. Las fracciones adsorbida y asociada a carbonatos, presentaron concentraciones muy bajas. La adsorbida, con un rango de 0.01 y 0.09 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD 0.06 y ± 0.05 mg kg⁻¹, con un valor promedio de <0.01%, los carbonatos, con un rango <LD y 0.07 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 0.02 y ± 0.04 mg kg⁻¹, y un valor promedio de <0.01%. Es indica que la fracción residual concentró mayor contenido, se siguen los oxihidróxidos y sulfuros, los tres de mayor concentración de Fe. Esto implica un serio riesgo para el ambiente en un corto o mediano plazo.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Fe en las muestras con pH neutro, se encuentra en el orden siguiente:

Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Adsorbida > Carbonatos

Tabla 20. Distribución de especiación química del hierro en muestras con pH neutro.

Fe	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-02	0.93	0.09	0.07	9924	12538	23037
JF-09	0.79	0.09	<LD	10729	8650	19960
JF-29	1.71	0.01	<LD	13940	11450	21219
Mín	0.79	0.01	<LD	9924	8650	19960
Máx	1.71	0.09	0.07	13940	12538	23037
% total	<0.01	<0.01	<0.01	26.31	24.82	48.9
Media	1.14	0.06	0.02	11531	10879	21405
STD	0.50	0.05	0.04	21245	2006	1547

<LD= menor límite de detección

Manganeso (Mn)

Las concentraciones de Mn de cada una de las fracciones analizadas en las muestras con pH neutro se presentan en la Tabla 21.

El Mn reportó una alta contenido en la fracción asociada a los oxihidróxidos de Fe-Mn, con intervalo de 4,676 y 6,310 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 5,375 y ± 843 mg kg⁻¹ con un promedio del 85 %. Seguida de la fracción residual, con 214 a 647 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 434 y ± 217 mg kg⁻¹ con porcentaje del 6.9% del total de Mn. La fracción de los sulfuros

y MO presenta una concentración cercana a la residual, un rango 266 y 599 mg kg⁻¹, con un media aritmética ± STD de 414 y ± 1,670 mg kg⁻¹, con un promedio de 6.6%. Las fracción de carbonatos presentó bajo contenido de Mn en relación las fracciones anteriores, con rango de 0.68-289 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 96.8 y ± 166 mg kg⁻¹, un promedio de 1.53%. Las fracciones soluble y adsorbida están muy por debajo de las señaladas anteriormente. La soluble su rango es de 0.51 y 0.68 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 0.58 y ± 0.09 mg kg⁻¹, con 0.01% de promedio. La adsorbida presentó valores de 0.65-1.83 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 1.27 y ± 0.59 mg kg⁻¹ y un promedio de 0.02% del total de Mn. Los resultados indican que los oxihidróxidos tuvieron valores muy altos de este metal, por lo cual implica un riesgo para el medio que pudiera liberarse al ambiente en un corto o mediano plazo.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Mn en las muestras con pH neutro, se encuentra en el orden siguiente:

Oxihidróxidos de Fe-Mn > Residual > Sulfuros y MO > Carbonatos > Soluble > Adsorbida

Tabla 21. Distribución de especiación química del manganeso muestras con pH neutro.

Mn	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-02	0.68	1.83	0.68	4676	266	214
JF-09	0.51	1.32	0.87	5138	377	647
JF-29	0.55	0.65	289	6310	599	441
Mín	0.51	0.65	0.68	4676	266	214
Máx	0.68	1.83	289	6310	599	647
% total	0.01	0.02	1.53	85	6.6	6.9
Media	0.58	1.27	96.8	5375	414	434
STD	0.09	0.59	166	843	170	217

Vanadio (V)

Las concentraciones del Vanadio de cada una de las fracciones analizadas en las muestras con pH neutro se presentan en la Tabla 22.

El V fue mayor en la fracción residual, con intervalos de 30.9 y 49.54 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 37.22 y ± 10.7 mg kg⁻¹ y un promedio de 63.6 %. Muy por abajo de la residual se encontró la fracción de los oxihidróxidos

de Fe-Mn con valores de 8.91 y 15.72 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 11.97 y ± 3.44 mg kg⁻¹ y un porcentaje de 20.46%. Cercano a la fracción de los Oxihidróxidos de Fe-Mn, resultaron los sulfuros y MO, mg kg⁻¹, con un rango de 7.54 y 12.2 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 9.30 y ± 2.52 mg kg⁻¹ y un valor promedio 15.92 %. En las tres fracciones restantes (solubles, adsorbidas y asociada a carbonatos) quedaron muy pobremente representadas, con un promedio de <0.03%. Debido a las bajas concentraciones de cada fracción y del cual ninguna rebasó el VRF, pudiera ser que el riesgo sea menor para el ambiente y liberarse en un largo periodo de tiempo.

De acuerdo con los resultados, la distribución de Vanadio en las muestras con pH neutro, se encuentra en el orden siguiente:

Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Adsorbida > Carbonatos

Tabla 22. Distribución de especiación química de vanadio en muestras con pH neutro

V	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-02	0.02	0.01	0.01	8.91	8.19	31.20
JF-09	<LD	<LD	<LD	11.32	7.54	30.93
JF-29	0.01	<LD	<LD	15.72	12.2	49.54
Mín	<LD	<LD	<LD	8.91	7.54	30.9
Máx	0.02	0.01	0.01	15.72	12.2	49.54
% total	0.02	<0.01	<0.01	20.46	15.92	63.6
Media	0.01	<0.01	<0.01	11.97	9.30	37.22
STD	0.01	<0.01	<0.01	3.44	2.52	10.7

. <LD= menor límite de detección

Zinc (Zn)

Las concentraciones de Zn de cada una de las fracciones analizadas en las muestras neutras se presentan en la Tabla 23.

El Zn, acumuló mayor concentración en la fracción de los oxihidróxidos de Fe-Mn con valores que va de 3,988 y 5,645 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 4,816 y ± 1,172 mg kg⁻¹ y un promedio 52.54% del total de este metal. En seguida los sulfuros y MO con un rango de 1,664 a 2,055 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 1,859 y ± 277 mg kg⁻¹, con un valor promedio de 20.3%. Posteriormente la fracción asociada a carbonatos con intervalos de 86.2 y 1,868

mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 977 y ± 1260 mg kg⁻¹ con promedio de 10.7% del total de Zn. En la fracción residual, el rango fue de 715 y 1,728 mg kg⁻¹, una media ± STD de 1222y ± 716 mg kg⁻¹, con un promedio 13.32l. Con bajo contenido de Zn, comparado con las fracciones anteriores, se encuentran las fracciones solubles y adsorbidas. La soluble con valores de 48.7 y 52.8 mg/kg, una media aritmética ± STD de 50.72 y ± 2.88 mg kg⁻¹y un valor promedio 0.6% del total de Zn. La adsorbida, va de 1701 y 312 mg kg⁻¹, media aritmética ± STD de 242 y ± 100 mg kg⁻¹ y un porcentaje de 2.63%. Los resultados indican que las fracciones de los oxihidróxidos, sulfuros y carbonatos acumularon alto contenido de este metal, siendo la fracción de los oxihidróxidos el más alto. Debido a esto, el Zn representa un riesgo a corto y mediano plazo.

De acuerdo con los resultados, la distribución del Zn en las muestras con pH neutro, el orden es el siguiente:

Oxihidróxidos de Fe-Mn>Sulfuros y MO >Carbonatos >Residual >Soluble > Adsorbida

Tabla 23. Distribución de especiación química del zinc en muestras con pH neutro.

Zn	Soluble mg kg ⁻¹	Adsorbida mg kg ⁻¹	Carbonatos mg kg ⁻¹	Oxihidróxidos de Fe- Mn mg kg ⁻¹	Sulfuros y MO mg kg ⁻¹	Residual mg kg ⁻¹
JF-09	52.8	312	86.2	3988	1664	1729
JF-29	48.7	171	1868	5645	2055	715
Mín	48.7	171	86.2	3988	1664	715
Máx	52.8	312	1868	5645	2055	1728
% total	0.6	2.63	10.7	52.54	20.3	13.32
Media	50.72	242	977	4816	1859	1222
STD	2.88	100.10	1260	1172	277	716

<LD= menor límite de detección

Tabla 24. Distribución de la Especiación Química de los EPT en muestras neutras

<u>As</u>
<i>Residual > Sulfuros y MO > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Soluble > Adsorbida y Carbonatos</i>
<u>Fe</u>
<i>Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Adsorbida > Carbonatos</i>
<u>V</u>
<i>Residual > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Soluble > Adsorbida > Carbonatos</i>
<u>Cd</u>
<i>Oxihidróxidos de Fe-Mn > Carbonatos > Sulfuros y MO > Residual > Soluble > Adsorbida</i>
<u>Mn</u>
<i>Oxihidróxidos de Fe-Mn > Residual > Sulfuros y MO > Carbonatos > Soluble > Adsorbida</i>
<u>Zn</u>
<i>Oxihidróxidos de Fe-Mn > Sulfuros y MO > Carbonatos > Residual > Soluble > Adsorbida</i>
<u>Cu</u>
<i>Sulfuros y MO > Oxihidróxidos de Fe-Mn > Residual > Carbonatos > Soluble > Adsorbida</i>

En la Tabla 24 nos indica la distribución de los EPT en muestras con pH neutro, y su análisis es el siguiente:

- **El As, Fe y V**, presentaron mayor concentración en la fracción residual.
- **El Cd, Mn y Zn**, presentaron mayor concentración en la fracción de oxihidróxido de Fe-Mn. Se estima que estos minerales se disuelven lentamente, por lo que la liberación de EPT es a mediano plazo (1-5 años). Y el riesgo de igual manera sería a mediano plazo.
- **El Cu**, presentó mayor concentración en la fracción de los sulfuros y MO, se considera entre las más estables ya que requieren periodos de tiempo relativamente grandes (5-20 años) para disolverse y liberar los EPT adsorbidos.

V.6 Análisis metodológico de las plantas nativas de los jales “El Fraile” en Taxco, de Alarcón, Gro.

Para el análisis químico de las especies de plantas nativas recolectadas en los jales “El Fraile”, se trabajó con siguiente diagrama (Tabla 10): a) Trabajo de campo, que incluyó: la recolección de plantas nativas, prensado e identificación. b) Trabajo de laboratorio, consistió en el lavado, molienda, digestión y análisis de cada ejemplar colectado y 3) Trabajo de gabinete, consistió en la elaboración de tablas e interpretación de resultados.



Figura 10. Metodología para el estudio de plantas nativas en los jales “El Fraile” en Taxco de Alarcón, Gro.

Los mecanismos de fitorremediación y los procesos que provienen de la identificación de plantas que acumulan metales pesados incluyen: Fitoextracción o fitoacumulación, rizofiltración, fitoestabilización, rizodegradación o fitoestimulación, fitodegradación y fitovolatilización. En esta investigación, la técnica seleccionada de fitorremediación más apropiada fue la de fitoextracción o fitoacumulación, que consistió en la adsorción de EPT mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas.

De las 40 plantas colectadas entre hierbas, arbustos y árboles con capacidad de concentrar EPT, 30 de ellas fueron plantas de las cercanías de los jales y 10 plantas comparativas (controles) de las mismas especies que fueron colectadas en zonas sin afectación por residuos mineros cercanas a Taxco, Gro. (Tlamacazapa, Puente Campuzano e Ixcateopan) (datos de Olea y Zúñiga, 2009), con el propósito de comparar su desarrollo y contenido de metal. De las 40 plantas identificadas, 36 fueron utilizadas para la digestión total y el análisis de metales en el Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-AES), las otras cuatro especies de plantas (*Plumbago pulchella* (tlachichinol o cola de iguana); *Stemmadenia abovata* (tepechicle); *Spondrial purpurea* (ciruelo cimarrón); *Ceiba aesenlifolia* (pochote) no se analizaron debido a problemas que presentó el equipo de trabajo (horno de microondas Multiwave 3000, marca SOLV).

El Análisis en el ICP, consistió en la determinación de la composición química de algunas partes de la planta (hoja, raíz y tallo). Actualmente se considera como una referencia indispensable para determinar tanto los requerimientos nutricionales de plantaciones como los estados carenciales de microelementos. Ello se debe a que el análisis da una indicación precisa de la absorción de los diferentes elementos por la planta.

El total de muestras obtenidas en este estudio fue de 108 entre hoja, raíz y tallo, de esas, 78 fueron de plantas colectadas en los jales El Fraile y 30 de plantas controles (sin jales). A las 108 muestras se les midió los siguientes elementos químicos: As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn, algunos de ellos son considerados como elementos potencialmente tóxicos (EPT).

Para efectuar la identificación taxonómica de las plantas en el herbario, se consultaron algunas literaturas relacionadas a las florísticas generales, haciendo una descripción en las categorías del género y la especie (Rzedowski *et al*; 1990 y Rzedowski *et al*; 2001, Rodríguez y Porras 1996), así también se solicitó su colaboración del Dr. Cesáreo Catalán Everástico investigador en el área de botánica y docente de la Unidad Académica de Ciencias Agropecuarias y ambientales de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAG).

V.7 Especies de plantas de los jales y su grupo comparativo (plantas controles)

Verbesina crocata (capitaneja); *Asclepias curassavica* (flor de sangre o platanillo); *Sapindáceas serjania* (enredadera); *Senecio deppeanus* (Jara amarilla o candelero); *Thevitia ovate* (yoyote); *Psidium guajava* (guayabo); *Lythrum gráciles*; *Dodonoea biolata* (chapulixtil o ocotillo); *Bursera copalifera* (copal) y *Senna pallida* (cammpiseran). (Tomado del estudio de Olea y Zúñiga, 2009). Estas plantas fueron colectadas en la base de los jales de El Fraile y estas mismas especies se colectaron en otros sitios sin afectación por jales (plantas comparativas) cercanos a Taxco (Tlamacazapa, Puente Campuzano e Ixcateopan) (datos de Olea y Zúñiga, 2009). La finalidad de este estudio es comparar a través de un análisis químico, los niveles de concentración por especie.

V.8 Especies de plantas de los jales sin su grupo comparativo

En esta segunda colecta, fueron plantas de los jales, sin su grupo control, es decir, este grupo de plantas no se compararon con otras plantas libres de contaminación minera debido a que muchas de esta misma especies no se encontraron en los alrededores de los terrenos más cercanos.

Juniperus fláccida (pino); *Vitex mollis* (coyotomate); *Lantana cámara L.* (salvia real o cinco negrito); *Lysiloma divencatum* (mezquite); *Cnidoscolus multilobusb* (chaya de monte); *Ipomoea arborescens* (cazahuate); *Phithecellobium dulce* (huamúchil o guamúchil); *Opuntia robusta* (Nopal); *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul); *Taxodium mucronatum* (ahuehuete o sabino); *Jacaranda minosifolia* (jacaranda); *Ficus cotinifolia* (amate prieto); *Leucaena escalante* (guaje); *Lysiloma acapulcensis* (tepeguaje); *Guafuma ulmifolia* (cahuilote) y *Ficus insípida* (amate blanco).

V.9 Descripción de resultados (plantas comparativas)

Con los resultados obtenidos del análisis del material vegetal seleccionado (hoja, raíz y tallo) en el ICP, se determinó la concentración de cada elemento químico por planta, con esos valores se realizó el cálculo para obtener el valor máximo, mínimo, la media, varianza y la desviación estándar. A continuación se describen los resultados obtenidos.

Plantas comparativas

EPTs en hoja

En las hojas de las plantas, el As no se detectó (Tabla 25). En cambio el Cd obtuvo un rango de concentración de 2.98 y 10.4 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 5.6 y ± 2.70 mg kg⁻¹ donde la concentración mayor la presentó la especie vegetal *Sapindáceas serjania* (enredadera) y la menor fue *Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo).

El Cr presentó valores que oscilan entre 0.50 y 27.3 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 7.2 y ± 8.10 mg kg⁻¹, la especie vegetal con mayor concentración fue *Lythrum graciles* y la menor fue *Verbesina crocata* (capitaneja).

Con relación al Cu, este osciló entre 23.8 y 33.8 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 30.4 y ± 3.4 mg kg⁻¹, donde *Bursera copalifera* (copal) presentó niveles altos de concentración y *Sapindáceas serjania* (enredadera) el nivel más bajo (Figura 11).

Con respecto al Fe, se encontró en un rango que va entre 105 y 868 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 333 y ± 271.0 mg kg⁻¹ y la especie con valor más alto fue *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) en menor concentración *Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo).

El contenido de Ni oscila entre de 1.5 y 12.9 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 2.5 y ± 4.72 mg kg⁻¹ y *Lythrum graciles* fue la especie de mayor concentración y *Psidium guajava* (guayabo) obtuvo valores muy bajos.

En relación con el Pb, este oscila entre de ND y 43.2 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 4.8 y ± ND mg kg⁻¹, siendo la especie *Sapindáceas*

serjania (enredadera) quién presento el valor de concentración más alto, no se detectó un valor menor.

Los contenidos de Zn oscilaron entre 25.4 y 149 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 62.0 y ± 35.7 mg kg⁻¹, encontrándose que la especie vegetal *Psidium guajava (guayabo)* destacó con mayor concentración y la menor fue *Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)* (Figura 12).

Tabla 25. Concentración (mg kg⁻¹) de los EPTs en las hojas de plantas comparativas

PLANTAS COMPARATIVAS (HOJA)	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
<i>Verbesina crocata (capitaneja)</i>	ND	8.98	0.50	31.9	171	ND	ND	45.4
<i>Asclepias curassavica (flor de sangre)</i>	ND	6.97	0.50	27.8	134	ND	ND	33.9
<i>Sapindáceas serjania (enredadera)</i>	ND	10.4	2.48	23.8	220	ND	43.2	49.2
<i>Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)</i>	ND	3.0	7.97	32.4	868	2.99	ND	25.4
<i>Thevitia ovate (yoyote)</i>	ND	3.49	4.99	31.9	109	ND	ND	67.8
<i>Psidium guajava (guayabo)</i>	ND	5.96	5.96	26.8	283	1.5	ND	149
<i>Lythrum graciles</i>	ND	4.48	27.3	32.3	656	12.9	ND	56.7
<i>Dodonoea biolata (chapulixtil u ocotillo)</i>	ND	2.98	8.46	32.8	105	3.49	ND	66.7
<i>Bursera copalifera (copal)</i>	ND	3.98	6.97	33.8	450	1.99	ND	68.7
<i>Senna pallida (cammpiseran)</i>	ND	2.45	4.42	12.3	145	2.71	ND	36.31
Valor máximo	ND	10.4	27.3	33.8	868	12.9	43.2	149
valor mínimo	ND	2.45	0.50	12.3	105	1.5	43.2	25.4
Media	ND	5.3	7.0	28.6	314	2.3	4.3	60
Varianza	ND	7.5	59.1	43.1	68798	22.3	ND	1201
STD	ND	2.73	7.69	6.6	262.3	4.72	ND	34.7
STD relativa	ND	51.9	110.5	23.0	83.5	206.6	ND	57.9

ND= no detectado

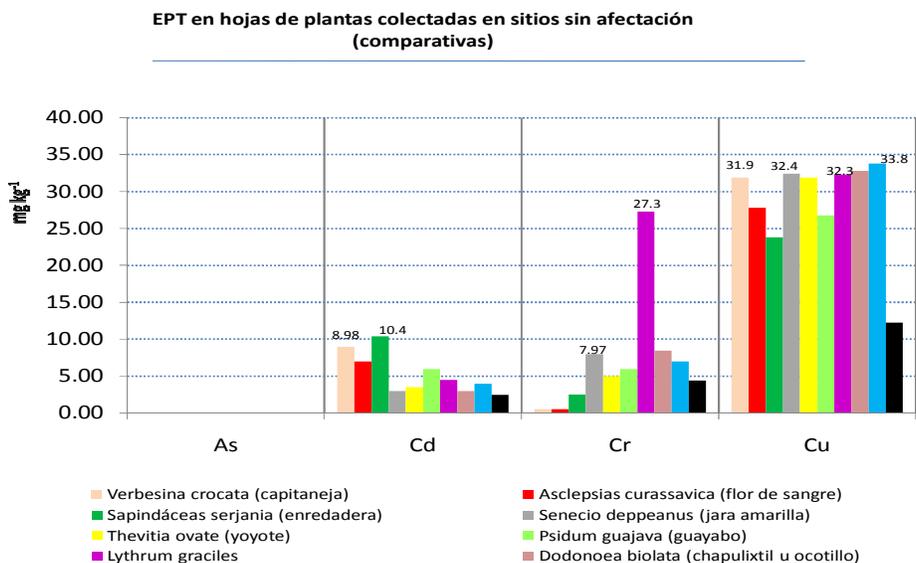


Figura 11. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de hojas de plantas comparativas

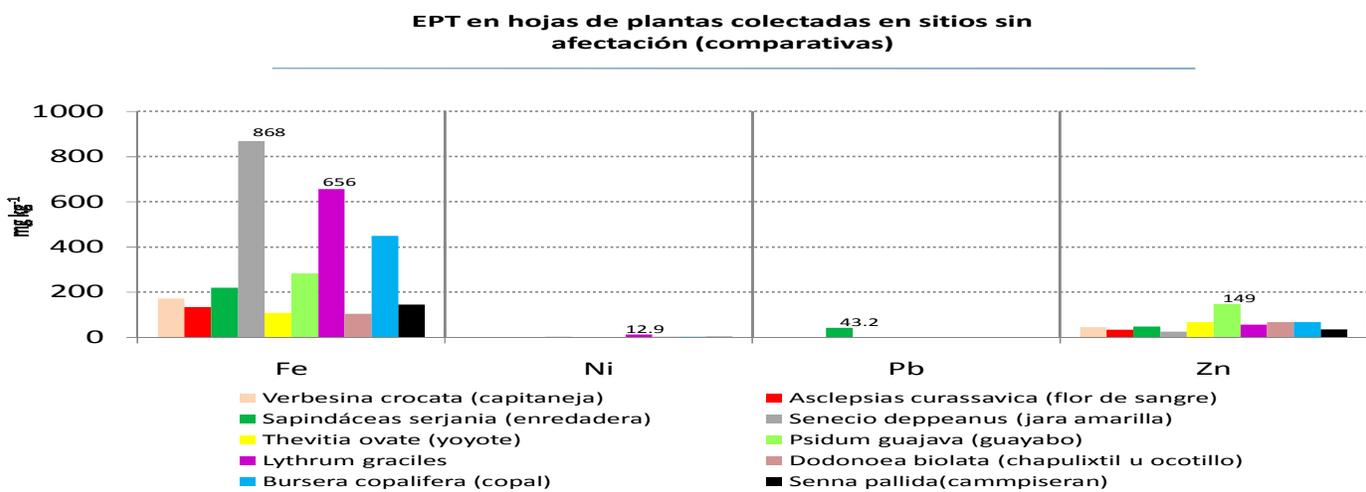


Figura 12. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de hojas de plantas Comparativas

EPTs en raíz

En la raíz de las plantas el As no se detectó (Tabla 26). Por otra parte el Cd logró obtener un rango de concentración de 2.5 y 22.3 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 7.4 y ± 7.37 mg kg⁻¹, la concentración mayor la presentó la especie vegetal *Lythrum graciles* y la menor fue *Senecio deppeanus* (*jara amarilla* o *candelerero*).

El Cr presentó valores que oscilan entre 0.20 y 18.3 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 7.6 y ± 4.93 mg kg⁻¹ y el nivel más alto lo obtuvo *Lythrum graciles* y el más bajo *Sapindáceas serjania (enredadera)*.

Con relación al Cu, este osciló entre 19.4 y 34.8 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 27.3 y ± 4.9 mg kg⁻¹, donde *Psidium guajava (guayabo)* presentó niveles altos de concentración y *Bursera copalifera (copal)* el nivel más bajo (Figura 13).

Con respecto al Fe, se encontró en un rango entre 11.2 y 1157 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 317 y ± 336.1 mg kg⁻¹ siendo la especie *Lythrum graciles* la de mayor concentración y en menor fue *Sapindáceas serjania (enredadera)*.

El contenido de Ni oscila entre de 1.5 y 64.3 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 8.7 y ± 24.6 mg kg⁻¹, la especie *Psidium guajava (guayabo)* quién presento nivel mayor de concentración y *Thevitia ovate (yoyote)* obtuvo valores muy bajos.

En relación con el Pb, este oscila entre de 199 y 61.6 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 8.1 y ± 30.9 mg kg⁻¹, siendo la especie *Lythrum graciles* quién reporto el valor más alto y *Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)* con valor menor.

Los contenidos de Zn oscilaron entre 25.0 y 78 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 40.0 y ± 16.3 mg kg⁻¹, y se encontró que la especie *Verbesina crocata (capitaneja)* destacó con mayor concentración, y la menor fue *Bursera copalifera (copal)* Figura 14).

Tabla 26. Concentración (mg kg⁻¹) de los EPTs en raíz de plantas comparativas

PLANTAS COMPARATIVAS (RAÍZ)	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
<i>Verbesina crocata</i> (capitaneja)	ND	4.47	2.98	23.8	428	ND	17.8	78
<i>Asclepias curassavica</i> (flor de sangre)	ND	20.3	3.97	30.8	191	ND	ND	40.7
<i>Sapindáceas serjania</i> (enredadera)	ND	5.0	0.20	28.4	11.2	ND	ND	39.3
<i>Senecio deppeanus</i> (jara amarilla o candelero)	ND	2.5	8.95	30.3	212	5.97	1.99	54.2
<i>Thevitia ovate</i> (yoyote)	ND	4.48	6.47	23.9	127.9	1.5	ND	45.8
<i>Psidium guajava</i> (guayabo)	ND	3.49	9.97	34.8	300	64.3	ND	25.9
<i>Lythrum graciles</i>	ND	22.3	18.3	31.7	1157	9.43	61.6	35.1
<i>Dodonoea biolata</i> (chapulixtil u ocotillo)	ND	5.47	6.47	28.3	539	ND	ND	29.3
<i>Bursera copalifera</i> (copal)	ND	2.98	8.96	19.4	89	2.49	ND	25
<i>Senna pallida</i> (cammpiseran)	ND	3.49	9.48	21.9	115	2.99	ND	26.4
Valor máximo	ND	22.3	18.3	34.8	1157	64.3	61.6	78
valor mínimo	ND	2.5	0.20	19.4	11.2	1.5	1.99	25
Media	ND	7.4	7.6	27.3	317	8.7	8.1	40
Varianza	ND	54.4	24.4	23.8	112968.7	604.9	952.2	264.5
STD	ND	7.37	4.93	4.9	336.1	24.6	30.9	16.3
STD relativa	ND	99.1	65.1	17.9	106.0	283.8	379.3	40.7
ND= no detectado								

EPT en raíz de plantas colectadas en sitios sin afectación (comparativas)

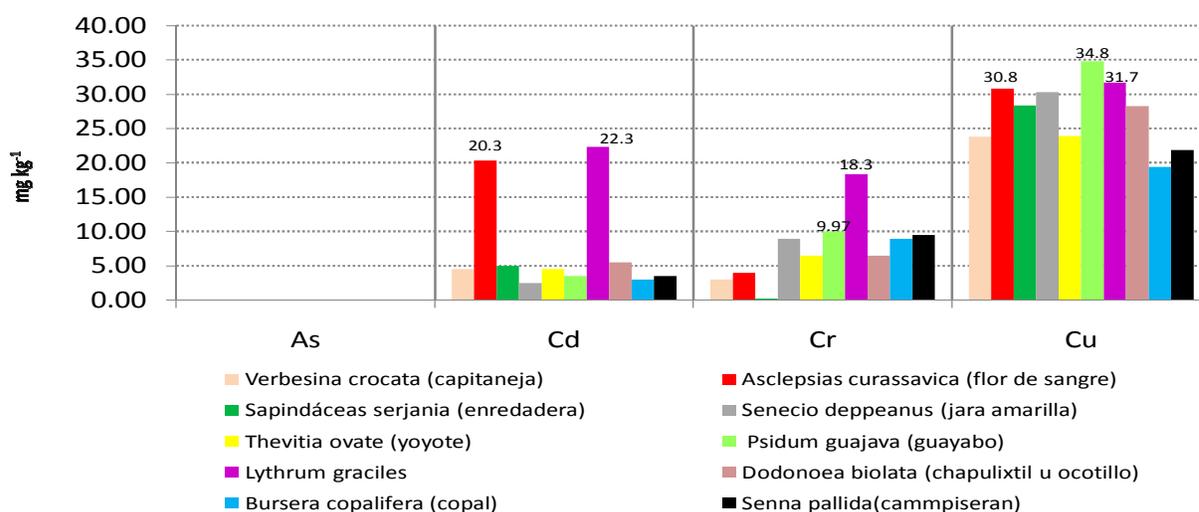


Figura 13. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de raíz de plantas comparativas

**EPT en raíz de plantas colectadas en sitios sin afectación
(comparativas)**

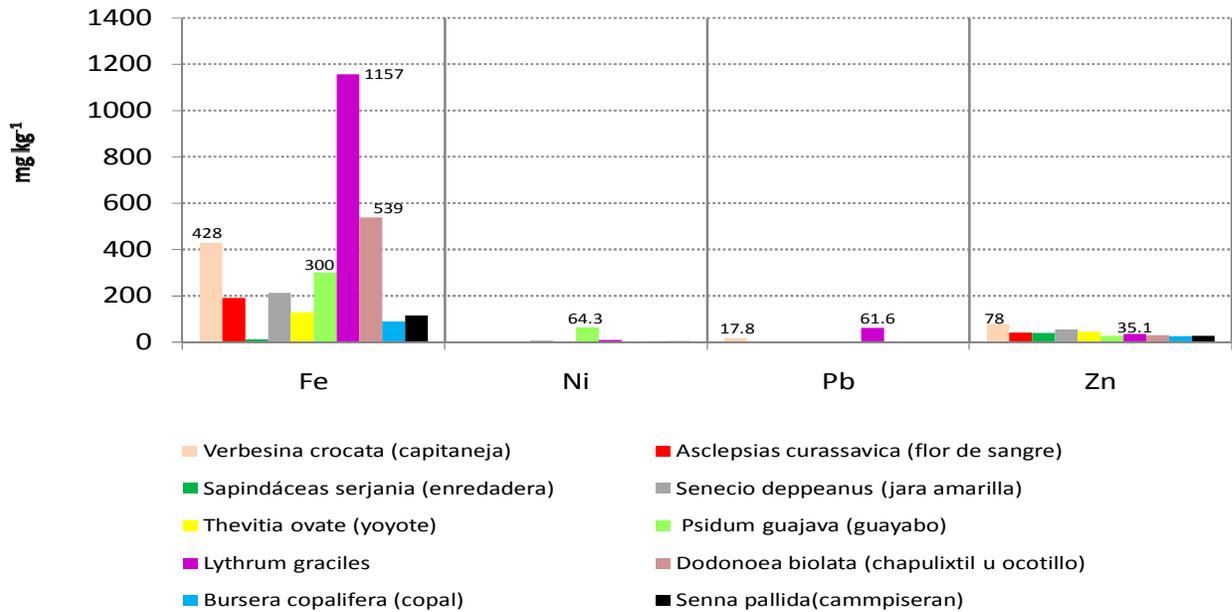


Figura 14. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de raíz de plantas comparativas

EPTs en tallo

El As presentó un rango entre ND y 1.98 y la especie vegetal *Senna pallida* (campaíseran) detectó mayor concentración, no presentó una media aritmética ni STD (Tabla 27).

El Cd reportó un rango de concentración de 2.5 y 29.8 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 10.1 y ± 8.55 mg kg⁻¹ y la concentración mayor la presentó la especie *Verbesina crocata* (capitaneja) y la menor fue *Thevitia ovate* (yoyote).

El Cr presentó valores que oscilan entre 0.50 y 14.4 mg kg⁻¹, una media aritmética ± STD de 7.4 y ± 5.53 mg kg⁻¹, la especie de mayor concentración fue *Lythrum graciles* y la menor *Sapindáceas serjania* (enredadera).

Con relación al Cu, este osciló entre 14.9 y 55.5 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 26.6 y ± 12.7 mg kg⁻¹, donde *Senna pallida* (campaíseran) presentó niveles altos de concentración y *Thevitia ovate* (yoyote) el nivel más bajo (Figura 15).

El Fe, se encontró con un rango entre 43 y 1564 mg kg⁻¹, y una media aritmética ± STD de 521 y ± 602.7 mg kg⁻¹ y la especie *Lythrum graciles* presento un valor más alto, mientras que *Asclepsias curassavica* (flor de sangre) reporto menor concentración.

El contenido de Ni oscila entre de 1.5 y 5.5 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 2.3 y ± 1.64 mg kg⁻¹, siendo *Lythrum graciles* quién mostró una mayor concentración y *Thevitia ovate* (yoyote) obtuvo valor menor.

En relación con el Pb, este oscila entre de 1.49 y 71.8 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 7.3 y ± 49.7 mg kg⁻¹, siendo *Senna pallida* (cammpiseran) la especie que mostró una concentración mayor y *Verbesina crocata* (capitaneja) presentó un valor menor.

Los contenidos de Zn oscilaron entre 27.0 y 145 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 50.0 y ± 34.9 mg kg⁻¹, y la especie *Senna pallida* (cammpiseran) destacó con mayor concentración y la menor fue *Lythrum graciles* (Figura 16).

Tabla 27. Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT en tallo de plantas comparativas.

Plantas comparativas (tallo)	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
<i>Verbesina crocata</i> (capitaneja)	ND	29.8	1.00	22.9	1143	ND	1.49	43.3
<i>Asclepsias curassavica</i> (flor de sangre)	ND	8.46	0.50	19.4	43	ND	ND	46.8
<i>Sapindáceas serjania</i> (enredadera)	ND	16.9	0.50	18.8	96	ND	ND	65.9
<i>Senecio deppeanus</i> (jara amarilla o candelero)	ND	4.48	13.4	34.3	433	4.48	ND	36.8
<i>Thevitia ovate</i> (yoyote)	ND	2.5	4.97	14.9	84.9	1.5	ND	33.3
<i>Psidium guajava</i> (guayabo)	ND	3.49	8.98	39.4	177	1.5	ND	33.9
<i>Lythrum graciles</i>	ND	13.9	14.4	23.4	1564	5.5	ND	27
<i>Dodonoea biolata</i> (chapulixtil u ocotillo)	ND	12.4	6.97	18.4	71	1.99	ND	34.3
<i>Bursera copalifera</i> (copal)	ND	2.48	9.43	19.3	201	3.97	ND	35.7
<i>Senna pallida</i> (cammpiseran)	1.98	6.93	13.8	55.5	1395	4.46	71.8	145
Valor máximo	2.0	29.8	14.4	55.5	1564	5.5	71.8	145
valor mínimo	ND	2.5	0.50	14.9	43	1.5	1.49	27
Media	ND	10.1	7.4	26.6	521	2.3	7.3	50
Varianza	ND	73.1	30.6	161.4	363214.4	2.7	2471.7	1217.1
STD	ND	8.55	5.53	12.7	602.7	1.64	49.7	34.9
STD relativa	ND	84.4	74.8	47.7	115.7	70.3	678.4	69.6

ND= no detectado

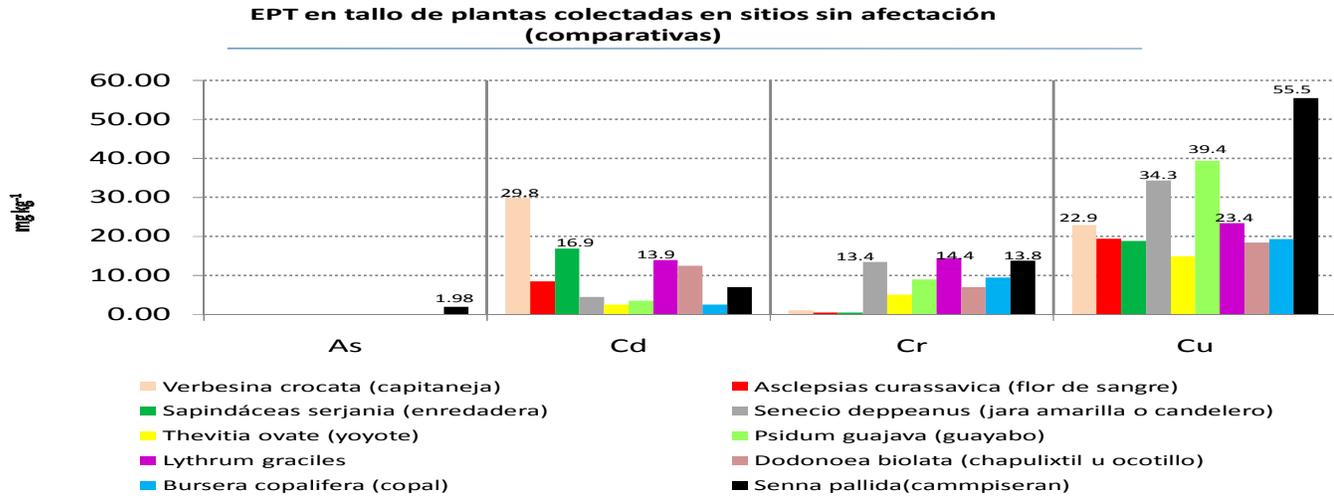


Figura 15. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de tallo de plantas Comparativas

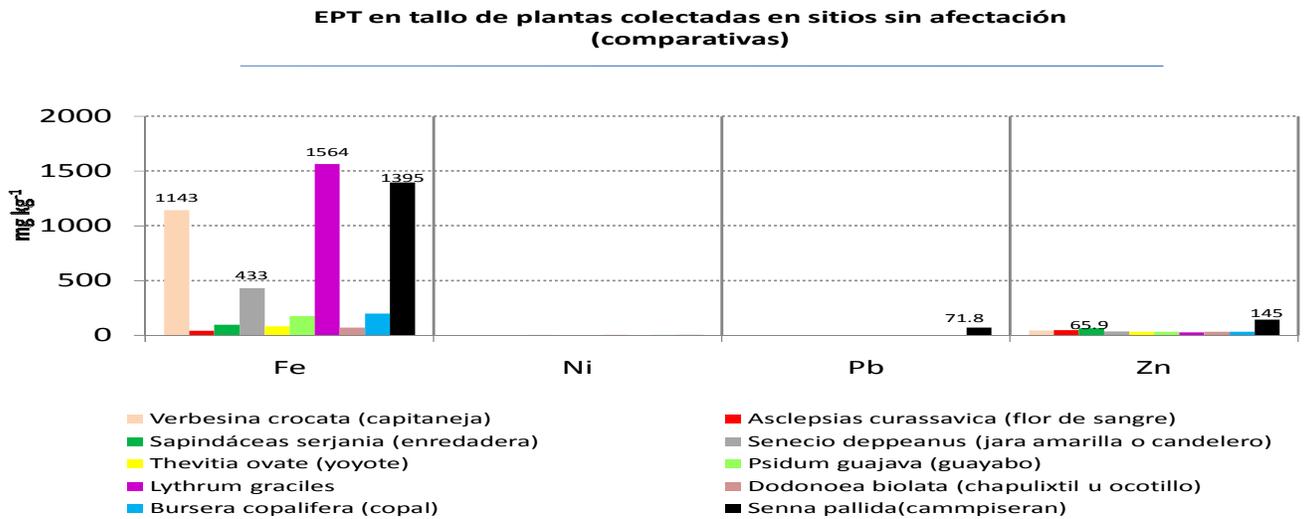


Figura 16. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de tallo de plantas Comparativas

V.10 Concentración total de los EPT en plantas colectadas en los jales y su Factor de enriquecimiento (FE) con relación al valor encontrado en las muestras comparativas.

Los valores del factor de enriquecimiento (FE) se determinó dividiendo la concentración obtenida de cada especie de planta colectada en los jales entre la concentración de la planta comparativa. Los resultados se describen de la siguiente manera.

EPT en las hojas de plantas de jales y su FE

Con respecto al As, presento un rango de concentración que va de 7.46 y 96.8 mg kg⁻¹ y una media aritmética \pm STD de 11.2 y \pm 51.6 mg kg⁻¹, encontrándose que la especie vegetal *Bursera copalifera* (*copal*) presento la concentración más elevada y su FE elevado de 96.8 veces más. *Sapindáceas serjania* (*enredadera*) fue la especie mostró menor concentración con un FE de 7.46. Las demás especies su FE fue cero.

El Cd obtuvo un rango de 1.49 y 18.4 mg kg⁻¹ con una media aritmética \pm STD de 7.85 y \pm 5.33 mg kg⁻¹. Siendo *Thevitia ovate* (*yoyote*) la especie con mayor concentración y con un FE de 5.27 veces más. Se encontró que *Sapindáceas serjania* (*enredadera*) reporto menor concentración de Cd y su FE mostró menor valor al de la muestra control (<VR). La especie *Senecio deppeanus* (*jara amarilla o candelero*) obtuvo un FE de 4.33. Las demás especies reportan un FE bajo.

El Cr presentó valores que oscilan entre 0.50 y 9.5 mg kg⁻¹ y una media aritmética \pm STD de 5.22 y \pm 3.07 mg kg⁻¹, encontrándose que la especie *Lythrum gráciles* tuvo mayor concentración y su FE fue menor al de la muestra control, la especie *Psidium guajava* (*guayabo*) reporto el valor más bajo de concentración y mostró un FE menor al de la muestra control. *Verbesina crocata* (*capitaneja*) resultó con un FE más elevado (5.0 veces más).

En relación al Cu, sus valores van entre 10.9 y 80.2 mg kg⁻¹, una media aritmética \pm STD de 39.3 y \pm 21.2 mg kg⁻¹, donde *Asclepsias curassavica* (*flor de sangre*) presentó niveles más altos de concentración y el FE más elevado de 2.88 veces más. La especie *Sapindáceas serjania* (*enredadera*) presento el nivel más bajo de concentración y su FE fue menor al de la muestra control. Especie como

Psidium guajava (guayabo) tuvo un FE de 2.19, *Senna pallida* (cammpiseran) con 1.8, entre otras.

El Fe se encontró en un rango entre 76.7 y 1643 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 390 y ± 468 mg kg⁻¹ en donde la especie *Bursera copalifera* (*copal*) acumuló mayor concentración y su FE fue el más elevado con 3.65 veces más. Mientras que *Asclepias curassavica* (*flor de sangre*) reportó baja concentración y su FE fue menor al valor encontrado en la muestra control. Otra de las especies que reportó un FE elevado fue *Verbesina crocata* (*capitaneja*) con 3.41.

El contenido de Ni osciló entre de 1.0 y 5.0 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 1.64 y ± 1.27 mg kg⁻¹. *Lythrum gráciles* registró la mayor concentración y con un FE menor al de la muestra control. *Verbesina crocata* (*capitaneja*) presento el valor más bajo de concentración, con un FE de 1.0. El FE mayor se presentó en la especie *Sapindáceas serjania* (*enredadera*) con 2.48 veces y *Thevitia ovate* (*yoyote*) con 1.99.

Por otra parte se encontró que Pb oscila entre de 32.3 y 215.6 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 28.9 y ± 103.3 mg kg⁻¹. *Bursera copalifera* (*copal*) acumuló mayor concentración y el FE fue el más elevado con 215.6 veces más, seguida de *Verbesina crocata* (*capitaneja*) con 41.3. La especie *Sapindáceas serjania* (*enredadera*) tuvo un valor de concentración bajo y su FE fue menor al valor de la planta control.

El Zn reportó un rango entre 20.0 y 488 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 124.0 y ± 147.3 mg kg⁻¹, encontrándose que la especie *Bursera copalifera* (*copal*) tuvo mayor concentración y un FE elevado de 7.10 veces más. *Lythrum gráciles* fue la especie con valor menor y su FE fue menor al del valor de la muestra control. Otras especies como *Dodonoea biolata* (*chapulixtil* u *ocotillo*) con 4.12, *Senecio deppeanus* (*jara amarilla* o *candelerero*) con 3.66, *Verbesina crocata* (*capitaneja*) con 2.31 (Ver Tabla 28)

Tabla 28. EPT en las hojas de plantas de jales y su FE con respecto a los valores encontrados en las muestras de plantas comparativas.

PLANTAS JALES (HOJA)	As	FE	Cd	FE	Cr	FE	Cu	FE	Fe	FE	Ni	FE	Pb	FE	Zn	FE
<i>Verbesina crocata</i> (capitaneja)	7.5	7.5	7.0	<VR	2.5	5.0	50.3	1.57	584	3.41	1.0	1.0	41.3	41.3	105	2.31
<i>sclepsias curassavica</i> (flor de sangre)	ND	0.0	10.4	1.49	1.00	2.0	80.2	2.88	76.7	<VR	ND	0.0	ND	0.0	42.3	1.24
<i>Sapindáceas serjania</i> (enredadera)	7.46	7.46	1.49	<VR	4.97	2.0	10.9	<VR	474	2.15	2.48	2.48	32.3	<VR	76.6	1.55
<i>Thevitia ovate</i> (yoyote)	ND	0.0	18.4	5.27	7.0	1.40	49.8	1.56	234	2.14	1.99	1.99	ND	0.0	45.3	<VR
<i>Psidium guajava</i> (guayabo)	ND	0.0	8.45	1.41	0.50	<VR	58.7	2.19	167	<VR	ND	0.0	ND	0.0	72.6	<VR
<i>Lythrum graciles</i>	ND	0.0	1.49	<VR	9.5	<VR	23.8	<VR	180	<VR	4.97	<VR	ND	0.0	20	<VR
<i>Dodonoea biolata</i> (chapulixtil u ocotillo)	ND	0.0	5.97	2.0	7.0	<VR	28.3	<VR	262	2.49	2.48	<VR	ND	0.0	275	4.12
<i>Bursera copalifera</i> (copal)	96.8	96.8	9.48	2.38	7.48	1.07	22.9	<VR	1643	3.65	1.99	1.0	215.6	215.6	488	7.10
<i>Senna pallida</i> (cammpiseran)	ND	0.0	2.98	1.21	7.96	1.80	22.4	1.8	121	<VR	1.49	<VR	ND	0.0	22.4	<VR
Valor máximo	96.8		18.4		9.5		80.2		1643		4.97		215.6		488	
valor mínimo	7.46		1.49		0.50		10.9		76.7		1.00		32.30		20	
Media	11.2		7.85		5.22		39.3		390		1.64		28.9		124	
Varianza	2659.9		28.4		9.4		449.3		218993.1		1.62		10672.0		21685.3	
STD	51.6		5.33		3.07		21.2		468.0		1.27		103.3		147.3	
STD relativo	461.6		67.8		58.8		53.9		119.9		77.6		357.3		118.8	

FE= Factor de enriquecimiento
 ND= No detectado
 <VR= Menor al valor encontrado en la muestra control

EPTs en raíz de plantas de jales y su FE

La concentración del As presentó un rango de 1.49 y 47.4 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 9.8 y ± 26.0 mg kg⁻¹, reportando la especie *Verbesina crocata* (capitaneja) el contenido más alto y un FE mayor (47.4 veces más de este elemento). *Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo) reportó baja concentración y su FE fue menor con 1.5 veces más que la muestra control. *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) acumuló un FE de 46.8.

El Cd tuvo rango de 0.99 y 25.0 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 9.55 y ± 8.87 mg kg⁻¹ y la concentración mayor la presentó la especie *Verbesina crocata* (capitaneja) con un FE de 5.59 veces más. *Lythrum gráciles* presentó la menor concentración y su FE fue menor al del valor de la muestra control. El FE más elevado lo presentó la especie *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) con 5.96, *Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo) 4.44, *Psidium guajava* (guayabo) con 2.27 entre otras.

El Cr presentó valores entre 6.0 y 14.9 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 9.64 y ± 3.29 mg kg⁻¹. Siendo *Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo) la especie de mayor concentración con 2.3 veces más que la muestra control. *Verbesina crocata* (capitaneja) fue la especie con menor concentración y su FE fue menor al de la muestra control. Mientras que *Sapindáceas serjania*

(enredadera) tuvo el FE más elevado con 44.6 veces más, las demás especies reportan un FE mucho menor.

Con relación al Cu, este presenta un rango que va entre 9.49 y 168 mg kg⁻¹ y una media aritmética \pm STD de 43.5 y \pm 50.7 mg kg⁻¹, donde *Verbesina crocata* (*capitaneja*) presentó niveles altos de concentración y un FE elevado de 7.05 veces más que la muestra comparativa, seguida de *Asclepias curassavica* (flor de sangre) con 3.19, *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) con 1.11. *Lythrum gráciles* presentó el nivel de concentración más bajo y con FE menor al de la muestra control.

El Fe reportó un rango entre 125 y 2364 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 791 y \pm 725.3 mg kg⁻¹ y el valor más alto de concentración lo presentó *Verbesina crocata* (*capitaneja*) con un FE de 5.52, mientras que *Sapindáceas serjania* (enredadera) fue la especie con menor concentración pero con FE más elevado de 11.1 veces más, seguida de *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) con un FE de 7.70

El contenido de Ni oscila entre de 1.98 y 7.5 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 4.08 y \pm 2.01 mg kg⁻¹ y la especie *Dodonoea biolata* (*chapulixtil u ocotillo*) tuvo mayor concentración, esta misma especie logró acumular un FE mayor de hasta 7.5 veces más que la muestra de comparación. Seguida de *Thevitia ovate* (yoyote) con un FE de 3.63. *Psidium guajava* (*guayabo*) fue la especie con baja concentración y su FE fue menor al de la muestra control. Las otras especies acumularon un FE menor con relación a los valores anteriormente mencionados.

Los valores de Pb se encuentran entre 1.48 y 177 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 45.8 y \pm 73.9 mg kg⁻¹, siendo *Verbesina crocata* (*capitaneja*) quien concentró el valor más alto y con un FE menor de 9.94 veces más. *Thevitia ovate* (yoyote) fue la especie de menor concentración, con un FE de 1.48. *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) acumuló un FE mayor con 80.3, seguida de *Dodonoea biolata* (*chapulixtil u ocotillo*) con 70.5 veces más, *Psidium guajava* (*guayabo*) con 25.8. Las demás especies reportaron valores menores de FE en relación con los valores anteriormente.

El contenido de Zn oscila entre 12.0 y 519 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 212 y ± 188.4 mg kg⁻¹. *Verbesina crocata* (capitaneja) destacó con mayor concentración con un FE de 6.65. *Senna pallida* (cammpiseran) reportó una menor concentración con un FE menor al de la muestra control. *Dodonaea biolata* (chapulixtil u ocotillo) reportó el FE más elevado con 16.0 veces más que la muestra control, seguida de *Bursera copalifera* (copal) con 12.2, otra de la especie es *Psidium guajava* (guayabo) con un FE 6.94. Especies restantes reportan un FE menor (Ver Tabla 29).

Tabla 29. EPT en la raíz de plantas de jales y su FE con respecto a los valores encontrados en las muestras de plantas comparativas.

PLANTAS JALES (RAIZ)	As	FE	Cd	FE	Cr	FE	Cu	FE	Fe	FE	Ni	FE	Pb	FE	Zn	FE
<i>erbesina crocata</i> (capitaneja)	47.4	47.4	25	5.59	6.0	2.0	168	7.05	2364	5.52	2.0	2.0	177	9.94	519	6.65
<i>scolepsias curassavica</i> (flor de sangre)	2.49	2.49	3.49	<VR	6.0	1.51	98.2	3.18	375	1.96	2.0	2.0	8.47	8.47	51.3	1.26
<i>apindáceas serjania</i> (enredadera)	ND	0.0	2.48	<VR	8.92	44.6	13.8	<VR	125	11.10	2.48	2.48	ND	0.0	24.3	<VR
<i>enecio deppeanus</i> (jara amarilla o candelero)	46.8	46.8	14.9	5.96	8.46	<VR	33.8	1.11	1633	7.70	5.97	1.0	159.8	80.3	340	6.27
<i>hevitia ovate</i> (yoyote)	ND	0.0	7.44	1.66	12.4	1.9	25.2	1.05	945	7.38	5.45	3.63	1.48	1.48	176	3.84
<i>sidrum guajava</i> (guayabo)	ND	0.0	7.94	2.27	8.44	<VR	27.8	<VR	759	2.53	1.98	<VR	25.8	25.8	180	6.94
<i>ythrum graciles</i>	ND	0.0	0.99	<VR	7.99	<VR	9.49	<VR	127	<VR	3.99	<VR	ND	0.0	40.4	1.15
<i>odonoea biolata</i> (chapulixtil u ocotillo)	1.49	1.5	24.3	4.44	14.9	2.3	30.8	1.08	945	1.75	7.45	7.45	70.5	70.5	471	16.0
<i>ursera copalifera</i> (copal)	ND	0.0	5.96	2.0	8.44	<VR	11.4	<VR	358	4.02	3.47	1.39	14.9	14.9	306	12.2
<i>enna pallida</i> (cammpiseran)	ND	0.0	2.98	<VR	14.9	1.6	16.9	<VR	283	2.46	5.97	1.99	ND	0.0	12.0	<VR
alor máximo	47.4		25.0		14.9		168		2364		7.45		177		519	
alor mínimo	1.49		0.99		6.0		9.49		125		1.98		1.48		12	
ledia			9.55		9.64		43.5		791		4.08		45.8		212	
arianza	678.5		78.7		10.8		2570.1		526022.6		4.04		5458.0		35481.0	
TD	26.0		8.87		3.29		50.7		725.3		2.01		73.9		188.4	
TD relativo	265.3		92.9		34.1		116.4		91.7		49.3		161.5		88.9	

E= Factor de enriquecimiento
D= No detectado
VR= Menor al valor encontrado en la muestra control

EPT en tallo de plantas de jales y su FE

El As presentó un rango de 18.9 y 48 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 6.8 y ± 20.4 mg kg⁻¹, reportando a *Bursera copalifera* (copal) quién presento la concentración más elevada, registrando un FE elevado de 48 veces más. La menor concentración fue para *Verbesina crocata* (capitaneja) con un FE de 18.9.

El Cd presento un rango de 1.98 y 29.3 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de .14 y ± 7.98 mg kg⁻¹. *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) acumuló mayor concentración y el FE fue el más elevado con 6.54 veces más. La menor concentración fue registrada por *Sapindáceas serjania* (enredadera) con un FE menor al valor encontrado en la muestra comparativa.

El Cr presentó valores que oscilan entre 2.48 y 22.3 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 8.09 y ± 5.47 mg kg⁻¹, la especie *Bursera copalifera* (copal)

presentó mayor concentración, con un FE de 2.38 veces más. En menor concentración se encontró en *Asclepsias curassavica* (flor de sangre) con un FE de 4.96. El FE más elevado lo presentó *Sapindáceas serjania* (enredadera) con 10.9 veces más con respecto a la muestra comparativa.

Con relación al Cu, este osciló entre 10.9 y 71.1 mg kg⁻¹ y una media aritmética \pm STD de 31.3 y \pm 20.4 mg kg⁻¹, donde *Asclepsias curassavica* (flor de sangre) presentó niveles altos de concentración y el FE más elevado (3.66 veces más Cu que la muestra comparativa). *Sapindáceas serjania* (enredadera) fue la especie con nivel más bajo y su FE fue menor al de la muestra control.

Con respecto al Fe, se encontró en un rango que va entre 72.0 y 1175 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 429 y \pm 373 mg kg⁻¹ y la especie *Bursera copalifera* (copal) obtuvo el valor más alto y un FE de 5.84 y *Lythrum graciles* el valor menor y el FE fue menor al de la muestra control. El FE más elevado lo obtuvo la especie *Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo) con 7.46 veces más.

El contenido de Ni oscila entre de 0.50 y 11.4 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 3.03 y \pm 3.3 mg kg⁻¹, siendo la especie *Bursera copalifera* (copal) la de mayor concentración, teniendo 2.9 veces más de Ni que la muestra comparativa. *Psidium guajava* (guayabo) tuvo un valor muy bajo de concentración y un FE menor al de la muestra control.

En relación con el Pb, este oscila entre de 2.48 y 130 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 25.8 y \pm 47.9 mg kg⁻¹, siendo la especie *Bursera copalifera* (copal) la de más alta concentración y con un FE elevado (130 veces más de Pb), la especie *Thevitia ovate* (yoyote) presentó el nivel más bajo con un FE de 2.48. *Verbesina crocata* (capitaneja) fue otras de las especies que resultó con FE alto (50.4 veces más)

El Zn tuvo un rango entre 24.3 y 256 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 116 y \pm 86.0 mg kg⁻¹. La especie *Asclepsias curassavica* (flor de sangre) destacó con mayor concentración y con un FE de 5.47. Mientras que *Senna pallida* (cammpiseran) reportó baja concentración y su FE fue menor al de la muestra control. El FE más elevado lo presentó *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) con 6.27 veces más que la muestra control (Ver Tabla 30).

Tabla 30. EPT en el tallo de plantas de jales y su FE con respecto a los valores encontrados en las muestras de plantas comparativas.

PLANTAS JALES (TALLO)	As	FE	Cd	FE	Cr	FE	Cu	FE	Fe	FE	Ni	FE	Pb	FE	Zn	FE
<i>Verbesina crocata</i> (capitaneja)	18.9	18.9	7.0	<VR	3.98	3.98	59.2	2.58	967	<VR	1.49	1.49	75.1	50.4	149.7	3.45
<i>Asclepias curassavica</i> (flor de sangre)	ND	0.0	4.97	<VR	2.48	4.96	71.1	3.66	127	2.95	ND	0.0	ND	0.0	256	5.47
<i>Sapindáceas serjania</i> (enredadera)	ND	0.0	1.98	<VR	5.46	10.9	10.9	<VR	152	1.58	2.0	2.0	7.0	7.0	47.7	<VR
<i>Senecio deppeanus</i> (jara amarilla o candelero)	ND	0.0	29.3	6.54	7.46	<VR	23.8	<VR	379	<VR	2.48	<VR	23.3	23.3	231	6.27
<i>Thevitia ovate</i> (yoyote)	ND	0.0	7.46	2.98	6.46	1.29	33.8	2.26	373	4	0.99	<VR	2.48	2.48	102	3.06
<i>Psidium guajava</i> (guayabo)	ND	0.0	6.95	1.99	5.96	<VR	42.7	1.08	388	2	0.50	<VR	9.44	9.44	120	3.53
<i>Lythrum graciles</i>	ND	0.0	3.47	<VR	9.94	<VR	22.8	0.97	72	<VR	4.47	<VR	ND	0.0	26.8	<VR
<i>Dodonoea biolata</i> (chapulixtil u ocotillo)	ND	0.0	11.9	<VR	7.97	1.14	13.4	<VR	530	7.46	4.48	2.25	10.9	10.9	176	5.13
<i>Bursera copalifera</i> (copal)	48	48	5.97	2.40	22.3	2.36	21.8	1.1	1175	5.84	11.4	2.9	130	130	27.9	<VR
<i>Senna pallida</i> (cammpiseran)	ND	0.0	2.48	<VR	8.92	<VR	13.8	<VR	125	<VR	2.48	<VR	ND	0.0	24.3	<VR
Valor máximo	48		29.3		22.3		71.1		1175		11.4		130		256	
valor mínimo	18.9		1.98		2.48		10.9		72		0.50		2.48		24.3	
Media	6.7		8.14		8.09		31.3		429		3.03		25.8		116	
Varianza	414.7		63.5		29.9		417.8		139100.4		11.07		2297.7		7396.1	
STD	20.4		7.97		5.47		20.4		373.0		3.3		47.9		86.0	
STD relativo	305.8		97.9		67.5		65.2		87.0		109.7		185.8		74.0	
FE= Factor de enriquecimiento																
ND= No detectado																
<VR= Menor al valor encontrado en la muestra control																

V.11 Descripción de resultados (plantas de los jales El Fraile sin su grupo comparativo)

EPTs en hojas

El As presentó un rango de 0.25 y 64.5 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 6.0 y ± 19.7 mg kg⁻¹, reportando a *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) la especie que mayor concentración presentó y la menor fue para *Leucaena escalante* (guaje).

El Cd tiene un rango de concentración de 0.25 y 4.2 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 1.74 y ± 1.42 mg kg⁻¹ siendo *Ipomea arborescens* (cazahuate) quién presentó el valor más alto y la menor fue *Lysiloma divencatum* (mezquite).

El Cr presentó valores que oscilan entre 0.25 y 24.9 mg kg⁻¹ con una media aritmética ± STD de 2.77 y ± 6.11 mg kg⁻¹, *Vitex mollis* (coyotomate) fue la especie con mayor concentración y la menor fue *Ficus cotinifolia* (amate prieto).

Con relación al Cu, este osciló entre 3.72 y 16.8 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 10.3 y ± 4.4 mg kg⁻¹ y *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) acumuló mayor concentración y *Ficus insípida* (amate blanco o ceiba) reportó valor menor.

El Fe, se encontró en un rango que va entre 48 y 1922 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 381 y ± 532.5 mg kg⁻¹ y la especie con valor más alto

fue *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul), en menor concentración fue para *Lysiloma divencatum* (mezquite).

El contenido de Ni oscila entre de 0.25 y 38.0 mg kg⁻¹, su media aritmética ± STD de 3.62 y ± 9.8 mg kg⁻¹, la especie *Vitex mollis* (coyotomate) almacenó más Ni y *Ficus cotinifolia* (amate prieto) la concentración más baja.

En relación con el Pb, este oscila entre de 1.74 y 45.7 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 13.1 y ± 15.1 mg kg⁻¹, siendo la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) quién reportó el valor más alto y *Leucaena escalante* (guaje) el valor más bajo.

Los contenidos de Zn oscilaron entre 13.0 y 419 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 138 y ± 142.1 mg kg⁻¹, se encontró a la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) la de mayor concentración y la menor fue *Lysiloma divencatum* (mezquite) (Tabla 31).

Tabla 31. EPT en las hojas de plantas de jales sin comparación

Plantas con jales (Hojas)	As mg kg⁻¹	Cd mg kg⁻¹	Cr mg kg⁻¹	Cu mg kg⁻¹	Fe mg kg⁻¹	Ni mg kg⁻¹	Pb mg kg⁻¹	Zn mg kg⁻¹
<i>Juniperus flaccida</i> (pino)	7.00	1.00	1.25	4.75	447	2.00	43.7	330
<i>Vitex mollis</i> (coyotomate)	ND	3.74	24.9	14.4	145	38.0	5.22	108
<i>Lantana cámara</i> (salvia real o cinco negritos)	2.97	0.74	1.98	15.6	269	2.23	11.6	55.5
<i>Lysiloma divencatum</i> (mezquite)	ND	0.25	0.74	6.19	48	ND	ND	13
<i>Cnidioscolus multilobusb</i> (chaya de monte)	2.45	1.00	1.22	10.7	132	1.00	3.41	68
<i>Ipomea arborescens</i> (cazahuate)	13.4	4.2	2.23	13.6	1483	1.49	35.2	92.9
<i>Phithecellobium dulce</i> (huamúchil o guamuchil)	ND	2.72	0.50	13.1	127.3	0.25	7.92	321
<i>Opuntia robusta</i> (nopal)	0.25	4.0	1.00	9.97	229	1.24	18.9	409
<i>Echinochloa colona</i> (zacate o navajita azul)	64.5	3.72	2.23	16.8	1922	2.73	45.7	419
<i>Taxodium mucronatum</i> (ahuehuete o sabino)	ND	0.50	1.24	11.2	189	2.24	12.2	78
<i>Jacaranda minosifolia</i> (jacaranda)	ND	0.50	1.49	10.1	93.4	2.98	2.98	21
<i>Ficus cotinifolia</i> (amate prieto)	ND	1.49	0.25	4.74	151	0.25	6.74	53
<i>Leucaena escalante</i> (guaje)	0.25	0.75	1.00	7.45	91.4	1.24	1.74	60
<i>Lysiloma acapulcensis</i> (tepehuaaje)	1.99	0.50	2.73	5.97	367	1.74	4.48	97
<i>Guafuma ulmifolia</i> (cahuilote o chapulín blanco)	2.49	1.49	ND	16.7	276	ND	7.72	47.1
<i>Ficus insípida</i> (amate blanco o ceiba)	0.75	1.24	1.49	3.72	123	0.50	2.73	41
Valor máximo	64.5	4.2	24.9	16.8	1922	38.0	45.7	419
valor mínimo	0.25	0.25	0.25	3.72	48	0.25	1.74	13
Media	6.0	1.74	2.77	10.3	381	3.62	13.1	138
Varianza	388.0	2.0	37.3	19.8	283596.6	95.75	227.1	20205
STD	19.7	1.42	6.11	4.4	532.5	9.8	15.1	142.1
STD relativo	328.2	81.7	221.0	43.1	139.9	270.5	114.7	102.8

ND: no detectado

EPTs en raíz

El As presentó un rango de 3.47 y 795.8 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 59.3 y \pm 209.7 mg kg⁻¹, reportando *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) con el nivel más elevada, fue la especie *Ficus insípida* (amate blanco o ceiba) con menor concentración.

El Cd osciló entre 0.75 y 30.9 mg kg⁻¹ con una media aritmética \pm STD de 6.14 y \pm 7.77 mg kg⁻¹ y la mayor concentración lo reporta *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) y la menor fue *Lysiloma divencatum* (mezquite).

El Cr presentó valores que oscilan entre 0.99 y 34.6 mg kg⁻¹ y una media aritmética \pm STD de 8.01 y \pm 8.83 mg kg⁻¹, la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) presentó mayor concentración y *Ficus insípida* (amate blanco o ceiba) tuvo el valor menor.

Con relación al Cu, este osciló entre 4.47 y 50.0 mg kg⁻¹ y una media aritmética \pm STD de 19.7 y \pm 12.8 mg kg⁻¹, donde *Leucaena escalante* (guaje) almacenó un alto contenido de Cu y *Vitex mollis* (coyotomate) el nivel más bajo.

Con respecto al Fe, se reporta entre 71.0 y 18834 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 1925 y \pm 4531.1 mg kg⁻¹, destacando la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) con el nivel más alto y *Jacaranda minosifolia* (jacaranda) con bajo nivel.

El contenido de Ni oscila entre de 0.75 y 33.4 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 6.47 y \pm 8.06 mg kg⁻¹, la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) fue la de mayor concentración y *Lysiloma divencatum* (mezquite) obtuvo el valor bajo.

En relación con el Pb, este oscila entre de 2.5 y 242 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 57.4 y \pm 62.2 mg kg⁻¹, destacando la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) con el valor más alto y *Jacaranda minosifolia* (jacaranda) con el valor bajo.

Los contenidos de Zn oscilaron entre 12.0 y 2517 mg kg⁻¹, con una media aritmética \pm STD de 360 y \pm 600.2 mg kg⁻¹, y se encontró que la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) destacó con mayor concentración, y la menor fue *Lysiloma divencatum* (mezquite) (Tabla 32).

Tabla 32. EPT en la raíz de plantas de jales sin comparación

Plantas con jales (Raíz)	As mg kg ⁻¹	Cd mg kg ⁻¹	Cr mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Ni mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
<i>Juniperus flaccida</i> (pino)	24.9	3.99	6.23	33.1	1089	5.73	131.8	149
<i>Vitex mollis</i> (coyotomate)	4.22	1.99	7.21	4.47	471	4.47	23.1	165
<i>Lantana cámara</i> (salvia real o cinco negritos)	30.8	17.9	12.4	29.3	1719	7.96	72.1	543
<i>Lysiloma divencatum</i> (mezquite)	ND	0.75	1.99	5.47	318	0.75	2.48	12
<i>Cnidocolus multilobusb</i> (chaya de monte)	7.21	3.97	12.1	14.1	755	7.46	27.8	134
<i>Ipomea arborescens</i> (cazahuate)	13.4	4.22	2.23	13.6	1483	1.49	69.8	92.9
<i>Phithecellobium dulce</i> (huamúchil o guamúchil)	10.9	5.22	1.49	17.1	1317	1.98	78.0	441
<i>Opuntia robusta</i> (nopal)	14.9	1.49	20.1	6.71	611	13.4	22.8	69
<i>Echinochloa colona</i> (zacate o navajita azul)	795.8	30.9	34.6	31.6	18834	33.4	242	2517
<i>Taxodium mucronatum</i> (ahuehuete o sabino)	19.6	3.98	9.22	18.1	892	7.97	109.6	462
<i>Jacaranda minosifolia</i> (jacaranda)	ND	1.98	1.24	7.45	71	1.24	2.5	52
<i>Ficus cotinifolia</i> (amate prieto)	4.46	6.69	4.96	26.2	765	4.71	34.4	401
<i>Leucaena escalante</i> (guaje)	7.71	7.96	1.74	50.0	710	2.24	57.2	381
<i>Lysiloma acapulcensis</i> (tepehuaje)	6.23	1.24	3.49	5.48	363	5.98	9.73	46
Guafuma ulmifolia (<i>cahuilote</i> o <i>chapulín blanco</i>)	5.97	1.99	8.20	11.6	1038	4.72	22.1	100
<i>Ficus insípida</i> (amate blanco o ceiba)	3.47	3.97	0.99	21.3	371	ND	12.6	200
Valor máximo	795.8	30.9	34.6	50.0	18834	33.4	242	2517
valor mínimo	3.47	0.75	0.99	4.47	71	0.75	2.5	12
Media	59.3	6.14	8.01	19.7	1925	6.47	57.4	360
Varianza	43969.1	60.3	78.1	163.4	20531118	64.99	3890.5	360187.9
STD	209.7	7.77	8.83	12.8	4531.1	8.06	62.4	600.2
STD relativo	353.3	126.5	110.3	64.9	235.3	124.6	108.7	166.6
ND: no detectado								

EPTs en tallo

El As se encontró con un rango de 0.25 y 405 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 26.8 y ± 133.9 mg kg⁻¹, reportando *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) con la concentración más elevada y la menor fue *Opuntia robusta* (nopal).

El Cd reportó un rango de concentración de 0.25 y 20.1 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 3.91 y ± 5.25 mg kg⁻¹ y la concentración mayor la presentó la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) y la menor fue *Lysiloma divencatum* (mezquite).

El Cr presentó valores que oscilan entre 0.99 y 13.5 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 3.08 y ± 3.28 mg kg⁻¹, la especie *Juniperus flaccida* (pino) presentó mayor concentración y la menor fue *Lysiloma acapulcensis* (tepehuaje).

Con relación al Cu, este osciló entre 3.23 y 46.9 mg kg⁻¹ y una media aritmética ± STD de 12.8 y ± 11.2 mg kg⁻¹, donde *Ficus cotinifolia* (amate prieto) presentó niveles altos de concentración y *Opuntia robusta* (nopal) el nivel más bajo.

El Fe reportó un rango que va entre 56.2 y 10252 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 857 y ± 2510.9 mg kg⁻¹ y la especie con valor más alto fue *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) en menor concentración la especie *Lysiloma divencatum* (mezquite).

El contenido de Ni oscila entre de 0.25 y 40.2 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 4.58 y ± 10.0 mg kg⁻¹ y la especie *Juniperus flaccida* (pino) fue la que concentró el mayor valor y *Lysiloma divencatum* (mezquite) el valor menor.

En relación con el Pb, este oscila entre de 1.98 y 211.6 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 23.8 y ± 53.3 mg kg⁻¹, siendo la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) quién reportó el valor más alto y *Cnidioscolus multilobusb* (chaya de monte) obtuvo el valor más bajo.

Los contenidos de Zn oscilaron entre 25.0 y 2066 mg kg⁻¹, con una media aritmética ± STD de 278 y ± 536.8 mg kg⁻¹ y se encontró que la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) destacó con mayor concentración, y la menor fue *Lysiloma divencatum* (mezquite) (Tabla 33).

Tabla 33. EPT en el tallo de plantas de jales sin comparación

Plantas con jales (Tallo)	As mg kg⁻¹	Cd mg kg⁻¹	Cr mg kg⁻¹	Cu mg kg⁻¹	Fe mg kg⁻¹	Ni mg kg⁻¹	Pb mg kg⁻¹	Zn mg kg⁻¹
<i>Juniperus flaccida</i> (pino)	10.9	4.00	13.5	7.24	648	40.2	58.9	305
<i>Vitex mollis</i> (coyotomate)	0.50	1.24	6.22	16.1	458	1.74	13.1	148
<i>Lantana cámara</i> (salvia real o cinco negritos)	3.49	1.74	1.99	8.99	217	0.75	10.7	99.9
<i>Lysiloma divencatum</i> (mezquite)	ND	0.25	1.24	6.49	56.2	0.25	ND	25
<i>Cnidioscolus multilobusb</i> (chaya de monte)	ND	4.47	1.24	8.70	109	1.00	13.9	89.7
<i>Ipomea arborescens</i> (cazahuate)	ND	0.50	1.24	4.96	102	0.50	1.98	29
<i>Phithecellobium dulce</i> (huamúchil o guamúchil)	ND	12.7	1.00	6.24	503	1.00	7.49	1044
<i>Opuntia robusta</i> (nopal)	0.25	1.74	1.49	3.23	209	1.00	18.8	28
<i>Echinochloa colona</i> (zacate o navajita azul)	405	20.1	5.48	28.4	10252	12.90	211.6	2066
<i>Taxodium mucronatum</i> (ahuehuete o sabino)	ND	0.75	5.24	10.9	184	6.74	12.9	95
<i>Jacaranda minosifolia</i> (jacaranda)	ND	1.73	1.48	13.3	86.7	1.48	3.96	66
<i>Ficus cotinifolia</i> (amate prieto)	ND	4.24	2.49	46.9	158	0.25	2.74	55
<i>Leucaena escalante</i> (guaje)	2.23	1.24	3.47	6.45	138	3.47	3.97	55
<i>Lysiloma acapulcensis</i> (tepehuaje)	3.72	0.75	0.99	3.97	259	0.75	10.1	120
<i>Guafuma ulmifolia</i> (<i>cahuilote</i> o <i>chapulín blanco</i>)	1.74	3.73	1.00	14.9	212	0.50	8.20	160
<i>Ficus insípida</i> (amate blanco o ceiba)	0.99	3.47	1.24	5.21	114.2	0.75	2.73	58.3
Valor máximo	405	20.1	13.5	46.9	10252	40.2	211.6	2066
valor mínimo	0.25	0.25	0.99	3.23	56.2	0.25	1.98	25
Media	26.8	3.91	3.08	12.8	857	4.58	23.8	278
Varianza	17923.8	27.6	10.8	125.9	6304453.6	101.00	2845.5	288121.4
STD	133.9	5.25	3.28	11.2	2510.9	10.0	53.3	536.8
STD relativo	500.1	134.1	106.6	87.7	293.1	219.5	224.0	193.3
ND: no detectado								

Plantas comparativas

Con los resultados analizados anteriormente, se efectuó la comparación de la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) entre especies de plantas recolectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas (controles) recolectadas en sitios sin afectación por jales cercanos a Taxco (Tlamacazapa, Puente Campuzano e Ixcateopan) (datos de Olea y Zúñiga, 2009).

Especies vegetales: *Verbesina crocata* (*capitaneja*), *Asclepias curassavica* (*flor de sangre*), *Sapindáceas serjania* (*enredadera*), *Senecio deppeanus* (*jara amarilla* o *candelero*), *Thevitia ovate* (*yoyote*), *Psidium guajava* (*guayabo*), *Lythrum gráciles*, *Dodonoea biolata* (*chapulixtil* u *ocotillo*), *Bursera copalifera* (*copal*), *Senna pallida* (*cammpiseran*).

Hoja

En la Figura 17 y 18 se muestra el resultado de los EPT en hoja (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn) de cada una de las especies de los dos sitios analizados.

Con relación al As la concentración se presentó de la siguiente manera: Las especies de los jales que acumularon una mayor concentración fueron: ***Bursera copalifera* (copal)** con 96.8 mg kg⁻¹, seguida de ***Verbesina crocata* (capitaneja)** con 7.5 mg kg⁻¹ y ***Sapindáceas serjania* (enredadera)** con 7.46 mg kg⁻¹. En plantas comparativas (sin jales), el As no se detectó.

Los resultados indican que solo una de las especies colectadas en los jales (***Bursera copalifera***) presentó concentraciones de As que rebasó los límites establecidos (10-20 mg kg⁻¹), la mayoría de las especies vegetales (con jales y comparativas) acumularon As por debajo del límite obtenido, por lo que se pueden considerar que estas especies están aparentemente sin contaminación por este metal, aunque en las plantas el As es un elemento no esencial.

El Cd presentó concentraciones muy variables en la mayoría de las especies de ambos sitios, siendo ***Thevitia ovate* (yoyote)** con 18.4 mg kg⁻¹ la especie de jales con mayor concentración de Cd, ***Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero)** con 13.0 mg kg⁻¹, ***Asclepias curassavica* (flor de sangre)** con 10.4 mg kg⁻¹, ***Bursera copalifera* (copal)** con 9.48 mg kg⁻¹ y ***Psidium guajava* (guayabo)** con 8.45 mg kg⁻¹. En plantas comparativas (sin jales) con niveles altos de Cd se encuentran: ***Sapindáceas serjania* (enredadera)** con 10.4 mg kg⁻¹ y ***Verbesina crocata* (capitaneja)** con 8.98 mg kg⁻¹, las demás especies presentaron niveles bajos de concentración. Los valores permisibles de este elemento son de 3-8 mg kg⁻¹. Los resultados obtenidos indican que cinco especies de los jales y dos comparativas están por encima de estos límites, la mayoría de las especies no presentan toxicidad es decir se encuentran aparentemente libres de contaminación por este metal.

En relación al Cr, en casi todas de las especies de ambos sitios reportan concentraciones por abajo de los límites establecidos (1-10 mg kg⁻¹). La especie ***Lythrum gráciles*** colectada en los jales fue la única que presentó el valor alto de Cr con 9.5 mg kg⁻¹, esta misma especie colectada en sitio sin afectación tuvo **27.3**

mg kg⁻¹. Los valores obtenidos, indican que la mayoría de las especies vegetales reportan valores por debajo de los límites establecidos, puede considerar que aparentemente no hay toxicidad en dichas plantas. En el caso de ***Lythrum gráciles*** (especie vegetal comparativa) que reportó un valor de 27.3 mg kg⁻¹, pudiera deberse a que ciertos factores ambientales del suelo como el pH, materia orgánica, variaciones de humedad y composición del suelo al mezclarse con el suelo modifican los procesos de los EPT. En general casi todas las plantas se encontraron sin contaminación por este metal. Por otra parte no existe evidencia que el Cr sea un elemento esencial para el metabolismo de las plantas.

El Cu, presentó niveles de concentración variables. Las especies de jales con más alta concentración fueron: ***Asclepsias curassavica (flor de sangre)*** con 80.2 mg kg⁻¹, ***Psidium guajava (guayabo)*** con 58.7 mg kg⁻¹ y ***Thevitia ovate (yoyote)*** con 49.8 mg kg⁻¹. Sin embargo las especies comparativas como: ***Bursera copalifera (copal)*** acumuló 33.8 mg kg⁻¹, ***Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)*** con 32.3 mg kg⁻¹ y ***Verbesina crocata (capitaneja)*** con 31.9 mg kg⁻¹. Es importante señalar que en plantas comestibles se desconoce el límite permisible de este elemento y los valores obtenidos en este estudio fueron comparados con el valor máximo reportado por Hernández Gil, (2001) que es de hasta 64 mg kg⁻¹. De acuerdo a los resultados, una de las especies de los jales (***Asclepsias curassavica***) se encontró por arriba del valor reportado por Hernández Gil. La gran mayoría de las muestras vegetales de los dos sitios, acumularon cantidades considerables de Cu, sin embargo, las concentraciones disponibles están por debajo de los valores establecidos y se pudiera considerar que estas especies no presentan toxicidad ni son bioacumuladoras de este metal.

Con respecto al Fe las concentraciones fueron elevadas y muy variables en la mayoría de las especies colectadas de ambos sitios (con jales y comparativas), por lo que únicamente se reportan algunas de las especies que presentan las más altas concentraciones. Las especies de jales como: ***Bursera copalifera (copal)*** acumuló 1634 mg kg⁻¹, seguida de ***Verbesina crocata (capitaneja)*** con 584 mg kg⁻¹ y ***Sapindáceas serjania (enredadera)*** con 474 mg kg⁻¹. En sitios sin contaminación (plantas comparativas) las especies fueron: ***Senecio deppeanus***

(**jara amarilla o candelero**) que reportó una concentración de 868 mg kg⁻¹, **Lythrum gráciles** con 656 mg kg⁻¹ y **Bursera copalifera (copal)** con 450 mg kg⁻¹. Según los límites permisibles de Fe reportados por Merían, 1991, es hasta 35 mg kg⁻¹, los resultados obtenidos en este estudio, nos indican que todas las plantas recolectadas en ambos sitios reportan niveles altos de concentración y están muy por encima de lo establecidos de acuerdo a Merían.

En relación al Ni, se encontró que las especies recolectas en jales y no jales (comparativas), reportaron valores de concentración bajos. Las especies de los jales como. **Lythrum gráciles**, concentró 5.0 mg kg⁻¹, **Sapindáceas serjania (enredadera)** 2.48 mg kg⁻¹ y **Dodonoea biolata (chapulixtil u ocotillo)** con igual valor (2.48 mg kg⁻¹). En los sitios no contaminados (comparativas) la especie **Lythrum gráciles** acumuló 12.9 mg kg⁻¹, seguida de **Dodonoea biolata (chapulixtil u ocotillo)** con 3.49 mg kg⁻¹ y **Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)** con 2.99 mg kg⁻¹. Cabe mencionar que no existen reportes de los límites permisibles pero de acuerdo a los datos reportados por Kabata-Pendias, (1995), establece hasta 30 mg kg⁻¹ el nivel de concentración. Los resultados de este elemento en los dos sitios (con jales y sin jales), nos indican que los valores se encuentran por abajo del valor reportado por el autor. Se puede observar que todas las especies colectadas en ambos sitios, están aparentemente libres de contaminación por Ni.

El Pb, presentó niveles de concentración muy variados en ambos sitios (con jales y sin jales). Las especies colectadas de los jales reportaron los siguientes valores: **Bursera copalifera (copal)** con 215.6 mg kg⁻¹, **Verbesina crocata (capitaneja)** 41.3 mg kg⁻¹ y **Sapindáceas serjania (enredadera)** con 32.3 mg kg⁻¹. En los sitios sin afectación (plantas comparativas) el único valor reportado fue el de la especie **Sapindáceas serjania (enredadera)** con 43.2 mg kg⁻¹. Datos reportados por Merían, (1991), nos indican que el valor de concentración del Pb alcanzó hasta 300 mg kg⁻¹. Los resultados obtenidos de este metal, indican que el nivel de concentración de ambos sitios (con jales y sin jales) se encuentran por abajo de este valor, aparentemente no presentan toxicidad ni son bioacumuladores de Pb.

El Zinc, es otro elemento que presentó concentraciones muy variables en especies de ambos sitios. Los niveles de concentración de especies colectadas en los jales son: **Bursera copalifera (copal)** con 488 mg kg⁻¹, **Dodonaea biolata (chapulixtil u ocotillo)** con 275 mg kg⁻¹ y **Verbesina crocata (capitaneja)** con 105 mg kg⁻¹. Las siguientes especies comparativas como **Psidium guajava (guayabo)** acumuló 149 mg kg⁻¹, **Bursera copalifera (copal)** 8.7 mg kg⁻¹ y **Thevitia ovate (yoyote)** con 67.8 mg kg⁻¹. Los límites permisibles de Zn se desconocen, pero de acuerdo a los datos reportados por Hernández Gil, (2001) establece hasta 710 mg kg⁻¹ el nivel de concentración. El resultado de este metal en las muestras analizadas de los dos sitios (con jales y sin jales), se encuentran muy por abajo del valor reportado por el autor y posiblemente sin afectación por Zn.

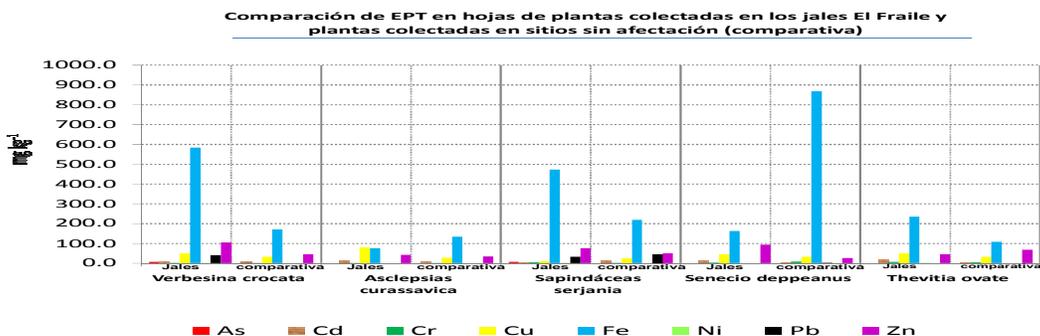


Figura 17. Comparación de EPT en hojas de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas

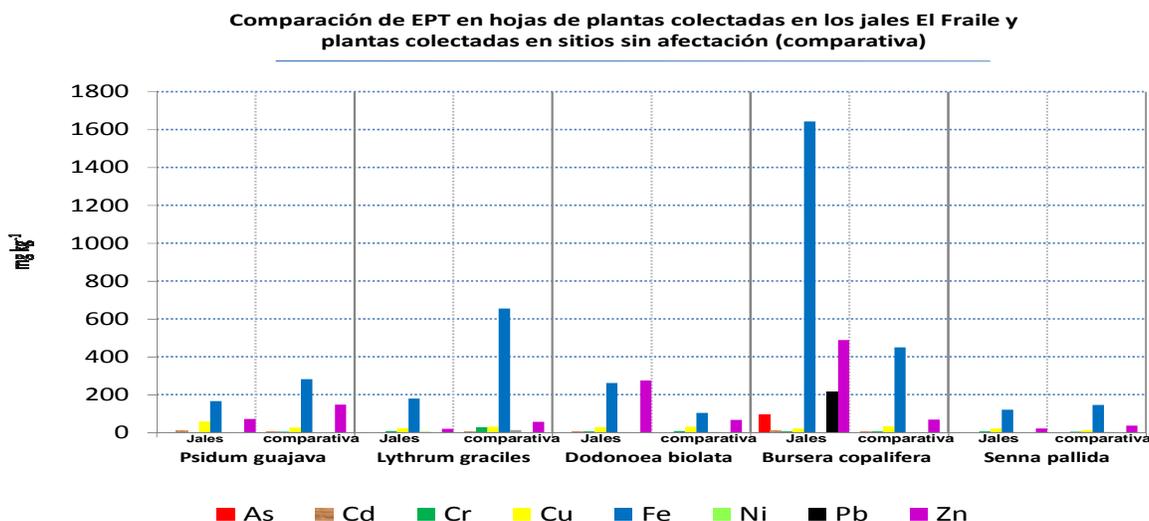


Figura 18. Comparación de EPT en hojas de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas

Raíz

En la Figura 19 y 20 se muestra el resultado de los EPT en raíz (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn) de cada una de las especies de los dos sitios analizados.

El As, reportó niveles de concentración en las siguientes especies con jales: **Bursera copalifera (copal)** reportó una mayor concentración con **47.7 mg kg⁻¹** y **Verbesina crocata (capitaneja)** con **18.9 mg kg⁻¹**. En plantas comparativas el As solo se detectó en la especie **Senna pallida (cammpiseran)** con **1.98 mg kg⁻¹**. Los límites reportados por Kabata-Pendías, (1986) es de **10-20 mg kg⁻¹**. Los resultados indican que una especie de plantas colectadas en los jales presentó una concentración que sobrepasa estos límites. En plantas comparativas este elemento solamente se acumuló en una especie lo cual indica que la mayoría de las especies están aparentemente sin afectación.

El Cd reporta concentraciones muy variables en la mayoría de las especies de ambos sitios, sobresaliendo con mayor concentración las plantas con jales **Verbesina crocata (capitaneja)** con **25.0 mg kg⁻¹**, **Dodonaea biolata (chapulixtil u ocotillo)** **24.3 mg kg⁻¹** y **Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)** **14.9 mg kg⁻¹** que de acuerdo al valor permisible de este elemento (**3-8 mg kg⁻¹**) estos resultados están por encima de los límites establecidos. En plantas comparativas

dos de las especies vegetales se encuentra con valores que sobrepasan el límite como ***Lythrum gráciles*** con 22.3 mg kg⁻¹ y ***Asclepsias curassavica (flor de sangre)*** 20.3 mg kg⁻¹. Los resultados obtenidos indican que tres especies de los jales y dos comparativas están contaminadas. Esto demuestra que las plantas en su mayoría están sin aparente contaminación de este metal. Las especies comparativas que resultaron con valores por encima del límite establecido, pudiera ser que de manera natural los EPT se eleven por la influencia de ciertos factores físicos o químicos como el pH, materia orgánica, variaciones de humedad y la composición del suelo.

En relación al Cr, se detectaron concentraciones por lo general bajas en ambos sitios (en jales y sin jales). En jales las especies ***Dodonaea biolata (chapulixtil u ocotillo)*** y ***Senna pallida (cammpiseran)*** presentaron concentraciones similares de 14.9 mg kg⁻¹ y ***Thevitia ovate (yoyote)*** 12.4 mg kg⁻¹. En plantas comparativas (sin jales) las especies ***Lythrum gráciles*** reportó 18.3 mg kg⁻¹, ***Psidium guajava (guayabo)*** con 9.97 mg kg⁻¹ y ***Senna pallida (cammpiseran)*** con 9.48 mg kg⁻¹ las de mayor concentración. Se desconoce el límite permisible en vegetales, autores como Kabata-Pendías, 2001 reportan el valor hasta 10 mg kg⁻¹. Los resultados indican que tres especies de los jales y una comparativa están por encima de los límites permisibles, por lo cual la mayoría de las especies vegetales no rebasaron estos límites.

El Cu, concentró niveles muy variables y las especies vegetales de jales con mayor concentración fueron ***Verbesina crocata (capitaneja)*** tuvo 168 mg kg⁻¹, ***Asclepsias curassavica (flor de sangre)*** 98.2 mg kg⁻¹ y ***Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)*** 33.8 mg kg⁻¹. Mientras que las especies sin afectación (comparativas) como: ***Psidium guajava (guayabo)*** tuvo 34.8 mg kg⁻¹, ***Lythrum gráciles*** 31.7 mg kg⁻¹ y ***Asclepsias curassavica (flor de sangre)*** con 30.8 mg kg⁻¹. El límite reportado por Hernández Gil, (2001) es de hasta 64 mg kg⁻¹ y los valores obtenidos indican que únicamente dos especies colectadas de los jales sobrepasan el valor máximo reportado por el autor. La gran mayoría de las muestras vegetales de los dos sitios, no acumularon cantidades elevadas de Cu.

El contenido del Fe se reportó en ambos sitios (plantas con jales y comparativas) muy elevado comparado con las anteriores especies. En sitios contaminados con jales las especies con más alto nivel concentración por Fe fueron: ***Verbesina crocata* (capitaneja)** con 2364 mg kg⁻¹ y ***Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero)** con 1633 mg kg⁻¹, ***Thevitia ovate* (yoyote)** y ***Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo)** ambas con 945 mg kg⁻¹ entre otras. Las especies comparativas como ***Lythrum gráciles*** reportó una concentración de 1157 mg kg⁻¹, con 656 mg kg⁻¹, ***Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo)** con 539 mg kg⁻¹ y ***Verbesina crocata* (capitaneja)** 428 mg kg⁻¹ entre otras. Según los límites permisibles de Fe reportados por Merián, (1991), es hasta 35 mg kg⁻¹, los resultados obtenidos en este estudio, nos indican que todas las plantas recolectadas en ambos sitios están muy por encima de lo establecidos por Merián.

El Ni, se encontró en ambos sitios (con jales y comparativas), reportando niveles de concentración muy bajos. En los jales, las especies fueron: ***Dodonoea biolata* (chapulixtil u ocotillo)** reportó 7.45 mg kg⁻¹, ***Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero)** y ***Senna pallida* (campa)**, ambas con igual valor 5.97 mg kg⁻¹, ***Thevitia ovate* (yoyote)** con 5.45 mg kg⁻¹. En los sitios no contaminados (plantas comparativa) la especie ***Psidium guajava* (guayabo)** reportó 64.3 mg kg⁻¹, ***Lythrum gráciles*** con 9.43 mg kg⁻¹ y ***Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero)** con 5.97 mg kg⁻¹. No existen reportes de los límites permisibles pero de acuerdo a los datos reportados por Kabata-Pendias, (1995), establece hasta 30 mg kg⁻¹ el nivel de concentración. La especie ***Psidium guajava* (guayabo)** recolectada en sitio sin afectación fue la única que acumuló elevada concentración con 64.3 mg kg⁻¹ y reportó el nivel más alto. Estos resultados indican que la mayoría de las especies (jales y sin jales) están aparentemente libres de contaminación por Ni.

Con respecto al Pb, las concentraciones fueron muy variables en ambos sitios, las especies recolectadas en los jales que reportaron niveles elevados son: ***Verbesina crocata* (capitaneja)** con 177 mg kg⁻¹, ***Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero)** con 159.8 mg kg⁻¹, y ***Dodonoea biolata* (chapulixtil u**

ocotillo) con 70.5 mg kg⁻¹. En sitios sin afectación únicamente fue la especie **Lythrum gráciles** con 61.6 mg kg⁻¹, **Verbesina crocata (capitaneja)** con 17.8 mg kg⁻¹ y **Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)** con 1.99 mg kg⁻¹. De acuerdo a lo reportado por Merían, (1991) el Pb resultó hasta con 300 mg kg⁻¹, los valores obtenidos en este estudio, no rebasaron este valor, no presentan toxicidad.

El Zinc, es otro elemento que se presentó en ambos sitios y las especies de jales con niveles de concentración mas elevados son: **Verbesina crocata (capitaneja)** con 519 mg kg⁻¹, **Dodonoea biolata (chapulixtil u ocotillo)** con 471 mg kg⁻¹ y **Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)** con 340 mg kg⁻¹. En plantas colectadas en sitios sin afectación (comparativas) las especies **Verbesina crocata (capitaneja)** acumuló 78 mg kg⁻¹, **Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)** con 54.2 mg kg⁻¹ y **Thevitia ovate (yoyote)**, con 45.8 mg kg⁻¹. De acuerdo a los datos reportados por Hernández Gil, (2001) establece este elemento hasta 710 mg kg⁻¹ el nivel de concentración. Sin embargo, las concentraciones disponibles de este elemento en las plantas se encontraron por debajo de los valores establecidos.

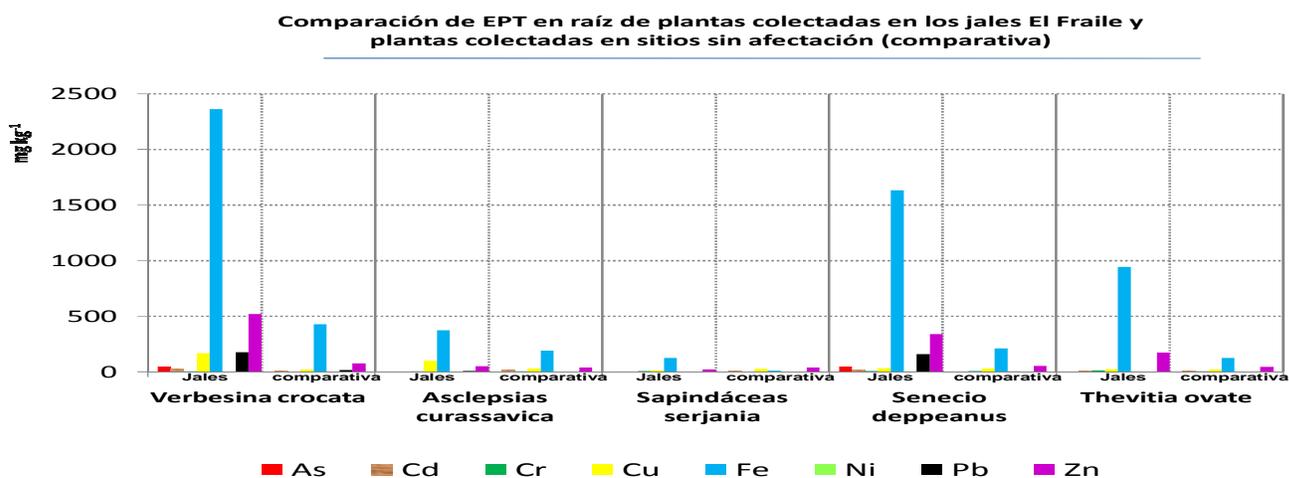


Figura 19. Comparación de EPT en raíz de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas

Comparación de EPT en raíz de plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas colectadas en sitios sin afectación (comparativa)

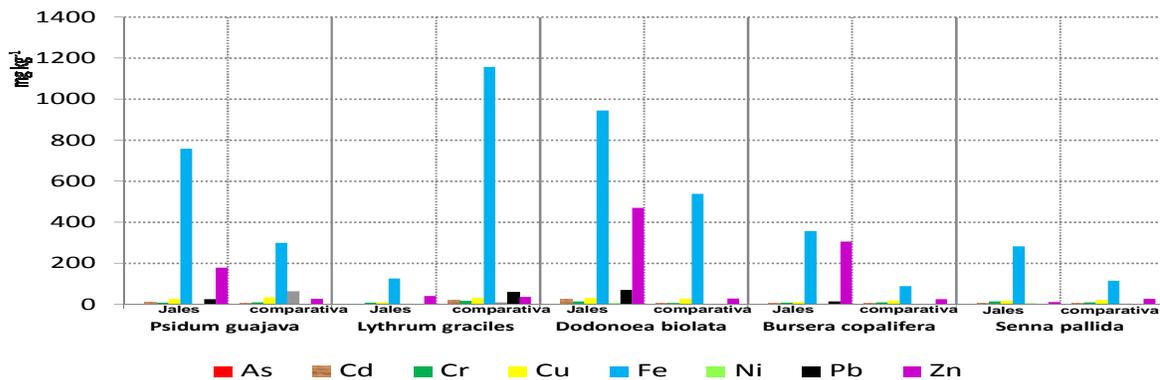


Figura 20. Comparación de EPT en raíz de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas

Tallo

En la Figura 21 y 22 se muestra el resultado de los EPT en tallo (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn) de cada una de las especies de los dos sitios analizados.

El As, reportó niveles altos en las siguientes especies, con jales: **Bursera copalifera (copal)** con 47.7 mg kg^{-1} , seguida de **Verbesina crocata (capitaneja)**, con 18.9 mg kg^{-1} . En sitios (comparativo (sin afectación)) el As se detectó únicamente en **Senna pallida (cammpiseran)** con 1.98 mg kg^{-1} . Los resultados indican que solamente **Bursera copalifera (copal)** especie vegetal colectada en los jales, presentó concentraciones elevadas, rebasando los límites reportados por Kabata-Pendías, (1995) de hasta $10\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$. Por lo cual aparentemente no hay toxicidad en las plantas por As.

El Cd mostró concentraciones muy variables en la mayoría de los dos sitios, sobresaliendo con mayor concentración las plantas con jales **Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)** 29.3 mg kg^{-1} , **Dodonaea biolata (chapulixtil u ocotillo)** 11.9 mg kg^{-1} y **Thevitia ovate (yoyote)** 7.46 mg kg^{-1} . Dentro de las especies sin afectación (comparativas) se encuentran: **Verbesina crocata (capitaneja)** 29.8 mg kg^{-1} , **Sapindáceas serjania (enredadera)** 16.9 mg kg^{-1} , **Lythrum gráciles** con 13.9 mg kg^{-1} , **Dodonaea biolata (chapulixtil u ocotillo)** 12.4 mg kg^{-1} y **Asclepias curassavica (flor de sangre)** 8.46 mg kg^{-1} . El valor permisible de este elemento esta entre $3\text{-}8 \text{ mg kg}^{-1}$. Los resultados indican que

dos de las especies de los jales y cinco comparativas están por encima de los valores establecidos. Esto demuestra que las plantas colectadas en los jales en su mayoría acumularon cantidades considerables de Cd, sin embargo, las concentraciones disponibles de este elemento en las plantas se encontraron por debajo de los valores establecidos. Es importante hacer notar que existen cinco especies comparativas que tienen concentraciones de Cd por arriba de los límites permisibles y esto pudiera ser por la influencia de ciertos factores físicos o químicos como el pH, materia orgánica, variaciones de humedad y la composición del suelo.

En relación al Cr, en ambos sitios (en jales y comparativas) las concentraciones se reportaron bajas de acuerdo al valor establecido. **Bursera copalifera (copal)** fue la especie vegetal de jales con mayor concentración con 22.3 mg kg⁻¹, seguida de **Lythrum gráciles** con 9.94 mg kg⁻¹ y **Senna pallida (cammpiseran)** con 8.92 mg kg⁻¹. En plantas comparativas se encontró que **Lythrum gráciles** acumuló 14.4 mg kg⁻¹, seguida de **Senna pallida (cammpiseran)** con 13.8 mg kg⁻¹ y **Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)** con 13.4 mg kg⁻¹. Kabata-Pendías, (2001) reportan el valor máximo de este elemento hasta 10 mg kg⁻¹. Los resultados indican que una especie de los jales y tres comparativas sobrepasan ese valor. En este estudio la mayoría de las muestras no rebasan el límite permisible.

El Cu, presentó niveles concentración de la siguiente manera. En los jales, las especies **Asclepsias curassavica (flor de sangre)** concentró 71.1 mg kg⁻¹, **Verbesina crocata (capitaneja)** con 59.2 mg kg⁻¹ y **Psidium guajava (guayabo)** con 42.7 mg kg⁻¹. Las especies comparativas como **Senna pallida (cammpiseran)** acumuló 55.5 mg kg⁻¹, **Psidium guajava (guayabo)** 39.4 mg kg⁻¹ y **Senecio deppeanus (jara amarilla o candelero)** con 34.3 mg kg⁻¹. El valor máximo reportado por Hernández Gil, (2001) es de hasta 62 mg kg⁻¹. Los resultados indican que la gran mayoría de las plantas presentaron el Cu en bajas concentraciones y solamente **Asclepsias curassavica (flor de sangre)** reportó una concentración de 71.1 mg kg⁻¹, valor que está por encima del nivel

establecido. Sin embargo, la forma disponible en cada especie se reportó en bajas concentraciones.

El contenido del Fe se reporta bastante variable en los dos sitios (con jales y sin jales) y con alto nivel de concentración. En jales las especies ***Bursera copalifera*** (copal) tuvo **1175** mg kg⁻¹, ***Verbesina crocata*** (capitaneja) con 967 mg kg⁻¹ y ***Dodonoea biolata*** (chapulixtil u ocotillo) con 530 mg kg⁻¹. En sitios sin contaminación las especies ***Lythrum gráciles*** 1564 mg kg⁻¹, ***Senna pallida*** (cammpiseran) con 1395 mg kg⁻¹ y ***Verbesina crocata*** (capitaneja) con 1143 mg kg⁻¹. Según los límites permisibles de Fe reportados por Merían, 1991, es hasta 35 mg kg⁻¹, los resultados obtenidos en este estudio, nos indican que todas las plantas colectadas en ambos sitios reportaron niveles altos de concentración y están muy por encima de lo establecidos por Merían. En el caso de las plantas comparativas en donde todas las especies se reportan por encima del valor establecido, esto puede ser debido a la influencia de factores ambientales que hacen que se modifiquen los procesos bioquímicos de los elementos.

En relación al Ni, en ambos sitios, los niveles de concentración resultaron muy bajos con respecto a otras especies. ***Bursera copalifera*** (copal) reportó 11.4 mg kg⁻¹, seguida de ***Dodonoea biolata*** (chapulixtil u ocotillo) con 4.48 mg kg⁻¹ y ***Lythrum gráciles*** con valor de 4.47 mg kg⁻¹. En los sitios no contaminados con jales la especie ***Lythrum gráciles*** reportó 5.5 mg kg⁻¹, ***Senecio deppeanus*** (jara amarilla o candelero) con 4.48 mg kg⁻¹ y ***Senna pallida*** (cammpiseran) con una concentración de 4.46 mg kg⁻¹. Según Kabata-Pendias, (1995), establece hasta 30 mg kg⁻¹ de Ni. En este estudio la totalidad de las muestras de los dos sitios fueron bajas de acuerdo a lo establecido por Kabata-Pendias, esto indica que todas las especies vegetales no presentan toxicidad ni son bioacumuladores de este metal.

El Pb, se concentró en los dos sitios y las especies vegetales que acumularon alto contenido de Pb, son: en jales ***Bursera copalifera*** (copal) acumuló 130 mg kg⁻¹, ***Verbesina crocata*** (capitaneja) 75.1 mg kg⁻¹ y ***Senecio deppeanus*** (jara amarilla o candelero) 23.3 mg kg⁻¹. En sitios sin afectación (comparativas) a ***Senna pallida*** (cammpiseran) con **71.8** mg kg⁻¹ y ***Verbesina crocata*** (capitaneja) con 1.49 mg kg⁻¹. De acuerdo a lo reportado por Merían,

(1991), en donde el Pb resultó hasta con 300 mg kg⁻¹, los valores obtenidos en este estudio, no rebasan este valor, por lo tanto pudiera ser que dichas especie estén libres de contaminación por Pb.

El Zinc, es otro elemento que reporta en ambos sitios concentraciones bajas de acuerdo a los límites permisibles. Las especies de los jales como **Asclepias curassavica** (flor de sangre) acumuló 256.2 mg kg⁻¹, **Senecio deppeanus** (jara amarilla o candelero) 231 mg kg⁻¹ y **Verbesina crocata** (capitaneja) con 149.7 mg kg⁻¹. En plantas comparativas, las especies **Senna pallida** (cammpiseran) tuvo 145 mg kg⁻¹, **Sapindáceas serjania** (enredadera) 65.9 mg kg⁻¹ y **Asclepias curassavica** (flor de sangre) con 46.8 mg kg⁻¹, entre otras. Hernández Gil, (2001) establece hasta 710 mg kg⁻¹ el nivel de concentración de este metal y los valore obtenidos en ambos sitios estudiados no sobrepasan el valor reportado por el autor.

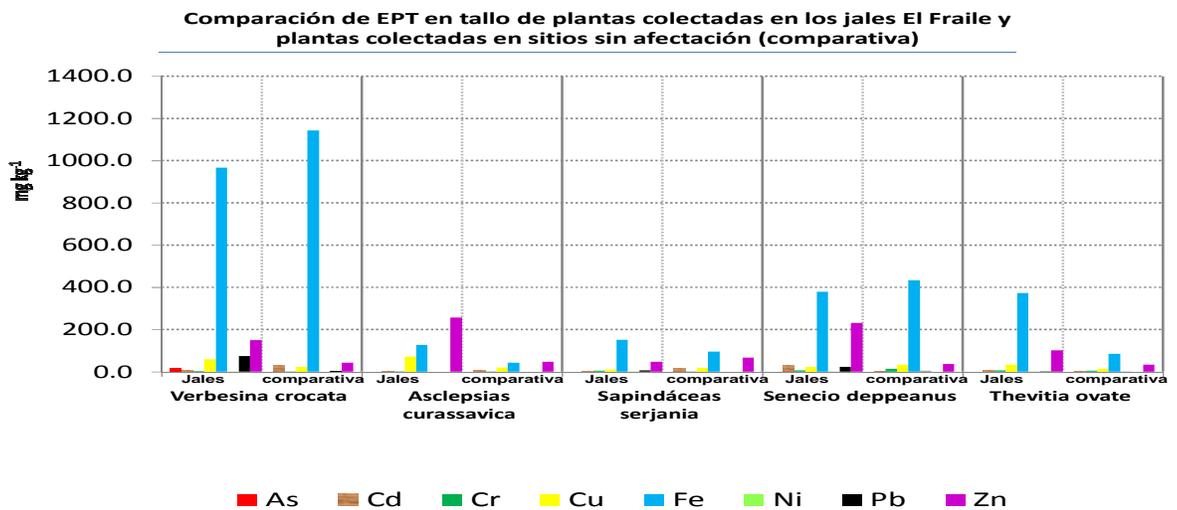


Figura 21. Comparación de EPT en tallo de algunas plantas colectadas en los jales ELFraile y plantas comparativas

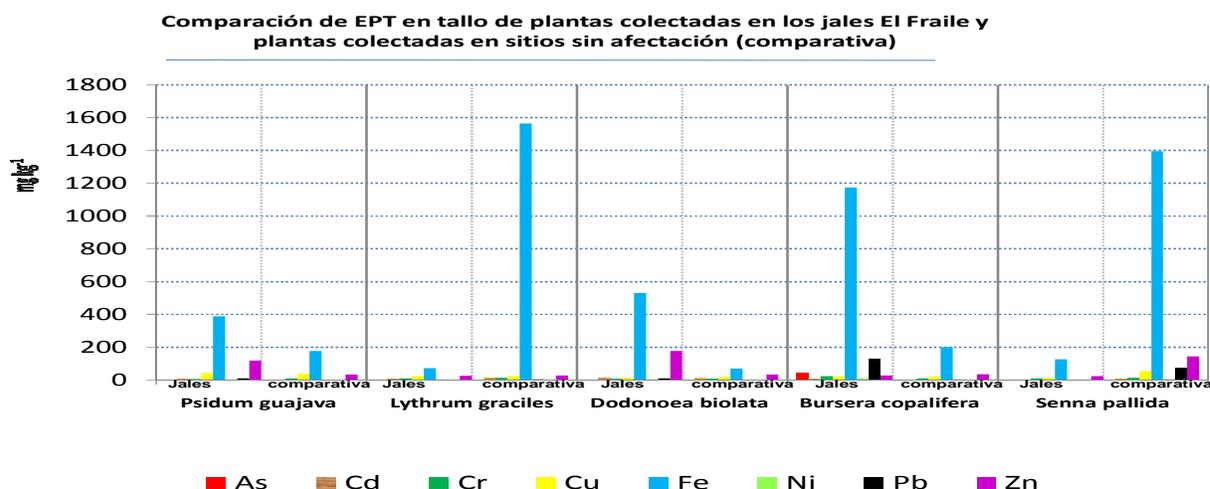


Figura 22. Comparación de EPT en tallo de algunas plantas colectadas en los jales El Fraile y plantas comparativas

Plantas de los jales El Fraile sin su grupo comparativo

Se efectuó el análisis de la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) de las plantas colectadas en la base de los jales El Fraile, tomando en cuenta el material seleccionado (hoja, raíz y tallo).

Juniperus fláccida (pino); *Vitex mollis* (coyotomate); *Lantana cámara* L.(salvia real o cinco negrito); *Lysiloma divencatum* (mezquite); *Cnidocolus multilobusb* (chaya de monte); *Ipomoea arborescens* (cazahuate); *Phithecellobium dulce* (huamúchil o guamúchil); *Opuntia robusta* (Nopal); *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul); *Taxodium mucronatum* (ahuehuete o sabino); *Jacaranda minosifolia* (jacaranda); *Ficus cotinifolia* (amate prieto); *Leucaena escalante* (guaje); *Lysiloma acapulcensis* (tepeguaje); *Guafuma ulmifolia* (cahuilote) y *Ficus insípida* (amate blanco).

Hoja

En las Figuras 23 y 24 se muestran los resultados de los EPT (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) de las plantas colectadas en los jales El Fraile. A continuación se describe el siguiente análisis:

Con relación al As la concentración se presentó de la siguiente manera: Las especies que acumularon una mayor concentración fueron: ***Echinochloa colona (zacate navajita)*** con 64.5 mg kg⁻¹, seguida de ***Ipomea arborescens (cazahuate)*** con 13.4 mg kg⁻¹ y ***Juniperus flaccida (pino)*** con 7.0 mg kg⁻¹. Los resultados indican las especies colectadas en los jales como ***Echinochloa colona*** e ***Ipomoea arborescens*** presentaron concentraciones de As que rebasan los límites establecidos (10-20 mg kg⁻¹). Sin embargo la mayoría de las especies vegetales presentaron concentraciones que están muy por debajo del límite permisible, indicando que estas especies están aparentemente sin contaminación por este metal.

El Cd presentó concentraciones muy bajas en todas las especies con respecto al valor establecido. Los valores permisibles de este elemento son de 3-8 mg kg⁻¹ y las especies vegetales colectadas en los jales se encuentran aparentemente sin toxicidad.

En relación al Cr, la mayoría de las especies reportaron concentraciones por abajo de los límites establecidos (1-10 mg kg⁻¹) y la especie vegetal ***Vitex mollis (coyotomate)*** fue la única que presentó el valor alto de Cr con 24.9 mg kg⁻¹. Los valores indican que la mayoría de las especies vegetales reportan valores por debajo de los límites establecidos.

El Cu, se encontró en la mayoría de las especies con niveles de concentración variables. La especie de jales con más alta concentración fue ***Echinochloa colona (zacate navajita)*** con 16.8 mg kg⁻¹. Por lo cual todas las especies están aparentemente sin toxicidad.

Con respecto al Fe en todas las especies de vegetales las concentraciones en su mayoría fueron elevadas y muy variables por lo que únicamente se reportan algunas de las especies con niveles más altos como ***Echinochloa colona (zacate navajita)*** acumuló 1922 mg kg⁻¹, seguida de ***Ipomea arborescens (cazahuate)*** con 1483 mg kg⁻¹ y ***Juniperus flaccida (pino)*** con 474 mg kg⁻¹. Según los límites permisibles de Fe reportados por Merián, 1991, es hasta 35 mg kg⁻¹, los resultados obtenidos en este estudio, indican que todas las especies presentan alto nivel de toxicidad y son bioacumuladoras de este metal.

En relación al Ni, se encontró en todas las especies valores de concentración bajos, de acuerdo a los límite permisibles. La especie *Vitex mollis* (**coyotomate**) concentró el más alto nivel de Ni con 38.0 mg kg⁻¹. Según Kabata-Pendias, (1995), establece hasta 30 mg kg⁻¹ el nivel de concentración de Ni. Por lo cual aparentemente no existe contaminación por este metal.

Con relación al Pb, todos sus valores estuvieron muy por debajo de los límites reportados donde la especie *Echinochloa colona* (**zacate navajita**) la mayor concentración con 45.7 mg kg⁻¹. Datos obtenidos por Merían, (1991), nos indican que el valor de concentración del Pb alcanzó hasta 300 mg kg⁻¹. Esto indica que el nivel de concentración acumulado por cada especie es muy abajo, esto pudiera considerarse que aparentemente no hay riesgo de contaminación por Pb.

El Zinc, las especies como *Echinochloa colona* (**zacate navajita**) acumuló 419 mg kg⁻¹, *Opuntia robusta* (**nopal**) con 409 mg kg⁻¹ y *Juniperus flaccida* (**pino**) con 330 mg kg⁻¹. Los límites permisibles de Zn se desconocen, pero de acuerdo a los datos reportados por Hernández Gil, (2001) establece hasta 710 mg kg⁻¹ el nivel de concentración. En las muestras analizadas se encontró que el valor reportado es muy abajo y posiblemente no hay afectación por Zn.

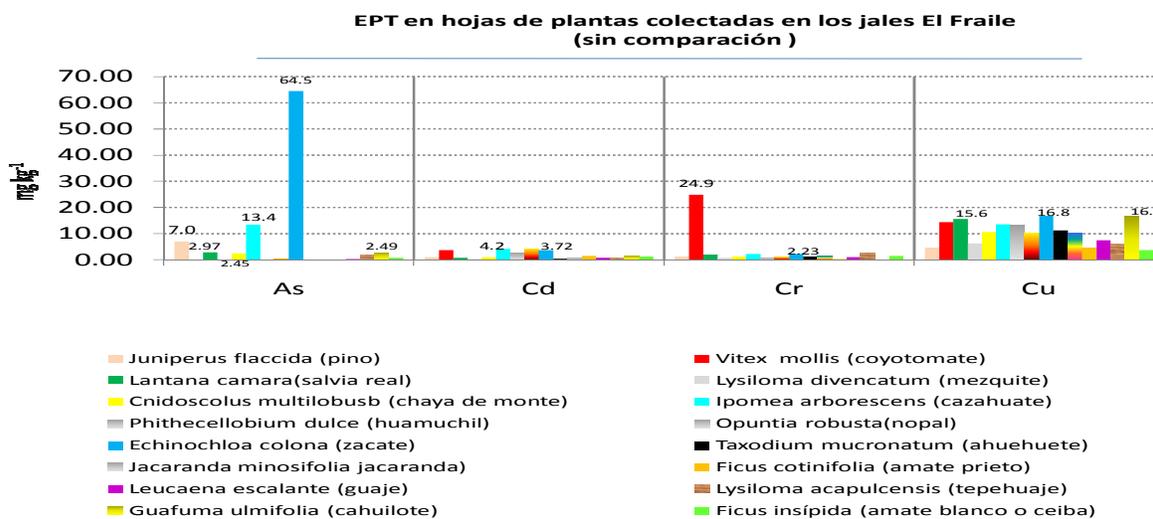


Figura 23. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de hoja de plantas de jales sin comparación

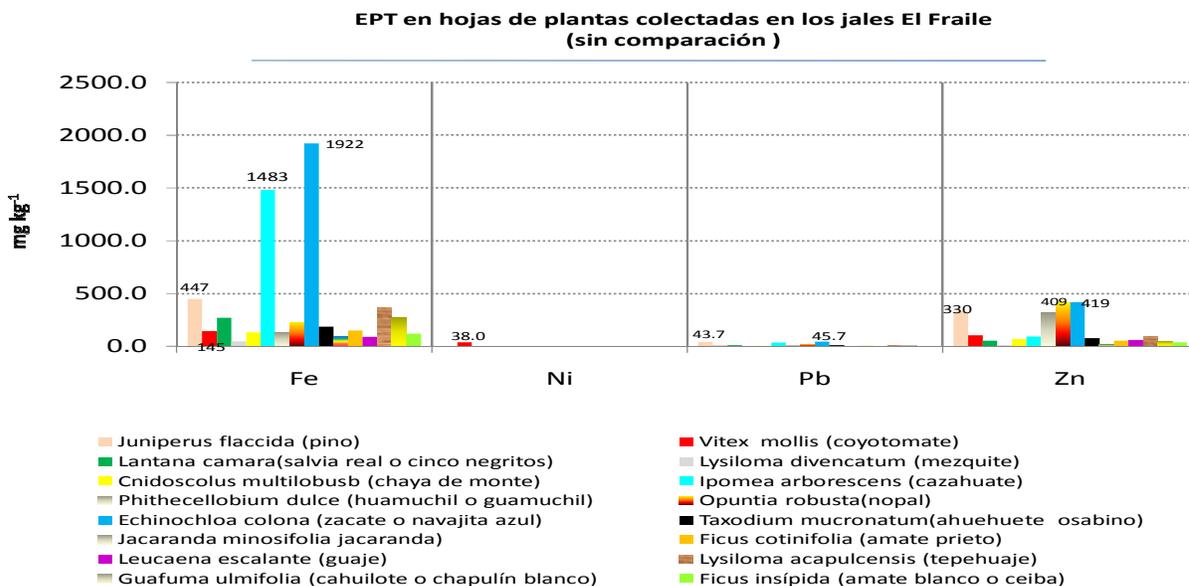


Figura 24. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de hoja de plantas de jales sin comparación

Raíz

El As, reportó en algunas especies vegetales niveles de concentración relativamente alto y en otras fueron valores muy bajos y dos especies no se detectó este elemento. Dentro de las especies con mayor concentración está: ***Echinochloa colona* (zacate navajita)** con 795.8 mg kg^{-1} , ***Lantana cámara* (salvia real)** con 30.8 mg kg^{-1} y ***Juniperus flaccida* (pino)** con 24.9 mg kg^{-1} . Los límites reportados por Kabata-Pendías, (1986) es de $10\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$. Los resultados indican que solo tres de las especies presentaron concentraciones muy elevada y las demás no rebasaron este límite permisible.

El Cd reporta concentraciones moderados en la mayoría de las especies sobresaliendo con mayor concentración las plantas con jales ***Echinochloa colona* (zacate navajita)** con 30.9 mg kg^{-1} , ***Lantana cámara* (salvia real)** con 17.9 mg kg^{-1} y ***Leucaena escalante* (guaje)** con 7.96 mg kg^{-1} , que de acuerdo al valor permisible de este elemento ($3\text{-}8 \text{ mg kg}^{-1}$) dos de las especies están por encima de estos límites.

En relación al Cr, se detectaron concentraciones relativamente altas y algunas muy bajas, siendo ***Echinochloa colona* (zacate navajita)** la especie con mayor concentración con 34.6 mg kg^{-1} , seguida de ***Opuntia robusta* (nopal)** con 20.1 mg kg^{-1} , ***Lantana cámara* (salvia real)** con 12.4 mg kg^{-1} y ***Cnidoscolus***

multilobusb (chaya de monte) 12.1 mg kg⁻¹. Este elemento puede ser esencial para las plantas porque en su totalidad de las especies lo acumularon aún en bajas concentraciones. Kabata-Pendías, 2001 reportan el valor hasta 10 mg kg⁻¹. Los resultados indican que cuatro especies están por encima de los límites permisibles, aunque la mayoría no rebasaron estos límites, esto indica que aparentemente están libres de contaminación por Cr.

El Cu, fue muy bajo en todas las especies en comparación con el límite reportado. Siendo **Leucaena escalante (guaje)** la especie que concentró el valor más alto de Cu (50.0 mg kg⁻¹). El límite es de hasta 64 mg kg⁻¹. Sin embargo, las concentraciones disponibles de este elemento en las plantas se encontraron por debajo de los valores establecidos.

El contenido del Fe se reportó en su mayoría fue muy elevados y las especies con más alto nivel fueron: **Echinochloa colona (zacate navajita)** que acumuló 18834 mg kg⁻¹, **Lantana cámara (salvia real)** con 1719 mg kg⁻¹, **Ipomoea arborescens (cazahuate)** con 1483 mg kg⁻¹, **Phithecellobium dulce (huamúchil)** con 1317 mg kg⁻¹, **Juniperus flaccida (pino)** con 1089 mg kg⁻¹, entre otras. Según los límites permisibles de Fe reportados por Merían, (1991), es hasta 35 mg kg⁻¹, los resultados obtenidos en este estudio, nos indican que todas las plantas recolectadas en ambos sitios reportaron niveles altos de concentración y están muy por encima de lo establecidos por Merían.

El Ni, se encontró con niveles muy bajos y la única especie con mayor concentración fue **Echinochloa colona (zacate navajita)** con 33.4 mg kg⁻¹. Kabata-Pendias, (1995), establece hasta 30 mg kg⁻¹ el nivel de concentración. Y los valores obtenidos indican que las especies están aparentemente libres de contaminación por Ni.

El Pb, reportó valores que están por debajo de los valores establecidos. (300 mg kg⁻¹), por lo tanto pudiera ser que dichas especies estén aparentemente sin toxicidad. La única especie que presentó valores moderados fue **Echinochloa colona (zacate navajita)** con 242 mg kg⁻¹.

El Zinc, es otro elemento con niveles de concentración muy variables especie como **Echinochloa colona (zacate navajita)** acumuló 2517 mg kg⁻¹,

Lantana cámara (salvia real) con 543 mg kg⁻¹ Los límites permisibles de Zn se desconocen, pero de acuerdo a los datos reportados por Hernández Gil, (2001) establece este elemento hasta 710 mg kg⁻¹ el nivel de concentración (Ver Tabla 34).

La mayoría de las muestras vegetales acumularon cantidades por debajo al límite obtenido por Hernández (Figuras 25 y 26).

Tabla 34. Valores permisibles en varias especies vegetales.

Límites permisibles *	As mg kg ⁻¹	Cd mg km ⁻¹	Cr mg km ⁻¹	Cu mg km ⁻¹	Fe mg km ⁻¹	Ni mg km ⁻¹	Pb mg km ⁻¹	Zn mg km ⁻¹
LFU, 1989 ^a , Zartner Nyilas, 2002 ^b	10-20 ^a	1-3 ^b	-	-	-	-	50-3000 ^b	-
Concentración crítica** Kabata-Pendias, 1986	20	3-8	1-10	-	-	10-30	100-400	-
Valor mínimo y máximo reportado*** Merian, 1991 ^a Hernández-Gil, 2001 ^b Kabata-Pendias, 1995 ^c ATSR,1990 ^d	0.001- .061 ^a	0.1-30 ^a	0.2 0.5%	4-64 ^b	31-35 ^a		0.3- 300 ^a	114- 710 ^b

*Límites permisibles reportados por varios autores para algunas plantas alimenticias

** Concentración crítica para varias especies vegetales

*** Valor mínimo y máximo, reportado en especies de sitios contaminados con minería.

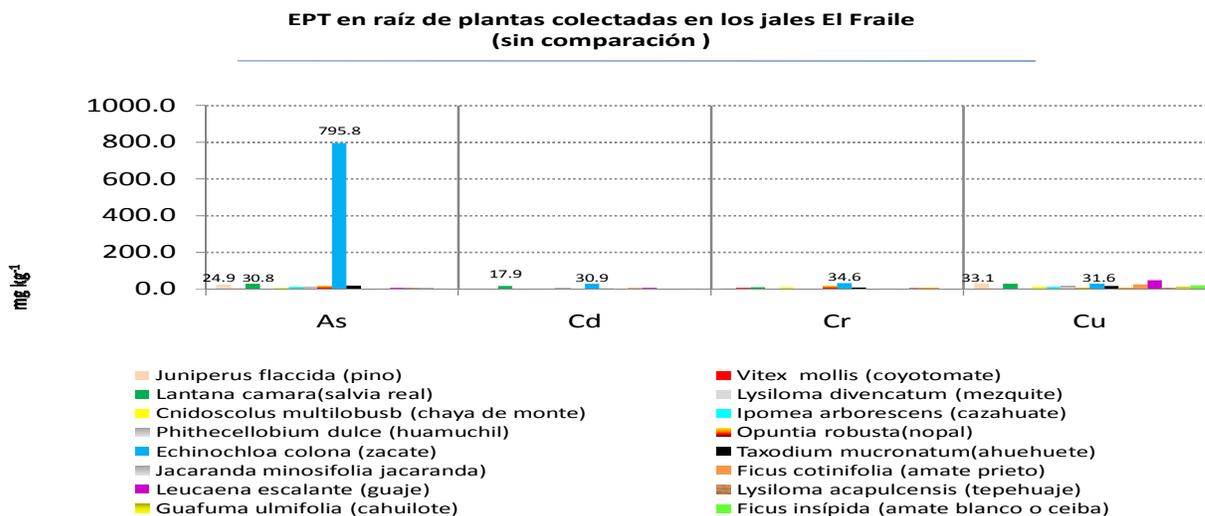


Figura 25. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de raíz de plantas de jales sin comparación

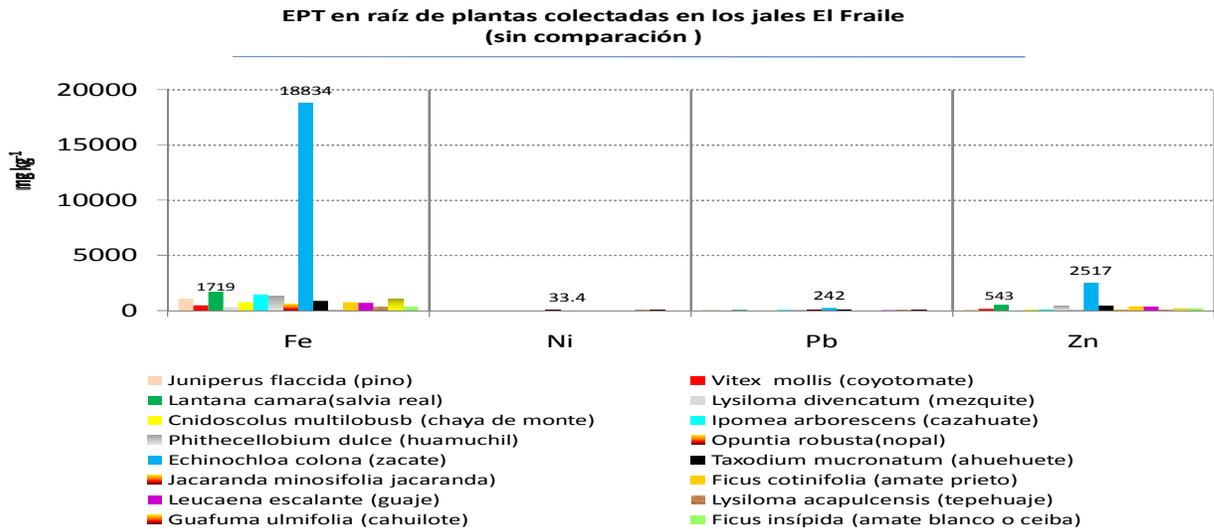


Figura 26. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de raíz de plantas de jales sin comparación

Tallo

El As, reportó niveles variados de concentración (bajos, altos y algunos no detectado) especies como ***Echinochloa colona* (zacate navajita)** acumuló 405 mg kg⁻¹, ***Juniperus flaccida* (pino)** con 10.9 mg kg⁻¹, entre otras. Los resultados indican que solamente ***Echinochloa colona* (zacate navajita)** presentó concentraciones elevadas, rebasando los límites reportados por Kabata-Pendías, (1995) de hasta 10-20 mg kg⁻¹.

El Cd mostró concentraciones relativamente bajas con relación a los límites permisibles (3-8 mg kg⁻¹) sobresaliendo las especies ***Echinochloa colona* (zacate navajita)** con 20.1 mg kg⁻¹, ***Phithecellobium dulce* (huamúchil)** con 12.7 mg kg⁻¹ seguida de ***Cnidoscolus multilobus* (chaya de monte)** con 4.47 mg kg⁻¹. Los resultados indican que dos de las especies están por encima de los valores establecidos. La mayoría acumularon cantidades por debajo de los valores permisibles.

En relación al Cr, todas especies detectaron muy bajas concentraciones siendo ***Juniperus flaccida* (pino)** la única especie con alto nivel con 13.5 mg kg⁻¹. Kabata-Pendías, (2001) reportan el valor máximo de este elemento hasta 10 mg

kg⁻¹. Los resultados indican que la totalidad de las especies vegetales acumularon este metal, pero por debajo de los valores establecidos.

El Cu, acumuló niveles bajos, siendo ***Ficus cotinifolia (amate prieto)*** la especie con más alta concentración con 46.9 mg kg⁻¹, seguida de ***Echinochloa colona (zacate navajita)*** con 28.4 mg kg⁻¹. El valor máximo reportado es de hasta 62 mg kg⁻¹. Sin embargo, la forma disponible en cada especie se reportó en bajas concentraciones.

El contenido del Fe en todas las plantas fue muy alto y las siguientes especies reportaron los niveles más elevados. ***Echinochloa colona (zacate navajita)*** con 10252 mg kg⁻¹, ***Juniperus flaccida (pino)*** con 648 mg kg⁻¹, ***Phithecellobium dulce (huamúchil)*** con 503 mg kg⁻¹, ***Vitex mollis (coyotomate)*** con 458 mg kg⁻¹. De acuerdo a los resultados obtenidos los valores están por arriba de los límites reportados Merián, 1991, es de hasta 35 mg kg⁻¹.

El Ni, se encontró que en todas las especies con niveles de concentración bajos de acuerdo a los límites establecidos. La única especie con alto nivel de concentración fue ***Juniperus flaccida (pino)*** que reportó 40.2 mg kg⁻¹. Reportes obtenidos por Kabata-Pendias, (1995), indican que este metal es de hasta 30 mg kg⁻¹.

El Pb, concentró mayor nivel en la especie ***Echinochloa colona (zacate navajita)*** con 211.6 mg kg⁻¹, pero según el valor reportado Merián, (1991) el contenido de Pb es hasta 300 mg kg⁻¹, esto indica que todas las especies presentaron bajo contenido de Pb y aparentemente no hay toxicidad por este metal.

El Zinc, es otro elemento que reporta concentraciones variables, donde los altos niveles fueron acumulados por las especies ***Echinochloa colona (zacate navajita)*** con 2066 mg kg⁻¹ y ***Phithecellobium dulce (huamúchil)*** con 1044 mg kg⁻¹ y ***Juniperus flaccida (pino)*** con 305 mg kg⁻¹, entre otras. Los límites permisibles de Zn se desconocen, pero de acuerdo a los datos reportados por Hernández Gil, (2001) establece hasta 710 mg kg⁻¹ el nivel de concentración de este metal. Los resultados indican que dos de las muestras están por encima del

valor reportado por el autor, la mayoría de las especies contienen Zn, pero a bajas concentraciones ((Ver Figuras 27 y 28).

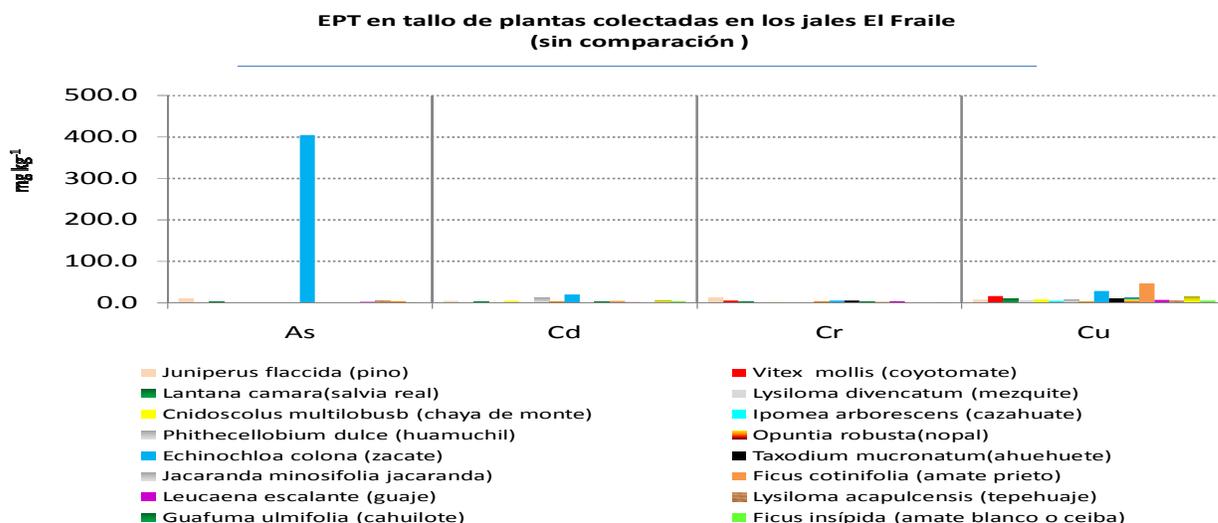


Figura 27. Concentración total de As, Cd, Cr y Cu en muestras de tallo de plantas de jales sin comparación

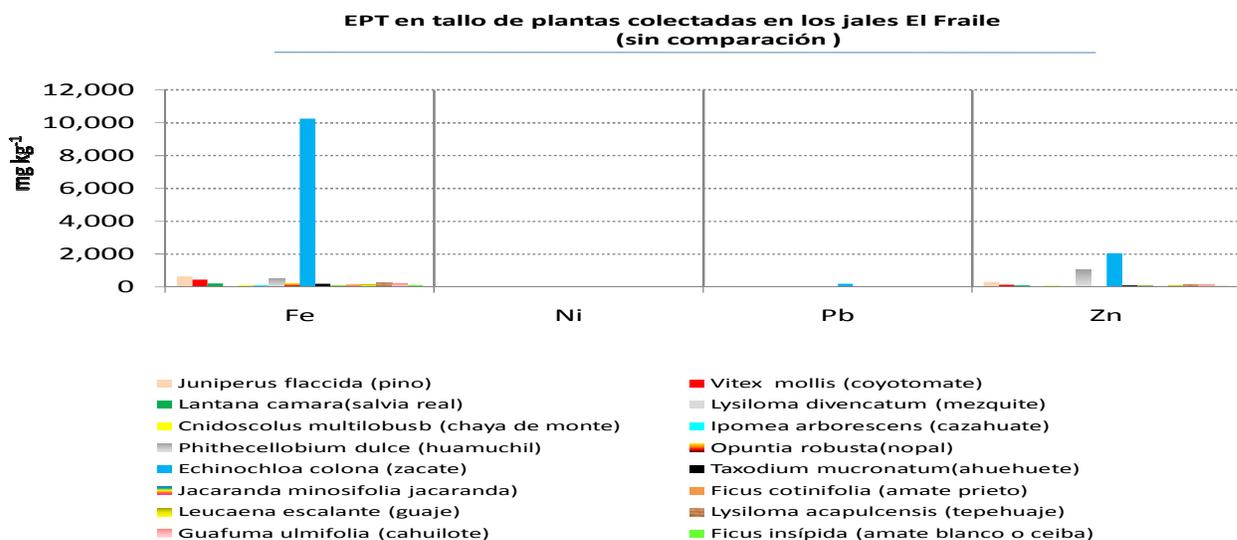


Figura 28. Concentración total de Fe, Ni, Pb y Zn en muestras de tallo de plantas de jales sin comparación

VI. DISCUSIÓN

Estudios sobre digestión total y la especiación química secuencial, realizados en los jales El Fraile por Flores-Mundo (2002), Martín-Romero (2001), Talavera *et al.*, (2005); Talavera *et al.* (2006) y Galarza-Brito (2009), reportan que los jales presentan altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) de As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, V y Z. En la digestión total los valores de los EPT fueron también demasiados altos, encontrándose muy por encima de los niveles regionales de fondo de acuerdo a lo reportado en el cuadro No. 6. Por otra parte las muestras presentaron un pH ácido y neutro, sin embargo el pH neutro (7.3-7.8) reportó valores más alto con respecto a las muestras con pH ácido (2.4-5.2).

La extracción química secuencial demostró que existe mayor liberación de metales en medios ácidos que en medios neutros, con excepción del As que es igualmente soluble en medios neutros o ligeramente alcalinos. Se sabe que la solubilidad de varios elementos entre ellos Cu, Cd, Pb y Zn se relacionan inversamente con el pH (McBride *et al.*, 1997). Esto indica que tanto la digestión total y la extracción química están controladas por el pH del medio, lo cual demuestra que los jales El Fraile, representan una fuente potencial de emisión de EPT y que los procesos de oxidación y precipitación representan los factores físicos y químicos más importantes que controlan la movilidad de EPT.

EPT en muestras de plantas de jales El Fraile y su comparativa

Se identificaron 40 especies de plantas nativas, pero únicamente se analizaron 36, de ellas 26 fueron colectadas de los jales El Fraile de Taxco, de Alarcón, Gro., las otras 10 fueron plantas comparativas (controles) colectadas en sitios sin afectación por jales cercanos a Taxco (Tlamacazapa, Puente Campuzano e Ixcateopan) (datos de Olea y Zúñiga, 2009). Las plantas (comparativas) fueron de las mismas especies que se colectaron en los jales, como son: *Verbesina crocata* (*capitaneja*), *Asclepias curassavica* (*flor de sangre*), *Sapindáceas serjania* (*enredadera*), *Senecio deppeanus* (*jara amarilla o candelero*), *Thevitia ovate* (*yoyote*), *Psidium guajava* (*guayabo*), *Lythrum gráciles*,

Dodonoea biolata (chapulixtil u ocotillo), *Bursera copalifera* (copal), *Senna pallida* (cammpiseran).

La finalidad de comparar químicamente plantas de ambientes distintos (jales y no jales) es saber la cantidad de elementos absorbido por cada especie, con fines fitorremediadoras de suelos contaminados por metales pesados.

De acuerdo a los resultados, las plantas recolectadas en los jales El Fraile, fueron las que acumularon mayor contenido de EPT que las plantas comparativas, siendo la especie *Bursera copalifera* (copal) la que acumuló mayor concentración de As (hoja 96.8, raíz 47.7 y tallo 47.7 mg kg⁻¹). Especies como *Bursera copalifera* (copal), (*Verbesina crocata* (capitaneja), *Senna pallida* (cammpiseran) y *Senecio deppeanus* (jara amarilla o candelero) reportaron mayor contenido de Fe y Cd. Estas especies vegetales pueden ser consideradas como fitoacumuladoras de estos metales. Es importante comentar que estas especies no fueron comparadas con otros estudios, por no encontrarse reportadas en la literatura como acumuladoras de metales. Este hallazgo trascendental de encontrar nuevas especies de plantas naturales de la región, podría ser que a futuro, estas se han reconocidas por la comunidad científica, como fitoremediadoras de Fe y Cd.

Un segundo grupo de plantas recolectadas en los jales El Fraile sin su grupo comparativo, está representado por las siguientes especies: *Juniperus fláccida* (pino); *Vitex mollis* (coyotomate); *Lantana cámara* L.(salvia real o cinco negrito); *Lysiloma divencatum* (mezquite); *Cnidioscolus multilobusb* (chaya de monte); *Ipomoea arborescens* (cazahuate); *Phithecellobium dulce* (huamúchil o guamúchil); *Opuntia robusta* (Nopal); *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul); *Taxodium mucronatum* (ahuehuete o sabino); *Jacaranda minosifolia* (jacaranda); *Ficus cotinifolia* (amate prieto); *Leucaena escalante* (guaje); *Lysiloma acapulcensis* (tepeguaje); *Guafuma ulmifolia* (cahuilote) y *Ficus insípida* (amate blanco) donde la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) concentró mayor contenido de As en los diferentes órganos de la planta (hoja 64.5, raíz 795.8 y tallo 405 mg kg⁻¹), rebasando los valores máximos aceptados. Esta misma especie acumuló niveles muy alto de Fe y su concentración llegó en hoja 1922, raíz 18834 y tallo 10252 mg kg⁻¹, en Zn acumuló en hoja 419, raíz 2517 y tallo 2066 mg kg⁻¹

superando los límites permisibles establecidos. Así mismo, se observó que la cantidad de Cd en esta misma especie (*Echinochloa colona*), fue mayor a la concentración máxima permitida en raíz 30.9 y tallo 20.1 mg kg⁻¹.

Los resultados indican que la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul) es la especie que absorbió más metales pesados y mayor cantidad, en los diferentes órganos de la planta (hoja, raíz y tallo). Por su capacidad y habilidad para crecer en presencia de estos elementos y sin sufrir daños tan severos, esta especie puede considerarse fitoacumuladora de As, Fe y Zn, esta podría ser seleccionada para estudiar cuidadosamente el proceso de absorción y de acumulación de estos elementos. Xiong, (1997) y Singh *et al.*, (2003) reportan que los pastos son el género más adecuado para la fitorremediación de formas orgánicas e inorgánicas de metales, por su hábitat de crecimiento y adaptabilidad a una variedad de condiciones edáficas y climáticas. En las *Asteraceae* se ha reportado por ejemplo tolerancia al plomo en *Sonchus oleraceus* y se le ha propuesto como especie fitoremediadora de ambientes contaminados con este metal. En otra investigación realizada por Sierra-Villagrana, 2006, reporta a la especie de pasto *Rye grassa* como acumuladora de Pb (2438.89 mg kg⁻¹). Arroyave *et al.*, (2009) reporta a *Brachiaria dictyoneura* (pasto llanero) como acumuladora de Cu y Hg. De lo anterior, se explica, que el pasto conserva diferentes mecanismos de tolerancia que le permiten acumular altos niveles de concentración de EPT. En esta investigación resultó ser la especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita) quién concentró mayor cantidad de EPT. Se sugiere que esta especie sea estudiada con más detenimiento para ser utilizada en la fitorremediación de los jales mineros de El Fraile.

VII. CONCLUSIONES

Características fisicoquímicas de los jales El Fraile

Los jales contienen cantidades importantes de elementos potencialmente tóxicos (EPT): As, Cd, Cu, Pb, Fe, Hg, Sb, V, Zn, entre otros, el cual representan una fuente de contaminación para el medio ambiente y para los pobladores de la zona.

La distribución de la especiación química de los EPT en muestras ácidas reporta que el **As, Cu, Fe, V y Pb** presentaron una mayor concentración en la fracción residual; **el Cd y Zn** en la fracción soluble y el **Mn** en los oxihidróxidos de Fe-Mn.

En muestras neutras, el **As, Fe y V** reportaron mayores concentraciones en la fracción residual; el **Cd, Mn y Zn** en los oxihidróxidos de Fe-Mn y el **Cu** en la fracción de los sulfuros y MO. Existe mayor liberación de metales en medios ácidos, ya que el **Pb** reportó su distribución únicamente en muestras ácidas y otros metales como el **Cd y Zn** fueron solubles en este mismo medio (ácido).

En muestras ácidas, la concentración total de EPT decrece en el siguiente orden: Fe > Pb > As > Mn > Zn > Cu > V > Cd, mientras que en las neutras es: Fe > Zn > Mn > Pb > As > Cu > Cd > V

La extracción secuencial confirma que efectivamente existen cantidades elevadas de metales como: Fe, Pb, Zn, Mn y Cu en los jales El Fraile.

Estos metales se encuentran en su mayor parte en las fracciones:

- **Residual.** } **Más estable para el ambiente y menos peligro para el ambiente**
- **Asociada a óxidos e hidróxidos de Fe-Mn.** }
- **Asociadas a sulfuros y MO** } **Menos estables y menos peligrosos para el ambiente**

- Soluble
 - Adsorbida
 - Carbonatos
- } Representan las fracciones más biodisponibles al ambiente y
Por lo tanto, son de mayor riesgo para la biota

Análisis de las Plantas colectadas de los jales El Fraile y su planta comparativa

- De las especies vegetales que se colectaron en los jales, sólo algunas de ellas son capaces de acumular altas concentraciones de metales.
- La absorción de los EPT en las plantas fue muy variable y dependió principalmente de cada una de las especies.

El Fe, Zn, As y Cd, fueron los elementos absorbidos en mayor proporción por las especies de los jales El Fraile como: *Bursera copalifera (copal)* el cual presentó las siguientes concentraciones: Fe (hoja 1643, raíz 358 y tallo 1175 mg kg⁻¹), Zn (hoja 488, raíz 306 y tallo 27.9 mg kg⁻¹), As (hoja 96.8, raíz ND y tallo 47.7 mg kg⁻¹) y Cd (hoja 9.48, raíz 5.96 y tallo 6.97 mg kg⁻¹).

La especie *Echinochloa colona* (zacate o navajita azul), acumuló los siguientes EPTs:: Fe (hoja 1922, raíz 18834 y tallo 10252 mg kg⁻¹), Zn (hoja 419, raíz 2517 y tallo 2066 mg kg⁻¹), As (hoja 64.5 raíz 795.8 y tallo 405 mg kg⁻¹) y Cd (hoja 3.72, raíz 30.9 y tallo 20.1 mg kg⁻¹). De ahí que la concentraciones encontrada en los diferentes órganos de las plantas (hoja, raíz y tallo) fue en el siguientes orden: Fe > Zn > As > Cd.

La especie *Echinochloa colona* (zacate navajita) podría ser considerada como planta fitoacumuladora de metales, ya que absorbió mayores concentraciones de hasta cuatro metales, especie que pudiera ser seleccionada para ser utilizada en el proceso de fitorremediación en los jales El Fraile de Taxco de Alarcón, Gro.

Es importante mencionar que los reportes existentes de las especies de vegetación que crecen en sitios contaminados por residuos de minas en México son escasos (Flores-Tavison *et al.*, 2003, Olguín *et al.*, 2003). De igual manera es poca la información sobre las concentraciones de elementos que pueden acumular

las especies y los mecanismos de adaptación que poseen. Por esta razón, los resultados de este estudio, se consideran relevantes, ya que abre un panorama al enfoque del uso de los recursos naturales para la investigación de problemas de contaminación.

VIII. LITERATURA CITADA

- Alexander, M. (1980). Introducción a la microbiología del suelo. AGT Editor. México, D.F., 447-461 p.
- Alloway, B.J. (1990) Heavy metals in soils. John Wiley and Sons, Inc. New York, ISBN 0470215984.
- Armienta, M.A., L.K.Ongley., R.Rodríguez., O.Cruz., H.Mango., G.Villaseñor. (2008). Arsenic distribution in mesquite (*Prosopis laevigata*) and huizache (*Acacia farnesiana*) in the Zimapán mining area, México.
- Arroyave Q.C., Araque M.P., y Peláez J.C. (2009). Evaluación de la bioacumulación y toxicidad de cadmio y mercurio en pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*). Volumen 17. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. págs. 45-49
- Barceló, J. y Poschenrieder, C. 2003. Phytoremediation: principles and perspectives. Contributions to Science. Institut d' Estudis Catalans, Barcelona. 2(3) 333-344.
- Baker, A.J.M. (1981). Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. J. Plant Nutrition 3:643-654.
- Baker, A.J.M., and Walker, P.L. (1997). Ecophysiology of Metal Uptake by Tolerant Plants. In Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects
- Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D. y Smith, J.A.C. 2000. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. En Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. Lewwis Publishers. USA. Pp. 85-107.
- Bernal, M.P., Clemente, R., Walker, D.J. (2007). The role of organic amendments in the bioremediation of heavy metal-polluted soils. En *Environmental Research at the Leading Edge*. Nova Science Publishers, Inc USA.
- Becerril, J. y Navarrete, M.E. (1993). Recopilación, aplicación y evaluación de las tecnologías de estabilización/solidificación para el tratamiento de residuos peligrosos. CENAPRED. Coordinación de Investigación. 96 pp.
- Brooks, R.R. (1998). Plants that hyperaccumulate heavy metal. CAB International. Londres

- Brooks, R.R. (2000). Plants that hyperaccumulate heavy metal. *Their role in phytoremediation microbiology, archeology, mineral exploration and phytomining*. CAB International. Londres.
- Cabrera, F., Clemente L., Díaz Barrientos, E. López R. y Murillo, J.M. (1999). Heavy metal pollution of soils affected by the Guadamar toxic flood. *Sci Total Environ*
- Castillo, B.A., Netzahual, N.M., Pérez, P.F. y Guevara, G.J.A. (2005). Estudio de la Absorción de Metales Pesados por la planta de nopal *opuntia ficus indica*. Laboratorio de Investigación en Bioinorgánica y Biorremediación (LIByB). Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Castillo, P.R, Sánchez, S.E. y Ortiz H.Ma. (2007). Fitorremediación de Suelos Contaminados con Metales Pesados utilizando plantas de género *Pelargonium sp.* Investigaciones Ambientales, y de Biotecnología. Morelos, México.
- Chen, *et al.*, (1997). Phytoremediation of Soil and Water Contaminants.
- Cunningham, S.D., Berti, W.R., Huang, J.W. (1995). Phytoremediation of contaminated soils and sediments. En: *Bio-remediation: Science and Applications*. 145-56, Madison, USA.
- Cunningham, S. D., (1996). Promises and Prospects of Phytoremediation. *Plant Physiol*.
- Chaney, R.L., Malik, M.Li., Brown,S.L., Brewer,E.P., Angle,J.S., Baker, A.J.M., (1997). Phytoremediation of soil metals. *Curr Opin Biotechnol*. 8:279-284.
- Christie, P., Li. X., Chen, B. (2004). Arbuscular Mycorrhiza can Depress Translocation of Zinc To Shoots of Host Plants in Soils Moderately Polluted with Zinc. *Plant and Soil*.
- Danielson, R.M. (1991) Temporal changes and effects of amendments on the occurrence of sheathing (ecto-) mycorrhizas of conifers growing in oil sands tailing and coal spoil. *Agric. Ecosystems Environ*.
- Davies, B., 1992. Interrelationships between soil properties and the uptake of cadmium, copper, lead, and zinc from contaminated soils by radish (*Raphanus sativus L.*). *Water, Air and Soil Pollution* 63: 331-342.
- Davies, F.T. Jr., Jeffrey D. Puryear, R. J. Newton, J. N. Egilla, J. A., y Saraiva, G. (2001). Mycorrhizal fungi enhance accumulation and tolerance of chromium in sunflower (*Helianthus annuus L.*). *Plant Physiol*.

- Dec J. y Bollang J. (1994). Use of plant material for the decontamination of water polluted with phenols. *Biotechnol. Bioeng.* 44, 1132-1139
- Dold, B., Fontboté, L. (2002): A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfide mine tailings of the Fe-oxide Cu-Au deposits from the Punta del Cobre district, northern Chile. *Chem.Geol.* 189,135-163
- Erlich, H.L. y Brierley, C.L. (1990). *Microbial Mineral Recovery*. McGraw-Hill. New York.
- Eweis, J. B.; Ergas, S. J.; Chang, D. P. Y. and Schroeder, E. D. (1999): *Principios de Biorrecuperación*. McGraw Hill, New York, p. 327.
- Flores-Tavison, E., Alarcón, H. M.T., González, E.S. y Olguín, E.J. (2003). Arsenic tolerating plants from mine sites and hot springs in the semi arid región of Chihuahua. México. *Acta Biotechnol.* 23:113-119.
- Garbisu, C., Alkorta, I. (2001). Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. Review paper. *Bioresource Technol.* 77:229-236.
- Ginocchio, R. (2004). Solución Vegetal. *Induambiente.* 67: 30-32.
- Glass, D.J. (2000) Economic potential of phytoremediation. Ensley (Ed) *Phytoremediation of toxic metals*. New York.
- Harvey, P. J, Campanella B. F, Castro P. M. L, Harms H, Lichtfouse E, Schäffner A. R, Smrcek, S. and Werck-Reichhart D. (2002). Phytoremediation of Polyaromatic Hydrocarbons, Anilines and Phenols. *Environmental Science and Pollution.* Int.9, 9-47
- Hernández Gil, R. PhD. (2001). *Botánica en Línea*. Material didáctico elaborado por él: Profesor de Fisiología Vegetal, Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela
- Jambor, J.L., Blowes, D.W., and Ritchie, A.I.M. (2003) *Environmental Aspects of Mine Wastes*. Mineralogical Association of Canada Short Course.
- Kabata-Pendías, A. (2000). *Trace Elements in soils and plants*. Third edition. CRC Press, An. Arbor, Michigan 432.
- Kabir, Z, y Koide, R.T. (2000). The effect of dandelion or a cover crop on mycorrhiza inoculum potential, soil aggregation and yield of maize.

- Karthikeyan, R., y Kulakow, P.A. (2003). Soil plant microbe interactions in phytoremediation. *Advances in Biochemical Engineering/ Biotechnology*.
- Kassel G., Ghoshal D. y Goyal A. (2002) Phytoremediation of trichloroethylene using hybrid poplar. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 8, 3-10.
- Kuleff, I., Djingova, R. (1991). The dandelion (*Taraxacum officinale*) A monitor for environmental pollution? *Water Air Soil Pollution*.
- Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, V. Motto, H., y Raskin, I. (1995). Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science & Technology*.
- Lasat, M.M., 2002. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *J Environ Qual*.31:109-120.
- Lovley, D. R., y J. D. Coates. (1997). Bioremediation of metal contamination. *Curr. Opin. Biotechnol*.
- Lovley, D.R. (2000). Environmental Microbe-Metal interactions. American Society for Microbiology, Washington, D.C.
- Maiti, R.K., Hernández, P.J.L., González, O.J.A., López, S.D., Morales, M. (2002). Advances in researches on plant based bioremediation and biochemical mechanisms of resistance of plants to heavy metals.
- Merían, E. (1991). Metals and their compounds in the environmental. VCH. Publisher. Weinheim, Alemania.
- McBride, M., Sauve, S. y Hendershot, M. (1997). Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *Eur. J. Soil Sci*. 48:337-346.
- McGrath, S. P, Lombi, E., Zhao, F. J., y Dunham, S. J. (2001). Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Natural Hyperaccumulation Versus Chemically Enhanced Phytoextraction. *Journal of Environmental Quality*.
- McGrath, S.P., Lombi, E., Zhao, F.L., Dunham, S.J. (2001). Phytoremediation of Heavy Metal-contaminated soils: Natural hyperaccumulation Versus. Chemically enhanced phytoextraction. *Journal of environmental Quality*. 30 (6): 1919-1926.
- McGrath, SP., Lombi, E., Gray, CW., Caille, N., Dunham, SJ y Zhao, F.J. 2006. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*. *Environmental Pollution* 141 (1): 115-125.

- Maier, R., Méndez, O., y Glenn, E. (2007). Phytostabilization Potential of Quailbush for Mine Tailings: Growth, Metal Accumulation, and Microbial Community Changes. Published in J. Environ. Qual. 36:245–253 (2007).
- Marjories S., Hong F, W., Farmayan J, I. y Chen Y. C. (2001). Phytoremediation of MTBE from a Grounwater plume. Environ. Sci. Technol. 35, 1231-1233.
- Martín, R.F. (2001). Procesos geoquímicos de liberación y transporte de metales pesados y metaloides en residuos mineros (jales). UNAM. Programa Posgrado en Ciencia de la Tierra. Unidad Teórica A.
- Martin, H. W. Young, T.R., Kaplan, D.I., Simon, L., y Adriano. D.C. (1996). Evaluation of three herbaceous index plant species for bioavailability of soil cadmium, chromium, nickel and vanadium. Plant Soil.
- Mejáre, M., Bülow, L., (2001). Metal-binding proteins and peptides in bioremediation and phytoremediation of heavy metals. Trend Biotechnol. 19 (2): 67-73..
- NOM-141-SEMARNAT. (2003). Establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1 (2004). Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio.
- Newman, *et al.*, (1999). Remediation of trichloroethylene in an artificial aquifer with trees: A controlled field study . Environ. Sci. Technol. 33, 2257-2265
- Núñez, L., Meas Y., Ortega B. y Olguín J. (2004). Fitorremediación fundamentos y aplicaciones. Ciencia. 69-82.
- Orchard J., Doucette J., Chard K. y Bugbee B. (2000). Uptake of trichloroethylene by hybrid poplar trees grown hydroponically in flow-through plant growth chambers. Environ. Toxicol. Chem. 19, 895-903.
- Pérez, *et al.*, (2004). Los Humedales del Biotopo Chocón Machacas, Río Dulce, Universidad de San Carlos. Guatemala.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., Campos, A., (2006). Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry: Ecología Aplicada, v. 5, p. 149–155.

- Reeves, R. D y Baker, A.J. (2000). Metal-Accumulating Plants. In: Raskin I. Ensley (Eds) Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment: 193-229. John Wiley and Sons Inc. USA.
- Ritcey, G.M., (1989). Tailings management, problems and solutions in the mining industry. Elsevier Science Publishing Co. Inc., 970 p.
- Romero, F.M. (2004). Proceso geoquímicos que controlan la movilidad de metales y metaloides en jales de sulfuros metálicos, "El Fraile", Taxco-Guerrero. Tesis de doctorado. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Romero, F.M y Ruíz, G.M (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. Boletín de la Sociedad Geológica de México. Vol. 62. México.
- Rzedowski, J y G.C. de Rzedowski. (2001). Flora fanerogámica del Valle de México. 2ª. Ed. Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Tolrá, R., poschenrieder, C. y Barceló, J. 1996. Zinc hyperaccumulation in *Thiaspia caerulescens*. II Influence of organic acids. J. Plant Nutrition 19: 1541-1550.
- Salt, D.E., Smith, R.D., y Raskin, I. (1998). Phytoremediation. Annu Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.
- Schat, H. y Verkleij, J. (1998). Biological interactions: The role for non-woody plants in phytorestoration: Possibilities to exploit adaptive heavy metal tolerance. Company Springer y Landes. New York.
- Schat, H., Llugany, M., Vooijs, R., Hartley-Whitaker, J. y Bleeker, PM. 2002. The role of phytochelatins in constitutive and adaptive heavy metal tolerances in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes. J. Exp. Bot. 53: 2381-2392.
- SEDESOL (1993) Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 1991-1992. Secretaría de Desarrollo Social. México.
- Sellers, K. 1999. Fundamentals of hazardous waste site remediation. *Lewis Publishers*.
- Siciliano S., Germida J., Banks K. y Creer C. (2003). Changes in microbial community composition and function during a polyaromatic hydrocarbon. Appl. Environ. Microbiol. 69, 483-489.

- Simonton, S., Dimsha, M., Thomson, B., Barton, L., y Cathey, G. (2000). Long-Term stability of metals immobilized by microbial reduction. *Environ. Engr.*
- Singer, P.C. y Stumm, W. (1970). *Acid Mine Drainage: The Rate Determining Step.* Science.
- Singh, O.V., S. Labana, G. Pandey, R. Budhiraja y R.K. Jain. 2003. Phytoremediation: An Overview of Metallic Ion Decontamination From Soil. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 61: 405-412.
- Schnoor, J.L., Licht, L.A., Mccutcheon, S.C., Wolfe, N.L. and Carreira, L.H. (1995). Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environ. Sci. Technol.* 29: 318-323.
- Soto, R. ML (2007) . Living near Mining Waste is Associated with Higher Blood Lead Concentrations in Children. Uni. Autónoma De Guerrero. Cuernavaca /Morelos. México.
- Talavera *et al.*, 2005. Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from, silver mines in the Taxco, México area to evaluate their potential environmental impact: *Geofísica Internacional.*
- Talavera *et al.* (2006). Geochemistry of leachates from the El Fraile Sulfide tailings piles in Taxco Guerrero, southern México. *Environmental Geochemistry and Health*, 28:243-255
- Tessier *et al.* (1979). Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*, Vol.51, No.7
- Torres, G., Navarro, A.E., y Languasco, J. (2007). Estudio preliminar de la fitoremediación de cobre divalente mediante *Pistia stratioides* (lechuga de agua). Lima Perú. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales.*3 (1): 13-20.
- USEPA (Environmental Protection Agency) (1997) Technology alternatives for the remediation of soils contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb.
- USEPA. (2000). Introduction to Phytoremediation. EPA 600-R-99-107. Formato electrónico disponible en:
<http://www.cluin.org/topics/default.focus/sec/Phytoremediation/>
- Vollke y Velasco. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. *Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).*México.

- Volke, S. T., Velasco, T. J. A y De La Rosa, A. (2005). Suelos Contaminados por Metales y Metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. S y G.
- Vymazal. (2005). Biorremediación de aguas contaminadas por metales pesados. <http://paulaarroyo.blogspot.com/2005/12/we-quest-biorremediacion-de-aguas.html>
- Wenzel, W.W., Adriano, D.C., Salt, D., Smith, R. (1999). Phytoremediation: A plant-microbe-based remediation system. En *Bioremediation of Contaminated Soils*, ed. Agronomy n° 37, 457-508, , USA.
- Wong M.H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*. 6: 775-780.
- Xiong, Z. T. 1997. Bioaccumulation and Physiological Effects of Excess Lead in a Roadside Pioneer Species *Sonchus Oleraceus* L. *Environmental Pollution* 97 (3): 275 279.
- Younger, P.L. (2000). Holistic remedial strategies for short- and long-term water pollution from abandoned mines. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section A: Mining Technology)*.

Sitios en internet o páginas web

- Cusato, M.S; Valiente, L; Tortosa, R.D; Bartoloni, N; Puellas, M. M. y D'Ambrogio, A. (2007). Uso de discaria americana en fitorremediación. Contaminación Medioambiental. Formato electrónico disponible en: http://webjapan.org/factsheet/es/pdf_Spanish/S43_envirp.pdf.
- Inforpress, (2006). Minería: violento desalojo en El Estor, Izabal Formato electrónico disponible en: www.cinvestav.mx/.../Publicaciones%20y%20Noticias/Revistas/Cinvestav/octdic%202006/presencia%20arsenico.pdf
- Magos, L. (1975). Mercury and Mercurials. *British Medical Bulletin* Formato electrónico disponible en: elmercuriodigital.es/content/view/12675/296/-31k
www.espacioblog.com/avia/post/2007/08/30/escandalo-vertedoiro-residuos-toxicos-e-perigosos-nerva
- www.cinvestav.mx/.../Publicaciones%20y%20Noticias/Revistas/Cinvestav/octdic%202006/presencia%20arsenico.pdf
- <http://www.boletinrural.com.ar/a2/index.cfm?fuseaction=MUESTRA&campo=htm0010&ext=htm&codcontenido=490&aplicacion=app112&canal=14,2>

- http://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/biorremediacion.htm
- ://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/biorremediacion.htm
- (Lozano-Teruel, 1998. Medio ambiente y vida saludable. Ciencia y Salud. http://servicios.laverdad.es/cienciaysalud/4_3_52.html)
- SEMARNAT. (2002). Sistema Nacional de Información Ambiental. <http://sepultura.semarnat.gob.mx/upsec/programas/comision/opinver.html>
- USEPA. (1999). Phytoremediation resource guide. Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office Washington. Formato electrónico disponible en: <http://www.clu-in.org/download/remed/phytoresgude.pdf>
- USEPA. (2001). A Citizen's Guide to Bioremediation. Formato electrónico disponible en: <http://www.epa.gov/swertio1/download/citizens/bioremediation.pdf>
- Van Deuren, J., Wang, Z. y Ledbetter, J. (1997). Remediation technologies screening matrix and reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA. <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.

Tesis:

- Díaz-Villaseñor E. (2006). Transferencia de metales entre suelo y plantas de maíz (*Zea mays L.*), sembradas en terrenos impactados por jales mneros en la región de Taxco, Guerrero. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Guerrero. Iguala, Gro.
- Flores-Mundo N. (2002). Caracterización química mineralógica de los jales El Fraile. Taxco de Alarcón, Guerrero. Tesis de licenciatura UAG. Taxco el Viejo, Gro.
- Galarza, B.Z. (2009). Especiación Química de Elementos Potencialmente Tóxicos en los jales El Fraile en Santa Rosa, Municipio de Taxco, Guerrero. Unidad Académica de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Tesis de Lic. Universidad Autónoma de Guerrero. Iguala de la Independencia. Gro.
- Olea, G. C.P y Zúñiga, O. K.M. (2009). "Plantas con Potencial para Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados en El Fraile, Guerrero. Unidad Académica de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Tesis de Lic. Universidad Autónoma de Guerrero. Iguala de la Independencia. Gro.

- Sierra, V.R., (2006). Fitorremediación de un Suelo Contaminado con Plomo por Actividad Industrial. Tesis Ing. Agrícola y ambiental. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

IX. ANEXOS

Anexo 1

Especies vegetales encontradas en los jales “El Fraile” en Taxco de Alarcón, Gro.

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN
<i>Verbesina crocata</i>	capitaneja
<i>Asclepias curassavica</i>	flor de sangre
<i>Sapindáceas serjania</i>	enredadera
<i>Senecio deppeanus</i>	jara amarilla candelero
<i>Thevitia ovate</i>	yoyote
<i>Psidium guajava</i>	guayabo
<i>Lythrum gráciles</i>	
<i>Dodonoea biolata</i>	chapulixtil u ocotillo
<i>Bursera copalifera</i>	copal
<i>Senna pallida</i>	cammpiseran
<i>Juniperus flaccida</i>	pino
<i>Vitex mollis</i>	coyotomate
<i>Lantana cámara</i>	salvia real o cinco negritos
<i>Lysiloma divencatum</i>	mezquite
<i>Cnidoscopus multilobusb</i>	chaya de monte
<i>Ipomoea arborescens</i>	cazahuate
<i>Phithecellobium dulce</i>	huamúchil o guamúchil
<i>Opuntia robusta</i>	nopal
<i>Echinochloa colona</i>	zacate o navajita azul
<i>Taxodium mucronatum</i>	ahuehuete o sabino
<i>Jacaranda minusifolia</i>	jacaranda
<i>Ficus cotinifolia</i>	amate prieto
<i>Leucaena escalante</i>	guaje
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	tepehuaje
<i>Guafuma ulmifolia</i>	cahuilote o chapulín blanco
<i>Ficus insípida</i>	amate blanco o ceiba

Anexo 2

Plantas colectadas en la base de los jales mineros de El Fraile.



Nom. científico	<i>Verbesina crocata (cav) Less.</i>			
Nombre común	Capitaneja			
Forma biológica	Herbácea leñosa			
Concentración (mg kg ⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	7.50	47.4	18.9
	Cd	7.00	25	7.00
	Cr	2.50	6.00	3.98
	Cu	50.3	168	59.2
	Fe	584	2364	967
	Ni	1.00	2.00	1.49
	Pb	41.3	177	75.1
	Zn	105	519	149.7



Nom. científico	<i>Asclepias curassavica</i>			
Nombre común	Flor de sangre o platanillo			
Forma biológica	Herbácea (planta ornamental)			
Concentración (mg kg ⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	2.49	ND
	Cd	10.4	3.49	4.97
	Cr	1.00	6.00	2.48
	Cu	80.2	98.2	71.1
	Fe	76.7	375	127
	Ni	ND	2.0	ND
	Pb	ND	8.47	ND
	Zn	42.3	51.3	256.2

ND = No detectado



Nom. científico	<i>Sapindáceas serjania</i>			
Nombre común	Enredadera			
Forma biológica	Liana			
Concentración (mg kg ⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	7.46	ND	ND
	Cd	1.49	2.48	1.98
	Cr	4.97	8.92	5.46
	Cu	10.9	13.8	10.9
	Fe	474	125	152
	Ni	2.48	2.48	2.00
	Pb	32.3	ND	7.00
	Zn	76.6	24.3	47.7

ND = No detectado



Nom. científico	<i>Senecio deppeanus (Helms)</i>			
Nombre común	Jara amarilla o candelero			
Forma biológica	arbusto			
Concentración (mg kg ⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	46.8	ND
	Cd	13	14.9	29.3
	Cr	4.47	8.46	7.46
	Cu	45.7	33.8	23.8
	Fe	164	1633	379
	Ni	ND	5.97	2.48
	Pb	ND	159.8	23.3
	Zn	93	340	231

ND = No detectado



Nom. científico	<i>Thevitia ovata (car) A.D C</i>			
Nombre común	Yoyote			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	ND	ND
	Cd	18.4	7.44	7.46
	Cr	7.00	12.4	6.46
	Cu	49.8	25.2	33.8
	Fe	234	945	373
	Ni	1.99	5.45	0.99
	Pb	ND	1.48	2.48
ND = No detectado	Zn	45.3	176	102



Nom. científico	<i>Psidium guajava L.</i>			
Nombre común	Guyabo			
Forma biológica	Leñosa (árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	ND	ND
	Cd	8.45	7.94	6.95
	Cr	0.50	8.44	5.96
	Cu	58.7	27.8	42.7
	Fe	167	759	388
	Ni	ND	1.98	0.50
	Pb	ND	25.8	9.44
	ND = No detectado	Zn	149	180



Nom. científico	<i>Lythrum graciles Benth.</i>			
Nombre común				
Forma biológica	Herbácea			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	ND	ND
	Cd	1.49	0.99	3.47
	Cr	9.50	7.99	9.94
	Cu	23.8	9.49	22.8
	Fe	180	127	71.5
	Ni	4.97	3.99	4.47
	Pb	ND	ND	ND
ND = No detectado	Zn	19.9	40.4	26.8



Nom. científico	<i>Dodonaea biolata (H.B.K)</i>			
Nombre común	Chapulixtil o ocotillo			
Forma biológica	arbusto			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	1.49	ND
	Cd	5.97	24.3	11.9
	Cr	7.0	14.9	7.97
	Cu	28.3	30.8	13.4
	Fe	262	945	530
	Ni	2.48	7.45	4.48
	Pb	ND	70.5	10.9
	ND = No detectado	Zn	275	471



Nom. científico	<i>Bursera copalifera</i>			
Nombre común	Copal			
Forma biológica	Leñosa (árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	96.8	ND	47.7
	Cd	9.48	5.96	5.97
	Cr	7.48	8.44	22.3
	Cu	22.9	11.4	21.8
	Fe	1643	358	1175
	Ni	1.99	3.47	11.4
	Pb	215.6	14.9	130
	Zn	488	306	27.9



Nom. científico	<i>Senna pallida</i>			
Nombre común	Cammpiseran			
Forma biológica	<i>Herbácea, arbusto, árbol</i>			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	ND	ND
	Cd	2.98	2.98	2.48
	Cr	7.96	14.9	8.92
	Cu	22.4	16.9	13.8
	Fe	121	283	125
	Ni	1.49	5.97	2.48
	Pb	ND	ND	ND
	Zn	22.4	11.9	24.3

ND = No detectado



Nom. científico	<i>Juniperus purpurea L.</i>			
Nombre común	Pino			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	7.00	24.9	10.9
	Cd	1.00	3.99	4.00
	Cr	1.25	6.23	13.5
	Cu	4.75	33.1	7.24
	Fe	447	1089	648
	Ni	2.00	5.73	40.2
	Pb	43.7	131.8	58.9
	Zn	330	149	305



Nom. científico	<i>Vitex mollis</i>			
Nombre común	Coyotomate			
Forma biológica	árbol			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	4.22	0.50
	Cd	3.74	1.99	1.24
	Cr	24.9	7.21	6.22
	Cu	14.4	4.47	16.1
	Fe	145	471	458
	Ni	38	4.47	1.74
	Pb	5.22	23.1	13.1
	Zn	108	165	148

ND = No detectado



Nom. científico	<i>Lantana cámara</i>			
Nombre común	Salvia, Cinco negritos			
Forma biológica	arbusto			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	2.97	30.8	3.49
	Cd	0.74	17.9	1.74
	Cr	1.98	12.4	1.99
	Cu	15.6	29.3	8.99
	Fe	269	1719	217
	Ni	2.23	7.96	0.75
	Pb	11.6	72.1	10.7
	Zn	55.5	543	99.9
ND = No detectado				



Nom. científico	<i>Lysiloma divencatum (Jacq) Macbr</i>			
Nombre común	mezquite			
Forma biológica	Leñosa (árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	ND	ND
	Cd	0.25	0.75	0.25
	Cr	0.74	1.99	1.24
	Cu	6.19	5.47	6.49
	Fe	48	318	56.2
	Ni	ND	0.75	0.25
	Pb	ND	2.48	ND
	Zn	13	12	25
ND = No detectado				



Nom. científico	<i>Cnidocolus multilobus (Pax) I. M. Johnston</i>			
Nombre común	Chaya de monte			
Forma biológica	arbusto			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	2.45	7.21	ND
	Cd	1.00	3.97	4.47
	Cr	1.22	12.1	1.24
	Cu	10.7	14.1	8.70
	Fe	132	755	109
	Ni	1.00	7.46	1.00
	Pb	3.41	27.8	13.9
	Zn	68	134	89.7



Nom. científico	<i>Ipomea arborescens (Homb. & Bonpl.)</i>			
Nombre común	Cazahuate			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	13.4	13.4	ND
	Cd	4.20	4.22	0.50
	Cr	2.23	2.23	1.24
	Cu	13.6	13.6	4.96
	Fe	1483	1483	102
	Ni	1.49	1.49	0.50
	Pb	35.2	69.8	1.98
	Zn	92.9	92.9	29



Nom. científico	<i>Phithecellobium dulce (roxb)benth</i>			
Nombre común	Huamuchil o guamúchil			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	10.9	ND
	Cd	2.72	5.22	12.7
	Cr	0.50	1.49	1.00
	Cu	13.1	17.1	6.24
	Fe	127.3	1317	503
	Ni	0.25	1.98	1.00
	Pb	7.92	78.0	7.49
	Zn	321	441	1044
ND = No detectado				



Nom. científico	<i>Opuntia robusta</i>			
Nombre común	Nopal			
Forma biológica	arbusto			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	0.25	14.9	0.25
	Cd	4.00	1.49	1.74
	Cr	1.00	20.1	1.49
	Cu	9.97	6.71	3.23
	Fe	229	611	209
	Ni	1.24	13.4	1.00
	Pb	18.9	22.8	18.8
	Zn	409	69	28



Nom. científico	<i>Echinochloa colona (L.) Link</i>			
Nombre común	Zacate o Navajita azul			
Forma biológica	Hierba			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	64.5	795.8	405
	Cd	3.72	30.9	20.1
	Cr	2.23	34.6	5.48
	Cu	16.8	31.6	28.4
	Fe	1922	18834	10252
	Ni	2.73	33.4	12.9
	Pb	45.7	242	211.6
	Zn	419	2517	2066



Nom. científico	<i>Taxodium mucronatum</i>			
Nombre común	Ahuehuete o sabino			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	19.6	ND
	Cd	0.50	3.98	0.75
	Cr	1.24	9.22	5.24
	Cu	11.2	18.1	10.9
	Fe	189	892	184
	Ni	2.24	7.97	6.74
	Pb	12.2	109.6	12.9
	Zn	78	462	95
ND = No detectado				



Nom. científico	<i>Jacaranda mimosifolia</i> (D. Don)			
Nombre común	Jacaranda			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	ND	ND
	Cd	0.50	1.98	1.73
	Cr	1.49	1.24	1.48
	Cu	10.1	7.45	13.3
	Fe	93.4	71	86.7
	Ni	2.98	1.24	1.48
	Pb	2.98	2.5	3.96
	Zn	21	52	66
ND = No detectado				



Nom. científico	<i>Ficus cotinifolia</i> (H.B.K.)			
Nombre común	Amate Prieto			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	ND	4.46	ND
	Cd	1.49	6.69	4.24
	Cr	0.25	4.96	2.49
	Cu	4.74	26.2	46.9
	Fe	151	765	158
	Ni	0.25	4.71	0.25
	Pb	6.74	43.4	2.74
	Zn	53	401	55
	ND = No detectado			



Nom. científico	<i>Leucaena esculenta</i> (DC.) Benth			
Nombre común	Guaje			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	0.25	7.71	2.23
	Cd	0.75	7.96	1.24
	Cr	1.00	1.74	3.47
	Cu	7.45	50.0	6.45
	Fe	91.4	710	138
	Ni	1.24	2.24	3.47
	Pb	1.74	57.2	3.97
	Zn	60	381	55



Nom. científico	<i>Lysiloma acapulcensis</i> (Kunth) Benth			
Nombre común	Tepeguaje			
Forma biológica	arbusto			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	1.99	6.23	3.72
	Cd	0.50	1.24	0.75
	Cr	2.73	3.49	0.99
	Cu	5.97	5.48	3.97
	Fe	367	363	259
	Ni	1.74	5.98	0.75
	Pb	4.48	9.73	10.1
	Zn	97	46	120



Nom. científico	<i>Guafuma ulmifolia (Lam)</i>			
Nombre común	Cahuilote, Capulín blanco			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	2.49	5.97	1.74
	Cd	1.49	1.99	3.73
	Cr	ND	8.20	1.00
	Cu	16.7	11.6	14.9
	Fe	276	1038	212
	Ni	ND	4.72	0.50
	Pb	7.72	22.1	8.20
	Zn	47.1	100	160
ND = No detectado				



Nom. científico	<i>Ficus insípida (Willd)</i>			
Nombre común	Ceiba o Amate blanco			
Forma biológica	Leñosa (Árbol)			
Concentración (mg kg⁻¹) de los EPT	Metal	Hoja	Raíz	Tallo
	As	0.75	3.47	0.99
	Cd	1.24	3.97	3.47
	Cr	1.49	0.99	1.24
	Cu	3.72	21.3	5.21
	Fe	123	371	114.2
	Ni	0.50	ND	0.75
	Pb	2.73	12.6	2.73
	Zn	41	200	58.3
	ND = No detectado			



Echinochloa colona (Zacate o Navajita azul), hierba encontrada con más frecuencia en el área de investigación.

