



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**CARACTERIZACIÓN DE UN JAL DE MINA
CON FINES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA
EN PACHUCA, HIDALGO.**

TESIS PROFESIONAL

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERO EN RESTAURACIÓN FORESTAL

PRESENTA

EMMANUEL MONDRAGÓN ROMERO

Chapingo, México, junio de 2008.



Esta tesis titulada “CARACTERIZACIÓN DE UN JAL DE MINA CON FINES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN PACHUCA, HIDALGO.”, fue realizada por el C. Emmanuel Mondragón Romero, bajo la dirección de la Dra. Elizabeth Hernández Acosta. Ha sido revisada y aprobada por el siguiente Comité Revisor y Jurado Examinador, para obtener el título de:

INGENIERO EN RESTAURACIÓN FORESTAL

PRESIDENTE

Dra. Elizabeth Hernández Acosta

SECRETARIO

Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

VOCAL

M.C. Edmundo Robledo Santoyo

SUPLENTE

Dr. José Guadalupe Álvarez Moctezuma

SUPLENTE

M.C. Enrique Guizar Nolazco

Chapingo, México. Julio de 2008.

IN MEMORIAM

DR. FERNANDO ZAVALA CHÁVEZ

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento económico para la realización de esta investigación a través del proyecto, intitulado "".

A la Universidad Autónoma Chapingo, por la formación profesional y humana.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta, por la dirección de esta investigación, pero sobre todo por su amistad, paciencia y consejos.

Al Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo, por su disposición, sus valiosas aportaciones y por creer en este proyecto.

Al M.C. Edmundo Robledo Santoyo, por las facilidades otorgadas para esta investigación.

Al Dr. José Guadalupe Álvarez Moctezuma y al M.C. Enrique Guizar Nolazco, por la revisión de este documento y por las aportaciones realizadas.

Al Dr. Fernando Zavala Chávez (*Q.E.P.D.*), por su ejemplo y enseñanzas.

Al Dr. Diodoro Granados Sánchez, por su colaboración en este proyecto y su incondicional ayuda.

A la M.C. Agustina Osorno Díaz, por su apoyo en la identificación botánica de las plantas.

Al Ing. José Rico Cerda por su apoyo técnico y moral durante esta etapa de mi formación profesional.

A mi familia, por todo el apoyo económico y moral que me han proporcionado.

A la familia Reyes Guerrero, especialmente a mis tíos Juventino Reyes y Celia Guerrero por su hospitalidad y apoyo durante mi estancia en Chapingo.

A mis amigos, por compartir buenos y malos momentos, sinceramente gracias.

*A mis padres,
con todo mi amor.*

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE CUADROS.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
RESUMEN.....	iv
SUMMARY.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Área de estudio	
2.2. Fase de campo	
2.3. Fase de laboratorio	
2.4. Análisis de resultados	
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1. Características físicas y químicas del jal	
3.2. Riqueza de especies	
3.3. Indicadores ecológicos	
3.4. Índices de diversidad	
3.5. Análisis de biomasa	
3.6. Acumulación de EPT en la vegetación	
3.7. Análisis de semejanza	
4. CONCLUSIONES	
5. LITERATURA CITADA	

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Propiedades físicas del sustrato	
2. Propiedades químicas del sustrato	
3. Interpretación de propiedades químicas del sustrato	
4. Contenido extractable de EPT en el sustrato	
5. Concentración media extractable de EPT en jales de Zacatecas y estado de México	
6. Listado florístico del jal de mina	
7. Indicadores ecológicos de las especies en los sitios de muestreo	
8. Índices de dominancia de Simpson y diversidad de Shannon	
9. Biomasa total de las especies	
10. Biomasa promedio de un individuo de cada especie	
11. Acumulación de EPT en las especies	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Ubicación del área de estudio	
2. Valores de importancia relativo (VIR) de las especies para cada sitio	
3. Biomasa total acumulada en cada sitio	
4. Concentración extractable de EPT en la biomasa total acumulada en cada sitio	
5. Concentración total extractable de EPT acumulado por cada especie	
6. Dendrograma de afinidad entre sitios	

RESUMEN

Se estudió un jal de mina en Pachuca Hidalgo, a través de la caracterización física y química del sustrato, riqueza de especies, parámetros ecológicos de la vegetación y el contenido extractable de elementos potencialmente tóxicos (EPT). Se realizó un muestreo selectivo y se levantaron nueve sitios con el método de cuadrados. Se identificaron las especies presentes y se calculó su valor de importancia relativo (VIR). Se determinaron los índices de Simpson y de Shannon y se realizó un análisis de agrupamiento de los sitios. Se tomaron muestras compuestas del sustrato y se determinaron sus propiedades físicas y químicas y el contenido de Cu, Pb, Zn, Mn, Ni y Cd. Se colectaron muestras de tejido vegetal de cada especie y se determinó la biomasa acumulada por sitio y la acumulada por especie, así como el contenido de EPT. El sustrato presentó una textura franco-arenosa, un pH medianamente alcalino y bajo contenido de materia orgánica. El Zn ($45.640 \text{ mg kg}^{-1}$) y el Pb ($14.710 \text{ mg kg}^{-1}$) fueron los EPT con mayor concentración en el sustrato. Se identificaron 25 especies de plantas. La especie *Haplopappus venetus* fue la que tuvo mayor VIR. El sitio 9 presentó la mayor dominancia (Índice de Simpson) y menor diversidad (Índice de Shannon) a diferencia del sitio 4 que presentó mayor diversidad y menor dominancia. El sitio 7 presentó la mayor biomasa (1997.23 g) y las especies *Haplopappus venetus* y *Brickelia veronicifolia* fueron las que mayor biomasa acumularon. *Solanum corymbosum* presentó la mayor acumulación de Cu (6.63 mg kg^{-1}), *Brickelia veronicifolia* en el caso de Pb (5.15 mg kg^{-1}) y Zn (20.33 mg kg^{-1}), *Atriplex suberecta* en Cd (1.82 mg kg^{-1}), *Cynodon dactylon* en Mn (69.84 mg kg^{-1}) y *Bouteloua curtipendula* en Ni (4.49 mg kg^{-1}). El análisis de semejanza arrojó que los sitios 2 y 8 son los de mayor semejanza (100%) y el sitio 5 no presentó ninguna semejanza con los demás. Se evidenció que el jal de mina presenta condiciones poco propicias para el desarrollo vegetal y sin embargo se encontraron un considerable número de especies de plantas creciendo en él. Dichas plantas han tolerado las condiciones adversas y la toxicidad de los EPT, llegando incluso a acumularlos en su tejido vegetal, lo que indica que tienen potencial en la restauración de sitios contaminados por actividades mineras.

Palabras clave: Jal de mina, elementos potencialmente tóxicos, restauración ecológica.

SUMMARY

1. INTRODUCCIÓN

México es uno de los países de Latinoamérica que se encuentra localizado en una región volcánica rica en minerales (Volke *et al.*, 2005), los cuales se han explotado como parte del sistema económico del país desde la segunda década del siglo XVI (Carrillo-González, 2005a). Resultado de dicha actividad se han generado residuos, a los que se les denomina con el nombre de “jales”, que incluyen los materiales producto de la excavación para encontrar las vetas y los sobrantes de la separación del mineral (Carrillo-González, 2005a). En México existen cientos de millones de toneladas de jales dispersos en el territorio nacional, de los que no se conocen sus condiciones y sus potenciales afectaciones al ambiente (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006). Los elementos asociados a los minerales explotados son variados y es común que su depósito en el suelo cause contaminación por un grupo de elementos (Alloway, 1995). En el caso de México, Gutiérrez y Moreno (1997) mencionan que los elementos potencialmente tóxicos (EPT) más comunes derivados del beneficio de los minerales con valor son Pb, Cd, Zn, As, Se y Hg.

Los jales son materiales no consolidados que están expuestos a deslave y lixiviación, provocando su dispersión y acumulación, tanto en el suelo como en los organismos vivos (Rorke, 2000; Puga *et al.*, 2006). Contienen cantidades relativamente altas de elementos cuya concentración natural es usualmente muy baja en el suelo, lo que hace de ellos residuos peligrosos (Carrillo-González, 2005a). Entre los principales problemas generados por los jales de mina se encuentran, la contaminación de mantos acuíferos y aguas superficiales debido a que pueden contener EPT, son una fuente de polvo dispersado por el viento, existe destrucción de hábitat, pérdida de productividad en la tierra y deterioro visual del paisaje (Payá, 1995; Cooke y Jonson, 2002). Son áreas que se caracterizan por poca vegetación o ninguna (Puga *et al.*, 2006), ya que no tienen condiciones propicias para el desarrollo vegetal (Danielson, 1991), puesto que además de su efecto tóxico, tienen otras limitantes para las plantas como bajo o nulo contenido de materia orgánica, valores extremos de pH, bajos niveles de elementos esenciales o baja fertilidad y baja agregación del suelo.

Estas desventajas hacen más difícil el establecimiento de las plantas y la consecuente recuperación del suelo (González-Chávez *et al.*, 2005). Sin embargo, conforme transcurre el tiempo, los jales son colonizados por la vegetación nativa (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006), a pesar de que la mayoría de las plantas son muy sensibles a los EPT que se encuentran en forma soluble en el suelo y cuando su concentración supera sus mecanismos de defensa pueden experimentar daños importantes (Puga *et al.*, 2006). Existe vegetación resistente que se adapta a estos ambientes con elevadas concentraciones de metales pesados y pueden colonizar esas áreas (Shaw, 1990), debido principalmente a que pueden concentrar en algunas de sus partes EPT (Puga *et al.*, 2006); por lo que las plantas pueden ser selectivas o no a la bioacumulación de dichos elementos, dándose generalmente una recolonización por plantas tolerantes a ellos (Ashley *et al.*, 2003).

Además de que la presencia de vegetación en los jales está relacionada con la presencia de EPT en los mismos, también deben considerarse las características de esa vegetación. De acuerdo con Grime (1982) las especies vegetales que colonizan áreas perturbadas, como es el caso de los jales, presentan características que están asociadas con la capacidad de colonización, entre las que se incluyen, sistema radical poderoso, leñoso y suculento que penetra las pequeñas fisuras del suelo a grandes profundidades, regeneración del brote a partir de yemas situadas cerca de la parte superior de la raíz principal, producción de miles de semillas pequeñas, que les permiten dispersarse a grandes distancias por la acción del viento, acumulación de reservas en órganos de propagación vegetativa y un sistema aéreo y subterráneo de rápido crecimiento. En este sentido, la vegetación puede ser utilizada como un indicador útil de la concentración de los EPT en un medio donde la raíz consume metales que pueden integrarse al ambiente a escalas espacial y temporal (Pugh and Freedman., 2002). Además de que la existencia de especies vegetales en las áreas contaminadas permite pensar en la posibilidad de usarlas para cubrir con vegetación suelos contaminados o sustratos desnudos y expuestos a los procesos dispersivos naturales (Díaz *et al.*, 2005).

El objetivo de este trabajo fue caracterizar el jal de mina “Dos Carlos” ubicado en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, a través de la determinación de las características físicas y químicas del sustrato, la riqueza de especies y parámetros ecológicos de la vegetación, así como el contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPT) tanto en el sustrato como en las especies vegetales presentes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Se estudió un jal de mina en la ciudad de Pachuca Hidalgo, ubicado dentro del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, en el cual se explotaron principalmente el oro y la plata. De esta última se produjo el 16% de la producción total mexicana, lo que representa el 6% de la plata extraída en las minas en todo el mundo durante cuatro siglos y medio de explotación (Geyne *et al.*, 1963). Este jal forma parte de un complejo de residuos dispersos en el Distrito Minero con un volumen de 107 659 225 ton. (COREMI, 1992).

Al jal objeto de estudio, se le conoce con el nombre de “Dos Carlos” y está ubicado a menos de 500 m de las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en las coordenadas extremas 20°06′ latitud norte, 98°43′ longitud oeste y 20°06′ latitud norte, 98°42′ longitud oeste. Presentó un área de 23 ha y una altura promedio de 20m. (Figura 1). Es producto de la acumulación de los residuos mineros de aproximadamente 200 años. El método de beneficio empleado en este Distrito Minero para la extracción del Au y Ag fue principalmente por amalgamación con Hg y por cianuración. En ningunos de los casos es posible la recuperación total de los compuestos y/o elementos adicionados, por los que es común encontrarlos en los jales en forma soluble. (Volke *et al.*, 2005).

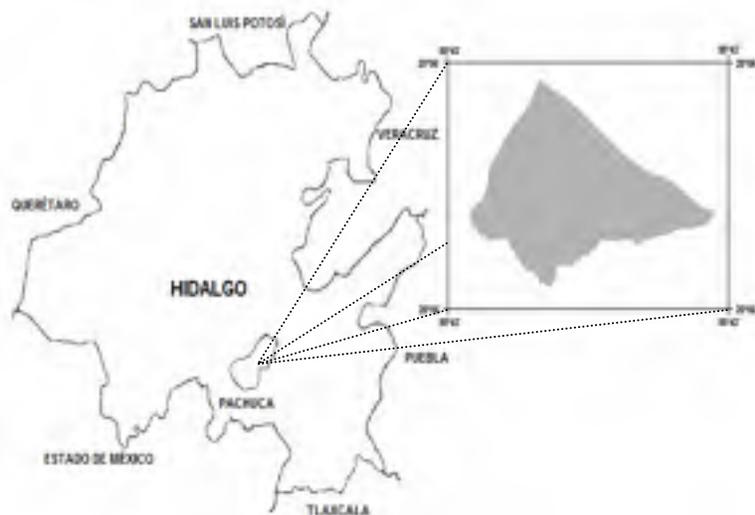


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

2.2. Fase de campo

Para la presente investigación se realizó un muestreo selectivo (Mason, 1992; Volke *et al.*, 2005), en el que se consideró la presencia de especies vegetales como elemento de selección, teniendo con ello un total de nueve sitios de muestreo. En cada sitio se midieron parámetros de la vegetación con el método de cuadrados (Sutherland, 1996). En este estudio sólo se consideraron las especies arbustivas y herbáceas que han colonizado el sitio. En cada sitio se ubicaron parcelas a cada 30 m. Las parcelas fueron de 4 x 4 m (16 m²) y de 1 x 1 m (1m²). En las primeras se identificaron y midieron las especies arbustivas y en las segundas las especies herbáceas de acuerdo a las recomendaciones de Higgins *et al.* (1994) y Sutherland (1996). En ambos tipos de parcelas se tomaron los datos de especie y dos diámetros para la estimación de la cobertura. En el caso de las especies de pastos cada macollo se consideró como una unidad. Se colectaron tres ejemplares de cada especie para su identificación botánica.

Para la caracterización físico-química del jal y el análisis de EPT, en cada sitio se tomó una muestra compuesta del sustrato. La muestra compuesta de cada sitio se integró con las submuestras tomadas en cada una de las parcelas que integraron cada uno de los sitios. Cada submuestra se tomó a una profundidad de 20 cm y fue de 250 g de peso. Al final cada muestra compuesta fue de un kilogramo de peso (Castellanos *et al.*, 2000).

Para la determinación de EPT en plantas, se colectaron diez ejemplares de cada especie vegetal presente en el jal, de acuerdo a lo propuesto por Gilbert (1987). Los ejemplares fueron colectados con raíz. Se consideró cubrir toda la superficie del jal tomando por lo menos un ejemplar de cada especie en cada sitio donde se presentó, hasta completar los diez individuos por especie. Los ejemplares fueron colocados en bolsas de papel.

2.3. Fase de laboratorio

Para la caracterización físico-química del jal se consideraron las siguientes variables con sus respectivas metodologías, de acuerdo a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Para la caracterización física se determinó densidad aparente (método de la probeta) y textura (método de Bouyoucos). Para la caracterización química se determinó pH (potenciómetro relación suelo:agua 1:2), porcentaje de materia orgánica (método de Walkley y Black), nitrógeno inorgánico (extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor), fósforo (método de Olsen) y cationes intercambiables K, Ca, Na y Mg (acetato de amonio 1N, pH 7.0).

Para la determinación de EPT, en este estudio se consideraron como tales al Cu, Zn, Pb, Mn y Cd, considerando lo mencionado por Alloway (1995), quien afirma que los principales elementos asociados con la explotación del Au y la Ag son el Cu, Pb, Zn, Te, As, Sb y Hg. En el caso particular de México Gutiérrez y Moreno (1997) mencionan además al Cd. Para la determinación de EPT en el sustrato y en las muestras de tejido vegetal se determinó la fracción extractable ya que es la que puede ser asimilable por las plantas. Se extrajeron con DTPA (ácido del dietilen-triamino-pentaácético) relación 1:4 y determinados por espectrometría de absorción atómica.

Para la determinación de la biomasa las muestras de tejido vegetal de cada especie fue separado en parte aérea y raíz y secadas en estufa a 70° C durante 36 h hasta alcanzar un peso constante, finalmente se pesó cada muestra.

2.4. Análisis de resultados

Los resultados de la caracterización físico-química se interpretaron con los parámetros propuestos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. La interpretación del contenido extractable de EPT tanto en el sustrato como en tejido vegetal se realizó con la misma norma y con los parámetros propuestos por Ankerman y Large (1977).

Los ejemplares de las especies vegetales fueron identificados botánicamente en el Herbario de Preparatoria Agrícola de la UACH, donde quedaron depositados para su consulta. Posteriormente se realizó un listado florístico del área. Con los datos obtenidos en campo se determinaron los parámetros ecológicos de frecuencia, densidad y cobertura en cada uno de los sitios. Con dichos parámetros se determinó el valor de importancia relativo de las especies (Müller-Dombois y Ellenberg, 1974). También se determinó en cada uno de los sitios el índice de dominancia de Simpson y el índice de diversidad de Shannon (Krebs, 1985)

Con los datos físico-químicas del jal y la presencia-ausencia de las especies vegetales en los sitios, se realizó un análisis de agrupamiento, basado en una medida de distancia y el método de unión de grupos. Se utilizó el programa PC-ORD, versión 4 (McCune y Mefford, 1999).

Se determinó la biomasa total acumulada en cada sitio y por cada una de las especies tanto total como la parte aérea y la raíz. También se determinó la relación existente entre la concentración de los EPT y la biomasa total que presenta cada sitio en 1 m^2 .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características físicas y químicas del jal de mina

La densidad aparente en el jal varió de 1.45 a 1.67, que de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, se puede considerar como alta y corresponde a suelos arenosos. Esta propiedad está relacionada con la textura, la cual fue franco arenosa, siendo su principal característica la baja capacidad para retener nutrientes y agua, debido a la alta proporción de poros grandes y el bajo contenido de arcillas (Castellanos *et al.*, 2000) (Cuadro 1). Los mismos autores mencionan que suelos franco arenosos presentan una densidad aparente de 1.40 a 1.60. Puga *et al.* (2006) encontraron que en jales de San Francisco del Oro, Chih., la textura fue areno-arcillosa.

Cuadro 1. Propiedades físicas del jal de mina.

Sitio	Densidad Aparente	Arena	Limo	Arcilla	Textura
		-----%-----			
1	1.55	58.2	36.0	5.8	FRANCO ARENOSO
2	1.55	62.2	30.0	7.8	FRANCO ARENOSO
3	1.56	54.2	30.0	15.8	FRANCO ARENOSO
4	1.47	56.2	30.0	13.8	FRANCO ARENOSO
5	1.56	70.2	22.0	7.8	FRANCO ARENOSO
6	1.52	60.2	28.0	11.8	FRANCO ARENOSO
7	1.55	62.2	34.0	3.8	FRANCO ARENOSO
8	1.67	56.2	32.0	11.8	FRANCO ARENOSO
9	1.45	66.2	24.0	9.8	FRANCO ARENOSO

El sustrato del jal presentó un pH de 7.0 a 7.6, el contenido de materia orgánica varió de 0.07 a 0.14 %, el contenido de nitrógeno inorgánico fue de 21.0 a 31.5 mg kg⁻¹ y el fósforo (P) fue de 0.1 a 6.0 mg kg⁻¹. En el caso de los cationes intercambiables el contenido de potasio (K) varió de 0.22 a 0.94 Cmol₍₊₎kg⁻¹, el contenido de sodio (Na) fue de 0.34 a 0.87 Cmol₍₊₎kg⁻¹, el contenido de calcio (Ca) fue de 6.8 a 29.8 Cmol₍₊₎kg⁻¹ y en el caso del magnesio (Mg) varió de 0 a 3.2 Cmol₍₊₎kg⁻¹ (Cuadro 2).

Cuadro 2. Propiedades químicas del jal de mina.

Sitio	pH [*]	Materia orgánica %	NI ^{**} mg kg ⁻¹	P	Cationes intercambiables			
					K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
					-----Cmol(+)kg ⁻¹ -----			
1	7.0	0.07	31.5	1.2	0.22	0.34	6.8	0.6
2	7.1	0.14	24.5	6.0	0.34	0.44	29.8	0
3	7.0	0.07	21.0	1.3	0.32	0.44	17.0	0.2
4	7.5	1.10	28.0	8.9	0.94	0.87	16.6	1.8
5	7.4	0.14	28.0	2.0	0.26	0.50	13.6	1.2
6	7.7	0.07	31.5	0.7	0.43	0.73	16.4	3.2
7	7.0	0.14	31.5	1.0	0.29	0.48	21.6	0.4
8	7.5	0.07	28.0	5.4	0.38	0.50	16.0	2.0
9	7.6	0.07	21.0	0.1	0.49	0.64	16.6	3.0

*H₂O (1:2)

**NI=Nitrógeno inorgánico

La interpretación de los resultados del análisis químico (Cuadro 3) se realizó consultando la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Se obtuvo que el pH del jal varió de neutro a medianamente alcalino, lo que hace suponer una baja disponibilidad de EPT, ya que como menciona McBride y Hendershot (1997) la solubilidad de varios elementos entre ellos Cu, Cd, Pb y Zn se relaciona inversamente con el pH. Esto es que a menor pH hay mayor disponibilidad de EPT para las plantas.

Sin embargo otros estudios en jales han referido valores de pH similares. Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach (2006) estudiaron jales de cianuración en el Distrito Minero de Guanajuato y encontraron valores de pH medianamente alcalinos. Carrillo-González (2005b) encontró que en tres jales de mina del estado de Zacatecas, el pH se presentó como alcalino. También se han reportado jales que van de ácidos a neutros, tal es el caso de un jal en Zacatecas que presentó un pH ligeramente ácido y en un jal de Temascaltepec Estado de México el pH varió de ligeramente ácido a neutro (Carrillo-González, 2005b). Puga *et al.* (2006) encontraron que en dos presas de jales de Chihuahua el pH varió de ligeramente ácido a neutro. Estos resultados hacen pensar que de acuerdo con las características particulares de cada jal es su reacción química.

El contenido de materia orgánica fue muy bajo en la mayoría de los sitios, lo que se relaciona con baja conductividad hidráulica, baja porosidad y mayor densidad aparente de los suelos, reflejándose en un medio ambiente poco propicio para la penetración radical y, por ende, en una baja fertilidad natural (Castellanos *et al.*, 2000). En otros estudios en jales de mina se ha encontrado que el bajo contenido de materia orgánica es una constante. Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach (2006) encontraron variaciones entre jales de 0.36 y 1.34%, considerándose en el rango de muy bajo a bajo. Carrillo-González (2005b) en el jal de Temascaltepec Estado de México encontró que el contenido de materia orgánica varió de bajo (0.6%) a alto (5.4%), presentándose el mayor contenido en la cima y el menor en las laderas.

Se encontró un contenido medio de nitrógeno inorgánico, lo cual de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) se puede deber a que a pH cercanos a la neutralidad se favorece la mineralización del nitrógeno, además de que dicha mineralización es mayor en suelos arenosos, como es el caso del jal. La importancia del nitrógeno radica en mayor medida en que es uno de los elementos esenciales para el desarrollo vegetal y que las necesidades de éste elemento dependen directamente del tipo de especie vegetal que se desarrolla en el sitio.

El contenido de fósforo (P) en el jal fue en general bajo, lo que repercute principalmente en la fertilidad y en consecuencia en el desarrollo vegetal. Es el segundo nutrimento en importancia y en cuanto a sus funciones en la planta, forma parte de compuestos orgánicos esenciales, entre ellos aminoácidos, proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos y clorofila (Castellanos *et al.*, 2000).

En cuanto a los cationes intercambiables se refiere, el contenido de potasio (K) fue muy heterogéneo ya que su concentración varió de bajo a alto, pasando por el contenido medio en algunos de los sitios. El potasio es de importancia para el crecimiento de las plantas ya que participa en la activación enzimática, transpiración, translocación de asimilados, la absorción de nitrógeno, las relaciones hídricas y energéticas, la síntesis de proteínas y los sistemas de defensa de las plantas (Castellanos *et al.*, 2000).

En el caso del Ca y Mg su contenido fue principalmente alto para el primero y muy variable para el caso del segundo. El calcio forma parte de la estructura de la pared celular, es fundamental para mantener la integridad de la membrana y coadyuva en varios sistemas enzimáticos. En cuanto al magnesio, su importancia radica en que forma parte de la molécula de clorofila y participa activamente en la actividad enzimática (Castellanos *et al.*, 2000).

Cuadro 3. Interpretación de propiedades químicas del jal de mina.

Sitio	pH	Materia Orgánica*	NI	P	Cationes intercambiables		
					K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
1	Neutro	Muy bajo	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Bajo
2	Neutro	Muy bajo	Medio	Medio	Medio	Alto	No presentó
3	Neutro	Muy bajo	Medio	Bajo	Medio	Alto	Muy bajo
4	Medianamente alcalino	Bajo	Medio	Medio	Alto	Alto	Medio
5	Medianamente alcalino	Muy bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Bajo
6	Medianamente alcalino	Muy bajo	Medio	Bajo	Medio	Alto	Alto
7	Neutro	Muy bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Muy bajo
8	Medianamente alcalino	Muy bajo	Medio	Bajo	Medio	Alto	Medio
9	Medianamente alcalino	Muy bajo	Medio	Bajo	Medio	Alto	Medio

*Se interpretó con los valores de referencia para suelos no volcánicos.

De los EPT extractables, el que presentó mayor concentración en el jal fue el Zn con un contenido promedio de 45.640 mg kg⁻¹, seguido del Pb con 14.710 mg kg⁻¹. El menor contenido lo presentaron el Cd con 0.981 mg kg⁻¹ y el Ni con 0.168 mg kg⁻¹ (Cuadro 4).

Cuadro 4. Contenido extractables de EPT en el jal de mina.

Sitio	Elementos potencialmente tóxicos					
	Cu	Pb	Cd	Mn	Zn	Ni
	-----mg kg ⁻¹ -----					
1	6.382	16.800	1.234	4.250	47.48	0.136
2	3.628	4.398	0.838	3.652	42.26	0.264
3	6.348	5.540	0.960	4.362	75.76	0.182
4	7.340	19.500	0.994	1.930	44.00	0.172
5	3.622	21.800	1.016	3.070	42.14	0.166
6	6.928	34.400	1.730	1.984	91.76	0.118
7	5.644	5.482	0.916	15.000	32.84	0.266
8	3.132	7.428	0.608	1.140	34.08	0.132
9	3.080	17.040	0.536	2.054	0.444	0.078
Media	5.123	14.710	0.981	4.160	45.640	0.168

El Cu, Zn y Mn se clasifican como micronutrientes, porque son esenciales para mantener el potencial productivo del suelo aunque su consumo sea en pequeñas cantidades por las plantas (Castellanos *et al.*, 2000). De acuerdo con Ankerman y Large (1977), el contenido de Cu y Zn fue muy alto, en contraste con el Mn cuyo contenido fue muy bajo. Para los EPT restantes (Cd, Pb y Ni) se interpretaron con los parámetros de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, teniendo que el Cd rebasó el contenido considerado como normal, aunque sin llegar a una concentración peligrosa. El Pb y Ni se encontraron dentro del contenido normal de acuerdo con la norma.

Es importante mencionar que muchos rangos para determinar contenidos peligrosos de EPT están dados en contenidos totales, sin embargo en este estudio se determinaron los contenidos extractables que es la parte del contenido total que puede asimilar la planta, por lo que pudiera pensarse que los resultados de EPT no son peligrosos en el área de estudio. Sin embargo, se encontró que en el caso de algunos EPT determinados ya hay señales importantes de contaminación. A pesar de que las concentraciones no rebasen los umbrales permisibles, su contenido rebasa lo que de manera natural contiene un suelo, en el caso del Cd, Bowen (1979) menciona que la concentración normal de Cd en un suelos es de 0.35 mg kg^{-1} .

Estos resultados contrastan por los obtenidos por Carrillo-González (2005b) en jales de Zacatecas y Estado de México, quien encontró que las mayores concentraciones extractables de EPT en cada uno de los jales estudiados corresponden al Pb, Zn y Mn. Las menores concentraciones corresponden al Cd y Ni (Cuadro 5).

Cuadro 5. Concentración media de EPT extractables en jales de Zacatecas y estado de México.

Sitio	Elementos potencialmente tóxicos					
	Cu	Pb	Cd	Mn	Zn	Ni
	-----mg kg ⁻¹ -----					
El Bote Zac.	7.3	167.5	8.2	13.5	22.4	0
Sombrero Zac.	21.8	21.5	8.3	0.7	139.5	0.3
Fresnillo Zac.	26.6	8.8	12.6	178.0	97.4	0.2
Noria de los Á. Zac.	2.3	84.7	1.1	6.5	14.1	0.5
Temascaltepec Méx.	1.3	4.4	0.4	11.6	35.5	0.4

Fuente: Carrillo-González (2005).

3.2. Listado florístico

Se identificaron 25 especies pertenecientes a siete familias botánicas, siendo las más representativas Asteraceae con nueve especies y Poaceae con siete especies (Cuadro 6). La familia que mayor número de especies presenta en el jal es Asteraceae, lo cual puede ser consecuencia de que como menciona Díaz *et al.* (2005), ésta es una de las familias con mayor número de especies en el mundo y además presenta uno de los mecanismos de dispersión más eficientes, ya que sus semillas son principalmente anemócoras.

Cuadro 6. Listado florístico del jal de mina.

Familia	Especie
Cactaceae	<i>Opuntia</i> sp. (1)
	<i>Opuntia</i> sp. (2)
Asteraceae	<i>Bahia pringlei</i> Greenm.
	<i>Haplopappus venetus</i> (HBK) Blake
	<i>Montanoa tomentosa</i> Cerv.
	<i>Brickelia veronicifolia</i> (HBK) Gray
	<i>Eupatorium vernicosum</i> Sch. Bip.
	<i>Parthenium bipinnatifidum</i> (Ort) Rollis
	<i>Artemisia klotzschiana</i> Besser
	<i>Zaluzania triloba</i> (Ort) Pers
	<i>Baccharis</i> sp.
Poaceae	<i>Stipa constricta</i> Hitchc.
	<i>Stipa tenuissima</i> Trin.
	<i>Lycurus phleoides</i> H.B.K.
	<i>Muhlenbergia repens</i> (Presl.) Hitchc.
	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.
	<i>Bouteloua curtispindula</i> (Michx.)
	<i>Leptochloa dubia</i> (HBK) Nees
Leguminosae	<i>Dalia obovatifolia</i> Ort.
	<i>Medicago polymorpha</i> L.
Chenopodiaceae	<i>Atriplex</i> sp.
	<i>Atriplex suberecta</i> Verdoorn.
Solanaceae	<i>Solanum corymbosum</i> Jacq.
	<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.
Cruciferae	<i>Eruca sativa</i> L.

En otros estudios en jales de mina se ha encontrado una mayor diversidad vegetal. Franco (2005) en un jal de mina de la Sierra de Catorce S.L.P. encontró 34 especies de plantas pertenecientes a 15 familias, siendo Asteraceae la más representativa. Díaz *et al.* (2005) en jales de Zacatecas encontraron 44 especies pertenecientes a 19 familias, siendo Asteraceae, Poaceae y Solanaceae las que se encontraron más comúnmente.

Los mismos autores en un jal de mina de Temascaltepec Méx. identificaron 29 especies vegetales pertenecientes a 12 familias, siendo Asteraceae, Leguminosae y Poaceae las especies más abundantes. Esta condición no sólo se ha observado en jales donde se extrajeron metales, sino también en bancos de material abandonados, Muñoz *et al.* (2006) reportaron 50 especies vegetales representadas en nueve familias botánicas, siendo las especies dominantes de las familias Poaceae, Asteraceae y Leguminosae.

Entre las especies que fueron encontradas en este estudio y que han sido reportadas en otros trabajos en jales de mina, se encuentran *Brickelia veronicifolia*, *Zaluzania triloba*, *Solanum elaeagnifolium*, *Stipa tenuissima*, *Bouteloua curtipendula*, *Haplopappus venetus* y *Cynodon dactylon* (Franco, 2005; Díaz *et al.*, 2005; Puga *et al.*, 2006; Muñoz *et al.*, 2006).

3.3. Indicadores ecológicos

Tres atributos básicos de la vegetación son densidad, frecuencia y cobertura. Sus variaciones pueden deberse a la composición de especies vegetales, estación del año, uso por animales y humanos y características edáficas y climáticas de la región (Zaragoza, 2001), así como la perturbación del lugar y la posible contaminación. Se encontró que en ocho de los nueve sitios la especie que presentó la mayor frecuencia relativa fue *Haplopappus venetus*, con valores que van de 20 a 40%. En los sitios 4 y 9 esta especie fue la más frecuente junto con *Lycurus phleoides* para el sitio 4 y con *Stipa constricta* para el sitio 9. En el sitio 5 ocupó el segundo lugar en frecuencia con un valor de 14.29%, superada por *Brickelia veronicifolia* con 17.86%. En el caso de la densidad relativa las especies que presentaron los valores más altos fueron *Lycurus phleoides* con valores de 20 a 70% en cuatro sitios, *Muhlenbergia repens* en dos sitios con valores superiores a 40% y *Stipa constricta* en dos sitios con valores de 40 a 74%. En el sitio 6 *Stipa constricta* y *Eruca sativa* tuvieron el mismo valor en densidad relativa, 31.37%. La cobertura relativa de las especies se comportó muy similar a la frecuencia. *Haplopappus venetus* fue la especie con el mayor porcentaje de cobertura con valores de 51 a 70% en siete sitios. Para el sitio 5 la especie con mayor cobertura fue *Brickelia veronicifolia* con 26.04% y para el sitio 6 fue *Eupatorium vernicosum* con 59.09% (Cuadro 7).

Cuadro 7. Indicadores ecológicos de las especies en los sitio de muestreo.

Especie	FR*	DR*	CR*	Especie	FR*	DR*	CR*
SITIO 1				SITIO 5			
-----%-----				-----%-----			
<i>Haplopappus venetus</i>	31.25	3.41	51.80	<i>Montanoa tomentosa</i>	3.57	0.12	3.86
<i>Stipa constricta</i>	25.00	26.02	20.47	<i>Eupatorium vernicosum</i>	7.14	0.35	8.41
<i>Lycurus phleoides</i>	31.25	70.24	24.87	<i>Brickelia veronicifolia</i>	17.86	1.85	26.04
<i>Opuntia sp (1)</i>	6.25	0.16	0.88	<i>Lycurus phleoides</i>	10.71	20.37	10.66
<i>Opuntia sp (2)</i>	6.25	0.16	1.98	<i>Haplopappus venetus</i>	14.29	1.39	15.27
SITIO 2				SITIO 6			
-----%-----				-----%-----			
<i>Haplopappus venetus</i>	30	5.71	70.04	<i>Eruca sativa</i>	16.67	31.37	6.27
<i>Stipa constricta</i>	10	5.89	3.14	<i>Muhlenbergia repens</i>	5.56	23.53	1.04
<i>Lycurus phleoides</i>	10	20.63	7.90	<i>Haplopappus venetus</i>	27.78	5.88	16.58
<i>Muhlenbergia repens</i>	20	44.20	12.84	<i>Stipa constricta</i>	22.22	31.37	13.05
<i>Eruca sativa</i>	20	11.79	2.36	<i>Eupatorium vernicosum</i>	22.22	7.60	59.09
<i>Cynodon dactylon</i>	10	11.79	3.71	<i>Opuntia sp (1)</i>	5.56	0.24	3.96
SITIO 3				SITIO 7			
-----%-----				-----%-----			
<i>Haplopappus venetus</i>	40	3.03	53.69	<i>Haplopappus venetus</i>	31.58	8.27	66.36
<i>Bahia pringlei</i>	20	4.62	2.34	<i>Stipa constricta</i>	26.32	37.97	18.48
<i>Medicago polymorpha</i>	10	20.78	8.54	<i>Eruca sativa</i>	21.05	23.57	8.09
<i>Solanum elaeagnifolium</i>	10	30.01	9.26	<i>Lycurus phleoides</i>	15.79	30.11	6.49
<i>Lycurus phleoides</i>	20	41.56	26.17	<i>Baccharis sp</i>	5.26	0.08	0.59
SITIO 4				SITIO 8			
-----%-----				-----%-----			
<i>Haplopappus venetus</i>	20.83	4.33	48.92	<i>Haplopappus venetus</i>	28.57	6.82	59.70
<i>Baccharis sp</i>	8.33	0.39	7.80	<i>Eupatorium vernicosum</i>	14.29	0.51	15.24
<i>Lycurus phleoides</i>	20.83	51.97	23.25	<i>Stipa constricta</i>	7.14	18.53	13.72
<i>Stipa constricta</i>	8.33	6.19	2.45	<i>Stipa tenuissima</i>	14.29	12.36	4.71
<i>Stipa tenuissima</i>	4.17	6.19	2.25	<i>Muhlenbergia repens</i>	14.29	49.42	4.96
<i>Dalia obovatifolia</i>	4.17	2.47	1.26	<i>Lycurus phleoides</i>	14.29	10.30	1.16
<i>Leptochloa dubia</i>	4.17	3.71	3.45	<i>Cynodon dactylon</i>	7.14	2.06	0.51
<i>Medicago polymorpha</i>	4.17	2.47	0.35	SITIO 9			
<i>Artemisia klotzschiana</i>	4.17	1.24	0.15	-----%-----			
<i>Parthenium bipinnatifidum</i>	4.17	6.19	4.00	<i>Haplopappus venetus</i>	40	8.57	66.79
<i>Atriplex suberecta</i>	4.17	4.95	2.69	<i>Stipa constricta</i>	40	73.85	29.60
<i>Zaluzania triloba</i>	4.17	1.24	0.50	<i>Lycurus phleoides</i>	20	17.58	3.61
<i>Solanum elaeagnifolium</i>	4.17	3.71	0.91				
<i>Muhlenbergia repens</i>	4.17	4.95	2.04				

*FR=Frecuencia relativa

DR=Densidad relativa

CR=Cobertura relativa

En cuanto al valor de importancia relativo (VIR) de las especies, *Haplopappus venetus* tiene el mayor VIR en los sitios 2 (35%), 3 (32%), 7 (35%) y 8 (32%); *Lycurus phleoides* en los sitios 1 (42%) y 4 (32%); *Brickelia veronicifolia* en el sitio 5 (15%), *Eupatorium vernicosum* en el sitio 6 (30%) y *Stipa constricta* en el sitio 9 con 48% (Figura 2). A diferencia de este estudio Muñoz *et al.* (2006) encontraron que las especies *Rhynchelytrum repens*, *Tagetes micrantha*, *Aeschynomene villosa* var. *Longifolia* y *Cynodon dactylon* son las que mayores valores de importancia presentaron en minas de explotación geológica a cielo abierto en La Primavera Jalisco. En este sentido la diferencia entre las especies puede deberse principalmente a la diferencia existente entre la vegetación nativa de cada lugar y al tipo de explotación minera de cada sitio.

3.4. Índices de diversidad

La dominancia en el jal se expresó a través del índice de Simpson, teniendo el mayor valor en el sitio 9 y el menor en el sitio 5, a diferencia de la diversidad, la cual se expresó a través del índice de Shannon, y en el que el mayor valor se presentó en el sitio 5 y el menor en el sitio 9. Las diferencias comparativas entre la dominancia y la diversidad en los sitios 5 y 9, expresa que ante un alta dominancia existe una baja diversidad (sitio 9) y a una baja dominancia existe una alta diversidad (sitio 5) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Índices de dominancia de Simpson y diversidad de Shannon.

Sitio	Índice de Simpson	Índice de Shannon
1	0.358	1.651
2	0.320	2.012
3	0.257	2.074
4	0.266	2.560
5	0.122	3.188
6	0.280	2.091
7	0.402	1.656
8	0.341	1.993
9	0.470	1.253

3.5. Análisis de biomasa

La biomasa es la suma total de la materia viva en una unidad de área dada y expresa el rendimiento biológico, además de que es potencialmente una fuente renovable para el almacenamiento temporal de EPT. En cuanto a la biomasa presente en cada sitio, se tiene que el sitio 7 es el que tiene una mayor biomasa (1997.23 g) y en contraste el sitio 5 es el que presenta la menor cantidad con 332.63 g (Figura 3).

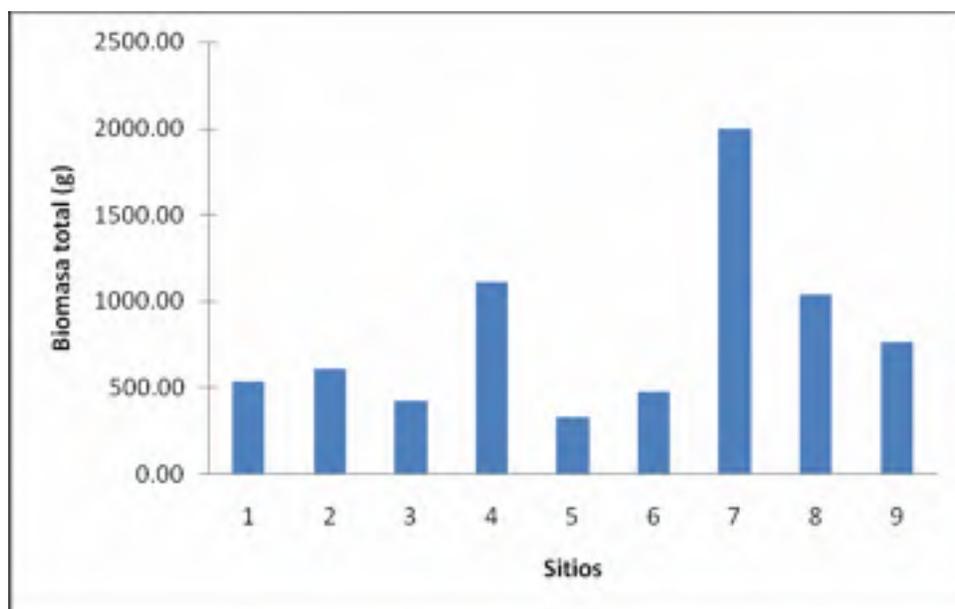


Figura 3. Biomasa total acumulada en cada sitio.

Las especies que presentaron la mayor biomasa fueron *Haplopappus venetus*, *Brickelia veronicifolia*, *Eruca sativa*, *Lycurus phleoides*, *Stipa constricta*, *Solanum elaeagnifolium* y *Leptochloa dubia* (Cuadro 9).

Cuadro 9. Biomasa total que presentan las especies en el jal.

Especie	Biomasa total
	-----g-----
<i>Haplopappus venetus</i> (HBK) Blake	7095.52
<i>Brickelia veronicifolia</i> (HBK) Gray	68.05
<i>Eruca sativa</i> L.	32.20
<i>Lycurus phleoides</i> H.B.K.	27.66
<i>Stipa constricta</i> Hitchc.	26.99
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	15.82
<i>Leptochloa dubia</i> (HBK) Nees	10.47
<i>Solanum corymbosum</i> Jacq.	6.16
<i>Stipa tenuissima</i> Trin.	5.72
<i>Muhlenbergia repens</i> (Presl.) Hitchc.	3.32
<i>Bouteloua curtipendula</i> (Michx.)	3.08
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	2.44
<i>Atriplex</i> sp	1.68
<i>Dalia obovatifolia</i> Ort.	1.30
<i>Parthenium bipinnatifidum</i> (Ort) Rollis	1.22
<i>Atriplex suberecta</i> Verdoorn.	1.14
<i>Zaluzania triloba</i> (Ort) Pers	1.05
<i>Artemisia klotzschiana</i> Besser	0.94

Sin embargo, a diferencia de la biomasa acumulada por especie, los individuos de las especies *Haplopappus venetus*, *Brickelia veronicifolia*, *Solanum corymbosum* y *Zaluzania triloba* son los que mayor biomasa poseen a nivel de individuo. Del total de las especies, se encontró que la mayoría presentan una mayor biomasa en la parte aérea, a diferencia de *Brickelia veronicifolia*, *Solanum elaeagnifolium* y *Lycurus phleoides*, quienes presentaron una mayor biomasa en la raíz (Cuadro 10).

Cuadro 10. Biomasa promedio de un individuo de cada especie.

Especie	Biomasa		
	Parte aérea	Raíz	Total
	-----g-----		
<i>Haplopappus venetus</i> (HBK) Blake	11.65	7.85	19.49
<i>Brickelia veronicifolia</i> (HBK) Gray	1.45	2.81	4.25
<i>Solanum corymbosum</i> Jacq.	1.32	0.22	1.54
<i>Zaluzania triloba</i> (Ort) Pers	0.85	0.20	1.05
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	0.48	0.51	0.99
<i>Artemisia klotzschiana</i> Besser	0.84	0.09	0.94
<i>Leptochloa dubia</i> (HBK) Nees	0.48	0.39	0.87
<i>Eruca sativa</i> L.	0.69	0.12	0.80
<i>Dalia obovatifolia</i> Ort.	0.33	0.32	0.65
<i>Bouteloua curtipendula</i> (Michx.)	0.47	0.15	0.62
<i>Atriplex</i> sp	0.48	0.08	0.56
<i>Stipa tenuissima</i> Trin.	0.42	0.10	0.52
<i>Atliplex suberecta</i> Verdoorn.	0.41	0.06	0.48
<i>Stipa constricta</i> Hitchc.	0.24	0.09	0.32
<i>Parthenium bipinnatifidum</i> (Ort) Rollis	0.18	0.06	0.24
<i>Lycurus phleoides</i> H.B.K.	0.09	0.11	0.20
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	0.11	0.05	0.16
<i>Muhlenbergia repens</i> (Presl.) Hitchc.	0.04	0.03	0.07

3.6. Acumulación de elementos potencialmente tóxicos en la vegetación

Las especies de plantas presentes en el jal acumularon en mayor o en menor medida EPT en su biomasa. De estas especies destacaron *Solanum corymbosum* y *Leptochloa dubia* con la mayor acumulación de Cu, *Brickelia veronicifolia* y *Leptochloa dubia* acumularon las mayores cantidades de Pb, *Atliplex suberecta* y *Artemisia klotzschiana* en Cd, *Brickelia veronicifolia* y *Cynodon dactylon* en Zn, *Cynodon dactylon* y *Leptochloa dubia* en Mn y *Bouteloua curtipendula* y *Muhlenbergia repens* en Ni (Cuadro 11).

Cuadro 11. Acumulación de EPT en las especies.

Especie	Elementos Potencialmente Tóxicos					
	Cu	Pb	Cd	Zn	Mn	Ni
	-----mg kg ⁻¹ -----					
<i>Haplopappus venetus</i> (HBK) Blake	2.23	2.30	0.32	14.11	16.68	0.63
<i>Brickelia veronicifolia</i> (HBK) Gray	2.26	5.15	0.66	20.33	21.19	0
<i>Solanum corymbosum</i> Jacq.	6.63	2.11	0.11	9.17	9.08	0
<i>Zaluzania triloba</i> (Ort) Pers	1.11	4.13	0.13	1.81	2.68	0.46
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.	1.16	4.08	0.28	14.55	13.88	0.29
<i>Artemisia klotzschiana</i> Besser	1.75	3.98	1.59	0.59	9.06	0
<i>Leptochloa dubia</i> (HBK) Nees	2.65	4.98	0.30	10.18	45.79	0.75
<i>Eruca sativa</i> L.	0.59	3.96	0.25	3.69	4.53	0.57
<i>Dalia obovatifolia</i> Ort.	1.26	4.68	0.23	5.08	16.31	0.60
<i>Bouteloua curtipendula</i> (Michx.)	1.57	2.06	0.00	14.13	19.34	4.49
<i>Atriplex</i> sp	1.00	3.73	0.34	4.25	28.80	0
<i>Stipa tenuissima</i> Trin.	0.68	3.32	0.48	2.22	10.11	0
<i>Atliplex suberecta</i> Verdoorn.	1.71	3.93	1.82	2.45	6.10	0.17
<i>Stipa constricta</i> Hitchc.	2.19	3.89	0.36	9.72	18.47	0.19
<i>Parthenium bipinnatifidum</i> (Ort) Rollis	1.73	3.70	0.16	3.51	2.75	0
<i>Lycurus phleoides</i> H.B.K.	1.63	3.59	0.24	5.53	22.84	0.45
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	1.93	4.21	0.29	16.03	69.84	0
<i>Muhlenbergia repens</i> (Presl.) Hitchc.	0.75	4.02	0.28	4.55	15.76	3.46

Se pudo observar que la mayoría de las especies no son selectivas en la acumulación de EPT aunque si en las cantidades acumuladas de cada uno de ellos. El EPT que menor acumulación presentó en las especies fue el Ni, ya que solamente 11 especies lo acumularon en su biomasa. Esto se pudo deber a que el Ni no es requerido por las plantas (no es considerado micronutriente) y además de que el fue el elemento con menor contenido en el sustrato.

También se encontró que la concentración de EPT en las plantas superó en algunos casos en contenido extractable en el sustrato. Esto nos indica que la mayoría del contenido extractable de los EPT en el suelo está siendo asimilado por las plantas, por lo que podemos considerarlas como especies tolerantes a los EPT por desarrollarse en un ambiente medianamente contaminado y acumuladores por presentar EPT en su biomasa.

De las especies que destacaron por su acumulación de EPT algunas ya han sido referidas en otras investigaciones. Puga et al. (2006) encontraron que *Cynodon dactylon* presentó altas concentraciones de As y Zn (consideradas como fitotóxicas) en jales de Chihuahua. Madejón *et al.* (2001) la considera acumuladora de Zn y otros autores la consideran remediadora de suelos, ya que es una especie que presenta una respuesta de correlación directa entre el grado de exposición al EPT y su tolerancia (Kim and Kim, 1996; Smith *et al.*, 1998; García *et al.*, 1997 y Kalandadze, 2003). Además de que esta especie se ha encontrado manteniendo poblaciones bacterianas fijadoras de nitrógeno atmosférico en suelos contaminados por hidrocarburos (Hernández-Acosta *et al.*, 2006) y Reyes (2007) encontró que presenta alta capacidad de absorber Ni y Zn en suelos irrigados con aguas residuales y alto contenido de metales pesados en Hidalgo, Méx.

Especies del género *Atriplex* han sido reportadas como plantas hiperacumuladoras de Se, tal es el caso de las especies *Atriplex confertifolia* y *Atriplex patula* (Beath *et al.*, 1939; Wu, 1994). Para el caso de el género *Haplopappus* también se ha reportado su utilización en la biorremediación de sitios contaminados con Se (Rosenfield and Beath, 1964). El género *Leptochloa* se ha reportado como acumulador de sales en suelos agrícolas (NIAB, 1987).

A pesar del contenido de EPT en su biomasa, estas plantas no presentaron daños físicos en su apariencia, ya que, posiblemente han desarrollado mecanismos bioquímicos para evadir su acción tóxica. El que las plantas no presenten daños sugiere que algunas de las especies estudiadas pudieran tomarse en cuenta para biorremediación de suelos contaminados. Hernández (2001) menciona que las plantas tienen habilidad de desarrollar resistencia contra daños ocasionados por metales pesados, por un carácter fijado genéticamente, pero modificable por adaptación.

En relación a la concentración de EPT de acuerdo a la biomasa total que presenta cada sitio en 1m² se encontró que en el sitio 7 se presenta la mayor concentración de Mn, Zn, Pb, Cu, Cd y Ni. El sitio que menor concentración presentó fue el sitio 6 (Figura 4). Esto se debió a que de manera general el sitio 7 fue el que mayor biomasa presentó en el jal.

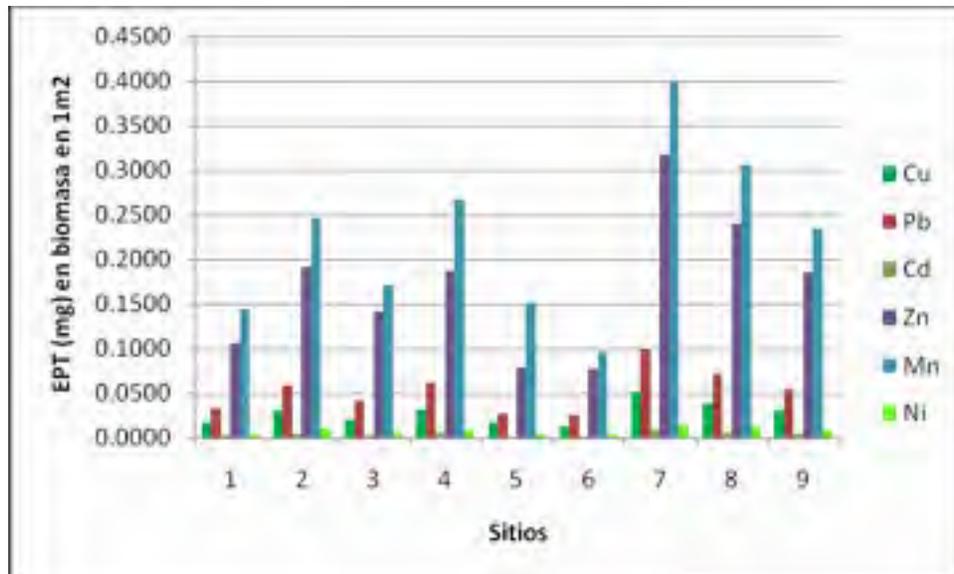


Figura 4. Concentración extractable de EPT en la biomasa total acumulada en cada sitio.

La especie que mayor concentró EPT por metro cuadrado fue *Haplopappus venetus*, seguida de *Stipa constricta* y *Lycurus phleoides* (Figura 5).

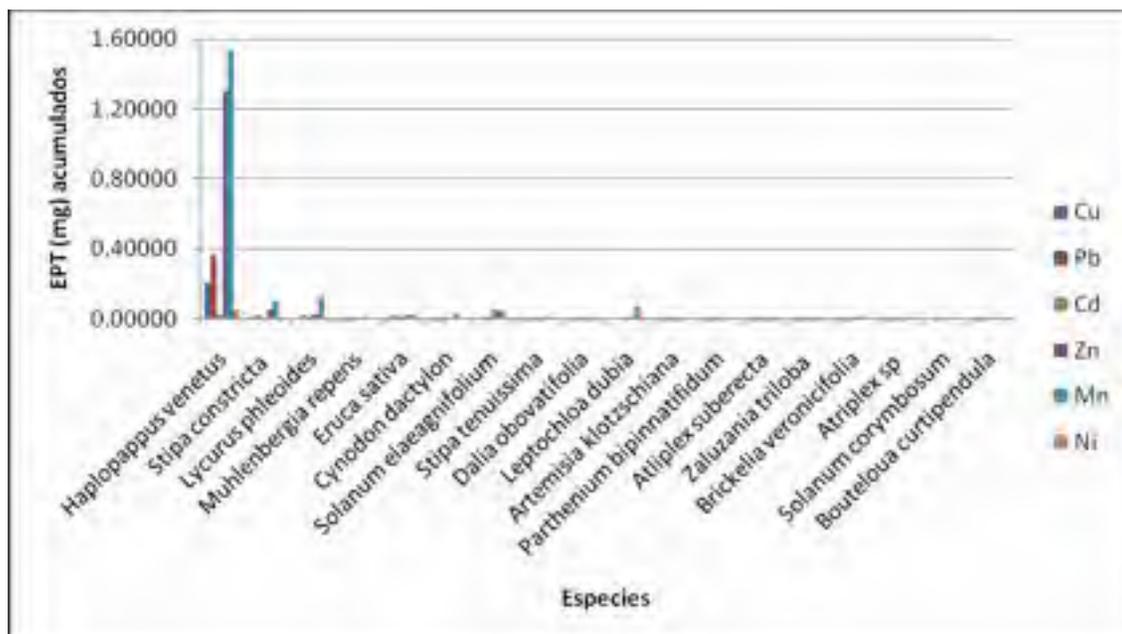


Figura 5. Total de EPT acumulado por cada especie en el jal.

A diferencia de lo aquí presentado, Carrillo-González (2005) encontró en los residuos de la mina “El Bote” en Zacatecas que las plantas establecidas en el jal presentan alta concentración de Zn en su parte aérea. Entre éstas especies se encuentran *Tagetes lunulata*, *Bouvardia ternifolia* y *Dalea bicolor*. En el caso de Cd y Zn, las especies con mayor contenido de estos EPT fueron *Teloxys graveolens*, *Jatropha dioca* y *Polygonum aviculare* para Cd y *Polygonum aviculare*, *Teloxys graveolens* y *Asclepias linaria*.

3.7. Análisis de semejanza

En relación a la afinidad entre sitios se encontró que los sitios 2 y 8, son los de mayor afinidad (100%), el sitio 6 fue el más cercano en composición de especies a ambos sitios (75%), seguido por el grupo conformado por los sitios 1, 9 y 7 con una afinidad mayor al 50%. De acuerdo con el nivel de corte elegido los sitios 3 y 4 formaron un grupo independiente al de los demás sitios, con una afinidad menor al 25%. El sitio 5 no presentó ninguna semejanza con los demás sitios (Figura 6).

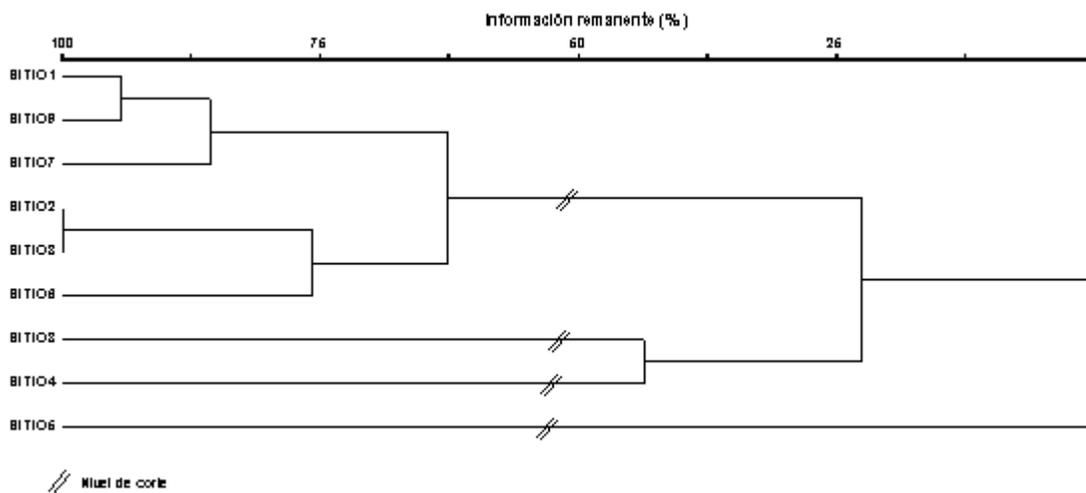


Figura 6. Dendrograma de afinidad entre sitios a través del Índice de semejanza de Jaccard y método de unión promedio entre grupos.

La alta semejanza entre los sitios 2 y 8 se debió a que compartieron cuatro especies: *Haplopappus venetus*, *Stipa constricta*, *Lycurus phleoides* y *Cynodon dactylon*, las cuales representaron el 80% del total de las especies presentes en el sitio 2 y el 57% de las especies del sitio 8. Los sitios 3 y 4 presentaron ocho especies que sólo fueron encontradas en alguno de los dos sitios o en ambos y que no comparten con el resto de los sitios. Éstas especies fueron *Zaluzania triloba*, *Solanum elaeagnifolium*, *Artemisia klotzschiana*, *Dalia obovatifolia*, *Atliplex suberecta*, *Parthenium bipinnatifidum*, *Bahia pringlei* y *Medicago polymorpha*. La única especie que se presentó en todos los sitios fue *Haplopappus venetus*, seguida de *Lycurus phleoides* que se presentó en ocho sitios y *Stipa constricta* en siete.

4. CONCLUSIONES

El jal presentó una textura franco-arenoso con una densidad alta. El pH varió de neutro a medianamente alcalino. El contenido de materia orgánica fue muy bajo y el de nitrógeno inorgánico fue medio. El contenido de fósforo fue bajo a diferencia del contenido de calcio que fue alto. El potasio y el magnesio variaron de bajo a alto.

La mayor concentración extractable de EPT la presentó el Zn ($45.640 \text{ mg kg}^{-1}$) seguido del Pb ($14.710 \text{ mg kg}^{-1}$). El menor contenido lo presentaron el Cd (0.981 mg kg^{-1}) y el Ni (0.168 mg kg^{-1}). Si se considera que el Cu, Zn y Mn tienen función como micronutrientes, el contenido encontrado de Cu y Zn es alto a diferencia del contenido de Mn, que resultó ser muy bajo. El contenido de Pb y Ni se considera como normal y el de Cd aunque rebasa el contenido considerado como normal no llega a un contenido peligroso.

Se identificaron 25 especies de plantas pertenecientes a siete familias botánicas, siendo las más representativas Asteraceae con nueve especies y Poaceae con siete especies. Se encontró que en ocho de los nueve sitios la especie que presentó la mayor frecuencia relativa fue *Haplopappus venetus*, con valores que van de 20 a 40%. En el caso de la densidad relativa las especies que presentaron los valores más altos fueron *Lycurus phleoides* con valores de 20 a 70% en cuatro sitios, *Muhlenbergia repens* en dos sitios con valores superiores a 40% y *Stipa constricta* en dos sitios con valores de 40 a 74%. *Haplopappus venetus* fue la especie con el mayor porcentaje de cobertura relativa con valores de 51 a 70% en la mayoría de los sitios.

En cuanto al valor de importancia relativo (VIR) de las especies, *Haplopappus venetus* tiene el mayor VIR en cuatro sitios con valor superior al 30%. En los sitios restantes destacaron *Lycurus phleoides* con valores de 32 a 42%, *Brickelia veronicifolia* con 15%, *Eupatorium vernicosum* con 30% y *Stipa constricta* con 48%.

La mayor dominancia, expresada en el Índice de Simpson se presentó en el sitio 9 y la menor en el sitio 4, a diferencia de la diversidad expresada a través del Índice de Shannon, donde la mayor diversidad se presentó en el sitio 4 y la menor en el sitio 9.

El sitio 7 fue el que presentó una mayor biomasa con 1997.23 g., contrastando con el sitio 5 que presentó la menor cantidad con 332.63 g. Las especies que presentaron la mayor biomasa fueron *Haplopappus venetus*, *Brickelia veronicifolia*, *Eruca sativa*, *Lycurus phleoides*, *Stipa constricta*, *Solanum elaeagnifolium* y *Leptochloa dubia*. Sin embargo, a diferencia de la biomasa acumulada por especie, los individuos de las especies *Haplopappus venetus*, *Brickelia veronicifolia*, *Solanum corymbosum* y *Zaluzania triloba* fueron las que mayor biomasa presentaron.

En cuanto a la cantidad de EPT que acumulan las especies se encontró que *Solanum corymbosum* presentó mayor acumulación de Cu, *Brickelia veronicifolia* es el caso de Pb y Zn, *Atliplex suberecta* para Cd, *Cynodon dactylon* en Mn y *Bouteloua curtipendula* en Ni. En la relación entre la concentración de EPT y la biomasa total presente en cada sitio en 1m², se encontró que en el sitio 7 se presenta la mayor concentración de Mn, Zn, Pb, Cu, Cd y Ni, a diferencia sitio 6 que tuvo la menor acumulación de EPT. La especie con mayor concentración de EPT por metro cuadrado fue *Haplopappus venetus*, seguida de *Stipa constricta* y *Lycurus phleoides*.

El análisis de semejanza arrojó que existe una alta afinidad entre los sitios 2 y 8 debido a que compartieron cuatro especies: *Haplopappus venetus*, *Stipa constricta*, *Lycurus phleoides* y *Cynodon dactylon*, las cuales representaron el 80% del total de las especies presentes en el sitio 2 y el 57% de las especies del sitio 8. El sitio que resultó diferente a los demás fue el sitio 5 al compartir el menor número de especies con los demás sitios. La única especie que se presentó en todos los sitios fue *Haplopappus venetus*, seguida de *Lycurus phleoides* que se presentó en ocho sitios y *Stipa constricta* en siete.

5. LITERATURA CITADA

- Alloway, B. 1995. *The origin of heavy metals in soils*. In: Heavy metals in soils. Alloway, B. J. (ed). Blackie A & P. London, UK. pp. 38-57.
- Ankerman D. and Large R. 1977. *Soil and plant analysis*. A & L. Agricultural laboratories. Memphis Tenn. USA
- Ashley P.M., Lottermoser B. G. and Chubb A.J. 2003. *Enviromental geochemistry of the Mt. Perry copper mines area, SE. Queensland Australia*. Geochem: Explor. Environ. Anal. 3, 345-357 p.
- Beath, O. A., Gilbert, C. S. and Eppson, H. F. 1939. *The use of indicator plants in locating seleniferous areas in western United States*. I. General. American Journal of Botany 26, 257-269.
- Carrillo-González, R. 2005a. *Breve descripción de la minería en México*. In: González-Chávez, M. C.; Pérez-Moreno, J. y Carrillo-González, R. (eds.). 2005. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 161 p.
- Carrillo-González, R. 2005b. *Niveles de contaminación de los suelos y las plantas*. In: González-Chávez, M. C.; Pérez-Moreno, J. y Carrillo-González, R. (eds.). 2005. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 161 p.
- Castellanos, J. Z.; J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. 2ª. Edición. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. San Miguel de Allende, Gto. 226 p.

- Consejo de Recursos Minerales (COREMI). 1992. *Monografía geológico-minera del Estado de Hidalgo*. Consejo de Recursos Minerales. Pachuca, Hidalgo. México. 58-61 p.
- Cooke, J. N. and M. S. Jonson. 2002. *Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: A review of theory and practice*. Environmental Review 10: 41:71.
- Danielson, R. M. 1991. *Temporal changes and effect of amendments on the occurrence of sheating (ecto-) mycorrhizas of conifers growing in oil sands tailings and coal spoil*. Agric. Ecosystems Environ. 35:261-281.
- Díaz, G. L. M.; A. Díaz O.; R. Carrillo-González y MC. González-Chávez. 2005. *Plantas que se desarrollan en áreas contaminadas con residuos mineros*. In: González-Chávez, M. C.; Pérez-Moreno, J. y Carrillo-González, R. (eds.). 2005. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 161 p.
- Franco, I. Ma. G. 2005. *Estrategias de colonización de las plantas para la restauración de jales de minas, en la Sierra de Catorce, S.L.P.* Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. 128 pp.
- García, S. A., Moyano A. y Munez C. 1999. *Forms of cadmium, lead and zinc in polluted mining soils and uptake by plants*. Común. Soil Sci. Plant Anal. 30, 1385-1402 p.
- Gardner, J. 2001. *Rehabilitación de minas para el mejor uso del terreno: la minería de bauxita en el bosque de Jarrah de Australia Occidental*. In Unasyuva. Rehabilitación de espacios degradados. FAO. 52:1-8.

- Geyne, A. R.; C., Fries Jr.; K. Segerstrom; R. F., Black and I. F., Wilson. 1963. *Geology and mineral deposits of the Pachuca-Real del Monte distric, State of Hidalgo, México*. Consejo de Recursos Naturales no Renovables. México. 8-109 p.
- Gilbert, R. O. 1987. *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Van Nostrand Reinhold. New Cork. Pp. 350.
- González-Chávez, M. C.; Pérez-Moreno, J. y Carrillo-González, R. 2005. *Introducción y aspectos generales de los suelos contaminados con residuos de minas y su recuperación*. In: González-Chávez, M. C.; Pérez-Moreno, J. y Carrillo-González, R. (eds.). 2005. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 161 p.
- Grime, J. P. 1982. *Estrategias de adaptación de las plantas y procesos que controlan la vegetación*. Limusa. México. 291 p.
- Gutiérrez, M. E. y M. Moreno. 1997. *Los residuos de la minería mexicana*. INE. En línea: http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/los_residuos.html (10/01/2008).
- Hernández-Acosta E., Gutiérrez-Castorena Ma. del C., Rubiños-Panta J. E. y Alvarado-López J. 2006. *Caracterización del suelo y plantas de un sitio contaminado con hidrocarburos*. Terra Latinoamericana 24: 463-470.
- Hernández G. R. 2001. *Nutrición mineral de las plantas*. Material didáctico. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Higgins, K. F.; Oldemeyer, J. L.; Jenkins, J. K.; Clambey, G. K. and Harlow, R. F. 1994. *Vegetation sampling and measurement*. In: T. A. Bookhout, ed. Research and management technique for wildlife and habitats. Fifth rd. The Wildlife Society. Bethesda Md. 567-591 p.

- Jonson M. S. and Bradshaw A. D. 1979. *Principies for the restoration of disturbed and degraded land*. Appl. Biol. 4:141-200.
- Kalandadze B. 2003. *Influence of the ore mining and processing enterprise of soil types in adjoining areas*. Agron. Res. 2, 131-137 p.
- Kim K. H. y Kim D. Y. 1996. *Heavy metal pollution in agricultural soils: measurement in the proximity of abandoned mine land sites*. J. Environ. Sci. Health 31, 783-795 p.
- Krebs, C. J. 1985. *Ecología: estudio de la distribución y la abundancia*. Harla. México. 413-425 p.
- Madejón P., Murillo J.M., Marañón T., Cabrera F. y López R. 2001. *Bioaccumulation of As, Cd, Cu, Fe and Pb in wild grasses affected by the Aznalcóllar mine (SW Spain)*. Sci. Total Environ. 209, 105-120 p.
- Mason, B. 1992. *Preparation of soil sampling protocols: sampling techniques and strategies*. US EPA, EPA/600/R-92/128. 169 pp.
- McBride M., Sauve, S. and Hendershot, M. 1997. *Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils*. Eur. J. Soil. Sci. 48: 337-346.
- McCune B. and Mefford, M. J. 1999. *PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data Version 4.0 MjM Software Desing*. Gleneden Beach, Oregon USA.
- Muller-Dombois, D. and H. Ellenberg. 1974. *Aims and methods of vegetation*. Ecology. Wiley, New York.

- Muñoz, U. A.; R. de L. Romo C.; S. H. Contreras R. y M. Huerta M. 2006. *Vegetación secundaria como un potencial biológico para la revegetación de áreas degradadas por la minería a cielo abierto en la zona de amortiguamiento del bosque La Primavera*. Memoria Avances en la Investigación Científica en el CUCBA. 409-415 p.
- NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). 2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 73 p.
- Nuclear Institute for Agricultura and Biology (NIAB). 1987. *Fifteen years of NIAB*. Faisalabad, Pakistan. Pp 133-134.
- Payá, H. F. 1995. *Actividad minera y contaminación ambiental*. Fundación Ambiente y Recursos Naturales. En línea: <http://www.farn.org.ar> (01/04/2008)
- Puga, S.; M., Sosa; A., de la Mora; C., Pinedo y J., Jiménez. 2006. *Concentraciones de As y Zn en vegetación nativa cercana a una presa de jales*. Rev. Inter. Contam. Ambient. 22 (2) 75-82. Distrito Federal, México.
- Pugh R., Dick D. and Fredeen A. 2002. *Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe and Cu) contents of plant foliage near the Anvil range lead-zinc mine, Faro Yukon Territory*. Ecotoxic. Environ. Safety. 52, 273-279 p.
- Ramos-Arroyo, Y. R. y Siebe-Grabach, C. D. 2006. *Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 23(1):54-74
- Reyes, C. E. 2007. *Especies silvestre como fitorremediadoras en suelos contaminados con Cd, Ni, Pb y Zn*. Tesis de Maestría. UACH. Chapingo, Estado de México. 92 p.

- Rorke, B. 2000. *Soil erodability and processes of water erosion on hillslope*: Geomorphology, 32, 385-415.
- Rosenfield, I. and Beath, O. A. 1964. *Selenium: geobotany, biochemistry, toxicity and nutrition*. Academic Press. New York. 411 pp.
- Shaw, A. J. 1990. *Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects*. CRC Press, Boca Raton, 35 p.
- Smith E., Naidu R. y Alston A. M. 1998. *Arsenic in the soil environment: a review*. Adv. Agron. 64, 149-195 p.
- Sutherland, W. J. 1996. *Ecological census techniques*. A handbook University of Anglia. Printed in the United Kingdom at the University Press. Cambridge.
- Volke, S. T.; J. A., Velasco T. y D. de la Rosa, P. 2005. *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. SEMARNAT-INE. México D.F. 141 p.
- Wu, L. 1994. *Selenium accumulation and colonization of plants in soils with elevated concentration of selenium and salinity*. In: Frankenberger, W. T. Jr. And Benson, S. (eds). Selenium in the environment. Marcel Dekker. New York. pp 279-325.
- Zaragoza, H. C. 2001. *Caracterización del hábitat y composición de la dieta de la codorniz moctezuma (Cytornix montezumae) en el noroeste del Estado de México*. Tesis de Maestría. C. P. México. 109 p.