



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Evaluación de la capacidad fitorremediadora del álamo blanco
(*Populus alba L.*) en suelo de mina "La Blanca" Hgo.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGO

PRESENTA

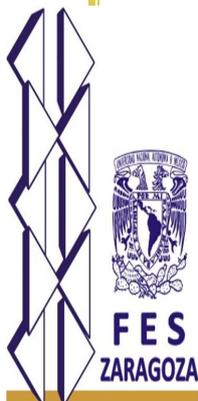
CRAVIOTO KAREN DELGADO

ÁREA ESPECÍFICA: CIENCIAS AMBIENTALES

LABORATORIO DE CONTAMINACIÓN Y
FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS

DIRECTORA DE TESIS: DRA. ESTHER MATIANA GARCÍA AMADOR

FINANCIADO POR PROYECTO PAPIME: PE 202311



MÉXICO, D.F.

MARZO 2014

Agradecimientos

Doy gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad que me ha dado para desarrollarme académicamente.

Agradezco a la **DRA. Esther Matiana García Amador** por ser mi tutora y guía en la realización de este proyecto, gracias por su apoyo, confianza y amistad incondicional que siempre me brindo.

A las revisoras de tesis **BIÓL. Leticia López Vicente, BIÓL. Maricela Arteaga Mejía, BIÓL. Aida Zapata Cruz y la BIÓL. Ana Laura Maldonado Tena** porque siempre estuvieron conmigo a lo largo de la realización de este proyecto, gracias por su apoyo, disposición, comentarios y sugerencias.

Y especialmente quiero agradecer al **BIÓL. Jonathan Hernández Muñoz** por su apoyo, dedicación, paciencia y conocimiento en la realización de este proyecto. Te quiero amigo, gracias por tu amistad.

A **Ana Zamora, Ivonne, Wendolyne, Diego, Mauricio, Viridiana, Carlos, Elia, Rubén, Jonathan y Ana Rasmus**, por compartir tantas bonitas experiencias en esta etapa de nuestras vidas.

A **Mónica, Anaid, Gabriela, Lorena, Alejandra, Ana, y Pamela** por compartir momentos fantásticos e inolvidables fuera y dentro en la cancha. Las quiero niñas y I LOVE THIS GAME.

Y a las personas presentes y ausentes que me acompañaron a lo largo de este camino que hoy concluye; a todos ellos muchas gracias.

Dedicatoria

Para Alberto y Patricia:

Aquellos que con amor

Me brindaron su confianza

Imaginándome grande cuando aún era pequeña

Sabiendo que con el tiempo

Podría convertir un sueño en realidad

A hora con ilusión ha culminado

Desde hoy soy alguien más

Respondiendo a sus anhelos y desvelos

Entiendo hoy su labor y agradezco

Su infinita dedicación

Para MI LUPITA:

Gracias por creer en mí y brindarme tu cariño y amor desde el día que nací hasta hoy.

“Sube la marea en esta habitación, pienso en el minuto en que todo cambio.

Fue lo más eterno de la colección de todas las fotos que mirando voy.

Recordando esta vida junto a ti, toda la energía que herede de ti.

Tú que eres mi héroe, mi respiración, tú que no te rindes nunca escucha esta canción.”

“Amaia Montero”

Te amo abue.



Con cariño para Beto, Sharon, Mónica y Jonathan

“Nada sobre esta tierra puede detener
al hombre que posee la correcta actitud
mental para lograr su meta. Y nada
sobre esta tierra puede ayudar
al hombre con la incorrecta actitud mental.”

Thomas Jefferson

ÍNDICE

	página
Resumen	1
I. Introducción	2
II. Marco teórico	5
2.1 Metales Pesados	5
2.2 Características del Plomo	5
2.3 Características del Cromo y Níquel	6
2.4 Plantas y metales pesados	7
2.5 Fitorremediación	7
2.6 Características de las plantas que se emplean en la fitorremediación	8
III. <i>Populus alba L.</i>	12
IV. Estudios anteriores	13
V. Justificación	15
VI. Problemática	15
VII. Hipótesis	15
VIII. Objetivos	16
IX. Métodos	17
9.1 Zona de colecta	17
9.2 Fase Vivero	17
9.3 Fase de Laboratorio	18
9.4 Índice de tolerancia	19
X. Resultados	21
10.1 Análisis del suelo	21
XI. Análisis de la planta	24
11.1 Cobertura	24
11.2 Altura	25

11.3 Diámetro del tallo	26
11.4 Efectos sobre la longitud radicular	27
11.5 Peso Fresco	29
11.6 Peso Seco	30
XII. Metales pesados	31
12.1 Contenido total de Pb en los órganos de <i>Populus alba L.</i>	33
XIII. Discusión	36
XIV. Conclusiones	39
XV. Bibliografía	40
Anexo	45

ÍNDICE DE FIGURAS

	página
Figura 1. Modelo de fitoextracción en la planta	11
Figura 2. Raíz testigo TV antes	27
Figura 3. Raíz Tratamiento SC después	27
Figura 4. Raíz testigo TC antes	28
Figura 5. Raíz Tratamiento SM después	28

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	página
Gráfica 1. Cobertura promedio de <i>Populus alba L.</i>	24
Gráfica 2. Altura promedio de <i>Populus alba L.</i>	25
Gráfica 3. Diámetro promedio del tallo de <i>Populus alba L.</i>	26
Gráfica 4. Longitud final de la raíz en <i>Populus alba L.</i>	27
Gráfica 5. Promedio del Peso Fresco de <i>Populus alba L.</i>	29
Gráfica 6. Promedio del Peso Seco de <i>Populus alba L.</i>	30
Gráfica 7. Contenido total de Pb en los órganos de <i>Populus alba L.</i>	33

ÍNDICE DE CUADROS

	página
Cuadro 1. Clasificación taxonómica de <i>Populus alba L.</i> según USDA http://plants.usda.gov y herbario de FESZA	12
Cuadro 2. Parámetros físicos y químicos	18
Cuadro 3. Rangos normales, críticos y utilizados en la planta	19
Cuadro 4. Resultados de los Parámetros físicos y químicos para los diferentes tratamientos del suelo.	21
Cuadro 5. Concentración de metales pesados totales en suelo.	31
Cuadro 6. Concentración de metales pesados en los diferentes órganos de la planta.	32
Cuadro 7. Secuencia de acumulación de Pb en los órganos de <i>Populus alba L.</i> en los diferentes tratamientos.	32
Cuadro 8. Secuencia de acumulación de Ni en los órganos de <i>Populus alba L.</i> en los diferentes tratamientos.	34
Cuadro 9. Secuencia de acumulación de Cr en los órganos de <i>Populus alba L.</i> en los diferentes tratamientos.	34
Cuadro 10. Índice de tolerancia	35
Cuadro 11. Factor de traslocación	35

Resumen

La minería a cielo abierto, está dentro de las actividades más perjudiciales que realiza el hombre a nivel mundial, debido a que solo se extraen los minerales deseados del suelo ocasionando que los residuos generados se depositen a cielo abierto. Con el paso de los años altas cantidades de elementos tóxicos como zinc, cadmio, plomo, níquel, cromo, selenio, molibdeno, etc. ocasionan daños irreversibles tanto en flora como fauna. Se considera a la fitorremediación como una técnica para rehabilitar suelos degradados utilizando plantas que tengan la capacidad de acumular metales pesados dentro de sus tejidos por su fácil adaptación a las propiedades químicas del entorno. Este proyecto se realizó con el fin de evaluar la capacidad fitorremediadora que tiene la especie *Populus alba L.* para los metales pesados (Pb, Ni y Cr), de un suelo de minería a cielo abierto. Se trabajó con suelo de mina y suelo de vivero, el cual se dividió en dos, una parte se empleó como testigo y a la otra parte se le añadió una mezcla de metales pesados en concentraciones críticas (82.5 mg kg^{-1} de Pb, 57 mg kg^{-1} de Ni y 24 mg kg^{-1} de Cr). En el suelo de mina (SM) se determinó una acumulación máxima de Pb en raíz (254 mg/kg^{-1}) y de Ni en hoja (2.5 mg/kg^{-1}); en el suelo con la mezcla de metales pesados (SC) se determinó una concentración de Pb en raíz (281 mg/kg^{-1}) y de Ni en hoja de (1.9 mg/kg^{-1}). El cromo no fue acumulado en ningún órgano de la planta. El índice de tolerancia fue de 120% en el tratamiento SM y de 106% para el tratamiento SC. El factor de traslocación para los tratamientos SM (0.83) y SC (0.77) indica que *Populus alba L.* es considerada una planta acumuladora para el Pb en altas concentraciones. Por lo tanto se concluye que *Populus alba L.* cosechado de un suelo de mina (SM) y de un suelo contaminado (SC) es acumulador de Pb y presenta concentraciones críticas en raíz, tallo y hoja.

I. Introducción

Muchas actividades humanas en la geosfera están asociadas con la extracción de recursos de la corteza terrestre. La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, practicada desde la época prehispánica y ha sido fuente de la expansión regional desde la Colonia. En el desarrollo del país fue un factor importante de modernización y avance, al suministrar insumos a prácticamente todas las industrias, entre las que destacan las de la construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica. La actividad minera en México se realiza principalmente en los estados del norte, con clima predominantemente árido y en menor proporción en el centro del país (Volkey y De La Rosa, 2005).

De acuerdo con la información de la Dirección General de Minas de México, la industria minera nacional es mayoritariamente metalúrgica, y se dedica principalmente a la producción de cobre, zinc, plata y plomo. Se concentra en doce entidades: Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco. Hidalgo se ha caracterizado por ser una entidad minera con un historial de 500 años de minería, era una de las entidades federativas más importantes en el desarrollo minero de México. Actualmente el estado es un importante productor de manganeso en el país y ocupa el tercer lugar en la producción de cadmio y en menor proporción la extracción de oro, plata, plomo y zinc (Coordinación General de Minería, 2010).

La minería de superficie, es la más perjudicial, ya que en esta se extrae toda la roca, grava y arena gruesa, lo que destruye la cubierta vegetal y el suelo. El método mejor conocido de minería de superficie es el de minería a cielo abierto, en la que el suelo es eliminado por dragas y otros equipos pesados para exponer los materiales deseados (Manahan, 2007).

Los minerales se extraen y se concentran al utilizar métodos físicos y posteriormente se separa la fracción económicamente redituable por gravimetría. Los materiales con baja concentración de metal se retiran en forma de lodos que contienen altas cantidades de elementos potencialmente tóxicos (EPT). Los lodos son depositados en tinas que en México se denominan presas de jales, estos materiales son difíciles de eliminar, ya que pueden permanecer durante décadas en el suelo e incorporarse en la cadena trófica (PROFEPA 2000).

Los residuos, producto de la actividad minera son usualmente depositados a cielo abierto en donde sufren procesos de intemperismo produciendo intoxicaciones y malformaciones en mamíferos (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007). Algunos elementos que se encuentran en los jales de mina son: zinc, cadmio, plomo, níquel,

selenio, molibdeno, telurio y arsénico (Remon *et al.*, 2005). Esto provoca que se generen sitios con condiciones inhóspitas y con alta peligrosidad para los organismos vivos, así como un paisaje ecológico degradado (Ullrich, Ramsey y Helios-Rybicka, 1999).

Es importante enfatizar este tipo particular de contaminación debido a la dificultad especial que los metales pesados suponen, principalmente por su persistencia en el medio, ya que el tiempo de residencia de estos en el suelo ronda los miles de años y por tanto, representan un riesgo permanente para la salud ambiental y humana (Navarro-Aviñó, Aguilar y López-Moya, 2007); uno de los resultados más graves de tal cualidad, es la amplificación biológica de los metales a través de las cadenas tróficas (lo que puede hacer que muchas plantas o animales lleguen a constituir un peligro para la salud al usarse como alimento) (Stoker y Seager, 1981).

Contaminación de suelos

El suelo es la fina capa superior de la corteza terrestre en contacto con la atmósfera o las aguas, que se ha formado lentamente como consecuencia de la acción combinada de los procesos geológicos, climatológicos y biológicos. Es el soporte en gran parte de las transformaciones de la energía y de la materia de los ecosistemas; su calidad, se ve afectada por dos motivos principalmente:

- Por los efectos de la contaminación que pueden permanecer ocultos durante mucho tiempo.
- Segundo, la titularidad privada de la mayor parte de los terrenos dificulta la adopción de medidas de protección.

Un suelo contaminado es aquel que ha superado su capacidad de amortiguar una o varias sustancias, pasando como consecuencia de ser un sistema protector a una amenaza para el agua, la atmósfera y los organismos. La presencia de contaminantes en el suelo modifican los equilibrios biogeoquímicos apareciendo cantidades anómalas de determinados componentes que originan modificaciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

La contaminación del ambiente se produce por la incorporación de cualquier tipo de energía, organismo o sustancia, que afecta las características de los ecosistemas, modificando negativamente sus propiedades y su capacidad para asimilarlas o degradarlas (Delgadillo-López, *et al.*, 2011).

De manera general, los contaminantes se clasifican en:

- Contaminantes orgánicos: hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's), bifenilos policlorados (PCB's), dioxinas, hidrocarburos de petróleo, disolventes clorados, compuestos aromáticos que se emplean en la producción de colorantes, explosivos, productos farmacéuticos, plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), surfactantes, entre otros (Cherian y Oliveira, 2005).
- Contaminantes inorgánicos: metales pesados como Co, Cr o Cu, elementos no metálicos como el As y B (Navarro-Aviñó, Aguilar y López-Moya, 2007). Algunos elementos traza son esenciales para la nutrición y crecimiento de plantas (B, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn) y animales (As, Cu, Co, Fe, Mn, Mo, Zn, Cr, F, Ni, Se, Sn y V). La toxicidad de estos elementos depende de la concentración, la forma química y su persistencia. (Adriano *et al.*, 2004; Navarro-Aviñó, Aguilar y López-Moya, 2007).

En general, los mecanismos involucrados en la remoción de contaminantes son de tres tipos (Volke Sepúlveda y Velasco, 2002):

1. Físicos (sedimentación, filtración, adsorción, volatilización).
2. Químicos (precipitación, hidrólisis, reacciones de óxido-reducción o fotoquímicas).
3. Biológicos (resultado del metabolismo microbiano, del metabolismo de plantas o de procesos de bioabsorción).

II. Marco teórico

2.1 Metales pesados

Los metales pesados son elementos cuya densidad es mayor a 5 gmL^{-1} . En la naturaleza se encuentran en concentraciones pequeñas, no disponible para los organismos (Kabata-Pendias y Pendias, 1984). También se definen a los metales pesados como un grupo de metales o metaloides asociados con contaminación y toxicidad potencial (Cornelis y Nordberg, 2007).

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre; sin embargo cuando se liberan en el ambiente por las actividades humanas pueden llegar a convertirse en contaminantes en el aire, agua superficial, subterránea, otros ambientes acuáticos y suelo. Las fuentes antropogénicas más importantes que liberan metales pesados son la extracción de minerales y las prácticas agrícolas que por medio del uso de químicos para combatir plagas y fertilizar el suelo aportan grandes cantidades de metales pesados como son cobre, cadmio, mercurio, cromo, arsénico, entre otros (Castro de Esparza, 2006).

2.2 Características del Plomo

Es un elemento químico de la tabla periódica. Su número atómico es de 82 y su peso atómico es de 207.2 uma. Por su abundancia terrestre, indica que suele concentrarse en rocas magmáticas y sedimentos arcillosos en el cual las concentraciones más comunes van de 10 a 40 ppm, mientras que en rocas ultramáficas y sedimentos calcáreos su gama es de 0.1 a 10 ppm. Su forma natural es la galena (PbS) y se produce principalmente como Pb^{2+} a pesar de su estado de oxidación. Durante la meteorización este se oxida lentamente en sulfuros y tiene la capacidad para formar carbonatos y ser incorporado en minerales como Fe, Mn y en la materia orgánica. Las características geoquímicas de Pb^{2+} se asemejan al grupo alcalinotérreo divalente de metales, por lo tanto tiene la capacidad de reemplazar K, Ba, Sr y Ca, tanto en minerales como en sitios de sorción (Kabata-Pendias y Pendias, 1984).

Plomo en las plantas

Aunque Pb está presente de forma natural en todas las plantas no se ha demostrado que desempeña un papel esencial en su metabolismo. Zimdahl (1977) y Hughes (1980) presentaron ampliamente los hallazgos sobre la absorción de Pb por las raíces y llegaron a la conclusión de que el modo de su captación es pasivo y que la tasa de absorción se reduce por el encalado y por la baja temperatura. El Pb

aunque no es fácilmente soluble en el suelo, es absorbido principalmente por los pelos de la raíz y se almacena en un grado considerable en las paredes celulares. Cuando Pb está presente en forma soluble, las raíces son capaces de tomar grandes cantidades de este metal y su acumulación aumenta con el paso del tiempo (Kabata-Pendias y Pendias, 1984).

2.3 Características del Cromo y Níquel

El cromo es un metal de transición del Grupo VIB de la tabla periódica. Cuenta con un número atómico de 24 y un peso atómico de 51.996 uma; de los cinco radioisótopos conocidos, ^{51}Cr es el más utilizado en el trabajo experimental. El cromo metálico es de color gris y frágil y puede ser altamente pulido. Es resistente al ataque por oxidación cual conduce a su uso en las aleaciones que son resistentes a la corrosión. La presencia de Cr en aleaciones también aumenta la dureza y la resistencia al desgaste mecánico. Se presenta en estados de oxidación +3 y +6 en el medio ambiente, Cr^{3+} tiene un radio iónico más estable de 0.064nm y el Cr^{6+} tiene un radio iónico de 0.052-0.053 nm (Alloway, 1990).

El níquel es un metal de transición del Grupo VIII de la Tabla Periódica. Su número atómico es 28 y su peso atómico 58.71 uma. De los siete radioisótopos conocidos ^{63}Ni es el más útil en los estudios de suelo-planta. El níquel puede producirse en un amplio número de estados de oxidación, pero solo el Ni(II) es estable a lo largo de la amplia gama de condiciones de pH y redox que se encuentran en el medio ambiente del suelo. El radio iónico de Ni (II) es 0.065nm (cerca de los de Fe, Mg, Cu y Zn). El níquel puede sustituir metales esenciales en metalo-enzimas y causa la interrupción de las vías metabólicas (Alloway, 1990).

Cromo y Níquel en las plantas

Las concentraciones de Cr en forma disponible para las plantas son extremadamente pequeñas en la mayoría de los suelos y esta falta de solubilidad se refleja en las bajas concentraciones del elemento que presenta. Las concentraciones en las partes foliares muestran poca relación con el contenido total de Cr en el suelo; en general, las concentraciones son menos de 1 mg / kg. Las concentraciones de Cr en los individuos que crecen en diversos tipos de residuos se encuentran comúnmente en el rango de 10-190 mg / kg, y las concentraciones tóxicas se encuentran en las plantas que crecen en sitios con residuos de cromato soluble (Cr-VI) (Alloway, 1990).

Una baja tasa de absorción de Cr a partir de la fracción soluble de este metal está relacionada con el mecanismo de la absorción por las raíces. Aparentemente estos tejidos no son capaces de reducir el Cr^{3+} a su forma más soluble Cr^{2+} , el cual es la forma más inestable bajo condiciones normales del suelo. Sin embargo, los mecanismos de absorción y translocación de Cr parecen ser similares a los de Fe, donde se refleja en una relación Cr / Fe bastante estable en los tejidos. Tiffin (1977) llegó a la conclusión que el Cr se transporta como complejos aniónicos que han sido identificados en los extractos de tejidos y en el fluido del xilema (Kabata-Pendias y Pendias, 1984).

Las concentraciones de Ni en plantas que crecen en suelos no contaminados están en el intervalo de 0.1-5 mg / kg. Se han encontrado valores ligeramente más elevados en los cultivos en suelos altamente orgánicos y un número de especies de árboles forestales. Las concentraciones de Ni provocan una baja solubilidad de Cr en comparación con éste. Se ha sugerido que el pirofosfato ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) elimina las ligaduras unidas orgánicamente de Cr (III), mientras que HCl probablemente extrae su mayoría en formas inorgánicas de Cr (III), tales como hidróxidos y fosfatos (Alloway, 1990).

2.4 Plantas y metales pesados

El sistema suelo-planta es un sistema abierto sujeto a insumos tales como contaminantes, fertilizantes, pesticidas y las pérdidas como la eliminación de los metales en el material vegetal cosechado, la lixiviación, la erosión y volatilización. Las plantas pueden acumular metales pesados en o sobre los tejidos debido a su gran capacidad de adaptación a las propiedades químicas variables del entorno, por lo que las plantas son depósitos intermedios a través de los elementos traza en los suelos y en parte de las aguas y el aire moviéndose hacia el hombre y los animales (Alloway, 1990).

Tiffin (1977) llegó a la conclusión de que las plantas pueden ser receptores pasivos de elementos traza pero también ejercer control sobre la captación o el rechazo de algunos elementos por reacciones fisiológicas apropiadas.

2.5 Fitorremediación

Una técnica que se utiliza para rehabilitar los suelos degradados es la fitorremediación que es la utilización de plantas hiperacumuladoras para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados. Dentro de las técnicas biológicas o ecológicas, el uso de plantas (fitorremediación; "fito", del griego "phyto", que significa "planta") se considera potencialmente capaz de dar

soluciones *in situ*, con un gasto financiero y tecnológico relativamente bajo. Además, el resultado, una cobertura "verde", es más agradable estéticamente y, hoy en día, más aceptable para el público, siendo más "ecológico". La fitorremediación se puede definir como el uso combinado de plantas, enmiendas del suelo (abonos, lodos activados, composta, etc.) y prácticas agronómicas (cultivo del suelo) para eliminar contaminantes del medio ambiente o reducir su toxicidad (Delgadillo-López, *et al.*, 2011).

La recuperación de suelos contaminados mediante métodos físicos o químicos "tradicionales" es generalmente rápida pero cara. Esta puede realizarse "*in situ*" (tratando el suelo en su lugar) o "*ex situ*" (tratamiento tras transporte del suelo). Las técnicas biológicas, o biorremediación, tienen como objetivo básico promover los procesos naturales y desarrollar técnicas para acelerar estos procesos en la recuperación de suelos y sedimentos contaminados. Una posibilidad es el uso de plantas hiperacumuladoras en la que se utilizan determinadas especies vegetales de crecimiento rápido y de gran capacidad de acumulación para extraer del suelo el contaminante. A esto se le conoce como fitoextracción.

2.6 Características de las plantas que se emplean en la fitorremediación

1. Por lo general, opera a muy bajas concentraciones en soluciones.
2. Depende en gran medida de las concentraciones de las soluciones, sobre todo en rangos bajos.
3. La tasa depende en gran medida de la presencia de H^+ y otros iones.
4. La intensidad varía según la especie de planta y la etapa de desarrollo.
5. Los procesos son sensibles a algunas propiedades del ambiente del suelo tales como la temperatura, aireación, y el potencial redox.
6. Puede ser selectivo para un ión particular.
7. La acumulación de algunos iones puede tener lugar contra un gradiente de concentración.
8. Las micorrizas juegan un papel importante en la absorción entre el medio externo y la raíz.

La absorción es uno de los factores más importantes que determina la disponibilidad biológica de un elemento traza en su unión a los constituyentes del suelo. En general, las plantas absorben fácilmente las especies de elementos traza que se disuelven en las soluciones del suelo en formas ya sea iónicas o quelatos y complejos (Kabata-Pendías y Pendías, 1984).

Captación en raíz

La captación de metales pesados puede darse por medio de dos formas:

- a) Absorción pasiva: es la difusión de los iones de las soluciones externas en la endodermis de la raíz.
- b) Absorción activa: requiere energía metabólica y se lleva a cabo en contra de un gradiente químico.

Los mecanismos de absorción de los metales pesados en las raíces implican varios procesos:

1. El intercambio de cationes por las raíces.
2. Transporte dentro de las células de los agentes quelantes o acarreos.
3. Efectos rizósfera.

Absorción foliar

La absorción foliar consiste de dos fases:

- a) La no metabólica: la penetración cutícula es generalmente considerado como la ruta principal de entrada y los mecanismos metabólicos son para la acumulación de elementos en contra de un gradiente de concentración.
- b) El segundo proceso es responsable del transporte de iones cruzando la membrana plasmática y en el protoplasma celular.

La velocidad de movilidad de elementos traza entre los tejidos varía en gran medida, dependiendo del órgano de la planta, su edad, y el elemento involucrado (Kabata-Pendias y Pendias, 1984).

Traslocación de los metales dentro de las plantas

Una vez que los iones han sido absorbidos a través de las raíces u hojas y han sido transportados a los vasos del xilema, existe la posibilidad de movimiento a lo largo de toda la planta. La velocidad y el grado de movimiento dentro de las plantas dependen del metal de que se trate, el órgano de la planta y la edad de la planta (Kabata-Pendias y Pendias, 1984).

Toxicidad y tolerancia

Los trastornos metabólicos de las plantas ocurren no sólo por deficiencias de micronutrientes, sino también por el exceso. Reacciones básicas relacionados con los efectos tóxicos de los elementos en exceso son los siguientes:

1. Los cambios en la permeabilidad de la membrana celular.
2. Las reacciones de los grupos tiol en cationes.
3. La competencia por los sitios con metabolitos similares, indispensables.
4. Afinidad para reaccionar con los grupos fosfato y los grupos activos de ADP o ATP.
5. La sustitución de los iones similares, indispensables.
6. La ocupación de los sitios de los grupos esenciales tales como fosfato y nitrato.

La evolución de la tolerancia al metal se cree que es bastante rápido en ambos microorganismos y plantas superiores y se sabe que tiene una base genética (Kabata-Pendias y Pendias, 1984).

Algunos mecanismos de tolerancia son:

1. La captación selectiva de iones.
2. Decremento en la permeabilidad de las membranas u otras diferencias en la estructura y función de las membranas.
3. Inmovilización de iones en raíces, hojas y semillas.
4. La eliminación de iones de metabolismo por deposición (de almacenamiento) en formas fijas y / o insolubles en diversos órganos y orgánulos.
5. Alteración de los patrones metabólicos.
6. La adaptación a la sustitución de un metal fisiológico en una enzima.
7. La liberación de los iones de las plantas de lixiviación de follaje, caída de hojas y excreción de las raíces

Al considerar los residuos que deja la minería a cielo abierto como problema de contaminación es necesario realizar una recuperación de este tipo de sitios utilizando plantas que sean capaces de tolerar las condiciones ambientales de estos sitios y que tengan la habilidad de estabilizar los suelos. Para lograrlo se necesitan plantas como *Populus alba L.* que es un árbol de crecimiento rápido y que almacena en su sistema vascular altas concentraciones de metales pesados debido a su fácil adaptación en una amplia gama de suelos ya sean suelos salinos o contaminados.

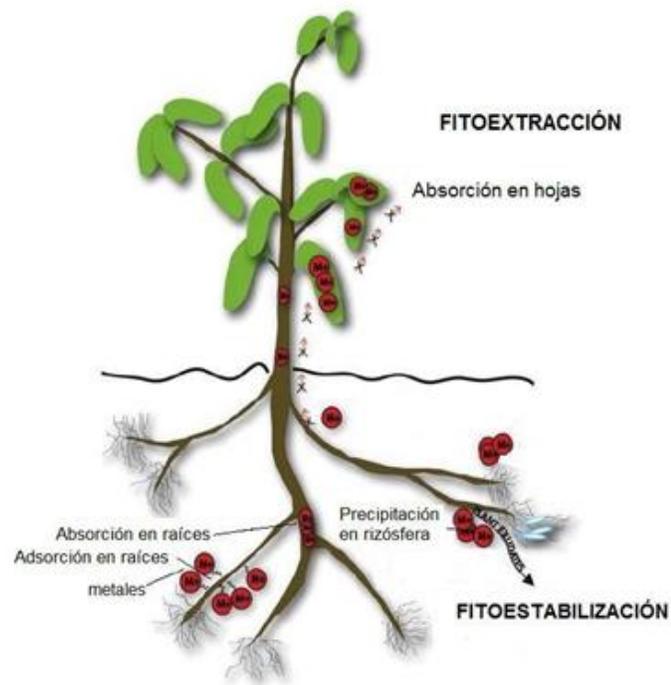


Figura 1. Modelo de fitoextracción en la planta.

III. *Populus alba* L.

Es un árbol caducifolio que puede alcanzar unos 30-35 m de altura, con una amplia copa y tronco de color blanco-grisáceo que puede llegar a alcanzar 6 m de diámetro en la base del tronco.

Las hojas jóvenes son blanquecinas y tomentosas, con el desarrollo el haz evoluciona hacia un color verde oscuro manteniéndose el envés blanquecino y tomentoso. Su foliación ocurre de febrero a abril y la defoliación de noviembre a enero.

Es un árbol de crecimiento rápido, pero poco longevo (60-70 años) que se encuentran en una amplia gama de suelos, siendo relativamente tolerantes a la salinidad y contaminación en general.

Su hábitat natural lo constituyen las riberas de los ríos, aunque también es usado como árbol ornamental (Ruiz de la Torre, 2001).

a. *Botánica*

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de *Populus alba* L. según USDA <http://plants.usda.gov> y herbario de FESZA

Clasificación taxonómica

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

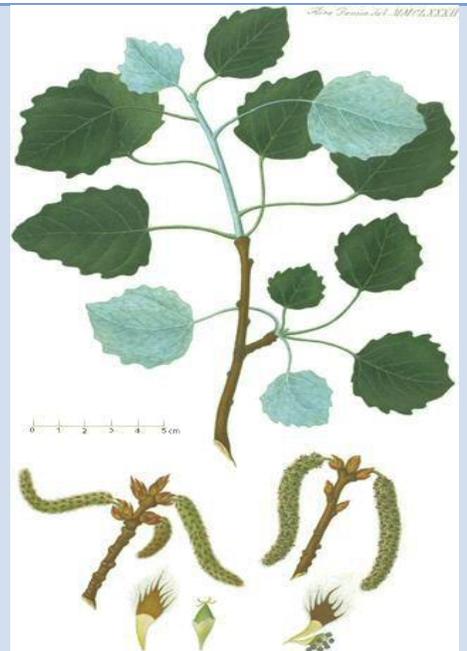
Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Salicales*

Familia: *Salicaceae*

Género: *Populus*

Especie: *Populus alba* L.



Es importante mencionar que en México, hasta el momento no existen estudios sobre el empleo de *Populus alba* L. como planta fitorremediadora de suelos de mina, debido a esto se pretende estudiar la capacidad del álamo blanco para la extracción de metales pesados de tal manera que este estudio servirá para ayudar a aumentar el conocimiento en la biorremediación de suelos contaminados.

IV. Estudios anteriores

En España se realizó un trabajo con el árbol álamo blanco (*Populus alba* L.) donde se estudió el nivel de elementos traza y nutrientes en hojas y ramas en un suelo altamente contaminado de la mina de Aznalcóllar (Madejón, 2003).

Delgadillo-López (2011) realizó una recapitulación bibliográfica donde señala que el género *Populus* se puede utilizar en diferentes tipos de contaminación orgánica e inorgánica, principalmente con metales pesados.

En Italia se realizó un trabajo utilizando altas concentraciones de cobre, para obtener de las especies *P. alba* y *P. x canadensis* un estudio de dosis respuesta (Borghi *et al.*, 2007). Vamelari (2008) realizó un estudio en suelos contaminados con As, Co, Cu, Pb y Zn y se utilizó las especies *Populus* y *Salix* para evaluar si en su biomasa se podían absorber altas cantidades de estos metales.

Giachetti (2006) realizó un trabajo con la especie *Populus x euramericana* (clon I-214) en suelos contaminados con residuos industriales para evaluar su desarrollo y absorción de metales pesados. Sebastiani (2004) utilizó los clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) y I-214 (*P. x euramericana*) para evaluar su crecimiento y acumulación de metales pesados al desarrollarse en residuos industriales.

Di Baccio (2009) realiza un estudio para obtener respuestas de *Populus x euramericana* (clon I-214) en un suelo contaminado con altas concentraciones de zinc analizando la asimilación de carbono, modificaciones estructurales, la distribución de metal y la localización celular en la planta.

En Austria, se realizó un trabajo utilizando zinc a altas concentraciones en suelos contaminados, para obtener de la especie *Populus canescens* L. un estudio de dosis-respuesta (Langer *et al.*, 2008). Dos Santos (2006) realizó un estudio de detección hidropónica para la resistencia y acumulación de cadmio y zinc en veinte clones de sauces y álamos.

En Polonia se realizó un trabajo, que analizó, las diferencias morfológicas de la especie *Populus Nigra L.* en un suelo contaminado a diferentes concentraciones de Cu y Pb (Strobawa y Lorenc-Plucińska, 2008).

En Chile se realizó un análisis de la expresión de genes en la raíz de la especie *Populus deltoides L.* sometida a estrés por alta concentración de cobre en el suelo (Guerra *et al.*, 2009).

En Bélgica se realizó un trabajo con clones de la especie *Populus* para evaluar su capacidad fitoextractora en suelos contaminados con Al, Cd y Zn (Laureysens *et al.*, 2004).

V. Justificación

Al considerar los residuos que deja la minería a cielo abierto como problema de contaminación es necesario realizar una recuperación de este tipo de sitios utilizando plantas que sean capaces de adaptarse y que tengan la habilidad de estabilizar los suelos. Para lograrlo, se necesitan plantas como *Populus alba L.* que es un árbol de crecimiento rápido que almacena en su sistema vascular altas concentraciones de metales pesados debido a su fácil adaptación en una amplia gama de suelos ya sean suelos salinos o contaminados.

Es importante mencionar que en México, hasta el momento no existen estudios sobre el empleo de *Populus alba L.* como planta fitorremediadora de suelos de mina, debido a esto, se pretende estudiar la capacidad del álamo blanco para la extracción de metales pesados de tal manera, que este estudio servirá para ayudar a aumentar el conocimiento en la biorremediación de suelos contaminados.

VI. Problemática

¿El álamo plateado se adaptará a un suelo de mina?

¿Presentará alguna señal visible que denote el estrés al que será sometido?

¿El álamo plateado será una especie fitoextractora para los elementos Ni, Pb, y Cr?

VII. Hipótesis

El álamo plateado al ser una planta de rápido crecimiento, con una producción de biomasa alta será capaz de remediar suelos con altas concentraciones de metales pesados como son los suelos de mina y a su vez una planta fitoextractora de Ni, Pb, y Cr.

VIII. Objetivos

8.1 Objetivo General

- Determinar la capacidad fitorremediadora de *Populus alba L.* (álamo blanco) en suelos contaminados por actividades mineras en México y su capacidad fitoextractora de Ni, Pb y Cr.

8.2 Objetivos Particulares

- Evaluar la tolerancia del álamo blanco en un suelo de mina.
- Comparar la tasa de crecimiento de los individuos de cada tratamiento.
- Evaluar la concentración de metales pesados (Ni, Pb y Cr) contenidos en los diferentes órganos de la planta (raíz, tallo y hoja).
- Analizar la concentración de metales pesados en el suelo de la mina "La Blanca", Edo Hidalgo, antes y después de los tratamientos.

IX. Método

9.1 Zona de colecta

La mina "La Blanca" ubicada en las coordenadas 20° 07. 041' N y 98° 41.373 ' W, a una altitud de 2,532 m, en el municipio de Pachuca de Soto cerca de la mina Dos Carlos.

Actualmente lleva 50 años cerrada, solo se encuentra restos de lo que fue un matorral xerófilo, donde sobresalen algunas opuntias, magueyes, herbáceas como pastos y algunas compuestas, junto con especies introducidas por el hombre como nicotiana y pirúl, el suelo se encuentra muy compacto, con la presencia de manchas blancas; las plantas se encuentran muy dispersas sobre el área y en algunos puntos no hay vegetación (Anexo. Figuras 1 y 2).

El Parque Ecológico Cubitos se ubica al sureste de la ciudad de Pachuca, tiene una superficie de 90.3 hectáreas en la zona conurbada Pachuca-Mineral de la Reforma. Dentro de la fauna se encuentran mariposas, abejas, arácnidos, anfibios, reptiles, aves y mamíferos y de flora angiospermas y cactáceas (Anexo. Figuras 3 y 4).

Se realizaron diferentes visitas a la mina "La Blanca" y el Parque Ecológico Cubitos en el estado de Hidalgo, donde se reconoció la zona, y se establecieron los puntos de muestreo así como la recolecta del material edáfico para los diferentes tratamientos con el álamo plateado.

9.2 Fase de Vivero

Las diferentes muestras de suelo recolectadas, se tamizaron (tamiz de 2mm) de manera individual, para posteriormente elaborar una muestra compuesta de cada zona (mina y cubitos), donde se utilizo 5 kg de suelo para trasplantar a los individuos para el tratamiento destinado. Se tomo una sub muestra de suelo de cada tratamiento y se realizaron los análisis físicos y químicos en el laboratorio.

Se adquirieron 24 individuos con características de tamaño y edad similares. Los cuales se distribuyeron en los siguientes tratamientos:

8 individuos como testigo donde 4 fueron para Testigo Vivero (TV) y otros 4 para Testigo Cubitos (TC)

8 individuos para suelo de mina (SM)

8 individuos para suelo contaminado con una mezcla de metales pesados (SC)

Se colocaron los árboles en bolsas de vivero con dimensiones de (25x30cm), se acondiciono el lugar con los requerimientos de luz, temperatura ambiente y una protección contra la exposición a las lluvias para evitar algún exceso en el contenido de agua en los tratamientos. El experimento, se realizo durante seis meses manteniendo a los individuos a capacidad de campo, evaluando semanalmente la altura, el diámetro y la cobertura de cada uno (Anexo. Figura 5 y 6).

La mezcla de metales pesados empleada en el tratamiento SC, se elaboró en base a los valores críticos en plantas de (Kabata- Pendias y Pendias, 1984).

9.3 Fase de Laboratorio

Al término de las 30 semanas se cosecharon los tratamientos, se midieron y pesaron por separado cada planta, posteriormente las plantas se lavaron con agua desionizada, secaron a temperatura constante (50°C) y los suelos se secaron al aire.

El análisis de suelo se baso en la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Los parámetros del suelo que se analizaran fueron:

Cuadro 2. Parámetros físicos y químicos

pH	Relación 1:2 (NOM-021-RECNAT-2000).
Densidad aparente	Método de la Probeta (Ríos, 1990).
Densidad real	Método del Picnómetro (Ríos, 1990).
Textura	Método AS-09 (NOM-021-RECNAT-2000).
Materia orgánica	Método AS-07 (NOM-021-RECNAT-2000).
Conductividad eléctrica	Método del conductímetro (Ríos, 1990).
CIC	Método AS-012 (NOM-021-RECNAT-2000).
Determinación del nitrógeno total	Método Kjeldhal (Colegio de Posgraduados).
Cuantificación de metales pesados en planta	Digestión triácida (Acido perclórico, Acido nítrico y Acido sulfúrico) (Radojevic & Bashkin, 1999).
Cuantificación de metales pesados en suelo	Técnica de agua regia (Radojevic & Bashkin, 1999).

Los árboles ya secos, se separaron en los diferentes órganos vegetativos (hojas, tallos y raíz) y se digirieron (Radojevic & Bashkin, 1999). para determinar la concentración de los metales pesados en cada uno de ellos por Absorción atómica de flama, en un equipo marca Varian Spectra 200.

Cuadro 3. Rangos normales, críticos y utilizados en la planta

Elemento	Rango normal en plantas (mgkg ⁻¹)	Concentración crítica en plantas (mgkg ⁻¹)	Concentración empleada en el tratamiento SC (mgkg ⁻¹)
Pb	0.2-20	3-300	82.5
Ni	0.02-20	10-100	57
Cr	0.03-14	5-30	24

9.4 Índice de tolerancia (Wilkins, 1978).

$$It = (MRCM / MRSM) \times 100$$

MRCM = Medida de longitud de la raíz en solución con metal

MRSM = Medida de la longitud de la raíz en solución sin metal

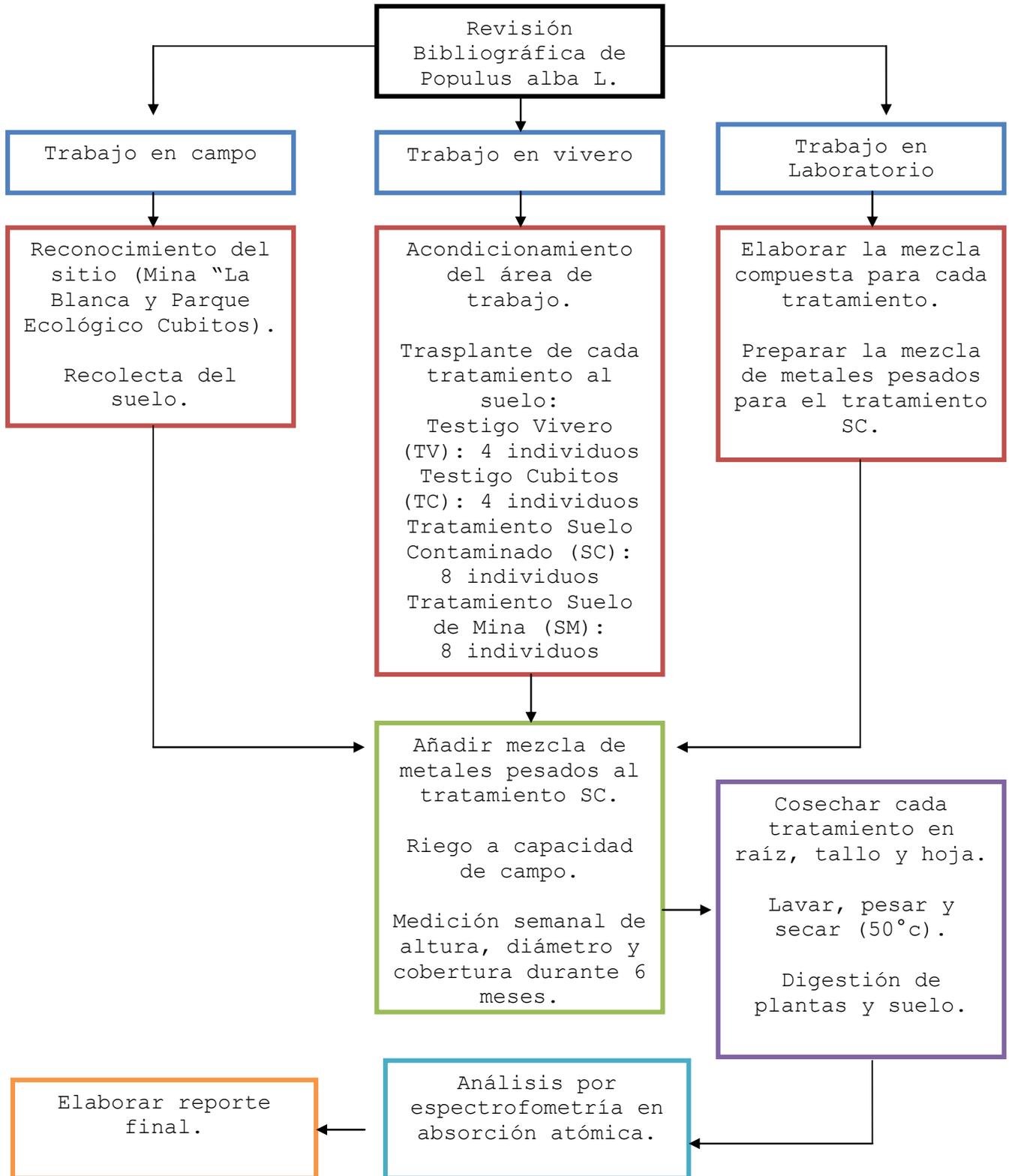
Con los resultados obtenidos del contenido de metales pesados en planta, se calculo el Factor de traslocación (Zhang *et al.*, 2010) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Ft = C_{tallos} / C_{raíces}$$

Donde:

C= concentración del metal

Diagrama de Flujo



X. Resultados

10.1 Análisis del suelo

Cuadro 4. Resultados de los parámetros físicos y químicos para los diferentes tratamientos del suelo.

Parámetros	Testigo Vivero TV	Testigo vivero con mezcla de metales pesados SC	Testigo Cubitos TC	Suelo de Mina SM
pH	8.45	7.12	8.42	8.24
Conductividad eléctrica mmhos/cm	0.84	1.18	0.39	0.44
	Efectos despreciables de la salinidad	Muy ligeramente salino	Efectos despreciables de la salinidad	Efectos despreciables de la salinidad
Densidad aparente g/cc	0.98	0.93	1.07	1.09
Densidad real g/cc	2.26	2.41	2.15	3.30
% de Materia Orgánica	4.21 Alto	4.57 Alto	2.86 Medio	1.61 Medio
% Nitrógeno total	0.21	0.22	0.14	0.08
Clase Textura	Franco-arenosa	Franco-arenosa	Franca	Franca
Fósforo	9 Medio	7.5 Medio	39 Alto	6 Medio
Ca Cmol(+) Kg⁻¹	4.91 Bajo	3.43 Bajo	9.42 Medio	9.81 Medio
Mg Cmol(+) Kg⁻¹	16.68 Alto	8.91 Alto	8.39 Alto	6.45 Alto
Na Cmol(+) Kg⁻¹	27.76	25.93	12.12	13.67
K Cmol(+) Kg⁻¹	6.57 Alto	4.87 Medio	12.97 Alto	5.80 Medio

El pH que presentó el tratamiento con la mezcla de metales pesados (SC) fue de 7.1 y se considera como neutro; para el testigo con suelo de vivero (TV) y el testigo con suelo del Parque Ecológico Cubitos (TC) para ambos fue de 8.4 y para el tratamiento con suelo de mina (SM) de 8.2, estos tratamientos se consideran medianamente alcalinos de acuerdo con la NOM-21-RECNAT-2000; *Populus alba L.* se desarrolla mejor en suelos con pH entre 5.5 a 7.5 (Swanson, 2007), aun que también soporta suelos con altas concentraciones de sales.

El porcentaje de materia orgánica (Cuadro 4) en TC y SM es medio (2.86 y 1.6%, respectivamente), mientras en TV (4.21%) y SC (4.57 %) es alto de acuerdo con la NOM-21-RECNAT-2000.

La textura fue franco-arenoso para TV y SC, es típica de un suelo que posee en su mayoría arena y cuenta con limo y arcilla obteniendo una coherencia entre partículas. La textura fue franca para SM y TC ya que la presenta un suelo que tiene una mezcla relativamente uniforme de los tres separados texturales (NOM-21-RECNAT-2000).

La densidad aparente (Cuadro 4) para TV fue de 0.98 g/cc, en SC de 0.93 g/cc, en TC de 1.07 g/cc y para SM de 1.09 g/cc; esto indica que los valores de los tratamientos, recaen en suelos de textura migajonosa (franca) y que presentan una estructura granular compuesta, muy porosa y materia orgánica bien evolucionada. Esto permite una mayor facilidad de penetración de las raíces en la profundidad del suelo y una alta capacidad para almacenar agua en la zona radicular (Ríos, 1985).

La densidad real para TV fue de 2.26 g/cc, en SC de 2.41 g/cc, para TC de 2.15 g/cc. El tratamiento SM presentó una densidad real de 3.3 g/cc, indicando que se presentan diferencias en su composición mineralógica con densidades diferentes (Ríos, 1985).

La conductividad eléctrica (CE) a 25°C reportada en mmhos/cm en una solución, es proporcional al contenido de sales sueltas e ionizadas contenidas en esa solución (NOM-21-RECNAT-2000). La conductividad eléctrica en TV fue de 0.8, en TC de 0.3 y en SM de 0.44, indicando que en estos tratamientos existen efectos despreciables de la salinidad. El tratamiento SC presentó una conductividad eléctrica de 1.18, que resultó muy ligeramente salino de acuerdo con la NOM-21-RECNAT-2000. *Populus alba L.* se desarrolla mejor en suelos con sodio menores de 0.5% (García 2007), aunque llega a soportar suelos con altas concentraciones de sales.

El porcentaje de nitrógeno total fue en TV de 0.21 %, en TC de 0.14 %, en SM de 0.08 % y en SC de 0.22 %; estos valores son considerados como altos y medios (NOM-21-RECNAT-2000).

El Ca (Cuadro 4) obtenido en $\text{Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ para TV fue de $4.91 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ y para SC de $3.43 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ y son considerados como valores bajos; en TC de $9.42 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ y en SM de $9.81 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$, estos son considerados como medios, de acuerdo a la NOM-21-RECNAT-2000.

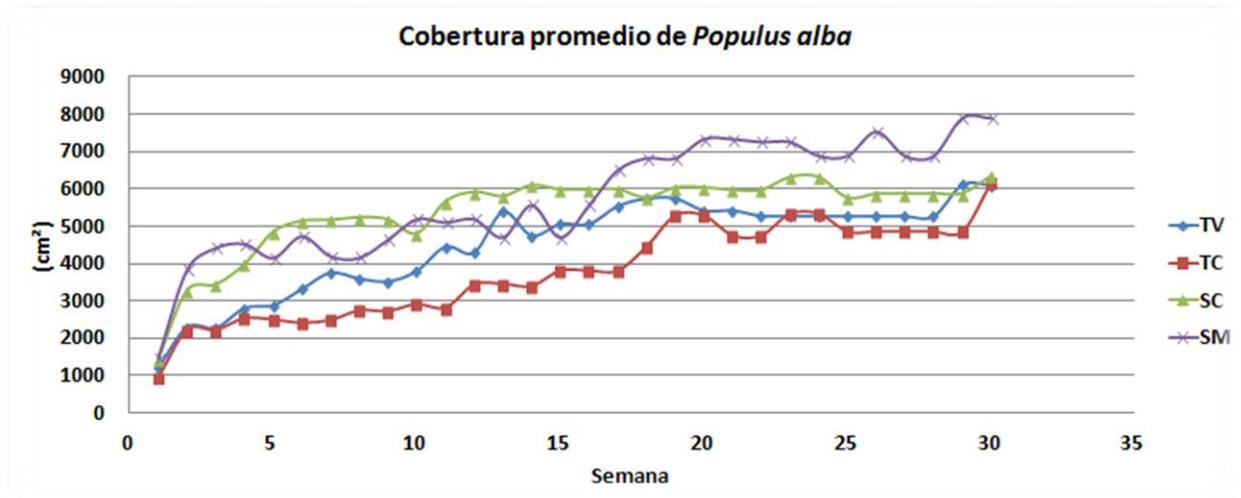
Las concentraciones de Mg (Cuadro 4) en $\text{Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ obtenidos para TV fue de $16.68 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$, en SC de $8.91 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$, en TC de $8.39 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ y en SM de $6.45 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$; Como lo establece la NOM-21-RECNAT-2000, todos los valores están en la clasificación alta.

Las concentraciones de Na (Cuadro 4) obtenidas en $\text{Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ para los tratamientos que no se añadió metales pesados fueron para TV $27.76 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$, en TC de $12.12 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ y en SM de $13.67 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$; para el tratamiento que se añadió metales pesados, la concentración en SC fue de $25.93 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$.

Para K, las concentraciones (Cuadro 4), obtenidas en TV fue de $6.57 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ y en TC de $12.97 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$, ambos valores se consideran como altos; para SC fue de $4.87 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$ y para SM de $5.80 \text{ Cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$, y son considerados valores medios de acuerdo a la NOM-21-RECNAT-2000.

XI. Análisis de la planta

11.1 Cobertura



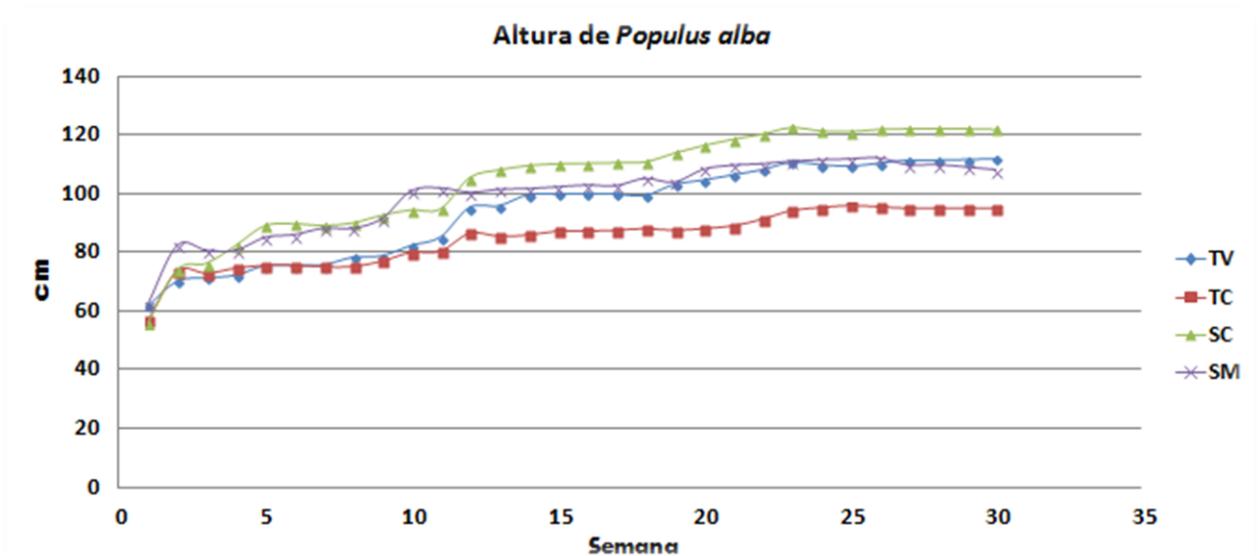
Gráfica 1. Cobertura promedio de *Populus alba L.*

En la gráfica 1 se muestra la cobertura de *Populus alba L.*, en la primer semana todos los tratamientos tuvieron un crecimiento semejante; el tratamiento de suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) y el tratamiento de suelo de la mina "La Blanca" (SM) a partir de la semana 5 hasta la 10 alcanzaron un crecimiento de 5000 cm² y 4800 cm², respectivamente, ambos presentaron un desarrollo de la cobertura mayor que el testigo del Parque Ecológico Cubitos (TC) y el testigo con suelo de vivero (TV).

Para la semana 10 los tratamientos SC y SM junto con el testigo TV presentaron un crecimiento similar en el desarrollo de la cobertura entre los valores 4000 cm² y 6000 cm², dejando al testigo TC por casi 2000 cm² debido a su lento crecimiento.

A partir de la semana 15 hasta la 29, el tratamiento SM aumento su cobertura presentando un desarrollo rápido y constante y termino casi 2000 cm² por encima del tratamiento SC, y los testigos TV y TC; el tratamiento SM demostró que obtuvo a lo largo del experimento el mayor aumento en la cobertura.

11.2 Altura



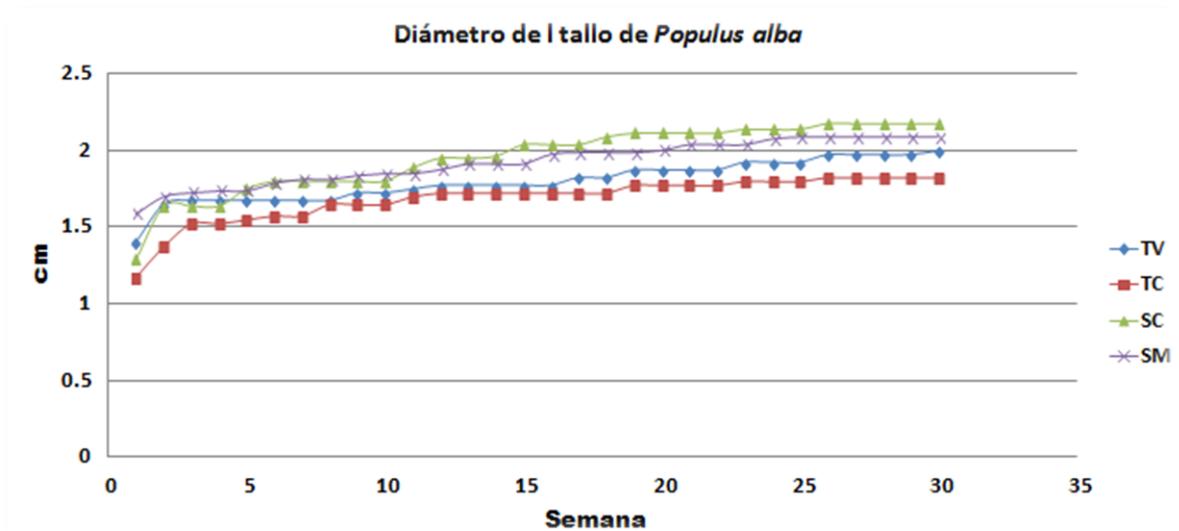
Gráfica 2. Altura promedio de *Populus alba L.*

La altura promedio de *Populus alba L.* para la primera semana todos los tratamientos tuvieron un desarrollo semejante (Gráfica 2); el tratamiento de suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) y el tratamiento de suelo de la mina "La Blanca" (SM) a partir de la semana 4 hasta la 12 alcanzaron una altura de 100 cm y 105 cm, ambos presentaron una altura mayor que el testigo del Parque Ecológico Cubitos (TC) y el testigo con suelo de vivero (TV).

A partir de la semana 15 hasta la 29, el tratamiento SM y el testigo TV presentaron un crecimiento similar en la altura y alcanzaron sus valores máximos, para SM de 108 cm y para TV de 112 cm; el testigo TC demostró un aumento lento en la altura y alcanzó el valor máximo de 98 cm, demostrando un crecimiento menor comparado con los otros tratamientos.

El tratamiento SC aumentó su altura presentando un desarrollo rápido y constante desde la semana 12 hasta la 29, el valor máximo que obtuvo fue de 121 cm; este demostró a lo largo del experimento que obtuvo el mayor aumento en la altura.

11.3. Diámetro del tallo



Gráfica 3. Diámetro promedio del tallo de *Populus alba* L.

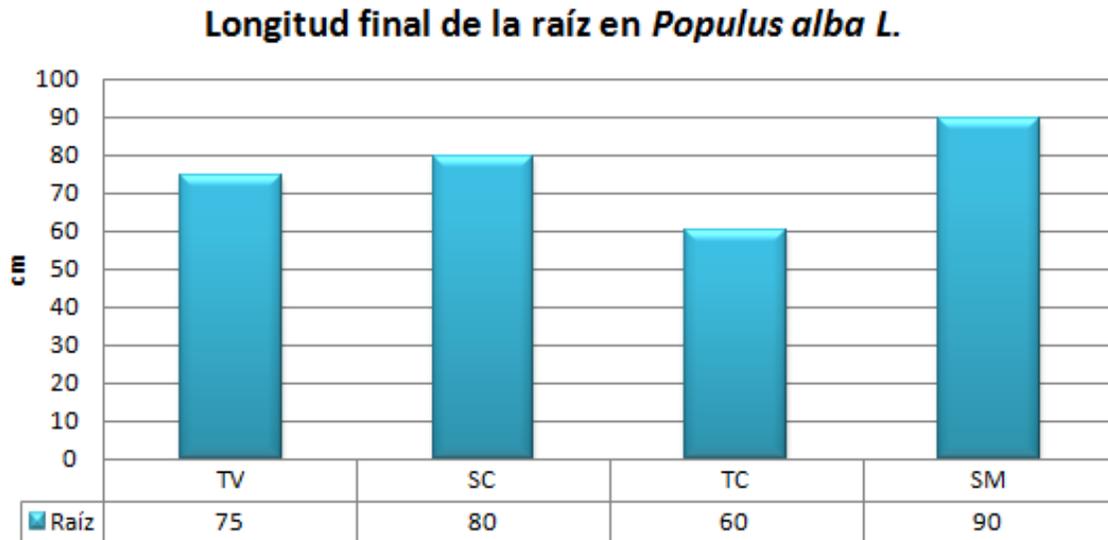
En la gráfica 3 se muestra el diámetro del tallo de *Populus alba* L., en la primer semana el tratamiento de suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) inicio con 1.2 cm, el tratamiento de suelo de la mina "La Blanca" (SM) con 1.5 cm; el testigo del Parque Ecológico Cubitos (TC) inicio con 1.1 cm y el testigo con suelo de vivero (TV) con 1.4 cm.

Para la semana 7 los tratamientos SM y SC alcanzaron un diámetro de 1.8 cm dejando a los testigos TV y TC con una diferencia de 0.2 cm en el desarrollo del diámetro.

A partir de la semana 7 hasta la 29, el tratamiento SM y y el testigo TV presentaron un crecimiento similar en el diámetro y alcanzaron el valor máximo de 2 cm; el testigo TC demostró un aumento lento en el diámetro y alcanzo el valor máximo de 1.8 cm, demostrando un crecimiento menor comparado con los otros tratamientos.

El tratamiento SC aumentó su diámetro presentando un desarrollo rápido y constante desde la semana 6 hasta la 29, el valor máximo que obtuvo fue de 2.1 cm; este demostró a lo largo del experimento que obtuvo el mayor aumento en el diámetro del tallo.

11.4 Efectos sobre la longitud radicular



Gráfica 4. Longitud final de la raíz en *Populus alba* L.

En la gráfica 4 se muestra la longitud final de *Populus alba* L. durante los seis meses que duro el experimento, el tratamiento de suelo de la mina "La Blanca" (SM) (Figura 5) y el tratamiento de suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) (Figura 3) obtuvieron una mayor longitud radicular comparado con el testigo con suelo de vivero (TV) (Figura 2) y el testigo del Parque Ecológico Cubitos (TC) (Figura 4).



Figura 2. Raíz testigo TV antes



Figura 3. Raíz Tratamiento SC después



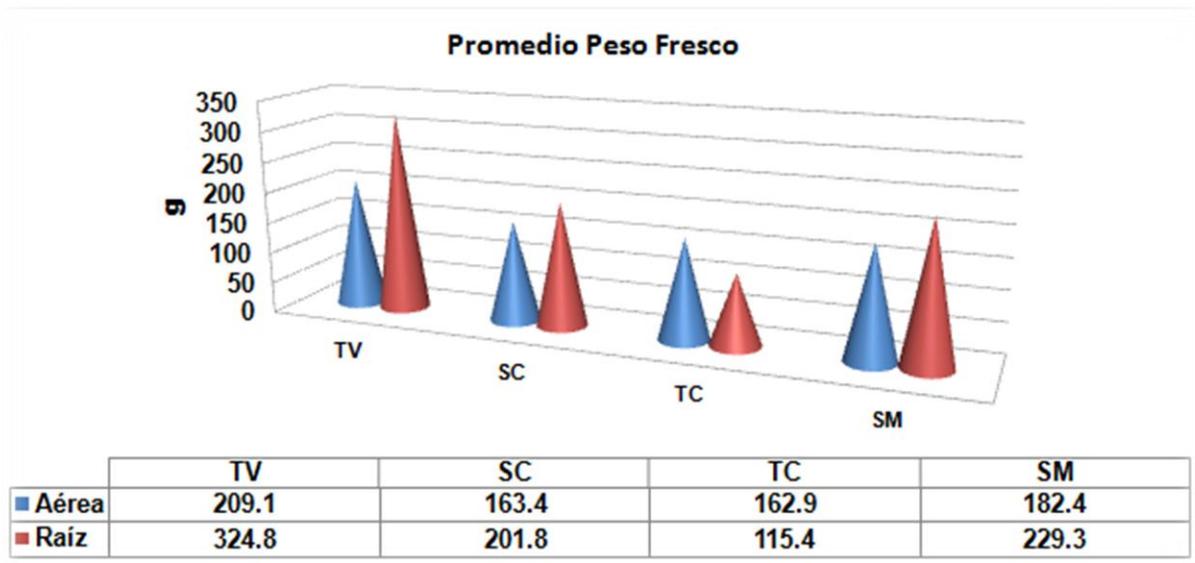
Figura 4. Raíz testigo TC antes



Figura 5. Raíz Tratamiento SM después

En las figuras 3 y 5 se muestra para los tratamientos SC y SM la longitud de la raíz más larga y gruesa comparado con los testigos TV y TC; el tratamiento SM demostró un mayor volumen y longitud en la raíz comparado con el tratamiento SC; la longitud de la raíz es un parámetro morfológico asociado al estrés que provocan los metales pesados en las plantas cuando se encuentran en altas concentraciones dentro de la planta (Ginocchio *et. al*, 2002).

11.5 Peso Fresco



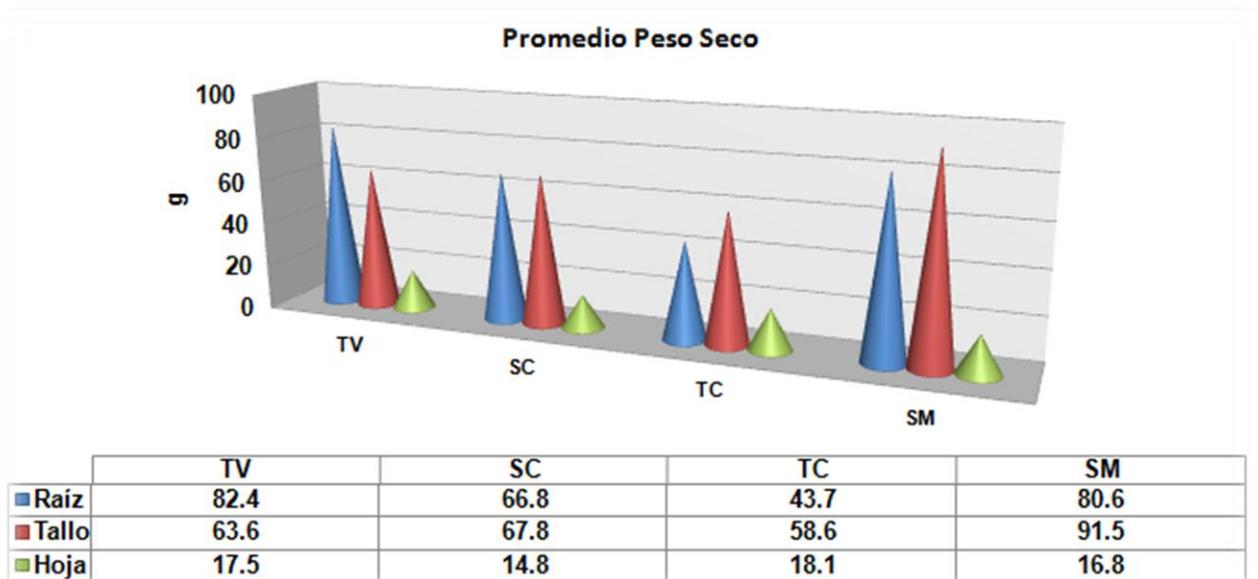
Gráfica 5. Promedio del Peso Fresco de *Populus alba L.*

El promedio del peso fresco (Gráfica 5) realizado en la raíz y parte aérea de la planta de *Populus alba L.* para todos los tratamientos. El promedio de la raíz entre tratamientos fue para el testigo con suelo de vivero (TV) de 324.8 g, para el testigo del Parque Ecológico Cubitos (TC) de 115.4 g, para el tratamiento de suelo de la mina "La Blanca" (SM) de 229.3 g y para el tratamiento de suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) de 201.8 g.

El promedio obtenido de la parte aérea entre tratamientos fue para TV de 209.1 g, para TC de 115.4 g, para SM de 182.4 g y para SC de 163.4 g.

En general el testigo TV, fue el que obtuvo el mayor peso para ambas partes de la planta comparado con los tratamientos SM y SC; el testigo TC fue el que obtuvo el menor peso para ambas partes de la planta.

11.6 Peso Seco



Gráfica 6. Promedio del Peso Seco de *Populus alba L.*

Al término de la fase experimental, se cosecharon y pesaron por separado las raíces, tallos y hojas de cada tratamiento. En la gráfica 6 se muestra el promedio del peso seco de *Populus alba L.* para todos los tratamientos; para el peso promedio de la raíz los resultados fueron los siguientes: en el testigo con suelo de vivero (TV) 82.4 g, en el testigo del Parque Ecológico Cubitos (TC) 43.7 g, en el tratamiento de suelo de la mina "La Blanca" (SM) 80.6 g y en el tratamiento de suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) 66.8 g.

Respecto al peso promedio del tallo los resultados fueron los siguientes: en TV 63.6 g, en TC 58.6 g, en SM 91.5 g y en SC 67.8 g. Para el peso promedio de las hojas los resultados fueron los siguientes: en TV 17.5 g, en TC 18.1 g, en SM 16.8 g y en SC 14.8 g.

En general el testigo TV fue el que obtuvo mayor peso en la raíz, el testigo TC obtuvo mayor peso en las hojas y el tratamiento SM obtuvo mayor peso en el tallo.

El porcentaje de pérdida de peso entre fresco y seco en la raíz para TV fue de 17.6%, en SC 33.2%, en TC 56.3% y en SM 19.4%; el porcentaje de pérdida de peso entre fresco y seco en la parte aérea para TV fue de 18.9%, en SC 17.4%, en TC 23.3% y en SM 8.3%. En general el testigo TV fue el que perdió menor peso en raíz y el tratamiento SM el que perdió menor peso en la parte aérea.

XII Metales pesados

Cuadro 5. Concentración de metales pesados totales en suelo.

Muestra	Pb mg/kg	Ni mg/kg	Cr mg/kg
Rango normal en suelo (mg/kg)¹	2-300	2-750	5-1500
Concentración crítica total en suelo (mg/kg)²	100-400	100..-	75-100
Antes de la cosecha	10.5	11	5.54
TV	136*	42	13
SC	34	32	16
Antes de la cosecha	57.19	18.1	12.85
TC	147*	14	3
SM	143*	28	19

1. Los datos proceden de Bowen, HJ. Environmental Chemistry of the Elements. Londres (1984)

2. Concentración crítica total de Kabata-Pendias, H. Trace Elements in Soil and Plants. Florida (1984).

(*) Valores críticos

Los valores de Pb, Ni y Cr en el suelo después de la cosecha aumentaron para el testigo de suelo de vivero (TV), el tratamiento de suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) y para el tratamiento de suelo de la mina "La Blanca" (SM) comparado con los valores de antes de la cosecha.

El testigo TC solamente presento un aumento en el valor de Pb y una disminución en los valores de Ni y Cr comparado con los valores de antes de la cosecha.

Cuadro 6. Concentración de metales pesados en los diferentes órganos de la planta.

Muestra	Pb mg/kg ⁻¹	Ni mg/kg ⁻¹	Cr mg/kg ⁻¹
Rango normal	0.2-20	0.02-20	0.03-14
Valor crítico Bowen, H.J.M, 1979	3-300	10-100	5-30
TV Raíz	219*	ND	ND
TV Tallo	198*	ND	ND
TV Hoja	103*	6.6	ND
SC Raíz	281*	ND	ND
SC Tallo	218*	ND	ND
SC Hoja	172*	1.9	ND
TC Raíz	232*	ND	ND
TC Tallo	232*	ND	ND
TC Hoja	167*	5.4	ND
SM Raíz	254*	ND	ND
SM Tallo	213*	ND	ND
SM Hoja	157*	2.5	ND

(*) Valores críticos de acuerdo a Bowen, H.J.M, 1979, ND= No detectado.

El pH del suelo en los diferentes tratamientos (Cuadro 2), está en un rango que va de medianamente alcalino a neutro, por lo que los metales no se encuentran fácilmente disponible en el suelo (Alloway, 1990; Kabata- Pendias y Pendias, 1984).

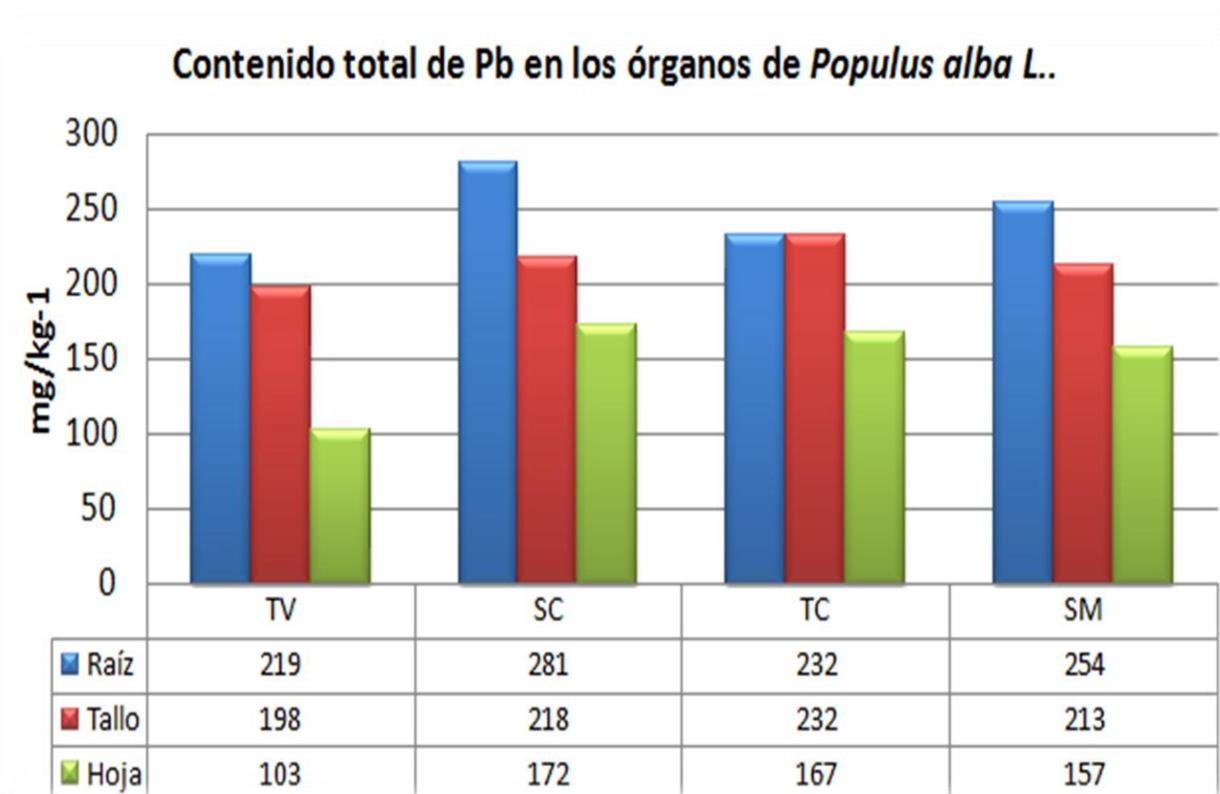
En base al cuadro 6, se elaboro la secuencia de extracción y acumulación de metales en los diferentes órganos de todos los tratamientos (Cuadro 7) y se determino lo siguiente:

Cuadro 7. Secuencia de acumulación de Pb en los órganos de *Populus alba L.* en los diferentes tratamientos.

Pb TV, SC, TC, SM Raíz> Tallo> Hoja Todos en concentraciones criticas
--

De acuerdo a Kabata-Pendias (1984) y Alloway (1990) el Pb aunque no es fácilmente soluble en el suelo, es absorbido principalmente por los pelos de la raíz y es almacenado en las paredes celulares en mayor proporción de los otros órganos. Cuando el Pb está presente en formas solubles en soluciones de nutrientes, las raíces son capaces de absorber grandes cantidades de este metal; lo que indica que la mayor absorción en todos los tratamientos fue en la raíz (Cuadro 7).

12.1 Contenido total de Pb en los órganos de *Populus alba L.*



Gráfica 7. Contenido total de Pb en los órganos de *Populus alba L.*

Todos los tratamientos presentaron concentraciones críticas de Pb (Gráfica 7), la concentración de Pb fue ligeramente más grande en las plantas desarrolladas en el suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) y en el suelo de la mina "La Blanca" en comparación con las plantas crecidas en el suelo sin contaminar (TV y TC).

Cuadro 8. Secuencia de acumulación de Ni en los órganos de *Populus alba L.* en los diferentes tratamientos.

<p style="text-align: center;">Ni TV, SC, TC, SM Hoja No está en concentración crítica</p>

El Ni se detectó solamente en las hojas de todos los tratamientos (Cuadro 8), debido a que Ni se incorpora fácilmente y rápidamente por las plantas y aunque el transporte y el almacenamiento parecen estar controlados por el pH, este metal es móvil y se acumula en hojas y semillas solamente (Kabata- Pendias y Pendias, 1984).

Cuadro 9. Secuencia de acumulación de Cr en los órganos de *Populus alba L.* en los diferentes tratamientos.

<p style="text-align: center;">Cr TV, SC, TC, SM No detectado</p>
--

De acuerdo a Alloway (1990) y a Kabata-Pendias y Pendías (1984) las concentraciones de Cr en forma disponible para las plantas son extremadamente pequeñas en la mayoría de los suelos y esta falta de solubilidad se refleja en las bajas concentraciones del elemento en las plantas (Cuadro 9). Una baja tasa de absorción de Cr por las plantas a partir de la fracción soluble de este metal está relacionada con el mecanismo de la absorción por las raíces. Aparentemente los tejidos de la raíz no son capaces de simular la reducción de Cr^{3+} a fácilmente soluble Cr^{2+} , que es la forma más inestable bajo condiciones normales del suelo. Sin embargo, los mecanismos de absorción y traslocación de Cr en las plantas parecen ser similares a los de Fe, cual se refleja en una relación Cr / Fe bastante estable en tejidos de plantas (Kabata-Pendias y Pendías,1984).

Cuadro 10. Índice de tolerancia

Índice de tolerancia en porcentaje (%)	
SC/TV	106.6 %
SC/TC	133.3 %
SM/TV	120 %
SM/TC	150 %

De acuerdo a Shu *et al.*, 2002 (Cuadro 10) el índice de tolerancia es el cociente entre la longitud media de la raíz en la solución con metal y la longitud media de la raíz en la solución sin metal por 100%; se obtuvieron valores por arriba del 100% para los tratamientos SC y SM, lo cual indica que son plantas tolerantes.

Cuadro 11. Factor de traslocación

Metal	FT TV		FT SC	
Pb	0.90	Acumuladora	0.77	Acumuladora
Ni	ND		ND	
Cr	ND		ND	

Metal	FT TC		FT SM	
Pb	1	Acumuladora	0.83	Acumuladora
Ni	ND		ND	
Cr	ND		ND	

En el cuadro 11 se utiliza el factor de traslocación para definir la efectividad en el transporte de metal de la raíz al tallo (Zhang *et al.*, 2010); se considera que las plantas tolerantes tienen valores menores de 0.5, las acumuladoras menores de 1 y las hiper acumuladoras mayor de 1.

XIII. Discusión

El Pb presente en el suelo está estrechamente ligado a la materia orgánica y el pH; es decir que cuando se tenga un pH alcalino y una materia orgánica alta (Cuadro 4) en el suelo la absorción de Pb seguirá incrementándose en función del aumento del pH que varía desde 3.0 hasta 8.5; el radio iónico del Pb puede actuar bloqueando el acceso de los iones en los sitios de absorción de las raíces provocando niveles altos de materia orgánica, pH y macro nutrientes; las altas concentraciones de Pb en el suelo causan un desequilibrio en las proporciones de nutrientes minerales dentro de los tejidos de las plantas en crecimiento; el Pb bloquea la entrada de cationes en la punta de la raíz y obstruye la entrada de iones como K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} y Fe^{3+} provocando una disminución de estos ocasionando una acumulación de altas concentraciones en el suelo facilitando la movilidad del Pb (Cuadro 4) (Goodbold, *et al.*, 1991; Vargas, 2006; Lee, 1998). El % de Nitrógeno es reducido bajo la toxicidad por Pb (Cuadro 4) (Burzynski, 1984; Vargas, 2006).

La introducción de metales pesados como el Pb en *Populus alba L* provoca un aumento en la producción de biomasa de las hojas, el tamaño de la altura y un engrosamiento en el diámetro del tallo (Gráfica 1, 2 y 3) debido a que la planta muestra una mayor productividad y resistencia cuando es expuesto a este metal (Giachetti, 2006; Vamerali, 2008; Borgui, 2007).

El análisis final de la longitud radicular muestra que el Pb afectó más el crecimiento de los tratamientos contaminados (SC y SM) observando claras diferencias con los testigos (TV y TC) sin Pb a lo largo de los 6 meses (Gráfica 4). La longitud de la raíz es un parámetro morfológico asociado al estrés (Figuras 2, 3, 4 y 5) que ocasionan las altas concentraciones de Pb y metales como Cu, Zn, Cd y Cr dando principalmente una mayor acumulación en la raíz (Guerra, 2008; Laureysens, 2004; Borghi, 2007; Sebastiani, 2004). El Pb puede ocasionar desordenes en las actividades fisiológicas normales de las plantas; algunos síntomas visuales son la inhibición rápida de crecimiento radicular, reducción del área foliar, clorosis en hojas y necrosis foliar (Ernst, 1998; Seregin e Ivanov, 2001; Burton, 1984).

El tratamiento SM presentó una necrosis foliar parcial, una reducción en el tamaño de las hojas y clorosis en mayor proporción comparado con el tratamiento SC; para los testigos TV y TC se presentó necrosis foliar parcial, clorosis y el tamaño de hojas no se vio afectado por la acumulación de Pb (Anexo. Figuras 11, 12, 13 y 14); las altas concentraciones de Pb y metales como Cu pueden afectar la actividad enzimática, la nutrición mineral y el potencial hídrico (Sebastiani, 2004; Di Baccio, 2009; Vargas, 2006).

Las concentraciones de Pb que se presentaron en los tejidos de *Populus alba L.* para los diferentes tratamientos, están dentro del rango considerado como crítico (Cuadro 6); el contenido de Pb en raíz y parte aérea fue diferente, presentando en todos los tratamientos que la raíz obtuvo la mayor acumulación; por otro lado, se observó que las hojas tuvieron una menor absorción de Pb comparado con el tallo. Todos los tratamientos presentaron concentraciones críticas de Pb (Gráfica 7), la concentración de Pb fue ligeramente más grande en las plantas crecidas en el suelo contaminado con la mezcla de metales pesados (SC) en comparación con el suelo de la mina "La Blanca, ambos tratamientos presentaron mayor contenido de Pb a diferencia de los testigos (TV y TC), probablemente la alta concentración de Pb en los testigos TV y TC es debido a los reactivos utilizados provenientes del medio en el que fueron cultivados.

Los tratamientos respondieron con un aumento en la producción de biomasa en los diferentes órganos, ya que se ha comprobado que la especie *Populus* demuestra una mayor productividad después de la exposición al Pb y a otros metales como As, Co, Cu, Zn y Cd; esto indica que las raíces, los tallos y las hojas de *Populus alba L.* muestran su adaptación con una alta resistencia y acumulación a los niveles excesivos de Pb en el suelo (Dos Santos, 2006; Dos Santos, 2006; Vamerali, 2008).

Las concentraciones de Níquel solamente se presentaron en las hojas de *Populus alba L.* para los diferentes tratamientos y no están dentro del rango considerado como crítico (Cuadro 6); debido a que se incorpora fácil y rápidamente por las plantas y aunque el transporte y el almacenamiento parecen estar controlados por el pH, este metal es móvil y se acumula en hojas y semillas solamente; las concentraciones de Ni en plantas que crecen en suelos no contaminados son generalmente en el intervalo de 0.1-5 mg / kg sin embargo se han encontrado valores ligeramente más elevados en los cultivos en suelos altamente orgánicos (Kabata-Pendias, 1984; Alloway, 1990).

En cuanto a las concentraciones de Cromo no se determinaron en ningún órgano de *Populus alba L.* para los diferentes tratamientos (Cuadro 6); aparentemente los tejidos de la raíz no son capaces de simular la reducción de Cr^{3+} a fácilmente soluble Cr^{2+} , la cual es la forma más inestable bajo condiciones normales del suelo; sin embargo, los mecanismos de absorción y traslocación de Cr en las plantas parecen ser similares a los de Fe, donde se refleja en una relación Cr / Fe bastante estable en tejidos de plantas; las concentraciones de Cr en forma disponible para las plantas son extremadamente pequeñas en la mayoría de los suelos y esta falta de solubilidad se refleja en las bajas concentraciones del elemento en las plantas.

Las concentraciones en las partes foliares de las plantas muestran poca relación con el contenido total de Cr en el suelo; en general, las concentraciones son menos de 1 mg / kg. Las concentraciones de Ni en las plantas provoca una baja solubilidad de Cr; de acuerdo a Kabata-Pendias (1984) y Alloway (1990) el pirofosfato ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) elimina las ligaduras unidas orgánicamente de Cr (III), mientras que HCL probablemente extrae su mayoría en formas inorgánicas de Cr (III), tales como hidróxidos y fosfatos.

Al analizar el índice de tolerancia (Cuadro 10), se observa que los valores para *Populus alba L.* en Pb, el tratamiento de suelo de mina "La Blanca" SM y el tratamiento con la mezcla de metales pesados SC (87.5 ppm de Pb) están por arriba del 100% por lo que se consideran acumuladoras; y se demuestra que *Populus alba L.* presenta una alta tolerancia a Pb y que puede desarrollarse en sitios que tengan altas concentraciones de este contaminante (Shu, 2002).

Se utilizó el factor de traslocación para definir la efectividad en el transporte del metal de la raíz al tallo (Zhang, 2010); se considera que las plantas tolerantes tienen valores menores de 0.5, las acumuladoras menores de 1 y las hiper acumuladoras mayor de 1; se observó que *Populus alba L.* (Cuadros 11 y 12) en el caso de Pb el FT en los testigos TV es de 0.90 y TC de 1 y para los tratamientos SC de 0.77 y SM de 0.83. Esto indica que la traslocación del Pb es alta en esta especie.

XIV. Conclusiones

- ❖ El árbol álamo plateado (*Populus alba L.*) presenta una fácil y rápida adaptación a el suelo de mina.
- ❖ El árbol álamo plateado almacena altas concentraciones de Pb de manera crítica en raíces, tallo y hojas para todos los tratamientos; y se concentra en las raíces la mayor acumulación de Pb a diferencia de las hojas y los tallos de todos los tratamientos.
- ❖ Los tratamientos que se desarrollaron en suelo contaminado presentan una mayor tasa de crecimiento tanto en altura, cobertura y diámetro comparado con los testigos, debido al estrés que provocan las altas concentraciones de Pb sobre los órganos de la planta.
- ❖ El tratamiento SM presentó una necrosis foliar parcial, una reducción en el tamaño de las hojas y clorosis en mayor proporción comparado con el tratamiento SC; los testigos TV y TC presentaron necrosis foliar parcial, clorosis y el tamaño de hojas no se vio afectado por la acumulación de Pb en altas concentraciones.
- ❖ *Populus alba L.* es acumulador para Pb en todos los tratamientos, por lo que es considerada como una especie fitoextractora de Pb.
- ❖ Níquel solo se detectó en hoja en todos los tratamientos.
- ❖ Cromo no se detectó en ningún órgano de la planta.

XV. Bibliografía

Adriano, D., Wenzelb, W.W., Vangronsveldc J., Bolan, N. S. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*. 122, 121-142.

Alloway, B.J. 1990. Heavy metals in soils. USA. John Wiley & Sons, Inc. pp. 19-189.

Borghi, M., Tognetti R., Monteforti, G., Sebastiani, L. (2007). Responses of *Populus x euramericana* (*P. deltoides* x *P. nigra*) clone Adda to increasing copper concentrations *Environmental and Experimental Botany*. 62(3), 290-299.

Borghi, M., Tognetti R., Monteforti, G., Sebastiani, L. (2008). Responses of two poplar species (*P. alba* and *Populus x canadensis*) to high copper concentrations. *Environmental and Experimental Botany*, 62(3), 290-299.

Burton, K. Morgan, E., Roig, A. (1984). The influence of heavy metals on the growth of sitka-spruce in South Wales forests. II green house experiments. *Plant soil*. 78, 271-282.

Burzynski, M; Grabowski, A. (1984). Influence of lead on nitrate uptake and reduction in cucumber seedlings. *Acta Soc. Bot. Pol.* 53, 77-86.

Castro de Esparza, M.L. (2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *International Congress: Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*. México.

Cornelis, R., Nordberg, M. 2007. *General Chemistry, Sampling, Analytical Methods, and Speciation. Handbook on the toxicology of metals*. pp 29-35.

Cherian, S., Oliveira M. (2005). Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*. 39, 77-93.

Delgadillo-López, A., González-Ramírez, C., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J., Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical Agroecosystems*. 14, 597-612.

Di Baccio, D., D., Tognetti., Sebastiani, L., Vitagliano, C. (2003). Responses of *Populus deltoids* x *Populus nigra* (*Populus x euramericana*) clone I-214 high zinc concentrations. *New Phytologist*. 159(2), 443-542.

Di Baccio, D., Tognetti, R., Minnocci, A., Sebastiani, L. (2009). Responses of the *Populus×euramericana* clone I-214 to excess zinc: Carbon assimilation, structural modifications, metal distribution and cellular localization. BioLabs, Scuola Superiore Sant'Anna, Piazza Martiri della Libertà 33, I-56127.

Di Baccio, D. 2010. Leaf structural modifications in *Populus x euramericana* subjected to Zn excess. *Biología Plantarum*, vol.54, no.3. pp 502-508.

Djingova R., Wagner, G., Peshev, D. (1995). Heavy metal distribution in Bulgaria using *Populus nigra* "Italica" as a biomonitor. *Sci. Total Environ.* 172, 151-158.

Djingova R., Kuleff, I., Wagner, G., Peshev, D. (1996). Investigations on the time dependant variations in metal concentration in the leaves of *Populus nigra* "Italica". *Environ. Pollut.* 184, 197-202.

Djingova R., Kuleff, I., Wagner, G. (1999). Screening of heavy metal pollution in Bulgaria using *Populus nigra* "Italica". *Sci. Total Environ.* 234, 175-184.

Domínguez, M.T. (2010). Elementos traza en el sistema planta-suelo: implicaciones para la ecología de especies leñosas mediterráneas y la restauración de zonas contaminadas. *Ecosistemas* 19(1), 92-96.

Dos Santos Utmazian, M., Wieshammer, G., Vega, R., Wenzel, W. (2006). Cadmium and zinc accumulation in willow and poplar species grown on polluted soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2007, 170, 265–272.

Dos Santos, M., Wieshammer, G., Vega, R., Wenzel, W. (2006). Hydroponic screening for metal resistance and accumulation of cadmium and zinc in twenty clones of willows and poplars. *Environmental Pollution* 148 (2007) 155e165.

Ernst, W. 1998. Effects of heavy metals in plants at the celular and organism level. *Ecotoxicology, Ecological Fundamentals, Chemical Exposure, and Biological Effects.* John Wiley and Sons, Nueva York. pp 587-620.

García, J. (2007). Características generales del Álamo. *Forestación con salicáceas en áreas bajo riesgo en Patagonia.* 1-5.

Giachetti, G., Sebastiani, L. (2006). Development and chromium uptake in hybrid poplars cultivated on substrate polluted with industrial slags: *Advances in Horticultural Science.* *Advances in Horticultural Science.* 20(3), 193-198.

Ginocchio, R., Toro, I., Schnepf, D., Macnair, M. R. (2002). Copper tolerance testing in populations of *Mimulus luteus* var. *variegates* exposed and non-exposed to copper mine pollution. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 0.

Goodbold, DL., et al. (1991). Lead influences root growth and mineral nutrition of *Picea abies* seedlings. *J. Plant Physiol.* 139, 95-99.

Guerra, F. Duplessisd, S., Kohlerd, A., Martin, F., Tapia, J., Lebed, P., Zamudio, F., González, E. (2009). Gene expression analysis of *Populus deltoides* roots subjected to copper stress. *Environmental and Experimental Botany.* 67, 335-344.

Hughes, M. K., Leep, N. W., Phipps, D. A. (1980). Aerial heavy metal pollution and terrestrial ecosystems. *Adv. Ecol. Res.*, 11, 217.

Kabata-Pendias, A. Pendias, H. 1984. Trace elements in Soils and Plants. Boca Raton, Florida. CRC Press, Inc. pp. 51-68.

Kabata-Pendias A., Mukherjee, A. 2007. Trace Elements from Soil to Human. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 550.

Langer, I., Krpata, D., Fitz, W.J., Wenzel, W., Schweiger, P. (2008). Zinc accumulation potential and toxicity threshold determined for a metal-accumulating *Populus canescens* clone in a dose–response study. *Environmental pollution.* 157, 2871-2877.

Laureysens, I., De Temmermanb L., Hastira, T., Van Gysel, M., Ceulemans, R. (2004). Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture. I. Seasonal variation in leaf, wood, and bark concentrations. *Environ. Pollut.* 131, 485–494.

Lee S. (1998). Absorption characteristics of lead onto soils. *J. Ha: Mat.* 63, 37-49.

Madejón, P. (2003). Elementos traza y nutrientes en álamo blanco tras el vertido tóxico de las minas de Aznalcóllar. *Invest. Agrar.:Sist. Recur. For.* 12(3), 19-33.

Manahan, S. E. 2007. Introducción a la Química Ambiental. Mexico, D.F. Editorial Reverté. pp. 303-352.

Navarro-Aviñó, J.P., Aguilar Alonso, I., López-Moya J.R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas.* 16 (2), 10-25.

NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Ediciones electrónica. México.

PROFEPA. 2000. Segundo grupo de criterios interinos de restauración de suelos contaminados con inorgánicos tóxicos (metales pesados) y otros. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. D. F.

Radojevic, M., Bashkin, N.V. 1999. Environmental Analysis. Royal Society of Chemistry and Thoma Graham House, Cambridge. pp. 180-430.

Remon, E., Bouchardonb, J.-L., Corniera, B., Guy, B., Leclerc, J.C., Faure, O. (2005). Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. Environmental Pollution 137, 316-323.

Ruiz de la Torre, J. 2001. Árboles y Arbustos de la España Peninsular. Coedición de la fundación del Conde del Valle de Salazar y Ediciones Mundi-Prensa. pp 512.

Sebastiani, L., Scebba, F., Tognetti, R. (2004). Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I214 (*P. × euramericana*) exposed to industrial waste. Environ. Exp. Bot. 52, 79–88.

Seregin, IV.; Ivanion, VB. (2001). Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. Russ. J. Plant Physiol. 48, 606-630.

Stoker, H. Seager, S. 1981. QUIMICA AMBIENTAL: Contaminación del aire y del agua. Barcelona, España. Editorial BLUME. pp. 320.

Stobrawa, K. y Lorenc-Plucińska, G. (2008). Thresholds of heavy-metal toxicity in cuttings of European black poplar (*Populus nigra* L.) determined according to antioxidants status of fine roots and morphometrical disorders. Parkowa 5. Polonia. 62-035.

Strolarikova, M. 2012. Anatomical differences of poplar (*Populus x euramericana* clone I-214) roots exposed to zinc excess. Biologia, 67 (3), 483-489.

Shu, W., Ye, Z., Lan, C., Zhang, Z., Wong, M. (2002). Lead, zinc and copper accumulation and tolerance in polulations of *Paspalum distichum* and *Cynodon dactylon*. Environ. Pollut. J. 120 (2), 445-453.

Tiffin, L. O. 1977. The form and distribution of metals in plants: an overview, in Proc. Hanford Live Sciences Symp. U.S. Department of Energy, Symposium Series, Washington, D.C. pp. 315.

Ullrich SM., Ramsey, M., Helios-Rybicka. (1999). Total and exchangeable concentrations of heavy metals in soils near Bytom an area of Pb/Zn mining and smelting in Upper Silesia, Poland. *Geochemistry* 14, 187-196.

Vamelari, T., Bandiera, M., Coletto, L., Zanetti, F., Dickinson, N., Mosca G. (2008). Phytoremediation trial son metal- and arsenic- contaminated pyrite wastes (Torviscosa, Italy). Department of Environmental Sciences, University of Parma. Parma, Italy.

Vargas, G. (2006). Efectos fisiológicos y compartimentación radicular en plantas de Ze mays L. expuestas a la toxicidad por plomo. Laboratorio de Fisiología Vegetal. Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología. Barcelona.

Volke Sepúlveda, T. y Velasco, J.A. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT. México, D.F. pp. 64.

Volkey, S. y De La Rosa, P. 2005. Suelos Contaminados por Metales y Metaloides: Muestreo y Alternativas para su Remediación. SEMARNAT-INE. México D.F. pp. 141.

Wilkins, D. A. 1978. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. *New Phytologist*. 80, 623-633.

Zhang, X., Xia, H., Zhian, Li., Ping, Z., Gao, B. 2010. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresource Technology* 101, 2063-2066.

Zimdahl, R. L. and Hassett, J. J. (1977). Lead in soil, in lead in the Environmental. Bogges, W. R. and Wixson. B. G. Eds., Report NSF, National Science Foundation. Washington, D.C. 99.

Anexo



Figura 1. Mina "La Blanca"



Figura 2. Vegetación de la Mina "La Blanca"



Figura 3. Parque Ecológico Cubitos



Figura 4. Parque Ecológico Cubitos



Figura 5.Area de trabajo



Figura 6. Trasplante en los diferentes tratamientos



Figura 7. Planta Testigo TV de *Populus alba L.*



Figura 8. Planta del tratamiento SC de *Populus alba L.*



Figura 9. Planta Testigo TC de *Populus alba L.*



Figura 10. Planta del tratamiento SM de *Populus alba L.*



Figura 11. Efectos ocasionados por Pb a las hojas del Tratamiento SC



Figura 12. Efectos ocasionados por Pb a las hojas del Tratamiento SC un mes después



Figura 13. Efectos ocasionados por Pb a las hojas del Tratamiento SM



Figura 14. Efectos ocasionados por Pb a las hojas del Tratamiento SM un mes después



Figura 15. Clorosis de las hojas por la agregación de la mezcla de metales pesados al tratamiento SC



Figura 16. Disminución de clorosis en las hojas del tratamiento SC dos semanas después de la agregación de la mezcla de metales pesados