



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

“Dinámica de acumulación de Cu, Pb y Zn en plantas de *Tagetes erecta* y tolerancia del cultivo a suelos contaminados con jales mineros“

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN TECNOLOGÍA**

PRESENTA:

GEORGINA MARISOL MOLINA GRANADOS

ASESOR: DR. ARTURO AGUIRRE GÓMEZ

CO-ASESOR: DR. JOSÉ LUIS SÁNCHEZ MILLÁN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a mi familia, por la extraordinaria labor que prestaron en la realización de esta tesis: A mi padre y hermana por el apoyo en las largas jornadas de mediciones y riego de las plantas. A mi madre por las asesorías prestadas sobre una amplia variedad de los temas presentes en la investigación.

También agradezco a todos mis amigos por el apoyo moral en todo momento. A Thalia por ser la amiga científica que me apoyó y compartió este arduo camino en la ciencia. A Jorge que fue mi compañero de banca en la escritura del trabajo y colaboraba en mis revisiones. Y a mis compañeros de carrera por alentarme con su ejemplo.

Al doctor Arturo Aguirre por los conocimientos que me dio y al doctor José Luis Sánchez por las facilidades prestadas en el invernadero para el desarrollo de este trabajo. A Georgina Guzmán por ser una gran maestra y contagiarme el amor por el área ambiental; Sin olvidar, a la doctora Paloma y la profesora Ely que me apoyaron en los aspectos a desarrollar en el laboratorio.

Por último, a la Universidad Nacional Autónoma de México y, en especial, a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por otorgarme las bases necesarias para desempeñar mi profesión de una manera adecuada.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	II
INTRODUCCIÓN.....	III
RESUMEN.....	IV
OBJETIVOS.....	V
HIPÓTESIS.....	V
I MARCO TEÓRICO	1
1.1 SUELO: DINÁMICA Y CONTAMINACIÓN.....	1
1.1.1 Contaminación del Suelo por EPT's.....	1
1.1.1.1 Suelo.....	2
1.1.1.2 Componentes esenciales del suelo.....	3
1.1.1.3 Dinámica de los componentes del suelo.....	4
1.1.1.4 Reacción del suelo ante EPT's.....	5
1.1.1.5 Transporte de EPT's en el sistema suelo – planta – agua.....	6
1.1.2 Factores y Efecto de la Toxicidad de los EPT's.....	7
1.1.2.1 Biodisponibilidad de EPT's.....	7
1.1.2.2 Efectos bioquímicos.....	8
1.1.2.3 Riesgos derivados de la acumulación de algunos EPT's.....	9
1.2 REMEDIACIÓN Y PLANTAS.....	11
1.2.1 Necesidad de Remediar Suelos Contaminados.....	11
1.2.1.1 Evaluación para determinar una remediación.....	12
1.2.1.2 Motivos para remediar.....	12
1.2.1.3 Conclusión de la remediación.....	13
1.2.1.4 Técnicas de remediación.....	13
1.2.2 Hiperacumulación y Fitorremediación.....	15
1.2.2.1 Hiperacumulación de EPT's en plantas	15
1.2.2.2 Importancia de la hiperacumulación y tolerancia.....	17
1.3 ELECCIÓN DE CONDICIONES GENERALES DEL EXPERIMENTO.....	18
II MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
2.1 MATERIALES, INSTRUMENTOS Y EQUIPOS.....	22
2.2 REACTIVOS Y SOLUCIONES.....	23
2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	23

2.3.1	Diseño Completamente al Azar.....	23
2.3.2	Análisis Estadístico.....	23
2.3.3	Características de los Materiales.....	24
2.3.3.1	<i>Caracterización del suelo</i>	24
2.3.3.2	<i>Caracterización del jal</i>	25
2.3.4	Tratamientos y Mezclas.....	25
2.3.5	Germinación y Trasplante.....	27
2.3.6	Muestreos.....	28
2.3.7	Monitoreo de Parámetros Agronómicos.....	30
2.3.8	Absorción de Metales.....	32
2.4	PROCEDIMIENTOS.....	32
2.4.1	Muestreo de Planta.....	32
2.4.2	Medición de Parámetros Agronómicos.....	33
2.4.3	Medición de Metales.....	34
2.4.3.1	<i>Digestión ácida en horno de microondas</i>	34
2.4.3.2	<i>Determinación por espectroscopia de absorción atómica</i>	35
III	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
3.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS SUSTRATOS.....	36
3.1.1	Suelo.....	36
3.1.2	Jal Minero.....	37
3.2	EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SUELO: JAL SOBRE LOS PARÁMETROS AGRONÓMICOS....	38
3.2.1	Altura de Planta.....	38
3.2.2	Número de Hojas.....	42
3.2.3	Contenido de Clorofila.....	47
3.2.4	Floración.....	48
3.3	EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SUELO: JAL SOBRE LA ABSORCIÓN DE METALES.....	50
IV	CONCLUSIONES.....	59
	REFERENCIAS.....	61
	APÉNDICES.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Componentes esenciales del suelo	3
Tabla 1.2 Formas básicas de los elementos en el suelo	4
Tabla 1.3 EPT's de interés (según Seoáñez, 1999).....	5
Tabla 1.4 Ejemplos de plantas hiperacumuladoras según Kabata-Pendias (2011).....	15
Tabla 2.1 Propiedades a analizar del suelo	24
Tabla 2.2 Tratamientos clasificados por porcentaje suelo – jal.....	25
Tabla 2.3 Tratamientos clasificados por proporción de jal.....	25
Tabla 2.4 Cantidades de sustrato por sistema.....	26
Tabla 2.5 Cantidades de sustrato finales por tratamiento.....	26
Tabla 2.6 Número de plantas necesarias por tratamiento para un muestreo.....	29
Tabla 2.7 Número de plantas necesarias por tratamiento para los seis muestreos.....	29
Tabla 2.8 Parámetros agronómicos e instrumento utilizado para medirlos.....	33
Tabla 3.1 Propiedades físicas y fisicoquímicas del sustrato.....	36
Tabla 3.2 Propiedades físicas y fisicoquímicas del jal.....	37
Tabla 3.3 Cantidad promedio de Cu en planta para los diversos tratamientos.....	53
Tabla 3.4 Cantidad promedio de Pb en planta para los diversos tratamientos.....	54
Tabla 3.5 Cantidad promedio de Zn en planta para los diversos tratamientos.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mezclas preparadas (100% S, 75% S y 50% S).....	26
Figura 2.2 Mezclas preparadas (25% S y 100% J).....	27
Figura 2.3 Semilleros con las plantas de <i>Tagetes erecta</i>	27
Figura 2.4 Tratamientos con plantas trasplantadas y distribuidas al azar.....	28
Figura 2.5 Esquema visual del diseño experimental	30
Figura 2.6 Línea del tiempo del ciclo de vida de las plantas durante el experimento.....	31
Figura 2.7 Línea del tiempo donde se muestran las fechas de medición de los parámetros agronómicos	31
Figura 2.8 Línea del tiempo donde se muestran las fechas de medición de índice de clorofila.....	32
Figura 2.9 Línea del tiempo donde se muestran las fechas de los muestreos.....	32
Figura 3.1 Curvas promedio de altura para cada tratamiento y tabla.....	38
Figura 3.2 Histogramas de altura de planta (...).....	40
Figura 3.3 Curvas promedio de número de hojas para cada tratamiento y tabla.....	42
Figura 3.4 Histogramas de número de hojas en planta (...).....	44
Figura 3.5 Comparación visual del estado de las plantas en los tratamientos.....	47
Figura 3.6 Curvas promedio de la medición de contenido de clorofila y tabla.....	48
Figura 3.7 Tiempo de floración en el ciclo de vida de <i>Tagetes erecta</i>	49
Figura 3.8 Floración observada para cada tratamiento	49
Figura 3.9 Curvas de la cinética de la cantidad de metal en planta.....	52
Figura 3.10 Cantidad de metal en planta en su parte aérea según la proporción de jal para los días de muestreo.....	56

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de este trabajo, se debe a la búsqueda de una solución ante la problemática que causan los desechos de la producción minera y su efecto en México.

La producción minera comprende actividades de extracción y refinación de minerales, y disposición de residuos, afectando cada una de ellas al ambiente en diferente grado y de diferente manera.

Estos minerales primarios a menudo contienen elementos “acompañantes”, siendo riesgosos los metales pesados, que después del proceso de refinación quedan en los materiales mineros de desecho (jales). Dichos jales se confinan en presas con el fin de evitar la contaminación del ambiente. Sin embargo, este método difícilmente funciona al 100% debido a problemas de escorrentía, filtraciones, falta de mantenimiento y sismos principalmente (Bautista, 1999).

Siendo México un país eminentemente minero por sus características geológicas (Sierra Madre Oriental y Occidental), los residuos sólidos provenientes de las minas y fundiciones son los más abundantes; sin embargo, dichos residuos no reciben tratamiento alguno (Bautista, 1999), agravando, los ya existentes, riesgos de contaminación. Un ejemplo de esto es: la actividad minera en el estado de Hidalgo que ha sido de gran importancia para la economía local y nacional. Uno de los municipios con mayor presencia en este ámbito es Zimapán, el cual concentra la mayor producción de oro y plata (al año 2007) con 30,582 toneladas, además de 1,060 toneladas de cobre (Ortiz, *et al.*, 2008). Por lo tanto, es un municipio con alto riesgo de contaminación.

Para lidiar con esta problemática, se han hecho estudios para la remediación de estos sitios, entre ellos, el realizado por Rodríguez, *et al.* (2010) sobre *Tagetes erecta* (nombre común: Cempoalxóchitl) afirmando que es una planta hiper-acumuladora de cadmio. Como esta es una planta nativa de México y presenta potencialidades como planta fitorremediadora (Sivasankar, *et al.*, 2012; Bosiacki, 2009), era probable que también presentara estas características hacia otros elementos potencialmente tóxicos (EPT's). Así que se decidió estudiar este aspecto en jales mineros de Zimapán.

También, se realizaron estudios preliminares sobre *Tagetes erecta* como instrumento de biorremediación de suelos contaminados, con posibles potencialidades también en actividades de *fitominería* (Brooks, *et al.*, 1998), útil en la recuperación en los procesos industriales de diversos metales (Cu, Zn, Pb, Ni, etc.) de interés tanto ecológico como económico.

RESUMEN

Debido a las necesidades descritas en la introducción, en este proyecto se planteó que si *Tagetes* absorbía metales y era tolerante a un ambiente muy contaminado podría usarse como planta fitorremediadora de jales, y al ser una especie nativa mexicana el proceso de remediación sería más accesible para la industria minera en México. Así es que, se indagó el efecto que otros EPT's (cobre, plomo y zinc) pueden tener sobre el comportamiento de diversos parámetros agronómicos (altura de planta, número de hojas) de crecimiento y bioquímicos (clorofila) de la planta. De esta manera, se pudo determinar la potencialidad de fitoacumulación hacia estos EPT's, lo que se logró haciendo crecer *Tagetes erecta* en un gradiente de concentración de metales generado de las mezclas de suelo no contaminado y jales mineros.

Se propusieron 5 tratamientos, diferenciados por la proporción de jal minero (proveniente de las minas de Zimapán, Hidalgo), donde se desarrollaron plantas de *Tagetes erecta*, por un periodo de tiempo que abarcara todo su ciclo vegetativo, a lo largo de ese tiempo se realizaron mediciones de algunos parámetros agronómicos y bioquímicos de interés para determinar el nivel de afectación derivado de los diversos metales presentes en los jales, las mediciones de parámetros fueron complementadas con un análisis de espectroscopia por absorción atómica para algunos metales específicos por su importancia minera y ecológica: plomo, cobre y zinc.

Los resultados obtenidos se resumen en: las plantas de *Tagetes erecta* se vieron afectadas desfavorablemente a medida que la proporción de jal en los tratamientos aumentaba, además se encontró un día de cosecha para obtener la mayor cantidad de metal en la planta. Por último, se concluyó que *Tagetes erecta* es una planta tolerante de los EPT's analizados y presenta potencialidades para ser utilizada como planta fitorremediadora en zonas mineras.

OBJETIVOS

- Objetivo general: Analizar las potencialidades en acumulación de EPT's de *Tagetes erecta* y la tolerancia que presenta hacia estos.
- Objetivos particulares:
 - Analizar el efecto de EPT's (Cu, Pb y Zn) provenientes de jales mineros sobre diversos parámetros agronómicos de crecimiento de *Tagetes erecta*.
 - Determinar la potencialidad de fitoacumulación de Cu, Pb y Zn a partir del crecimiento de *Tagetes erecta* en un gradiente de concentración de metales generado de mezclas de suelo no contaminado y jales mineros. Además, encontrar un día de cosecha para una eficiente recuperación de los metales.

HIPÓTESIS

Si *Tagetes erecta* absorbe EPT's y es tolerante a un sustrato con jales mineros, presenta potencialidades para usarse como planta para la fitorremediación de éstos, y al ser una especie nativa mexicana el proceso de remediación sería muy accesible para la industria minera en México.

I MARCO TEÓRICO

Esta sección presenta, primeramente, una descripción del suelo, la dinámica que tiene con los elementos que están en él y la posible contaminación debido a EPT's que puede sufrir. Después se habla de la necesidad de descontaminar (remediar) los suelos y las diversas técnicas que existen, se destaca la fitorremediación como una técnica que presenta muchos beneficios y, dentro de ésta, un grupo de plantas sobresalientes por su tolerancia a los contaminantes y su poder remediador. Por último, se presenta un diseño de experimento en base a los conocimientos previos y, en conjunto, con investigaciones sobre la planta *Tagetes erecta*, donde se sugiere que tiene potencialidades de tolerancia y remediación a contaminantes.

1.1 SUELO: DINÁMICA Y CONTAMINACIÓN

Una de las causas de contaminación ambiental a gran escala es la industria minera. Debido, comparado con otras industrias, a la gran cantidad de residuos que produce y la toxicidad de ellos. Todo esto deriva de una combinación de factores: las características del suelo de la zona minera, los contaminantes en sus residuos y la dinámica que existen entre ellos. En seguida se explica detalladamente estos factores.

1.1.1 Contaminación del Suelo por EPT's

Para que haya contaminación en el suelo se requiere de una sustancia (sólida o líquida) que se una al suelo, ya sea físicamente o químicamente y esta unión resulte en una amenaza para la salud humana y/o el ambiente (Morel, *et al.*, 2006).

Cuando la contaminación del suelo se debe a la presencia de EPT's los principales factores probables que la propician son la erosión y su posterior transporte en el suelo. Éstos deben tomarse en cuenta cuando quiera realizarse una remediación del sitio. Bajo ciertas circunstancias, es posible que esta remediación se haga mediante la siembra de vegetación porque se podrían inmovilizar los EPT's, además darle una cubierta vegetal al suelo con lo que se detendría el transporte de éstos y se reduciría la erosión del sitio impidiendo la propagación de la contaminación (Mirsal, 2008).

Por lo tanto, analizando la interacción entre el suelo y la vegetación (sistema suelo-vegetación) y su reacción hacia concentraciones anómalas de algún contaminante se puede aprovechar lo que hace la naturaleza para llegar a una solución sencilla de como extraer el contaminante al sembrar la vegetación adecuada (Seoáñez, 1999).

Para entender cómo se lleva a cabo la contaminación por EPT's hay que definir los elementos esenciales que existen en el suelo, las interacciones que ocurren entre los contaminantes y el suelo, su transporte y otros factores externos que puedan intervenir. Al entender estas interacciones se puede proponer cierto tipo de vegetación para remediar el sitio de modo eficiente.

1.1.1.1 Suelo

El concepto "Suelo" define un cuerpo natural formado a partir de minerales y restos orgánicos, influenciado por el clima y el medio biológico. Tienen diversas características: textura, estructura, pH, contenido de arcilla, contenido de materia orgánica, etc. Se diferencia en horizontes y suministra nutrientes y sostén a las plantas. El suelo posee cuatro componentes importantes: mineral, materia orgánica, aire y agua. La fase sólida abarca los componentes minerales y la materia orgánica, la fase líquida es el agua y la gaseosa el aire (Fassbender, 1975; Casanova, 2005).

El principal proceso formador de los suelos es la meteorización, es decir, la desintegración física y descomposición química de los minerales y las rocas que aportan los materiales inorgánicos, éstos pueden iniciar la formación del suelo en el sitio donde se han meteorizado o ser transportados a otros (por la gravedad, el viento, el agua o los glaciares).

Además de estos materiales inorgánicos, el suelo también está constituido por materiales orgánicos. Si las condiciones lo permiten, se pueden establecer bacterias, hongos, algas, líquenes, briofitos y pequeñas plantas entre las rocas y minerales meteorizados.

Al observar una sección vertical de suelo se notan variaciones (color, porosidad, materia orgánica, etc.) que forman una sucesión de niveles diferenciados, científicamente denominados horizontes.

Se diferencian mínimo tres y se nombran de la siguiente manera:

1) Horizonte A (capa superior). Contiene la mayor parte del material orgánico del suelo, por lo tanto, es la región con mayor actividad física, química y biológica.

2) Horizonte B. Algunas de sus partículas provienen de la capa superior debido a filtración, es una región de acumulación.

3) Horizonte C. Está compuesto por las rocas y minerales meteorizados de los cuales se ha formado el suelo de los horizontes superiores (Raven, *et al.*, 1992; Casanova, 2005).

1.1.1.2 Componentes esenciales del suelo

Los nutrientes son estos componentes esenciales, los necesitan las plantas para vivir, los macronutrientes son los que se necesitan en grandes cantidades, los medioelementos y los micronutrientes (oligoelementos o elementos traza) necesarios en pequeñas proporciones. La tabla 1.1 muestra su clasificación (Seoáñez, 1999).

Tabla 1.1 Componentes esenciales del suelo

Macronutrientes	Medioelementos	Micronutrientes
N	Ca	Fe
P	S	Mn
K	Mg	Zn
	Cu	Co
	B	Se
	Mo	I

Como se escribió anteriormente, el suelo proviene de una roca madre que está compuesta por diversos minerales según su origen. Debido a esto el contenido de elementos en el suelo es variable, haciéndose notar estas diferencias mucho más en los micronutrientes según el sitio que sea seleccionado. Además estos elementos se encuentran en diversas formas según la degradación de la roca madre (material original), el clima, el porcentaje de materia orgánica (MO), el contenido de agua, los enlaces iónicos existentes y la acidez. Las formas básicas en que se encuentran los elementos en el suelo se presentan en la tabla 1.2.

Es de especial atención el papel del clima, y aunado a éste, la acción del agua pues determinan la dinámica de los elementos componentes del suelo (Seoáñez, 1999).

Tabla 1.2 Formas básicas de los elementos en el suelo

<p>Asimilables por los vegetales</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Solución del suelo (fracción soluble en agua) - Iones atraídos por las cargas eléctricas del suelo (fracción de cambio). <p>Complejos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fracción adsorbida (metales – materia orgánica) - Fracción quelatada (metales – materia orgánica) - Fracción ligada por ciertos enlaces (metales – materia orgánica) <p>Minerales secundarios:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fracción de minerales arcillosos - Fracción de los óxidos metálicos insolubles - Minerales primarios
---	---

1.1.1.3 Dinámica de los componentes del suelo

Principalmente los elementos del suelo dependen de la composición de la roca madre y variaran en función de factores físicos, químicos, biológicos y componentes externos (climáticos).

Esta variación en los elementos tiene un carácter dinámico, derivando en transformaciones continuas a lo largo del tiempo (por ejemplo, fenómenos de disolución, el arrastre, el lavado, la pendiente, la evaporación, la adsorción, etc.)

De la misma manera que los elementos del suelo siguen cierta dinámica, los EPT's también la siguen y varían en función de los mismos factores; éstos pueden causar la acumulación de los EPT's provocando riesgos de contaminación (Seoáñez, 1999):

<p>Causas de Riesgo</p>	}	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de fertilizantes minerales. - Riegos intensivos. - Uso en riego de aguas residuales urbanas y/o industriales. - Depósitos de minerales. - Escombreras de minería. - Depósitos de residuos industriales (escorias, etc.)
--------------------------------	---	--

La actividad minera, en especial las presas de jales, están entre las principales causas por las que se da la contaminación de los suelo, debido a la gran cantidad de EPT's en los residuos que se vierten.

1.1.1.4 Reacción del suelo ante EPT's

Los vertidos industriales y urbanos, así como los mineros, aumentan el contenido de EPT's (Zn, Pb y Cu, en la tabla 1.3 se clasifican estos y otros contaminantes de interés) hasta una profundidad de 35 a 40 cm y su acumulación máxima se concentra en la superficie (5 primeros centímetros). A estas zonas tiene acceso la vegetación mediante las raíces de las planta y pueden absorber el contaminante.

La concentración del contaminante en las fases asimilables permanece invariable durante años, llegando a ser persistentes e irreversibles, lo que puede provocar graves problemas, tanto a la vegetación como en los animales que los consuman recorriendo la cadena alimenticia (Seoáñez, 1999).

Tabla 1.3 EPT's de interés (según Seoáñez, 1999)

Muy tóxicos y fácilmente disponibles	Contaminantes prioritarios según la EPA	Metales y no metales que aparecen en concentración superior a la normal por causas antropogénicas
As Pd Zn* Tl	Sb Pb* Cr Hg	Ag Pb*
Co Ag Sn Pb*	As Hg Cu* Tl	As Sb
Bi Cd Se Te	Be Ni Zn*	Cu* Sn
Ni Pt Cu* Hg	Cd Se	Hg Zn*
		Ni .

* Los tres metales son los analizados en este trabajo debido a su toxicidad y disponibilidad, y a que se presentan por causas antropogénicas, destacando como desecho de las mineras.

Los mecanismos o interacciones con las que actúa el EPT en el suelo son: unión por adsorción, precipitación, disolución y descomposición biológica.

El suelo presenta una capacidad amortiguadora ante la presencia de EPT's debido a diversos mecanismos o interacciones y por esto puede acumular metales por mucho tiempo.

Las interacciones en que interviene la materia orgánica se consideran las mayores responsables de la inmovilización de los EPT's, principalmente debido a los ácidos húmicos y fúlvicos. En otras palabras, influye en la sorción y en la formación de complejos, basada en la capacidad de quelación de sus componentes orgánicos. Otra interacción es la realizada por la biota presente en el suelo, los EPT's o vertidos sufren un ataque por los diversos organismos que se encuentren con ellos (Seoáñez, 1999).

1.1.1.5 Transporte de EPT's en el sistema suelo – planta – agua

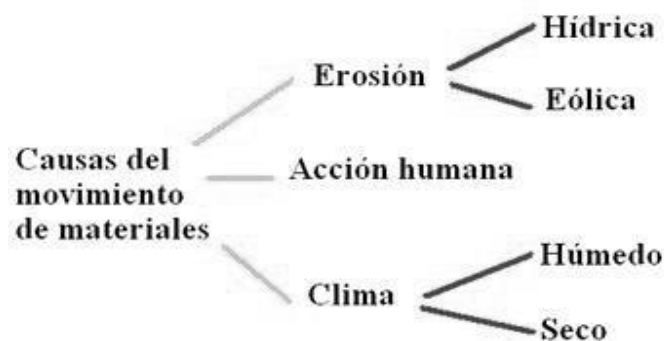
Primero, los EPT's pueden tener un efecto importante en cualquiera de las fases del suelo (sólida, líquida o gaseosa). Estas interacciones no están aisladas a la fase sólida, sino que suceden a lo largo de las diversas fases. Por eso, para Singh y Ward (2004) el transporte activo de los EPT's está determinado por los procesos de difusión y dispersión debido al movimiento que se les da, este transporte se verá afectado o no según las características del suelo y las aguas de infiltración (también la vegetación influye). Así, es importante señalar los siguientes procesos como concluyentes para la difusión y dispersión:

- 1) Intensidad de lluvia.
- 2) Evaporización.
- 3) Retención de agua del suelo.
- 4) Las propiedades hidráulicas del suelo: conductividad y propiedades de difusión.

De las características del suelo dependerá en mayor grado la concentración de los EPT's, estas concentraciones generalmente se vuelven anómalas (o exceden las normales) debido a las aportaciones antropogénicas o por erosión eólica en su superficie (Singh y Ward, 2004).

Segundo, la cantidad de agua que depende principalmente del clima. En climas húmedos hay lixiviación de materiales desde la superficie hacia el interior del suelo. El proceso será inverso para los climas secos, debido a la evaporación presente arrastrará los materiales solubles hacia la superficie.

A continuación, se muestra un esquema de algunas de las causas, que provocan el movimiento de los elementos contaminantes (Seoáñez, 1999):



Por último, la vegetación (ya sea natural o implantada por acción humana) influye de manera directa en el reciclaje y circulación de diversos elementos. En el caso de vegetación en presas de jales es difícil su desarrollo debido al ambiente adverso en el que se encuentra, aun así existen especies que sobreviven y absorben cierta cantidad de EPT's incluyéndolos en su reciclaje y circulación (Seoánez, 1999).

Además, la vegetación en una presa de jales puede resolver el problema del drenaje ácido, haciendo que los EPT's se vuelvan menos solubles y menos movibles (Morel, *et al.*, 2006).

Es importante tener en cuenta estos factores al analizar el lugar donde se encuentra el contaminante, ya que las características variarían según el sitio y podrán dar un ambiente propicio para expandir la contaminación o podrán ayudar a retenerlo en el suelo.

Por otro lado, es necesario saber que tan tóxico es un contaminante, esto depende de otros factores intrínsecos al EPT's que en la siguiente sección se detallarán.

1.1.2 Factores y Efecto de la Toxicidad de los EPT's

Ciertas características de los EPT's los hacen riesgosos, estas pueden permanecer inalterables o tener un punto de quiebre donde se exponga su toxicidad y afecten a la biodiversidad del sitio.

A continuación se hace un repaso de los factores que se consideran primordiales para que la toxicidad de los EPT's se exponga en el suelo y se propague hacia la vida, además de hacer una remembranza de cómo afectan a las plantas y humanos algunos EPT's de importancia económica (sobre todo minera).

1.1.2.1 Biodisponibilidad de EPT's

Esta característica que afectará mayormente a los organismos (toxicidad), se refiere al alcance de la absorción de una sustancia que llega a la circulación de un organismo. Esta absorción describe la entrada de los EPT's, sus sales o compuestos, ya sea mediante la respiración, deglución o absorción por la piel.

Después de ser absorbidos los EPT's penetran al organismo, circulan dentro de éste y más tarde son excretados, almacenados o metabolizados. Los procesos anteriores atenúan el efecto del EPT dentro del cuerpo pero si se persiste en una exposición al contaminante, éste

perfecciona su movimiento hacia dentro del organismo, además se llegará a un equilibrio dinámico entre el contaminante dentro del organismo y su cantidad desechada.

[Este equilibrio ayuda a que el organismo pueda seguir viviendo y “tolerando” este contaminante. Pero si el equilibrio se rompe y la sustancia xenobiótica se incrementa demasiado o, a un grado que ya no se pueda “tolerar”; esto conducirá (por lo general) a un colapso seguido de severos problemas de salud o incluso la muerte.]

Bioacumulación o bioconcentración son términos muy relacionados a la biodisponibilidad. Se utilizan para denominar concentraciones anómalas que se incrementan en el interior de un organismo a diferencia de las concentraciones en el ambiente circundante y que no es temporal.

Por otra parte, la biodisponibilidad se ve afectada por ciertos elementos; el más importante es el estado de oxidación del ión del EPT y se conoce como especiación. Ésta a su vez puede modificar la movilidad del contaminante en el ambiente. Otro factor que afecta es el pH, todos los metales (excepto molibdeno) son más solubles y biodisponibles a valores bajos de pH, por lo tanto, los problemas de toxicidad son más serios en medios ácidos (Singh y Ward, 2004).

En las zonas mineras los EPT's tienen un ambiente propicio para ser muy tóxicos debido al drenaje ácido que suele presentarse, dejando que los iones del contaminante se liberen dándoles mayor movilidad y el pH ayuda a que sean más solubles, como consecuencia se tiene una gran biodisponibilidad de éstos.

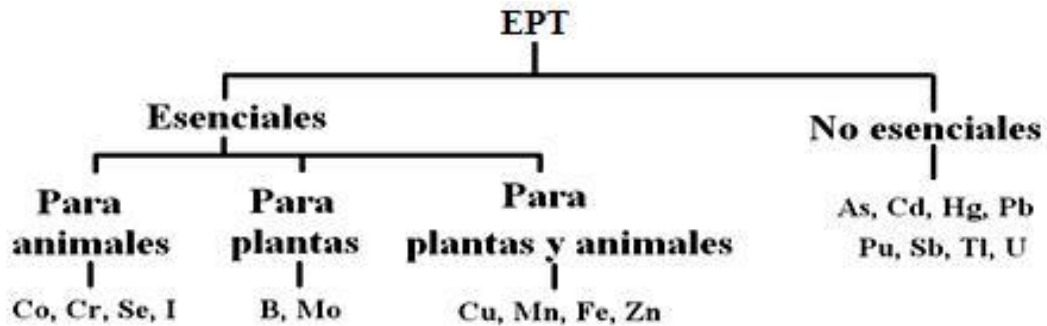
1.1.2.2 Efectos bioquímicos

Se debe recalcar que los EPT's no siempre dañan o matan a los organismos, de hecho, bajo ciertas circunstancias pueden ser de beneficio a los animales y las plantas. Para explicar cómo se diferencian según sus efectos se dividen en dos grupos:

a) Biológicamente esenciales: Son los micronutrientes, estructuran enzimas y proteínas. La deficiencia de ellos (debajo de una concentración crítica establecida) conduce a serias afecciones y disfunciones metabólicas. Mientras que el exceso de ellos (sobre cierta concentración crítica) también causará daños.

b) Biológicamente no esenciales: Al rebasar ciertas concentraciones (establecidas) llegan a ser tóxicos hacia los organismos. Por su parte, la toxicidad de ellos reside en la perturbación que hacen del metabolismo al reemplazar a los EPT's esenciales en las enzimas o en reacciones con el grupo fosfato en ADP y ATP (Singh y Ward, 2004).

Estas divisiones se aprecian en el siguiente esquema:



1.1.2.3 Riesgos derivados de la acumulación de algunos EPT's

Todos los EPT's presentan una toxicidad a partir de sobrepasar un límite crítico, al respecto, se ha hecho una vasta investigación de cómo afecta esa toxicidad a los organismos (planta, animales y humanos). En esta sección se detalla acerca de tres EPT's y los daños que pueden producir: cobre, zinc y plomo porque son los metales que se determinaron en este trabajo debido a su importancia minera (y su gran presencia en los jales mineros utilizados).

Cobre

Es un producto metalúrgico muy conocido y extraído por el humano. Se utiliza en infinidad de industrias, algunos ejemplos: en la industria eléctrica debido a su ductilidad y en la industria metalúrgica para crear aleaciones.

En cuanto a los daños que provoca en seres humanos hay estudios que lo vinculan con enfermedades y trastornos en riñones e hígado (Singh y Ward, 2004).

Su solubilidad está ligada al pH, si el pH es bajo el contenido del catión Cu^{2+} aumenta. Para el caso de las plantas, sus contenidos deberían estar en un rango de 5 – 20 mg L⁻¹ (Seoáñez, 1999).

En el esquema anterior se señala que es un elemento esencial para las plantas, a pesar de esto, en grandes cantidades causan toxicidad a un gran número de plantas. Primero afectan al crecimiento de las raíces y estimulan formación de raíces secundarias. Después al sobrepasarse la tolerancia de la raíz, se alcanza el vástago provocando un menor desarrollo de éste. También afecta el proceso de la fotosíntesis, disminuye el número de hojas y se puede mostrar enrojecimiento en las hojas (Guzmán, 2012).

Zinc

En la industria se utiliza principalmente para galvanizar y como componente de algunas aleaciones.

Se vincula a trastornos de la salud humana como enfermedades del páncreas y desordenes en el metabolismo (Singh y Ward, 2004).

Es uno de los EPT's más móviles, según su solubilidad que depende directamente del pH, con niveles bajos de pH se aumenta la solubilidad del zinc. En plantas su rango de contenido normal es: 25 - 150 mg L⁻¹ (Seoáñez, 1999).

Es difícil la toxicidad de las plantas por Zn, sobre todo en suelos básico. Sin embargo, en suelos ácidos o en terrenos cercanos a minas es posible esta intoxicación debido a los altos contenidos de este EPT's en el área. El exceso de Zinc provoca pigmentación roja en el pecíolo y las nervaduras de las hojas, reduce el crecimiento de la planta e inhibe la fijación de CO₂, además también produce clorosis (Guzmán, 2012).

Plomo

Es uno de los EPT's más contaminantes que se ha introducido al ambiente de manera antropogénica. Muestra poca movilidad en los suelos y en la vegetación.

En los humanos causa severos daños a los sistemas: nervioso, urinario y reproductor. En mujeres puede causar aborto, mientras que en los hombres reduce la fertilidad. También obstruye la biosíntesis de hemoglobina causando anemia (Singh y Ward, 2004).

Las plantas absorben el plomo principalmente del suelo. Afecta la absorción de nutrientes, el crecimiento y los procesos metabólicos. También se observa una disminución en el contenido de clorofila y longitud de planta (Guzmán, 2012).

Aunque el plomo puede entrar en grandes concentraciones a las raíces de la planta, no es común que haya un transporte significativo de éste hacia la parte aérea. Pero debido al viento el polvo del suelo, en algunos casos, provoca que las partículas finas de plomo penetran en las hojas directamente por los estomas (Morel, *et al.*, 2006).

Los efectos dañinos de los EPT's son variados y severos, sobre todo para los seres humanos. Es por esto, que surge una urgencia de descontaminar los lugares que puedan estar en contacto con las comunidades humanas, eliminando o minimizando esa contaminación.

Conocidos los factores que afectan el suelo y las características de un contaminante (o varios) se puede diseñar un método para descontaminar un sitio, existen muchos predeterminados a los que se les hacen pequeñas modificaciones para encajar con las necesidades de cada lugar. Estos métodos se denominan técnicas de remediación y se consideraran en el siguiente apartado.

1.2 REMEDIACIÓN Y PLANTAS

Bajo las circunstancias actuales de crecimiento de la población, es importante la limpieza de sitios contaminados, para evitar daños a la salud humana y tener un desarrollo sustentable.

Existen diversas técnicas para descontaminar los suelos, una de ellas es la fitorremediación que utiliza plantas tolerantes a niveles altos de contaminación para lograr descontaminar sitios. Aquellas que sean capaces de remover más de un contaminante son especialmente útiles, porque generalmente la contaminación se produce por una mezcla de componentes tóxicos. (Singh y Ward, 2004). A continuación se presenta esto de manera detallada.

1.2.1 Necesidad de Remediar Suelos Contaminados

Una vez que se ha identificado un suelo como contaminado, las leyes, normas y regulaciones demandan una investigación para conocer si los niveles de contaminación son inaceptables. Posteriormente, la remediación del suelo está dirigida a abordar los riesgos a la salud humana y al ambiente, sin perder de vista el aspecto financiero y legal. Con esto, se busca lograr que el suelo alcance un estado aceptable para un propósito dado, además de evitar que el contaminante se disperse a los ecosistemas cercanos (Morel, *et al.*, 2006).

En nuestro país, la NOM - 141 – SEMARNAT señala las especificaciones y los criterios ambientales a tener en cuenta para las etapas de preparación de sitios mineros, su construcción y operación. También toma en cuenta los procesos post-operación de presas de jales, y para su adecuado monitoreo (SEMARNAT, 2004).

1.2.1.1 Evaluación para determinar una remediación

Las políticas y el marco normativo, que rijan al sitio evaluado, son las que determinaran si se requiere una remediación. Tomando en cuenta esto, Morel, *et al.* (2006) resumen a tres, las formas de determinar que se requiere una remediación:

- a) Riesgos a la salud y el medio ambiente. Se evalúan los peligros de la sustancia (transporte y exposición potencial) hacia el humano y en ambiente, con eso se determina si se exceden los niveles aceptables.
- b) Concentración del contaminante. Se mide la concentración de la sustancia y se compara con una lista previamente diseñada por alguna agencia gubernamental.
- c) Antecedentes del suelo. Los niveles del contaminante en el suelo se comparan con los antecedentes de los suelos locales.

Los primeros dos incisos se basan en una valoración de riesgo, mientras que el tercero es un manera simple de comparar con los criterios locales si un suelo tiene altos niveles de contaminación o no (Morel, *et al.*, 2006).

1.2.1.2 Motivos para remediar

La principal razón para descontaminar un sitio es la preocupación por la salud humana y el riesgo que ésta corre. Para muchas legislaciones alrededor del mundo también se considera importante estimar los daños producidos hacia el ambiente y una solución que derive en una reurbanización de los sitios. Debido a los motivos antes señalados, no solo se recomienda la remediación de los sitios sino que se exige.

En México, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos busca garantizar un ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable, a través de la prevención de generación, la valorización y la gestión de residuos; además de buscar prevenir la contaminación y llevar a cabo remediaciones donde se requiera (LGPGIR, 2015).

1.2.1.3 Conclusión de la remediación

Es difícil delimitar cuando un sitio está “descontaminado”, debido a que no es solamente una cuestión de valores cuantitativos, sino también cualitativos. Así la valoración final de limpieza no puede basarse únicamente en un valor numérico de riesgo, sino en una serie de variables científicas y no científicas.

Para tomar una buena decisión se deben integrar varios factores políticos y sociales: información del sitio, de las legislaciones, datos científicos, factibilidad de producción, infraestructura, costos; de este modo, será transparente, consistente y reproducible la remediación del sitio (Morel, *et al.*, 2006).

1.2.1.4 Técnicas de remediación

En su inicio, la remediación para los suelos se realizaba por remociones físicas y se depositaba en vertederos o se incineraba, pero al final terminaba produciendo más daño al sitio. Por lo anterior se vio la necesidad de buscar nuevas alternativas que resultaran menos invasivas, proporcionando una buena limpieza pero menos dañina. Uno de esos métodos prometedores fue la biorremediación (usa organismos para limpiar contaminantes de suelos, agua, etc.) que posteriormente desarrolló una rama conocida como fitorremediación, con estas nuevas técnicas se logró encontrar las alternativas que proporcionaran limpieza a los sitios sin ser tan dañinas (Morel, *et al.*, 2006).

Actualmente existen muchas alternativas que se escogen según las características del sitio y Volke y Velasco (2002) las clasifican según sus tecnologías de remediación, dividiéndolas en tres tipos:

- a) Físicoquímicos. Como su nombre lo indica aprovecha las propiedades físicoquímicas (como pH, absorbancia, densidad, etc.), ya sea, de los contaminantes o del suelo para destruir, separar o contener la contaminación.
- b) Térmicos. Con el uso de calor se incrementa la volatilización, quema, descomposición o fundición de los contaminantes.

-
- c) Biológicos (biorremediación). Mediante la actividad metabólica de ciertos organismos (plantas, hongos o bacterias) se degrada, transforma o remueve el contaminante y sus residuos son inocuos.

En resumen, una remediación es necesaria para salvaguardar la salud de la población y el ambiente circundante de un sitio contaminado, en las presas de jales se ha demostrado que el encalado no es suficiente para contener el contaminante, por lo que se ha propuesto nuevos métodos para ayudar a remediarlos, siendo la fitorremediación el que sobresale de todos ellos.

La fitorremediación ha ganado muchos adeptos debido a su potencial remedidor a bajo costo comparado con otros métodos, en cuanto a una contaminación superficial. En las presas de jales se encuentra su mayor aplicación por ser un método que cubre las necesidades para este tipo de contaminación (Singh y Ward, 2004).

Fitorremediación

Este término da referencia a la utilización de plantas como colectores o agentes de la remediación de los sitios contaminados (Mirsal, 2008).

Este método utiliza diversas plantas para extraer, contener, inmovilizar o degradar los contaminantes, tanto del agua como del suelo. Se utiliza en grandes áreas (que permitan el cultivo) con bajo o moderado nivel de contaminación (Singh y Ward, 2004).

Según Singh y Ward (2004), la fitorremediación presenta varias ventajas (comparada con otros métodos):

- Menos destructivo para el ambiente.
- Menor necesidad de sitios de disposición del suelo.
- Mejor aprobación del público.
- Evita la excavación y la transportación.
- Permite limpiar a mayor escala.
- Potencialmente versátil para tratar una gran diversidad de materiales peligrosos.

Aunado a lo anterior, se ha demostrado que facilita la limpieza a gran escala y con bajos costos, este es el motivo de su éxito como técnica de remediación.

Por otro lado, hay que tener en cuenta los requisitos específicos que necesita esta técnica, contar con un terreno suficientemente grande como para realizar el cultivo de las plantas y que la contaminación se encuentre cerca o en la zona de las raíces (Singh y Ward, 2004).

Las presas de jales por lo general cumplen con los requisitos para realizar la fitorremediación por sus grandes áreas de terreno, una contaminación superficial y niveles moderados de contaminantes.

Cabe destacar que no cualquier tipo de planta puede ser utilizado en esta técnica, sino que debe presentar ciertas características que la hagan resistente ante la contaminación, por lo tanto, en el siguiente apartado se analizarán estas características.

1.2.2 Hiperacumulación y Fitorremediación

Algunas plantas tienen la capacidad de remover contaminantes al absorberlos directamente del suelo, después los transforman, transportan y acumulan en su interior (Singh y Ward, 2004).

Las plantas capaces de realizar esta absorción de contaminantes y seguir su desarrollo se conocen como hiperacumuladoras, de ellas depende la efectividad de la fitorremediación, así que en las siguientes secciones se detallará más sobre estas plantas hiperacumuladoras.

1.2.2.1 Hiperacumulación de EPT's en plantas

El término hiperacumulación se utiliza cuando concentraciones anormalmente altas (de algún EPT's) se acumulan. La siguiente tabla (1.4) muestra solo algunos ejemplos, pero la absorción siempre varía según la especie, la concentración del contaminante en el suelo, la movilidad, entre otros:

Tabla 1.4. Ejemplos de plantas hiperacumuladoras según Kabata-Pendias (2011)

Metal	Planta hiperacumuladora	Concentración reportada
Cobre	Diente de león	73 – 274 (mg kg ⁻¹)
Zinc	<i>Thlaspi caerulencens</i>	8000 (mg kg ⁻¹)
Plomo	Remolacha azucarera (hojas)	33 – 165 (mg kg ⁻¹)

Es difícil catalogar a una planta como hiperacumuladora porque su análisis es difícil, ya que, al limpiarlas para el análisis no puede asegurarse que la planta completa o sus partes subterráneas estén libres de contaminación. Además, algunas plantas acumulan en su sistema radicular pero fracasan en trasladar a otros tejidos y éstas no son de mucho interés (Morel, *et al.*, 2006).

Según Morel, *et al.* (2006) hay tres situaciones que pueden presentarse al analizar una planta:

- a) Entre especímenes de la misma especie las concentraciones varían mucho.
- b) A parte de las hojas otros tejidos pueden presentar altas concentraciones del metal.
- c) Una especie absorbe concentraciones altas de EPT's en condiciones artificiales.

Para los primeros dos casos la planta puede ser clasificada como hiperacumuladora, mientras que en el tercero no, debido a que no ha crecido en un ambiente natural. Aun así son de particular interés para la fitorremediación si toleran y completan su ciclo vegetativo exitosamente en medio de contaminación (Morel, *et al.*, 2006).

Es por esto que muchos estudios se basan en una tolerancia de las plantas y una alta absorción de EPT's (en ambientes artificiales) para considerarlas con potencialidades para ser utilizadas en la fitorremediación, a pesar, de no ser clasificadas como hiperacumuladoras.

Plantas hiperacumuladoras y tolerantes a EPT's

Estas plantas son específicas para cierto tipo de EPT's. Sus requerimientos agronómicos son pobremente conocidos para distintos tipos de suelo y concentraciones diversas de EPT's. Actualmente existen muy pocas especies disponibles para usarse en campo por lo que en general, se rechazan a las hiperacumuladoras como remediadoras de grandes áreas. Otro motivo es que se encuentran en muy pocos lugares, restringiendo su ubicación a suelos metalíferos, que naturalmente, son muy pocos.

Debido a lo anterior, se ha tenido la necesidad de buscar alternativas con plantas tolerantes a EPT's para usarlas como elementos para la fitorremediación de ciertos lugares, éstas son valoradas por sus potencialidades para la absorción de los estos contaminantes y son utilizadas como un valioso recurso biológico (Morel, *et al.*, 2006).

Al ser la fitorremediación una gran alternativa debido a las ventajas ya analizadas, se ha empezado una gran investigación para hallar plantas hiperacumuladoras y tolerantes para remediar ciertos sitios; en el caso de México hay estudios (Rodríguez, *et al.*, 2010) que sugieren que la planta *Tagetes erecta* cumple con características hiperacumuladoras al cadmio, por lo que probablemente, también pueda tolerar otros EPT's. Con esto se podría tener una planta endémica para usarse en la fitorremediación haciéndola un recurso valioso.

Absorción de EPT's por plantas

Tanto acumuladoras como plantas tolerantes pueden soportar un rango de contaminantes dependiendo de la planta que se trate, aunque ciertos elementos pueden alcanzar niveles críticos más rápidamente que otros.

Por otro lado, las plantas no reaccionan de la misma manera ante el incremento de concentraciones de contaminante en el suelo, pero generalmente, su eficiencia decae conforme se incrementan las concentraciones en el suelo.

Cuando el EPT entra al interior de la planta se debe considerar que: la concentración del elemento variará según el órgano que se estudie y la edad del mismo, tanto para plantas hiperacumuladoras como para tolerantes. Esto repercutirá en el tiempo de cosecha y las partes que se pretendan cosechar (Morel, *et al.*, 2006).

1.2.2.2 Importancia de la hiperacumulación y tolerancia

Lo atractivo de utilizar plantas que toleren o hiperacumulen es la posibilidad de retirar grandes concentraciones de un EPT sin la intervención significativa de químicos (Morel, *et al.*, 2006).

Hay muy pocas plantas clasificadas como hiperacumuladoras y de éstas se desconoce si logran los mismos resultados al ser implantadas en lugares distintos a su ambiente natural, por lo mismo se ha tratado de encontrar plantas tolerantes que logren terminar su ciclo vegetativo exitosamente en condiciones contaminantes. Las investigaciones indican que hay una gran gama de plantas que lo han logrado, dando a la fitorremediación material para poder trabajar en una remediación eficiente de sitios contaminados.

Finalmente, se puede decir que la fitorremediación es un buen método para reducir la contaminación porque previene que los componentes tóxicos se expandan y no es invasivo, esto también ayuda a mantener la salud humana y conservar la diversidad biológica, contribuyendo al desarrollo sustentable. Las investigaciones sobre plantas hiperacumuladoras y tolerantes ayudan a este método, otorgándole recursos para hacer más eficiente su remediación. Incluso hay un innovador campo llamado fitominería, que utiliza estas plantas cosechadas para reincorporar los EPT's a la industria minera, siendo un enfoque prometedor (Singh y Ward, 2004).

1.3 ELECCIÓN DE CONDICIONES GENERALES DEL EXPERIMENTO

El método que se eligió fue la fitorremediación (con plantas) debido a que es una solución de bajo costo y además, otorga una cubierta a los jales evitando que se expongan de manera directa a la acción del viento y otros factores que conllevan la dispersión de los contaminantes.

Lo siguiente fue elegir que planta se usaría para la remediación del sitio. Se presentaron dos problemas principalmente:

- 1) Las especies hiperacumuladoras que pueden absorber contaminantes a gran escala suelen ser pocas y de lugares muy alejados, derivando en la dificultad de importarlas y de adaptación de las mismas al sitio que se pretende remediar.
- 2) La posibilidad de que algún animal coma la planta y el EPT entre a la cadena alimentaria.

Por lo tanto, para este experimento se eligió una especie nativa del país con la cual se han realizado varios estudios y es conocida por su capacidad hiperacumuladora, esto elimina la primera dificultad. Para eliminar el riesgo de que la contaminación entre a la cadena alimentaria se debe realizar un estudio ecológico, adicional a este trabajo. Así que se consideró que *Tagetes erecta* es adecuada para realizar este experimento y buscar remediar la contaminación minera, ya que, es una planta con grandes potencialidades para la fitorremediación de zonas contaminadas con EPT's.

Sin embargo, antes de poder ser utilizada en la fitorremediación de jales mineros, se debe analizar si tiene potencialidades para tolerar la presencia de EPT's, porque se sabe que es hiperacumuladora de cadmio pero no se sabe mucho de su tolerancia hacia otros EPT's. De

acuerdo con esto, en este trabajo se analizará si *Tagetes erecta* es tolerante a la presencia de otros EPT's que se pueden encontrar en los jales mineros. De ser así se deducirá que esta planta tiene potencialidades para la fitorremediación de los jales de la industria minera.

De modo que, se realizó un diseño experimental completamente al azar, se eligió este tipo de diseño porque presenta las siguientes características, que se enumeran a continuación, de acuerdo con William y Gertude (1965) y Díaz (1999):

1. El arreglo es el más sencillo de los diseños estadísticos experimentales.
2. Otorga gran flexibilidad, ya que no hay restricciones en cuanto al número de tratamientos ni a las repeticiones. Además pueden variar las repeticiones de un tratamiento a otro.
3. El análisis estadístico que posteriormente se realiza es sencillo. Sin importar si el número de repeticiones es distinto para cada tratamiento, debido por ejemplo a muerte de material biológico, como en este caso que se experimentó con plantas de *Tagetes erecta*.
4. El diseño es recomendable cuando las condiciones ambientales locales no pueden ser homogenizadas y controladas para todos los individuos.
5. La interpretación de resultados es sencilla y directa.

Por otra parte, la finalidad no fue formar subgrupos sino analizar cada tratamiento por separado y la aleatoriedad nos otorga ésta posibilidad. Por lo tanto, el único factor a analizar fue: cómo afecta la proporción jal-suelo al crecimiento de las plantas y a la acumulación de metal en la parte aérea de las plantas de *Tagetes erecta*.

En cuanto al análisis estadístico de los datos, para los parámetros agronómicos podría haber variaciones aleatorias debido al diseño del experimento y la diversidad de factores que suceden simultáneamente, los parámetros agronómicos pueden verse afectados por: la genética y el ambiente (luz solar, humedad, etc.). Utilizando el análisis de varianza se logró distinguir cuando era significativo el decrecimiento de cada uno de los parámetros o si solo era producto de la aleatoriedad (Díaz, 1999). Esto se aplicó para altura de planta y número de hojas, que fueron los parámetros que contaron con todas sus mediciones a lo largo del experimento.

Aguirre (1981), propone que el siguiente paso al encontrar que existe un efecto, es determinar cuáles de los tratamientos son significativamente diferentes; esto se realizó con la prueba de

diferencias mínimas significativas, con esto, se encontró cuáles eran los tratamientos que afectaban a los dos parámetros agronómicos (altura y número de hojas).

Cabe destacar que no se midió la absorción de las raíces debido a que no se tiene una confiabilidad o certeza completa en los métodos actuales de limpieza de raíces para evitar interferencias en el análisis. Puesto que es muy difícil lograrlo y los métodos actuales no satisfacen la necesidad de limpieza, entonces se decidió realizar el análisis solo en la parte área de la planta. De todos modos, los resultados obtenidos dan una gran idea de las potencialidades de *Tagetes erecta* en cuanto a la tolerancia de EPT's.

Como se escribió en secciones anteriores, la tolerancia es la capacidad de una planta para completar su ciclo de vida en un ambiente adverso. Esto se puede determinar, en parte, al medir los parámetros agronómicos porque se ven afectados por la contaminación y evidencian deficiencias que presentan las plantas a lo largo de su ciclo vegetativo. Los parámetros agronómicos y bioquímicos medidos en este trabajo fueron: altura de planta, número de hojas y contenido de clorofila.

Por último, este experimento es de gran ayuda para la industria minera porque las legislaciones actuales se lo requieren y a nivel mundial se viene dando una presión para mejorar las circunstancias del ambiente a su alrededor. Estos nuevos métodos se adaptan muy bien para remediar los jales mineros, ya que, son de bajos costo, se prestan para las áreas que ocupan los jales y ayudan a que los EPT's no se dispersen. Todavía un extra es que con más estudios se podría implementar la fitominería (Sheoran, *et al.*, 2009) donde los EPT's se pueden recuperar y reintegrar a la producción de la mina (recuperando un valor monetario que se creía perdido).

En este trabajo se propusieron 5 tratamientos, diferenciados por la proporción de jal minero (proveniente de las minas de Zimapán, Hidalgo) donde se desarrollarían plantas de *Tagetes erecta*. Los tratamientos son: 100% S, 75% S, 50% S, 25% S y 100% J [S: Suelo y J: Jal], se realizaron mediciones de los parámetros agronómicos y bioquímicos: altura de planta, número de hojas y contenido de clorofila. Con esto se determinó el nivel de afectación en las plantas debido a la presencia de EPT's, se pudo notar como la situación de las unidades experimentales empeoraba conforme la proporción de jal aumentaba en el sustrato.

Los resultados obtenidos llevaron a la conclusión de que las plantas de *Tagetes erecta* se vieron afectadas puesto que la proporción de jal en el tratamiento aumentaba; también se determinó que es una planta tolerante de estos contaminantes mineros y que tiene potencialidades para la fitorremediación de estos sitios.

II MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Desarrollándose en el invernadero del Centro de Enseñanza Agropecuaria, en el laboratorio L-302 de Química de Suelos y Nutrición Vegetal y el Laboratorio de Análisis e Investigación en Química Agrícola y Ambiental, L-15 de La Unidad de Investigación Multidisciplinaria.

2.1 MATERIALES, INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

Materiales

- 120 bolsas de polietileno negro con capacidad de 2 litros
- 3 Bandejas (30x20) para la germinación de las plantas
- Sobres de diversos tamaños
- Mortero y pistilo
- Recipientes de plásticos (5 g)
- Jeringas (5 ml)
- Guantes de látex
- Goteros
- Vasos de precipitados (5 mL, 10 mL)
- Matraces volumétricos (10 mL)
- Semillas de *Tagetes erecta*
- Peat moss
- Sustrato suelo (del municipio de Zimapán, Hidalgo)
- Sustrato de jal (de la presa de jales No. 9, de las minas “El Monte” y “Carrizal”, en el municipio de Zimapán, Hidalgo)

Instrumentos

- Micropipetas (20 – 200 μ L, 100 – 1000 μ L y 1 – 5 mL)
- Báscula
- Medidor de clorofila Spad 502 (Konica Minolta)
- Estufa (Blue M Electric Company, single – wall transite oven)
- Balanza analítica (August Sauter KG, D 7470 Ebingen 1)

Equipos

- Horno de microondas para digestiones (MARSXpress, CEM Corporation)
- Potenciómetro (pH/CON 510, Oakton)
- Equipo de absorción atómica (SpectrAA 55B, Agilent Technologies)

Para todos los materiales que se utilizaron en la determinación de EPT's se evitó el contacto con detergentes de manera que no hubiera interferencias en el análisis por absorción atómica. Además a todos se les enjuago con agua destilada y desionizada en repetidas ocasiones.

2.2 REACTIVOS Y SOLUCIONES

- EDTA (0.1 M)
- Agua destilada, desionizada y de la llave
- HNO₃ iso-destilado
- H₂O₂ (30% Baker)
- HF (48 – 51 % Meyer)
- Soluciones madre de Cu (50 mg L⁻¹), Pb (100 mg L⁻¹) y Zn (20 mg L⁻¹)
- (La preparación de estas soluciones se reporta en el apéndice “B”) –

2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

2.3.1 Diseño Completamente al Azar

El experimento fue realizado para su desarrollo bajo un diseño completamente al azar, sin reemplazo, y de población finita. La aleatoriedad de éste prevaleció durante todo los procesos subsecuentes para su adecuado funcionamiento.

Se establecieron 4 tratamientos con distinta proporción de jal para evaluar su efecto contra el tratamiento testigo. La proporción de jal es distinta para cada tratamiento como posteriormente en la sección de tratamientos será explicado.

La forma de medir el efecto de los tratamientos fue mediante el monitoreo de algunos de los principales parámetros agronómicos de la planta, como son: altura de planta; número de hojas; y clorofila.

2.3.2 Análisis Estadístico

Se utilizó el análisis de varianza para distinguir si había diferencias entre los diferentes tratamientos. Esto se aplicó para altura de planta y número de hojas, que fueron los parámetros que contaron con todas sus mediciones a lo largo del experimento.

El siguiente paso fue determinar cuáles de los tratamientos eran los significativamente diferentes, esto se realizó con la prueba de diferencias mínimas significativas; con esto, se

encontró cuáles eran los tratamientos que afectaban a cada uno de los parámetros agronómicos (altura y número de hojas).

Por último, para el contenido de clorofila (el parámetro bioquímico restante), y el estudio por espectroscopia de absorción atómica, se realizó un análisis de las gráficas, porque no se contaba con un número grande de mediciones.

2.3.3 Características de los Materiales

Las muestras fueron obtenidas de Zimapán, Hidalgo. Tanto de la presa de jales número 9 de las minas “El Monte” y “Carrizal”, como de suelo en los alrededores de la mina (Guzmán, 2012).

Puesto que el material ya se ha utilizado con anterioridad para otros trabajos del laboratorio: los datos de caracterización, tanto del suelo como del jal, ya han sido reportados previamente. Por lo tanto, son citados en los siguientes subtemas.

De los EPT's que existen en Zimapán debido a la actividad minera, según estudios (Moreno, *et al.*, 2012), este trabajo analizó tres de ellos: Zinc, Plomo y Cobre.

2.3.3.1 Caracterización del suelo

Aproximadamente a 1 kilómetro de distancia de las instalaciones de la mina fueron tomadas estas muestras. Se utilizaron palas y cucharas para construcción en su recolección, se empacaron éstas en costales de rafia.

Se muestran las propiedades que se determinaron del sustrato (tabla 2.1):

Tabla 2.1 Propiedades a analizar del suelo

Suelo	
Propiedades Físicas	Propiedades Fisicoquímicas
Color	pH
Textura	Conductividad Eléctrica (CE)

2.3.3.2 Caracterización del jal

De las distintas presas de jales se colectaron de la presa 9, debido a que ésta es la que se encuentra en proceso de llenado; Para la recolección se utilizaron palas y cucharas para construcción. Las muestras se empacaron y conservaron en costales de rafia.

Las propiedades a determinar de los jales mineros son los mismos determinados anteriormente para el sustrato suelo como lo marca la tabla anterior (Guzmán, 2012).

Con esto se logrará conocer de una mejor manera los sustratos y después se procedió a dividirlos en tratamientos.

2.3.4 Tratamientos y Mezclas

Se plantearon cinco tratamientos resultantes de la combinación de los dos sustratos (suelo y jal), éstos se dividieron según el porcentaje que tienen de cada sustrato (tabla 2.2).

Tabla 2.2 Tratamientos clasificados por porcentaje suelo – jal

Tratamiento				
1	2	3	4	5
100% Suelo	75% Suelo	50% Suelo	25% Suelo	-
-	25 % Jal	50% Jal	75% Jal	100% Jal

Otra manera de presentarlos, que también será utilizada para el análisis de algunos resultados, es a partir, de la proporción de jal que se encuentre en cada tratamiento (tabla 2.3):

Tabla 2.3 Tratamientos clasificados por proporción de jal

Tratamiento				
1	2	3	4	5
0.0 jal	0.25 jal	0.50 jal	0.75 jal	1.0 jal

Según se haga uso de alguna de estas tablas en los resultados, se hará mención de la misma.

Las mezclas se formaron a partir de dos sustratos: suelo (no contaminado) y jales mineros. Se establecieron 24 sistemas (bolsas) por tratamiento. Se estableció que cada bolsa tuviera un peso final de 1.2 kg. Entonces, según el tratamiento las mezclas se llenaron como se muestra en la tabla 2.4:

Tabla 2.4 Cantidades de sustrato por sistema

Tratamiento	Cantidad Suelo	Cantidad Jal	Total
100% S	1.2 kg	-	1.2 kg por sistema
75% S	900 g	300 g	
50% S	600 g	600 g	
25% S	300 g	900 g	
100% J	-	1.2 kg	

Al sumarse el peso de los 24 sistemas, por tratamiento se necesitaron 28.8 kg para realizar las mezclas. Esta cantidad se repartió como a continuación se muestra (tabla 2.5):

Tabla 2.5 Cantidades de sustrato finales por tratamiento

Tratamiento	Cantidad Suelo (kg)	Cantidad Jal (kg)	Total
100% S	28.8	-	28.8 kg por tratamiento
75% S	21.6	7.2	
50% S	14.4	14.4	
25% S	7.2	21.6	
100% J	-	28.8	

Después se sumó toda la cantidad de suelo que se necesitaba y de jal respectivamente dando los totales de 72 kilogramos de suelo y los 72 de jal. Ya con estas cantidades pesadas se procedió a hacer las mezclas y llenar las bolsas según el peso determinado para cada una. Las figuras 2.1 y 2.2 muestran los diversos tratamientos preparados.



Figura 2.1 Mezclas preparadas (Izquierda a derecha: 100% S, 75% S y 50% S)



Figura 2.2 Mezclas preparadas (Izquierda a derecha: 25% S y 100% J)

Estos fueron pesados en una báscula, ya que el margen de error no era muy estricto sobre estas mediciones.

A la par de la preparación de los tratamientos en el invernadero se preparaban las semillas de *Tagetes erecta*, para su posterior trasplante a éstos. En el siguiente punto se desglosarán estos pasos.

2.3.5 Germinación y Trasplante

Se sembraron las semillas en bandejas donde respectivamente se utilizó peat moss para que las éstas tuvieran un ambiente adecuado para empezar a desarrollarse (figura 2.3). Se colocaron en el invernadero para mantener una temperatura, humedad y en general las condiciones más homogéneas posibles; Se dejaron crecer bajo estas condiciones durante dos semanas, alternando el periodo de riego cada tercer día.



Figura 2.3 Semilleros con las plantas de *Tagetes erecta*

Terminadas estas dos semanas se consideraron listas para el trasplante a los tratamientos antes detallados, se eligieron las unidades experimentales y se pusieron en las bolsas aleatoriamente. En este paso hay que mencionar que las raíces de las plantas fueron limpiadas con agua de

manera que se quitara la mayor cantidad de peat moss de ellas y no influyera en su desarrollo posterior dentro de los tratamientos.

Ya con los sistemas preparados por un lado y las plantas ya en su segunda semana de crecimiento se realizó el trasplante, 3 plantas (unidades experimentales) a cada sistema.



Figura 2.4 Tratamientos con plantas trasplantadas y distribuidas al azar

Con esto se terminó la preparación de todos los sistemas, es decir, de todas las bolsas con sus tres unidades experimentales cada una (figura 2.4). Lo siguiente fue determinar la periodicidad de los muestreos destructivos y de la medición de parámetros agronómicos.

2.3.6 Muestreos

En esta sección se detalla el número de muestreos realizados con el fin de abarcar un periodo largo de la vida de la planta, es decir, todo su ciclo vegetativo. Además se habla del número de repeticiones que fueron realizadas para cada muestreo.

Se plantearon 6 muestreos destructivos (las plantas debieron ser digeridas para su análisis por espectroscopia), los cuales se realizaron cada dos semanas en un período aproximado de 90 días, de esta manera se logró hacer el análisis a lo largo del ciclo vegetativo de la planta; la mayoría de los análisis actuales solo contemplan periodos cortos, así que fue un análisis más extenso.

Los siguientes datos se establecen para un solo muestreo y posteriormente se determinaron el total para los 6 muestreos:

- 1) Un solo muestreo:

- Para 1 tratamiento. Se plantearon 4 sistemas (bolsas), ya que cada sistema contiene 3 unidades experimentales, en total se necesitan 12 plantas.
- Para 5 tratamientos. Se necesitaron 20 sistemas (bolsas), con 3 unidades experimentales cada uno, se usaron 60 plantas (tabla 2.6):

Tabla 2.6 Número de plantas necesarias por tratamiento para un muestreo

Muestreo					
	T1	T2	T3	T4	T5
Sistemas	S-1	S-5	S-9	S-13	S-17
	S-2	S-6	S-10	S-14	S-18
	S-3	S-7	S-11	S-15	S-19
	S-4	S-8	S-12	S-16	S-20
Total acumulado: (Plantas)	12	24	36	48	60

2) Para los 6 muestreos:

- Para un tratamiento. Se necesitaron 24 sistemas, con 3 plantas, dando un total de 72 unidades experimentales.
- Para los cinco tratamientos. Se emplearon 120 sistemas, es decir, 360 plantas (tabla 2.7):

Tabla 2.7 Número de plantas necesarias por tratamiento para los seis muestreos

Muestreos	T1	T2	T3	T4	T5
1	S-4	S-28	S-52	S-76	S-100
2	S-8	S-32	S-56	S-80	S-104
3	S-12	S-36	S-60	S-84	S-108
4	S-16	S-40	S-64	S-88	S-112
5	S-20	S-44	S-68	S-92	S-116
6	S-24	S-48	S-72	S-96	S-120
Total acumulado: (Plantas)	72	144	216	288	360

Para representar lo propuesto de una manera más clara, podemos verlo gráficamente en la figura 2.5; se representan las tres variables (sistemas, unidades experimentales y tratamientos) así como los seis muestreos.

El diseño fue al azar, es decir, que posteriormente a esta distribución, se procedió a acomodarlo de un modo aleatorio en el invernadero para cumplir con el propósito del mismo; anteriormente al realizar los trasplantes, ya se había elegido las unidades experimentales aleatoriamente.

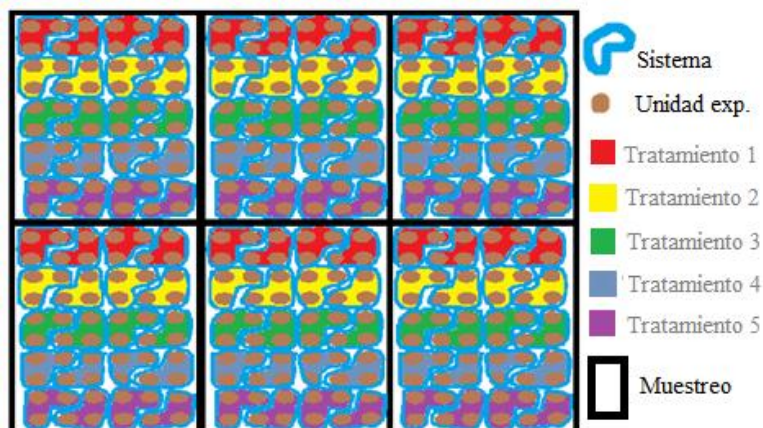


Figura 2.5 Esquema visual del diseño experimental

2.3.7 Monitoreo de Parámetros Agronómicos

Una vez trasplantadas las unidades experimentales a sus tratamientos se dejaron acondicionar, por un periodo de cuatro días con el objetivo de que se adaptaran a su nuevo ambiente, es decir a las mezclas. Pero llegada la fecha las unidades experimentales aún eran muy pequeñas, por lo cual se decidió dejarlas crecer una semana, de esta manera la primera medición de parámetros se llevó a cabo tres semanas después del trasplante, mientras que el resto de las mediciones se realizaron cada dos semanas (La calendarización de las mediciones puede ser consultada en el apéndice “A”).

El riego con agua de la llave se realizó cada tercer día lo más homogéneo posible para todas las mezclas.

En cuanto a la medición de clorofila, la primera se realizó el día 67 (a partir de la siembra de las plantas) de su ciclo vegetativo; Ese día solo se pudieron medir las primeras dos mezclas (100% S y 75% S). En la segunda medición (7 días después) fue posible medir las unidades experimentales de tres tratamientos (100% S, 75% S y 50% S). Para la última, las plantas de la mezcla 50% S ya no fueron medidas.

Con la información anterior se puede trazar un eje de tiempo donde se observa cómo se realizó el experimento, este será indispensable para entender cómo se distribuyó la medición de parámetros agronómicos:

- El día “0” corresponde al día de la siembra de las semillas de *Tagetes erecta*, después, otro punto importante es la fecha del trasplante a las mezclas (figura 2.6).

Los ejes de las gráficas en resultados se basan en esta línea del tiempo.

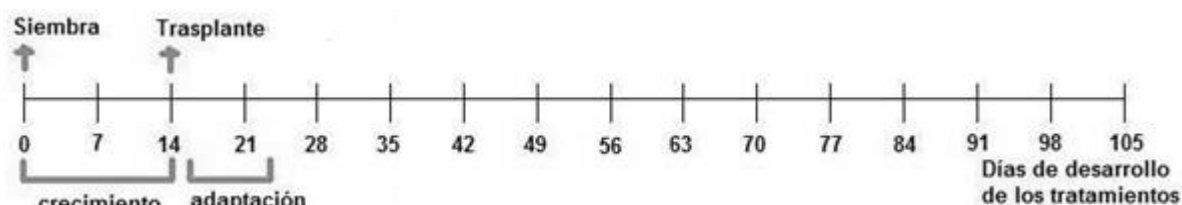


Figura 2.6 Línea del tiempo del ciclo de vida de las plantas durante el experimento

- El siguiente punto importante sería 35 días después, porque es la fecha de la primera medición de parámetros agronómicos.

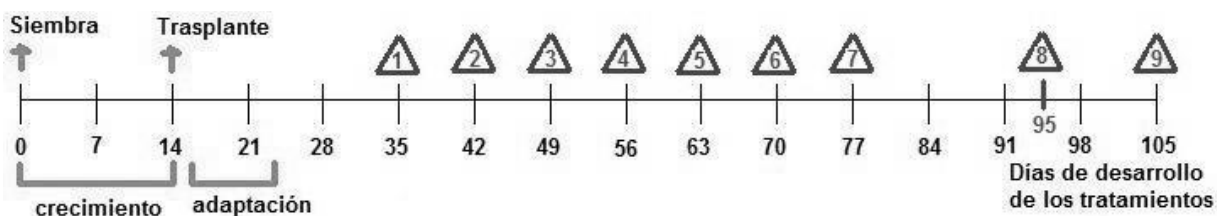


Figura 2.7 Línea del tiempo donde se muestran las fechas de medición de los parámetros agronómicos

- La medición de parámetros se procuró realizar cada semana con cierta variación al final del experimento (figura 2.7).
- La medición de clorofila se realizó a partir del día 67 del ciclo vegetativo de la planta y se realizaron 6 mediciones para este parámetro (figura 2.8).

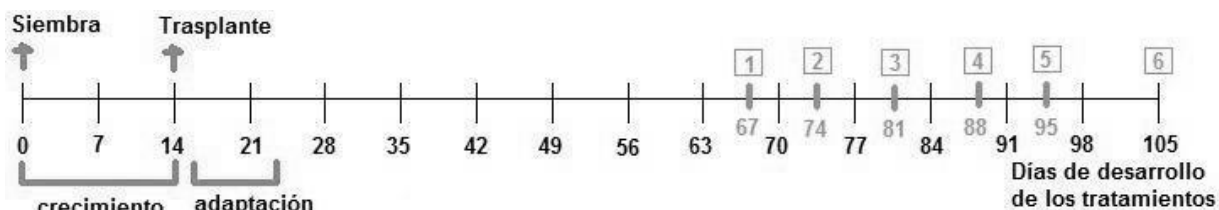


Figura 2.8 Línea del tiempo donde se muestran las fechas de medición índice de clorofila

2.3.8 Absorción de Metales

Se planteó el primer muestreo dos semanas después del trasplante, pero llegada la fecha las unidades experimentales aún eran muy pequeñas, por lo cual se decidió dejarlas crecer una semana, de esta manera el primer muestreo se llevó a cabo el día 35 del ciclo vegetativo; A partir de este punto, los muestreos se realizaron cada dos semanas.

Se puede trazar un eje de tiempo para visualizar como se realizaron los muestreos (figura 2.9):

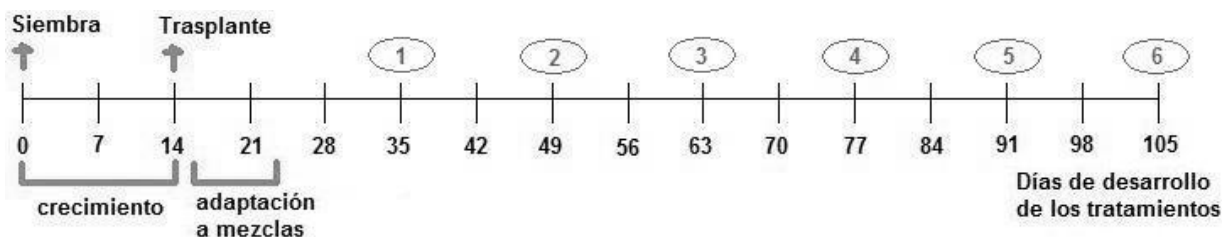


Figura 2.9 Línea del tiempo donde se muestran las fechas de los muestreos

- Los muestreos se realizaron cada 2 semanas.

2.4 PROCEDIMIENTOS

2.4.1 Muestreo de Planta

En cada muestreo destructivo se midió peso fresco y seleccionó dos plantas para análisis total de metales (vía digestión húmeda) por espectrometría de absorción atómica.

Es importante tener en cuenta la contaminación que puede llegar a presentar la muestra a analizar debido a partículas del suelo que se unen a la planta, especialmente cuando el suelo presenta partículas casi puras del EPT's a investigar. Así que lo más conveniente, para evitar la contaminación, es un cuidadoso proceso de lavado antes de procesar la muestra.

De manera que, el procedimiento para los muestreos destructivos fue el siguiente para cada unidad experimental:

- Cortar: Extraer la planta (desde la raíz) del tratamiento correspondiente.
- 1° Limpieza. Quitar de las raíces los residuos suelo – jal que pudieran interferir en el momento de pesar la planta.
- 1° Pesaje: Con una balanza, determinar los gramos de la unidad experimental.
- 2° Limpieza: Para la determinación de metales se debe eliminar cualquier interferencia que pueda presentar la planta, por el hecho de estar en contacto externo con los metales, así que este paso es fundamental para los análisis subsecuentes (acumulación de metales). Así que se realiza una limpieza con EDTA para quitar cualquier material sobre la superficie de la planta, tanto en las hojas, como en el tallo y las raíces.

[Limpieza con EDTA: Primero se limpia la planta con agua de la llave, a continuación en una disolución de EDTA (0.1 M) y por último con agua destilada.]

- Secar: Primero con papel procurando que este no deje residuos y después se mete a la estufa a 60°C por un día.
- 2° Pesaje: Al día siguiente con la balanza determinar los gramos.

Al terminar este proceso, se decidió almacenar las unidades y dejarlas en disposición para el análisis por espectroscopia.

2.4.2 Medición de Parámetros Agronómicos

La siguiente tabla (2.8) muestra el desarrollo de este procedimiento de manera muy sencilla:

Tabla 2.8 Parámetros agronómicos e instrumento utilizado para medirlos

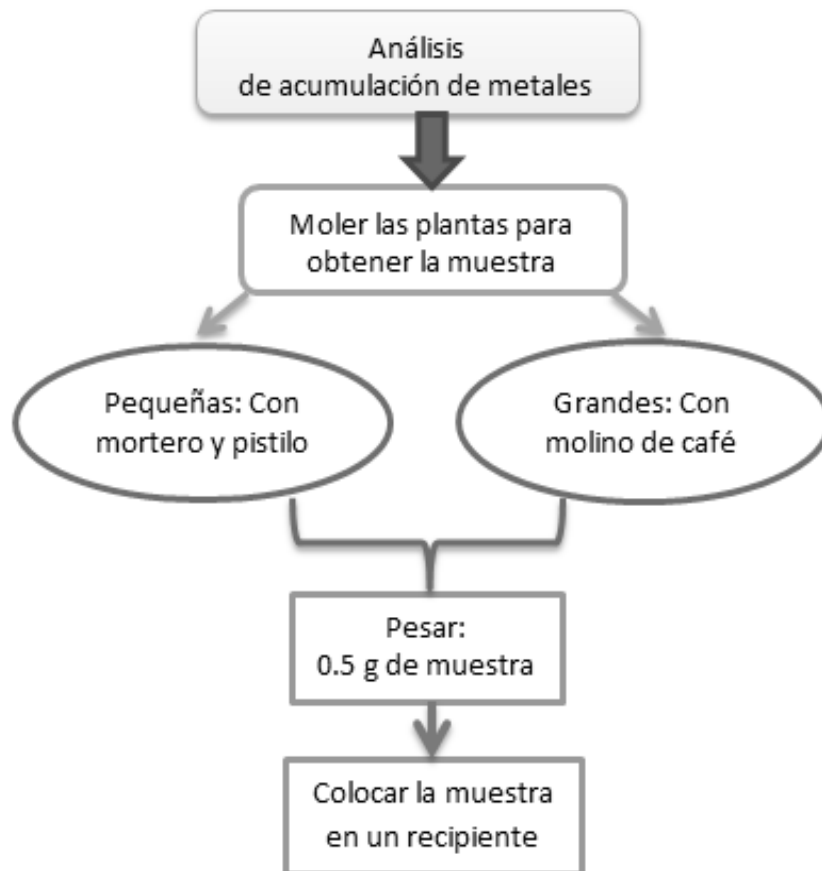
Parámetro:	Altura	No. De hojas	Cont. Clorofila
Instrumento:	Regla	-	Índice SPAD

El procedimiento anterior se realizó a cada planta a lo largo de su ciclo vegetativo, y como cada 15 días se realizaban muestreos destructivos, las plantas analizadas se fueron reduciendo en número conforme avanzaba el tiempo.

Con el análisis de los datos obtenidos se podrá saber cómo se vieron afectados estos parámetros según el tratamiento en el que se encontraban las unidades experimentales.

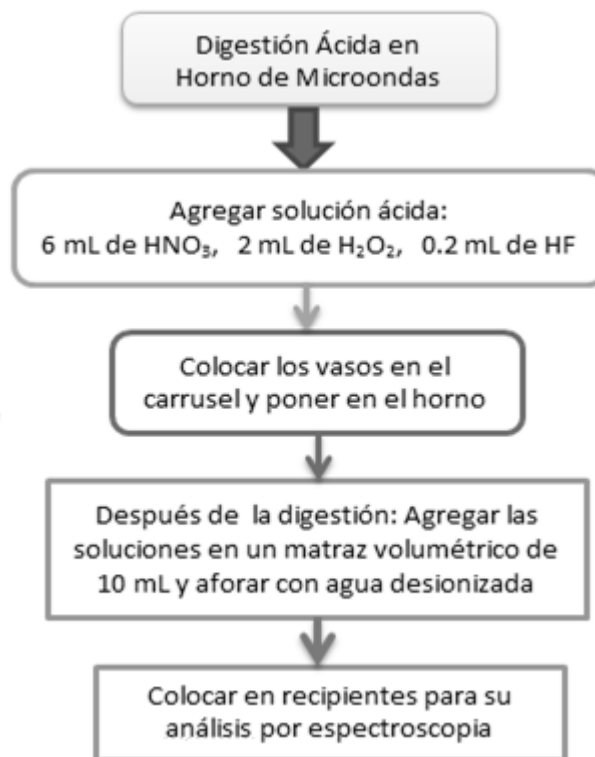
2.4.3 Medición de Metales

En el siguiente diagrama se muestra los pasos necesarios para obtener las muestras necesarias que posteriormente fue analizada:



2.4.3.1 Digestión ácida en horno de microondas

Antes de ser analizadas, las muestras debieron ser digeridas, este procedimiento se siguió de la siguiente manera:



2.4.3.2 Determinación por espectroscopia de absorción atómica

Se determinaron 3 metales: Zinc, Cobre y Plomo. Antes de realizarse el proceso, se prepararon soluciones patrón para poder trazar la curva de calibración y con esta comparar los resultados de contenido de metal. En el laboratorio ya se contaban con estándares de cobre (50 mg L^{-1}), zinc (20 mg L^{-1}) y plomo (100 mg L^{-1}) que se disolvieron hasta obtener las concentraciones necesarias para la curva. Las disoluciones requeridas fueron las siguientes:

- Cobre: 1, 2, 3, 4, 5 mg L^{-1} .
 - Zinc: 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 mg L^{-1} .
 - Plomo: 0.5, 1, 2, 3, 4 mg L^{-1} .
- Aforo a 25 mL con HNO₃**

Para saber cómo se obtuvieron las disoluciones anteriores a partir de las soluciones madre revisar: el apéndice “B” Disoluciones para la curva de calibración.

III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUSTRATOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de esas mediciones y se procede a su interpretación.

3.1.1 Suelo

Tabla 3.1. Propiedades físicas y fisicoquímicas del sustrato

Suelo	
Propiedades Físicas	Propiedades Fisicoquímicas
Color: a) En seco.- Rojo (2.5 YR, 4/6) ¹ b) En húmedo.- Rojo oscuro (2.5 YR, 3/6) ¹	pH: 6.10 (Ligero a moderadamente ácido) ^{3,4}
Textura al tacto: Arcillosa (Arena: Limo: Arcilla: 12:20:68) ²	CE: 128 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (No salino) ³

¹ Basada en la Carta de Color Munsell ² Según el triángulo de texturas del suelo reportado por Guzmán (2012)

³ Clasificación con base en la NOM-021-SEMARNAT (2001) ⁴ Según Aguirre, (2001).

De acuerdo con la tabla 3.1, el color rojo (2.5 YR, 4/6) y su textura arcillosa evidencian la presencia de óxidos de hierro, también tiene valores altos de porcentaje de saturación (84.6 g H₂O/100 g suelo, según Guzmán, 2012). Por lo tanto, retiene la fase acuosa por tiempos mayores que suelos con menores porcentajes de arcilla, disminuyendo la infiltración de EPT'S que pudieran contaminar los mantos freáticos en caso de ocurrir alguna dispersión de los jales (Guzmán, 2012).

El pH según la NOM-021-SEMARNAT (2001), es moderadamente ácido, sin embargo otros autores consideran estos valores como ligeramente ácidos (Aguirre, 2001) basados en efecto de toxicidad de ligero a nulo que pueden presentar estos metales con valores de pH > 6.

El suelo es clasificado como no salino y por lo tanto, el riesgo de salinidad es nulo, según la NOM-021-SEMARNAT (2001).

3.1.2 Jal Minero

Tabla 3.2. Propiedades físicas y fisicoquímicas del jal

Jal minero	
Propiedades Físicas	Propiedades Fisicoquímicas
Color: a) En seco.- Gris (5Y 5/1) ¹ b) En húmedo.- Gris muy oscuro (5Y 3/1) ¹	pH: 6.90 (Neutro) ^{2**,3}
Textura visual: Arenosa	CE: 430 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (No salino) ^{2**}

¹ Basada en la Carta de Color Munsell; ² Como referencia NOM-021-SEMARNAT (2001); ³ Citando Aguirre, 2001; ****Aunque la NOM-021-SEMARNAT (2001) es para análisis de suelos, se empleó para clasificar el pH y CE del jal**

Interpretación de la tabla 3.2: El color gris (5Y 5/1) del jal, y su valor de pH casi neutro, sugieren la ausencia momentánea de acidificación, debido al tratamiento de neutralización previo que se le da a estos jales por la minera. Estos jales recolectados son los más recientes por lo que el proceso de acidificación no se ha manifestado todavía. El color gris sugiere la dominancia del Fe (II) sobre el Fe (III), este último responsable de la hidrólisis y de uno de los dos procesos importantes de acidificación de los jales.

Según Guzmán (2012) reporta, la textura arenosa del jal denota poca cohesión del material. También se ha reportado una alta densidad (1.62 g cm^{-3}) de material debida muy probablemente a la gran cantidad de minerales metálicos presentes en él.

Se destaca que el jal es reciente por eso es neutro, esto afecta la conductividad eléctrica que aparece como no salina. Pero con el trascurso del tiempo, en cuanto el jal empiece a acidificarse el valor de la conductividad eléctrica se incrementará marcadamente.

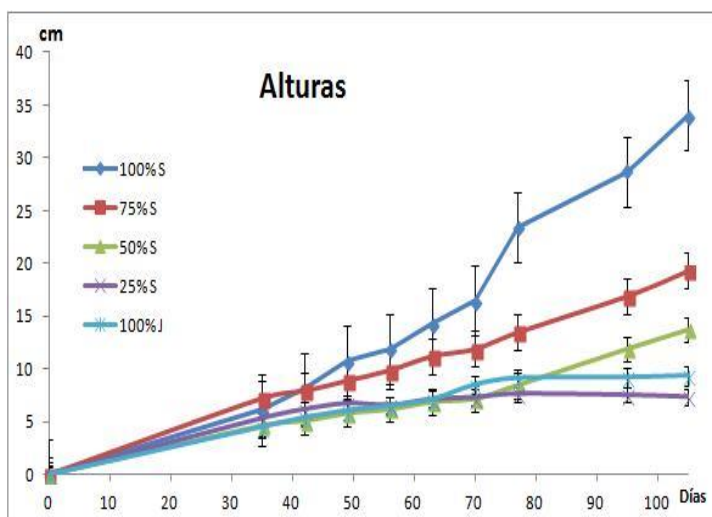
Debido a la poca cohesión de los materiales del jal y su gran cantidad de minerales metálicos, cuando se llegue a presentar la acidificación, los EPT's presentaran sus formas más tóxicas y tendrán gran movilidad, de modo que, podrán infiltrarse en el suelo de manera rápida, provocando un mayor riesgo de contaminación. Por otro lado, el suelo con su textura arcillosa y su alto porcentaje de saturación, presenta una capacidad amortiguadora de contaminantes, de esta manera, puede ayudar a que los EPT's no se infiltren a los mantos freáticos tan rápidamente en el tiempo, por lo que, si se realiza un monitoreo constante de los jales y se realiza un encalado periódico se puede contener la contaminación.

3.2 EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SUELO: JAL SOBRE LOS PARÁMETROS AGRONÓMICOS

En esta sección se presentan los resultados del experimento, empezando con los parámetros agronómicos analizados: altura de planta, número de hojas y contenido de clorofila. Además, se analiza el efecto que los tratamientos tuvieron en cada uno de los parámetros.

3.2.1 Altura de Planta

Primeramente, se realizó un análisis breve y sencillo. Solo se graficaron los promedios de todas las unidades experimentales existentes, para cada una de las fechas de medición de parámetros y se obtuvieron las barras de error para cada caso. Cabe mencionar, que aproximadamente cada dos puntos de la gráfica, las plantas se iban reduciendo en número debido a que se perdían por los muestreos destructivos.



	Tratamientos				
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J
Días	Alturas (cm) promedio				
35	6.1	7.2	4.6	5.3	4.5
42	8.1	7.9	5.1	6.2	5.4
49	10.8	8.9	5.8	6.8	6.1
56	11.9	9.9	6.2	6.6	6.5
63	14.3	11.2	6.9	7.2	7.1
70	16.5	11.9	7.2	7.3	8.5
77	23.5	13.5	8.5	7.7	9.1
95	28.7	16.9	11.9	7.5	9.2
105	34.1	19.3	13.7	7.4	9.4

Figura 3.1. Curvas promedio de altura para cada tratamiento y tabla correspondiente

En el gráfico de la figura 3.1, la curva azul (100% S) presenta un aumento marcado en la altura promedio del día 70 al 77; este aumento considerable, coincide con el periodo de floración de *Tagetes erecta*, particularmente, en este periodo surgieron las flores, lo que provocó el aumento marcado en las alturas promedio de esta curva.

Las demás curvas del gráfico siguen una tendencia similar: aumentar, lo que demuestra que las alturas promedio de todos los tratamientos siguieron una tendencia a incrementar su tamaño con el tiempo.

Al analizar las 5 curvas de esta gráfica se nota, al basarse en las barras de error, que en las primeras 2 curvas (100% S y 75% S) no hay diferencias significativas entre ellas hasta el día 70.

Para el día 56 las curvas 100% S y 75% S se separan del resto y para el día 77 la curva 100% S es distinta de la curva 75% S.

Hasta el día 95, la curva 50% S se diferencia de las curvas 25% S y 100% J.

Para la última medición (día 105) las curvas 100% S, 75% S y 50% S se diferencian definitivamente cada una, las mayores alturas presentadas por 100% S, seguidas por 75% S y después, 50% S. Por otro lado, las curvas 25% S y 100% J no presentan diferencias entre ambas, además fueron los tratamientos que presentaron menores alturas.

Para corroborar estos datos, de manera más robusta, se decidió realizar un análisis de varianza y diferencias mínimas significativas, para decidir si los tratamientos afectaban la altura de la planta y, de ser así, cuáles eran los que afectaban.

Los histogramas, de la siguiente página, representan el análisis de varianza y diferencias mínimas significativas:

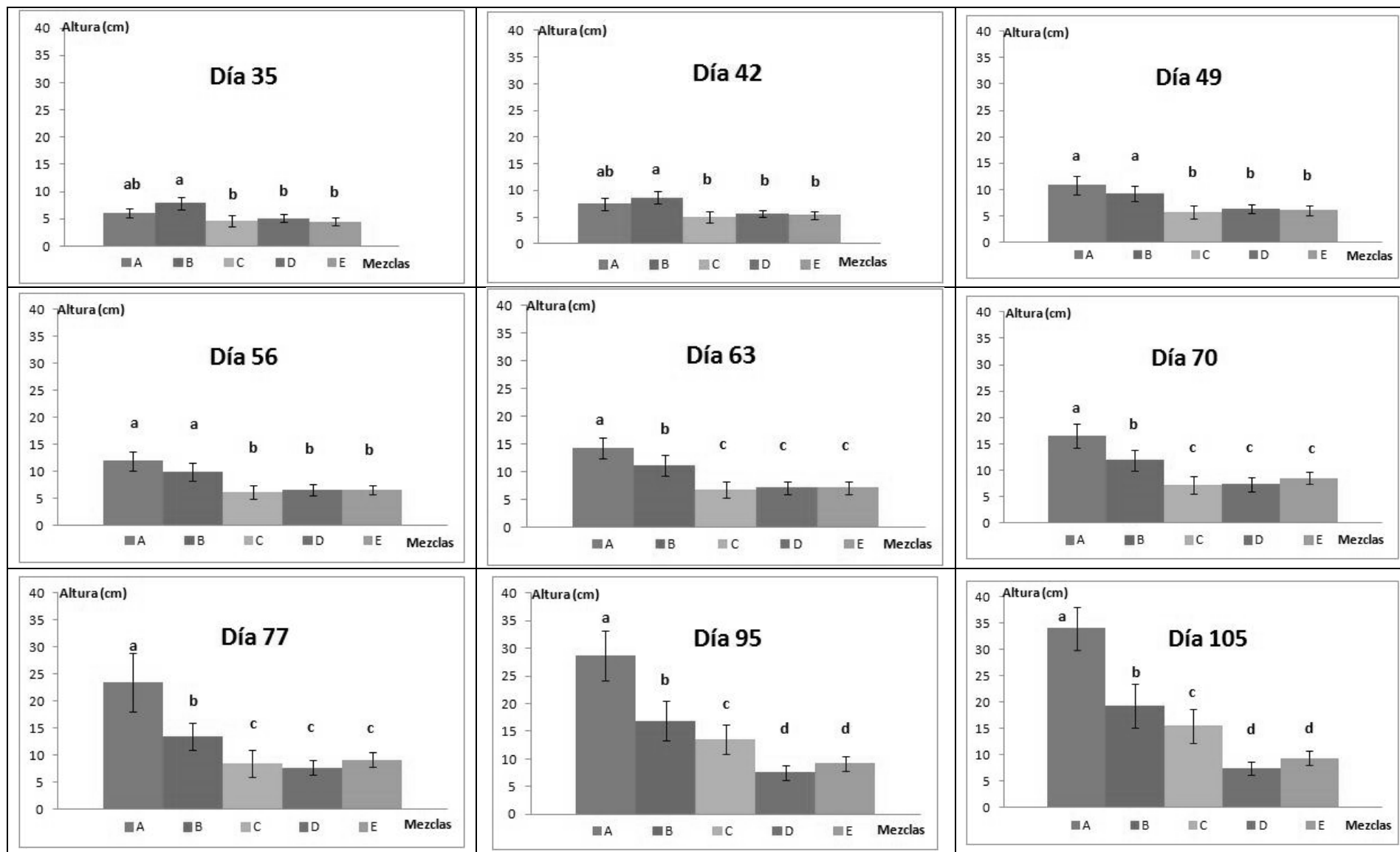


Figura 3.2. Histogramas de altura de planta (promedio) a lo largo del tiempo para cada tratamiento (izquierda a derecha, 100% S, 75% S, 50% S, 25% S, 100% J) con su análisis estadístico mediante diferencias significativas y comparación de medias (a - d).

Análisis varianza y diferencias mínimas significativas; altura de planta

Al observar la figura 3.2 como un todo, se ve fácilmente como se fue dando el crecimiento de las plantas desde que eran plántulas y presentaban características similares hasta que se muestran diferencias entre las alturas de cada tratamiento (Las diferencias mínimas significativas y la comparación de medias de las alturas de planta pueden verse en el apéndice “C”).

Por otro lado, el establecer un análisis más robusto ayudó a distinguir claramente la diferencia entre los tratamientos. A continuación, se desglosan las observaciones obtenidas para cada medición:

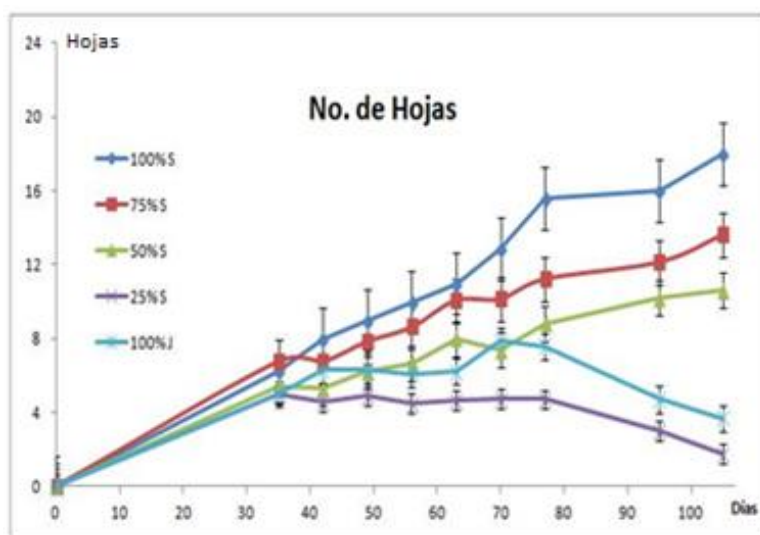
- Día 35 y 42. Los histogramas A (100% S) y B (75% S) no presentan diferencias significativas entre ellos, por otro lado, los histogramas C (50% S), D (25% S) y E (100% J) son iguales estadísticamente.
- Día 49 y 56. Los histogramas A (100% S) y B (75% S) presentaron características estadísticamente iguales, pero tenían diferencias significativas con respecto, a los histogramas C (50% S), D (25% S) y E (100% J) que no mostraron diferencias entre ellos.
- Día 63, 70. El histograma A (100% S) mostró las mayores alturas y fue estadísticamente diferente del histograma B (75% S), que a su vez, mostró diferencias significativas respecto a los histogramas C (50% S), D (25% S) y E (100% J), mientras que estos últimos tres siguieron presentando características estadísticamente iguales.
- Día 77. Aquí se siguió la tendencia anterior, sin embargo, hubo un marcado crecimiento de la altura para el histograma A (100% S) respecto a todos los demás, debido a que en esta medición surgió la flor de las plantas para este tratamiento, 100% S, lo que provocó el incremento considerable en su tamaño respecto a las demás.
- Día 95 y 105. El histograma A (100% S) presentó nuevamente las mayores alturas y fue significativamente diferente del histograma B (75% S), éste a su vez, fue estadísticamente distinto y con alturas mayores al histograma C (50% S) que también mostró diferencias significativas respecto a los histogramas D (25% S) y E (100% J), éstos últimos estadísticamente iguales y con las menores alturas.

En este periodo de tiempo, las plantas de los tratamientos 75% S y 50% S tuvieron la aparición de flores (una semana y 14 días después que el tratamiento 100% S, respectivamente) aunque en la gráfica no se notó demasiado este crecimiento debido a que fueron pocos los ejemplares con flor (afectando poco el promedio), tanto en el tratamiento 75% S como en el tratamiento 50% S, en comparación con 100% S que presentó flores en la mayoría de sus plantas.

En el análisis general de la figura 3.2, a lo largo del tiempo de monitoreo, estadísticamente se observó un efecto negativo en la altura de las plantas según la proporción de jal que tenía el tratamiento: A (100% S / 0 J) las mayores alturas, después B (75% S / 25% J), seguido de C (50% S / 50% J) y las menores alturas en D (25% S / 75% J) y E (0 S / 100% J).

3.2.2 Número de Hojas

De la misma manera que con el parámetro anterior, para el número de hojas se realizó una gráfica con los promedios de las unidades experimentales existentes, nuevamente cada dos puntos había un muestreo destructivo y se reducía el número de ejemplares.



	Tratamientos				
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J
Días	Número de hojas promedio				
35	6.3	6.8	5.4	5.0	5.0
42	8.0	6.8	5.3	4.6	6.3
49	9.0	7.8	6.2	4.9	6.3
56	10.0	8.6	6.6	4.5	6.1
63	11.0	10.1	8.0	4.7	6.2
70	12.9	10.2	7.4	4.8	7.9
77	15.6	11.2	8.8	4.7	7.6
95	16.0	12.2	10.2	3.0	4.7
105	18.0	13.6	10.6	1.8	3.7

Figura 3.3. Curvas promedio de altura para cada tratamiento y tabla correspondiente

En el gráfico de la figura 3.3, el periodo de tiempo del día 77 al día 105 los primeros tres tratamientos presentaron un aumento de hojas (100%S, 75% S y 50%S), mientras que los últimos dos (25%S y 100% J) redujeron marcadamente su número de hojas. En ese lapso, los

primeros tres tratamientos presentaron flores, mientras que los dos últimos, no lograron presentar floración. Los primeros tres tratamientos mostraron una tendencia al aumento de hojas, mientras que los tratamientos 25% S y 100% J se mantuvieron sin cambios marcados hasta el día 77 cuando decae su número de hojas.

Otro punto a destacar, es el hecho de que 100% J presentó mayor número de hojas que el tratamiento de 25% S. Para respaldar los resultados obtenidos y aclarar la discrepancia entre 100% J y 25% S, nuevamente se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias para encontrar diferencias mínimas significativas entre los tratamientos. A continuación se presentan los histogramas del análisis:

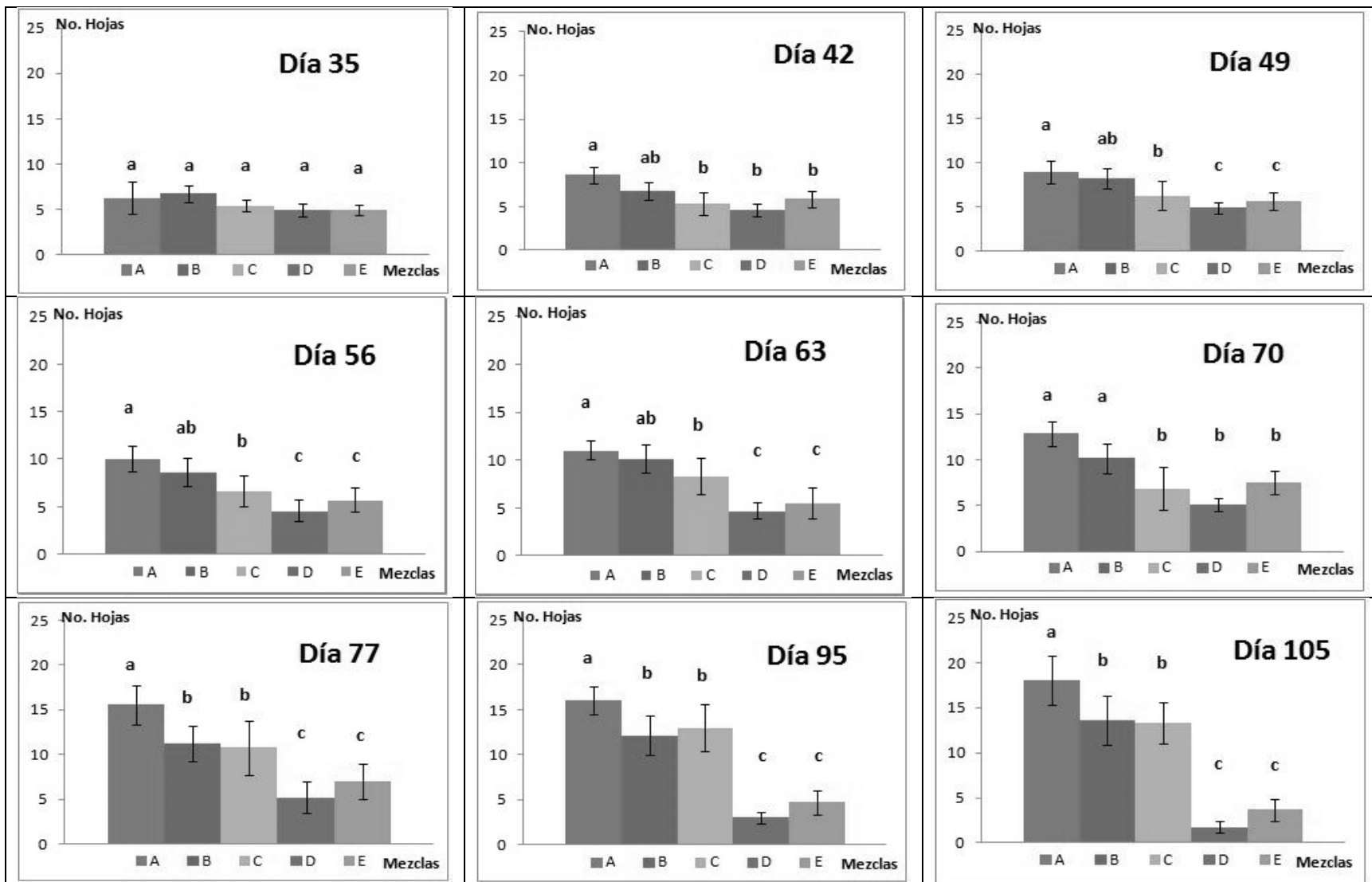


Figura 3.4. Histogramas de número de hojas en planta (promedio) a lo largo del tiempo para cada tratamiento (izquierda a derecha, 100% S, 75% S, 50% S, 25% S, 100% J) con su análisis estadístico mediante diferencias significativas y comparación de medias (a - c).

Análisis varianza y diferencias mínimas significativas; número de hojas

A continuación se presenta un análisis de los histogramas día por día (figura 3.4): - (Las diferencias significativas y la comparación de medias para número de hojas pueden ser consultadas en el apéndice “D”) –.

- Día 35. Después de tres semanas de crecimiento, los tratamientos presentaron características iguales, estadísticamente.
- Día 42. El histograma A (100% S) presentó características iguales al histograma B (75% S) pero con diferencias significativas respecto a los histogramas C (50% S), D (25% S) y E (100% J). También el histograma B (75% S) presentó características iguales a los histogramas C, D y E.
- Día 49, 56 y 63. El histograma A (100% S) no presenta diferencias significativas con el histograma B (75% S), éste a su vez, no presenta diferencias significativas con C (50% S), éste fue estadísticamente diferente del histograma A. Los tres histogramas anteriormente mencionados mostraron ser diferentes estadísticamente a los últimos dos histogramas D (25% S) y E (100% J).
- Día 70. Los histogramas A (100% S) y B (75% S) fueron estadísticamente iguales y mostraron diferencias significativas con los histogramas C (50% S), D (25% S) y E (100% J), estos tres últimos fueron iguales estadísticamente.
- Día 77, 95 y 105. El histograma A (100% S) presentó el mayor número de hojas y mostró ser estadísticamente diferente de los histogramas B (75% S) y C (50% S), entre estos dos no existieron diferencias significativas, además, fueron diferentes estadísticamente a los histogramas D (25% S) y E (100% J) que entre ellos dos mostraron igualdad estadística, siendo los tratamientos con menor número de hojas.

Se puede destacar que, en este periodo de tiempo se notó la dramática disminución en el número de hojas para los tratamientos 25% S y 100% J.

En un análisis general de la figura 3.4, se dedujo que la proporción de jal afectó negativamente este parámetro agronómico, este efecto se pudo ver en tres bloques:

-
- 1) El tratamiento 100% S presentó el mayor número de hojas.
 - 2) Los tratamientos 75% S y 50% S tuvieron una menor cantidad de hojas.
 - 3) Los tratamientos 25% S y 100% J fueron los que tuvieron menor número de hojas, incluso a partir del día 77 mostraron un decaimiento en su número.

Se puede destacar que, del día 77 – 95 se deberían presentar las flores y puesto que no presentaron en los dos últimos tratamientos (25% S y 100% J) se puede deducir que fue esto lo que provocó que estos dos últimos no aumentaran sus hojas (ni crecieran) en ese lapso; Es decir, para emitir flor la planta requiere de energía, para lo cual necesita de una mayor cantidad de nutrientes, pero estas plantas desde el principio mostraron un rezago en su desarrollo, así que, cuando se vieron en la necesidad de exigirse mayor energía para presentar el botón sus circunstancias impidieron que la tuvieran y provocó que se desgastaran muchísimo, tendiendo a sucumbir a este desgaste.

Como conclusión de todo el análisis de varianza y diferencias mínimas significativas, se puede decir que en las primeras semanas de desarrollo de las plantas en el experimento, en estos dos parámetros no se notaron diferencias marcadas entre los distintos gradientes de jal, sin embargo a partir del día 77 (aparición de flor) las diferencias en los tratamientos se definieron claramente, a tal grado que para el número de hojas se vio un descenso en la cantidad de las mismas para los dos últimos tratamientos. Finalmente, se puede decir que para estos dos parámetros, la proporción de jal afectó el desarrollo de la planta, tanto en su altura como en su número de hojas, además de que, este efecto adverso fue mayor conforme aumentaba la proporción de jal en el tratamiento.

Posteriormente, en la sección 3.3 se verá específicamente como afectó a cada tratamiento la presencia de los EPT's: Zn, Cu y Pb.



Figura 3.5. Comparación visual del estado de las plantas en los diversos tratamientos (izquierda a derecha, 100% S, 75% S, 50% S, 25% S y 100% J)

En la figura 3.5 se visualiza el grado de afectación entre las mezclas en los últimos muestreos. Se ven los primeros tratamientos con mayor altura de plantas y hojas más anchas y abundantes, en comparación con los últimos dos tratamientos donde casi no se percibe verdor la presencia de hojas y su altura es mucho menor.

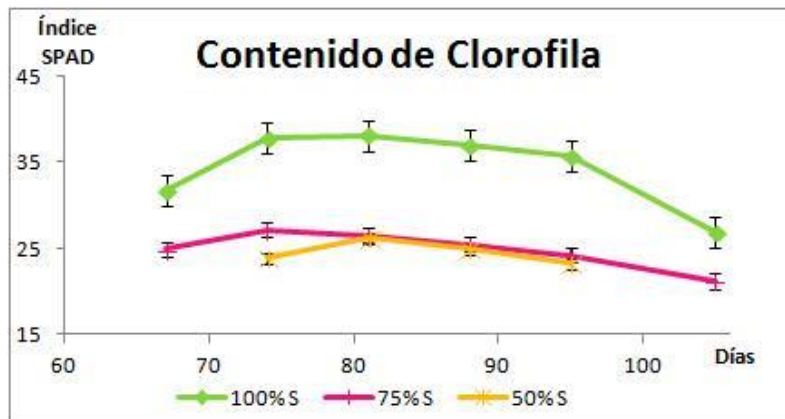
También se puede decir que 75% S y 50% S fueron los tratamientos menos afectados, mientras que 25% S y 100% J fueron los más dañados, incluso, llegando al punto de disminuir su número de hojas en la parte final de las mediciones.

3.2.3 Contenido de Clorofila

El tercer parámetro que se midió fue índice de clorofila; ésta solo se midió en los primeros tres tratamientos (100% S, 75%S y 50% S) debido a que fueron los únicos que el ancho de sus hojas permitió realizar la medición.

También cabe destacar que, se comenzó la medición a partir del día 67 porque fue cuando las hojas alcanzaron la anchura necesaria para ser medidas.

A continuación, en la figura 3.6, se observan las mediciones en el contenido de clorofila:



	Tratamiento		
	100% S	75% S	50% S
Días	Contenido de clorofila		
67	31.7	24.9	-
74	37.8	27.1	23.9
81	38.1	26.5	26.2
88	37.0	25.5	24.9
95	35.7	24.2	23.3
105	26.8	21.2	-

Figura 3.6 Curvas promedio de la medición de contenido de clorofila para tres de los tratamientos mediante índice SPAD con su correspondiente tabla de valores

Comparando con el tratamiento testigo, 75% S y 50% S presentaron una cantidad menor de clorofila, que aunque no es una gran diferencia, es suficiente para notarse y es significativa, respecto a 100% S, aun así, lograron producir botones y flores al final de su ciclo vegetativo que fue un gran logro.

Otro punto de interés: en los tratamientos 75% y 50% S su primera medición tuvo diferencia significativa pero los otros tres puntos indicaron una tendencia estadística igual, por lo que se pudo decir que presentaron contenidos de clorofila estadísticamente iguales a lo largo de las mediciones. Siguiendo esta tendencia, seguramente los últimos dos tratamientos (25% S y 100% J) mostrarían una menor cantidad de clorofila.

Se puede sugerir que este parámetro igualmente fue afectado por la proporción de jal en una manera adversa conforme aumentaba la proporción de jal en el tratamiento.

3.2.4 Floración

Durante el monitoreo del experimento, se dio la floración de las unidades experimentales. Esto agregó otros resultados que analizar, que no se tenía presente en el planteamiento inicial del experimento. Serrato *et al.* (1998) mencionan el periodo normal de floración de *Tagetes erecta*; ese periodo inicia el día 56 del ciclo vegetativo y termina el día 84. En la siguiente figura (3.7) se traza una línea del tiempo, que marca el periodo de floración:

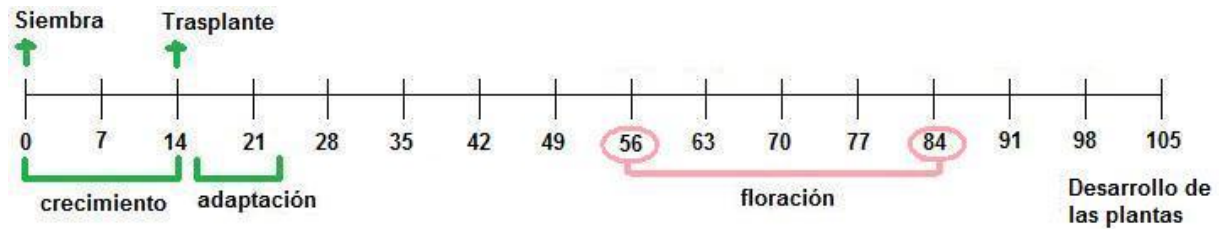


Figura 3.7 Tiempo de floración en el ciclo de vida de *Tagetes erecta*

En este experimento se encontró que para el tratamiento 100% S (testigo) la aparición de los primeros botones y el final de la floración, aproximadamente, fueron a la par de lo reportado anteriormente. Mientras que para el tratamiento 75% S la floración comenzó 7 días después y para el tratamiento 50% S empezó 14 días después de lo establecido (figura 3.8). Lo anterior indica que la floración se retrasó para estos dos tratamientos, denotando lentitud en el ciclo vegetativo de sus unidades experimentales. Por su parte los tratamientos 25% S y 100% J no presentaron floración, esto sugiere un mayor efecto negativo en sus ejemplares. Estos resultados apuntaron a que los jales influyeron a este retraso.

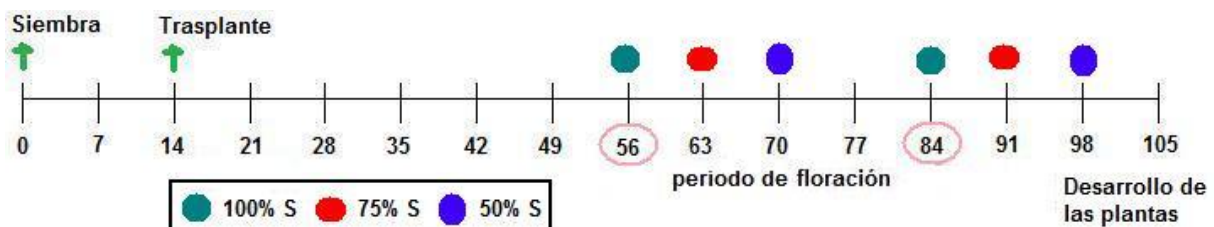


Figura 3.8 Floración observada para cada tratamiento comparado con la floración esperada

En las siguientes secciones se indagará si es la presencia de EPT's lo que provoca esta y otras afectaciones al analizar, en conjunto, los resultados obtenidos de los parámetros agronómicos de crecimiento de las unidades experimentales y la cuantificación de ciertos metales por espectroscopia atómica.

Analizando todos los parámetros agronómicos monitoreados, se puede decir que según la proporción de jal que tenían los tratamientos fue el grado de afectación adverso que presentaron, pudiendo dividir principalmente en dos grupos este efecto respecto al tratamiento testigo:

- a) 75% y 50% S con una ligera disminución en su altura, su número de hojas y su contenido de clorofila, sin embargo con la energía necesaria para completar su ciclo vegetativo satisfactoriamente.
- b) 25% S y 100% J mostraron una marcada disminución en su altura, número de hojas y probablemente en el contenido de clorofila, la afectación provocó que los ejemplares de estos tratamientos no completaran su ciclo vegetativo (no tuvieron periodo de floración).

Aunado a esto, comparando las raíces de las plantas del tratamiento 100% S (sanas) y el último tratamiento (100% J) se notó un efecto adverso en la zona radicular, debido a la proporción de jal presente.

Esto apoya lo que se mencionó de Guzmán (2012) en el marco teórico: la presencia excesiva de zinc y plomo puede explicar la reducción en el crecimiento de las plantas, la disminución en el número de hojas, debido a, plomo y cobre. La afectación en clorofila provocada por plomo y el efecto adverso en las raíces por cobre. De modo que, se sugirió la presencia de estos metales en las plantas.

Para comprobar la presencia de metales en planta y las concentraciones de cada metal en las unidades experimentales se tuvo que realizar un análisis químico del que se encargó el equipo de absorción atómica y en el siguiente apartado se presentan los resultados.

3.3 EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SUELO: JAL SOBRE LA ABSORCIÓN DE METALES

Mediante espectroscopia de absorción atómica se realizó la determinación de tres metales, cobre, plomo y zinc (Las curvas de calibración se encuentran en el apéndice “E”).

Se sabe que el jal presentaba una diversa cantidad de metales entre ellos los tres mencionados anteriormente, elegidos por ser de gran importancia:

1) Cobre. De gran utilidad industrial.

2) Plomo. Uno de los elementos tóxicos más conocidos y antiguos que se monitorean en la industria minera.

3) Zinc. A pesar de ser un nutriente en las plantas, en grandes cantidades puede afectar las funciones de las mismas.

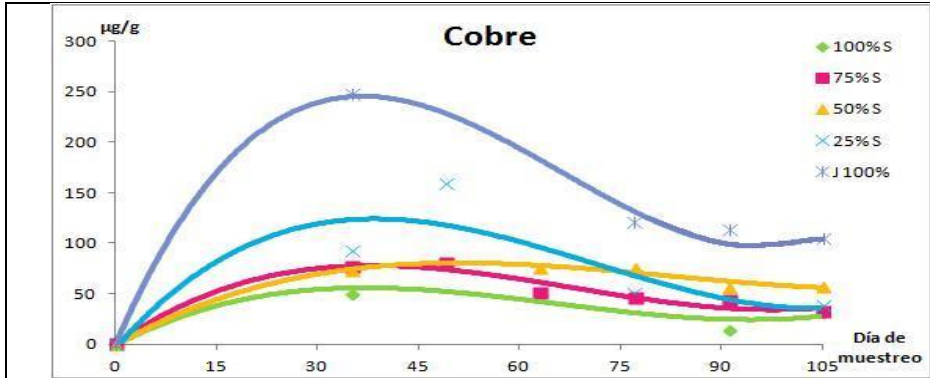
Con la determinación de metales se obtuvo un panorama general de la posible contaminación que fue tolerada por las unidades experimentales.

Para cada uno de los 5 tratamientos se tenían 4 repeticiones por muestreo, debido a la poca cantidad de peso que tenían las unidades experimentales se decidió juntar el contenido de estas cuatro para que el procedimiento se llevara a cabo lo mejor posible (solo se realizó el análisis en la parte aérea de la planta), además se realizaron las conversiones pertinentes para obtener la cantidad real de metal en la muestra después de la disolución para la digestión ácida, los resultados de las conversiones de unidades se encuentran en el apéndice “F”.

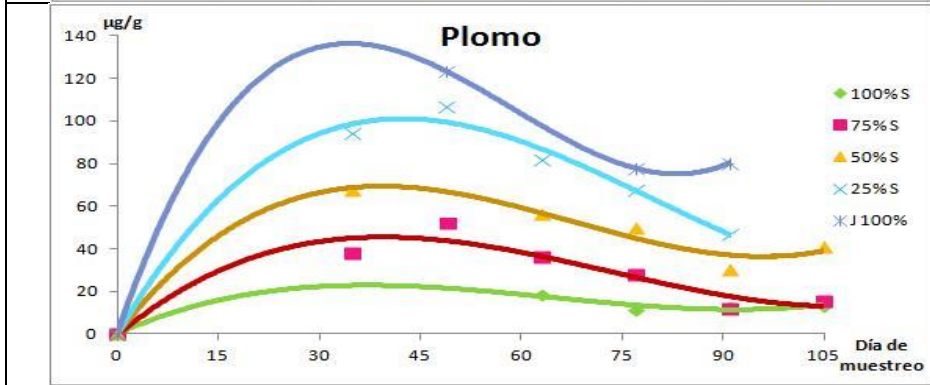
Ya obtenidas las cantidades reales de metal presentes en las muestras se obtuvieron diversas gráficas, éstas se presentaran con su subsecuente análisis.

Las primeras son gráficas de cinética de la cantidad de metal en la parte aérea de la planta para cada tratamiento. Después se encuentran las gráficas que muestran la cantidad de metal en la parte aérea de la planta contra la proporción de jal (figura 3.11), ambos grupos de gráficas se complementan para deducir que día sería el indicado para la cosecha de las plantas (el que presente mayor cantidad de metales por proporción de jal) y saber que tratamiento tuvo la mayor absorción de los metales analizados en sus unidades experimentales.

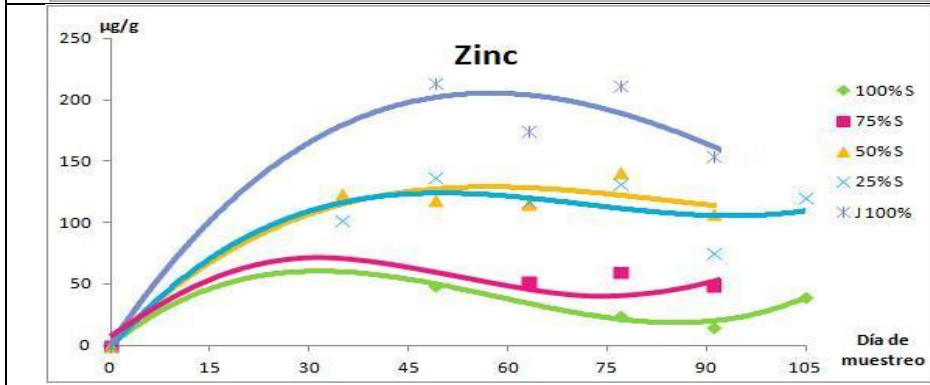
Al final se unieron los resultados obtenidos para los parámetros agronómicos con los obtenidos en la cuantificación de metales para tener una discusión conjunta que logre unir lo ocurrido en las unidades experimentales a lo largo de su ciclo vegetativo según el tratamiento en que se encontraban, todo enfocado a establecer si *Tagetes erecta* es tolerante para estos metales analizados.



Trat.	35	49	63	77	91	105
	Días de muestreo					
100% S	50.77	52	51.3	31	15.24	32.34
75% S	77.31	81.16	51.32	45.56	43.32	33.06
50% S	73.66	78	76.8	76.78	56.02	58.17
25% S	92.54	159.05	96	50.75	44	39.49
J 100%	247.37	228	182	120.83	113.14	104.59



Trat.	35	49	63	77	91	105
	Días de muestreo					
100% S	23	21	18.3	11.7	12.9	13.2
75% S	38.04	51.80	36.07	27.82	12	15.6
50% S	67.54	67	56.84	50.04	30.45	41.31
25% S	94.76	106.95	82.16	67.79	47.10	-
J 100%	136	123.32	98	77.80	80.38	-



Trat.	35	49	63	77	91	105
	Días de muestreo					
100% S	60	48.96	34	24.99	15.36	40.53
75% S	69	60	52.30	59.70	49.41	-
50% S	124.54	118.59	116.19	141.03	107.29	-
25% S	102.36	136.73	117.34	131.59	75.97	120.81
J 100%	180	214.22	175.36	212.43	155.46	-

Figura 3.9 Curvas de la cinética de la cantidad de metal en planta (µg/g) en su parte aérea para los distintos tratamientos
 * Los datos en cursiva no tienen una relevancia estadística # La falta de muestra se denota con un guión en la celda.

Efecto de los tratamientos sobre la cinética de absorción de metal

De la figura 3.9: Los resultados de las mediciones son los puntos en la gráfica (no son promedios), por esto no presentan barras de error. Las líneas representan a cada uno de los tratamientos a lo largo del tiempo, en este caso el tiempo son los días de muestreo. A continuación los resultados se analizaran en orden para cada metal:

1) Cobre: Se vio una tendencia a absorber mayor cantidad de metal según aumentaba la proporción de jal en los tratamientos, más marcada esta tendencia en el tratamiento 100% J. Existió una ligera variación, a partir del día 63, donde 50% S estuvo por encima de 25% S.

Se mostró un pico de todos los tratamientos en el día 49 de muestreo respecto a los demás días (indicando una mayor absorción) después se presentó un descenso hasta el día 91 a partir de este punto se elevó un poco la absorción hacia el final de los muestreos. Por otra parte, esta absorción se presentó ordenada, es decir, el tratamiento 75% S presentó menor absorción del metal hasta llegar a 100% J que mostró la mayor absorción (su curva sugiere una marcada absorción, en comparación a los otros tratamientos).

Las concentraciones promedios (dadas en μg de metal / g de planta en la parte aérea) para los tratamientos mostraron una clara tendencia a aumentar como se registró en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Cantidad promedio de Cu en planta para los diversos tratamientos

100% S \rightarrow 37.41	50% S \rightarrow 68.30	J 100% \rightarrow 146.58
75% S \rightarrow 55.12	25% \rightarrow 128.87	

2) Plomo. En cada día de muestreo se observó el mismo patrón, el primer tratamiento presentó la cantidad más baja de metal y el último tratamiento la cantidad más alta, siempre en ese orden. Además se vio una elevada cantidad del metal para todos los tratamientos en el día 49 de muestreo, después un ligero declive hacia el día 91 y un ligero aumento al día 105 para los tratamientos 100% S, 75% S y 50% S.

Las concentraciones promedios (dadas en μg de metal / g de planta en la parte aérea) denotan un aumento (tabla 3.4):

Tabla 3.4 Cantidad promedio de Pb en planta para los diversos tratamientos

100% S → 14.02	50% S → 49.23	J 100% → 87.67
75% S → 30.22	25% → 79.75	

3) Zinc. Las mayores concentraciones se situaron en los días 49, 63 y 77. Nuevamente, al igual que en cobre, 50% S se encontró por arriba del tratamiento 25% S en varias mediciones, igualmente se notó que en el último tratamiento la absorción estuvo por encima que en los otros tratamientos. Como en los otros metales, la menor concentración fue de 100% S hasta llegar a 100% J con la mayor concentración, excepto por una discrepancia a partir del día 63 entre 50% S y 25% S.

En la gráfica de zinc de la figura 3.10 se notó una tendencia poco marcada. Primero para todos los tratamientos excepto 100% J se llegó a un punto máximo en el día 49 después tuvieron una ligera baja hasta el día 77 y en la parte final aumentó un poco la cantidad de metal presente. En el caso de la mezcla 100% J tuvo su punto máximo hasta el día 63 y de este punto presentó un declive hasta el último día, aun bajo estas circunstancias, fue el tratamiento que más absorción del metal demostró.

Las concentraciones promedios (dadas en μg de metal / g de planta en la parte aérea) tienden a aumentar (tabla 3.5):

Tabla 3.5 Cantidad promedio de Zn en planta para los diversos tratamientos

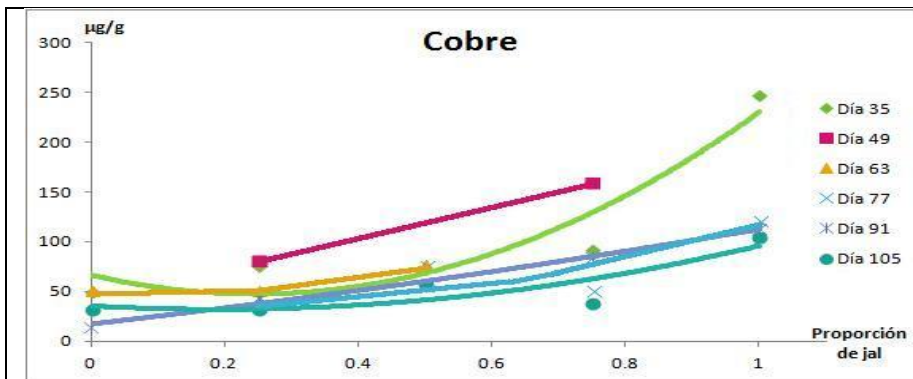
100% S → 32.46	50% S → 121.53	J 100% → 189.37
75% S → 53.80	25% → 114.13	

Al analizar las gráficas de los tres metales se puede decir que se observó una tendencia hacia una mayor absorción del metal, en la parte aérea de la planta, entre mayor fuera la proporción de jal en el sustrato, aunque como se mencionó en algunos casos se presentaba ligeramente 50% S fuera de este orden esto podría marcar un posible error experimental o requerir de un análisis más a fondo de este sustrato.

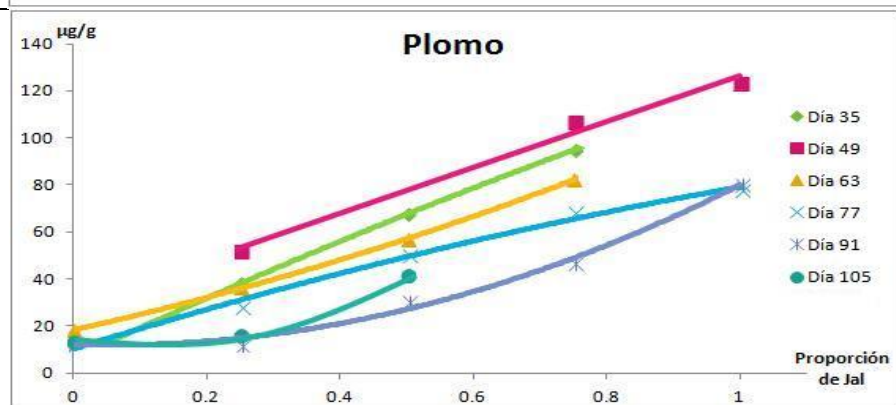
Es interesante la variación del tratamiento 100% J solo en el metal zinc, esto podría deberse a que en las últimas semanas las plantas de este tratamiento se notaban casi marchitas y recordando que el zinc es un metal esencial esto podría demostrar que al estar muriendo la

planta seguía absorbiendo los EPT's, mientras el zinc ya no lo utilizaba contribuyendo a la exacerbación de su situación, de igual manera sería un punto a analizar detalladamente en otro trabajo.

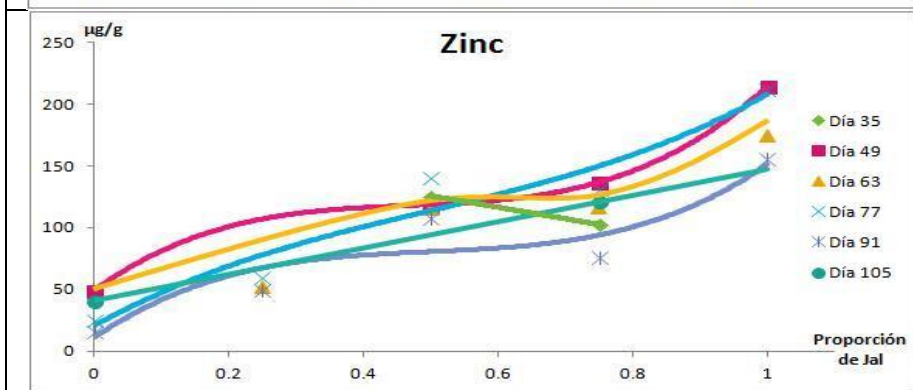
Por último, para comprobar si el aparente incremento en la absorción fue debido a la proporción de jal presente en el tratamiento se realizaron otras gráficas, que a su vez, permitieron sugerir cuál es el mejor día para cosechar la planta. En la figura 3.10, que se encuentra a continuación se presentan estas gráficas:



Prop. de Jal	35	49	63	77	91	105
	Días de muestreo					
0	50.77		51.3	-	15.24	32.34
0.25	77.31	81.16	51.32	45.56	43.32	33.06
0.5	73.66	-	76.8	76.78	56.02	58.17
0.75	92.54	159.05	-	50.75	-	39.49
1	247.37	-	-	120.83	113.14	104.59



Prop. de Jal	35	49	63	77	91	105
	Días de muestreo					
0	-	-	18.3	11.7	12.9	13.2
0.25	38.04	51.80	36.07	27.82	12	15.6
0.5	67.54	-	56.84	50.04	30.45	41.31
0.75	94.76	106.95	82.16	67.79	47.10	-
1	-	123.32	-	77.80	80.38	-



Prop. de Jal	35	49	63	77	91	105
	Días de muestreo					
0	-	48.96	-	24.99	15.36	40.53
0.25	-	-	52.30	59.70	49.41	-
0.5	124.54	118.59	116.19	141.03	107.29	-
0.75	102.36	136.73	117.34	131.59	75.97	120.81
1	-	214.22	175.36	212.43	155.46	-

Figura 3.10 Cantidad de metal en planta ($\mu\text{g/g}$) en su parte aérea según la proporción (o gradiente) de jal para los días de muestreo

Interpretación de gráficas (relación entre contenido de metal en planta y proporción de jal)

Con los mismos datos de la figura 3.9 de la sección anterior se realizaron estas gráficas. Lo distinto es que aquí lo que se tomó en cuenta la proporción de jal que se presentaba en el sustrato y la cantidad de metal que presentó la planta (figura 3.10).

Se analizaron las gráficas en orden de aparición en la figura anterior:

- 1) Cobre. Se mostró claramente que la cantidad del metal aumentó en relación con la proporción de jal que se tenía. Los primeros tres días de muestreo se encontraron más arriba de la gráfica y tuvieron un aumento en la cantidad de metal conforme se acercaba a las proporciones más altas de jal.

Por otro lado, los últimos tres días de muestreos se encontraron en la parte de abajo de la gráfica, con un aumento constante a lo largo de las proporciones del jal.

Además el día 49 fue el que mostró un valor más alto, y continuó así, a lo largo de las diversas proporciones de jal, así que en este día se encontró la mayor cantidad de cobre para todos los tratamientos.

- 2) Plomo. Su tendencia es constante, un aumento relacionado con una mayor cantidad de jal para todos los tratamientos. Nuevamente los tres primeros días son los que se encontraron en la parte superior, destacando que reincide el día 49 como el que a lo largo del gradiente de jal se mantuvo con las concentraciones más altas de plomo.

- 3) Zinc. Para las proporciones 0.5 y 0.75 jal se mostró el contenido de zinc casi constante (solo hay un pequeño aumento). Pero en general la tendencia fue a un aumento en la cantidad de zinc conforme se incrementó el gradiente de jal. Estos tratamientos estuvieron muy juntos, a pesar de ellos, se puede apreciar que el muestreo del día 49 se mantuvo por arriba de los demás en la mayoría de los casos.

Con este análisis se puede decir que el día que se obtuvo mayor cantidad de cada uno de los metales fue el día 49, para cada uno de los 5 tratamientos. En este punto se puede señalar una posible cosecha y recuperación de los metales más eficiente.

También corrobora lo sugerido por las gráficas de la sección anterior: existió un aumento en la cantidad absorbida de metal relacionada al aumento del gradiente de jal presente en el tratamiento.

En cuanto a la absorción de metales se puede decir que las diferencias encontradas entre los parámetros agronómicos en las plantas de nuestro tratamiento testigo y las plantas de los demás tratamientos fueron causadas por la absorción de EPT's, principalmente de los tres analizados (Cu, Pb y Zn). Esta absorción de contaminantes derivó en la afectación de los parámetros provocando: alturas más bajas, disminuido número de hojas y bajas concentraciones de clorofila en las hojas. Esto es comprobable por las características que mostraron las plantas al estar bajo la contaminación de estos EPT's, los descritos en el marco teórico y retomados de Guzmán (2012).

Además se encontró una relación entre el gradiente de jal y la absorción del metal por los tratamientos: aumenta la absorción de metal conforme aumenta el gradiente de jal en el sustrato. También según al aumento de ambos factores la situación de las unidades experimentales se exacerbaba, siendo los tratamientos 25%S y 100% J los más perjudicados.

Por otra parte, se puede mencionar que los tratamientos 75% S y 50% S lograron producir flores, lo cual es destacable debido a la situación de contaminación en la que se encontraban. Sin embargo, la aparición de los botones se retrasó una semana en el tratamiento 75% S y dos semanas en 50% S, esto sugiere que la contaminación provocó una lentitud en el ciclo vegetativo de las unidades experimentales.

Otro punto a destacar es, si se quiere tener una eficiente recuperación de los metales lo ideal es realizarlo en el día 49 del ciclo vegetativo de la planta porque demostró ser el día donde se absorbía mayor cantidad de los tres metales analizados para cada uno de los 5 tratamientos.

IV CONCLUSIONES

Tagetes erecta presenta ventajas como instrumento remediador:

- 1) Es una planta nativa de México, por ende, se tiene fácil acceso a ella y su ciclo vegetativo es relativamente corto.
- 2) La absorción que la planta presenta de EPT's puede permanecer en ella hasta el momento en que se coseche para la recuperación de los metales.

Por esto, es una buena candidata para la industria minera en México como elemento fitorremediador. Se puede decir que la planta *Tagetes erecta* tiene potencialidad de usarse como instrumento para la biorremediación de suelos contaminados particularmente con los metales en estudiados de la zona minera de Zimapán.

Tagetes erecta presentó acumulación de los EPT's analizados (Cu, Pb y Zn), además logró tolerarlos durante el periodo de tiempo analizado.

Los metales: cobre, plomo y zinc fueron absorbidos por las plantas de *Tagetes erecta* afectando de manera negativa los diversos parámetros agronómicos de crecimiento que se evaluaron (altura de planta, número de hojas), además del parámetro bioquímico de índice de clorofila.

A pesar de presentar efectos adversos provocados por la contaminación, los tratamientos 75% S y 50% S llegaron a producir flor, aunque con cierta lentitud precisamente causada por la presencia de los EPT's. Los tratamientos 25% S y 100% J no presentaron flor ni aparición de botones, no llegaron a completar su ciclo vegetativo pero lograron sobrevivir al encontrarse en ese ambiente adverso.

Las plantas *Tagetes erecta* presentaron una buena potencialidad de absorción hacia los EPT's analizados en este trabajo. Los rangos absorbidos de cada metal son aceptables, y como ya se mencionó, las plantas toleraron este ambiente logrando un desarrollo completo de su ciclo vegetativo en dos de los tratamientos (75% S y 50% S).

Si lo que se busca es la recuperación de estos metales de interés (ecológico y económico), se encontró una relación de cosecha en el mismo día para los tres metales, en este tiempo (día 49

del ciclo vegetativo) es cuando debería extraerse la planta para tener el mayor contenido del metal y así poder recuperarlo eficientemente.

Recomendaciones

Se sugiere hacer posteriores análisis con otros metales de interés con una escala de tiempo similar para tener un estudio más robusto de los EPT's que absorbe y el efecto que produce en la planta. Además, realizar un estudio económico y ecológico para determinar si la cantidad recuperada de los metales de interés es suficiente para constituir una ganancia para la empresa sobre otros métodos remediadores y no se daña la biodiversidad de la zona. Por último, con las semillas obtenidas de los tratamientos que lograron terminar su ciclo vegetativo se podría realizar un experimento bajo circunstancias parecidas y determinar si tienen ventaja ante la contaminación o, si por el contrario muestran un rezago frente a semillas que crecieron bajo circunstancias normales.

REFERENCIAS

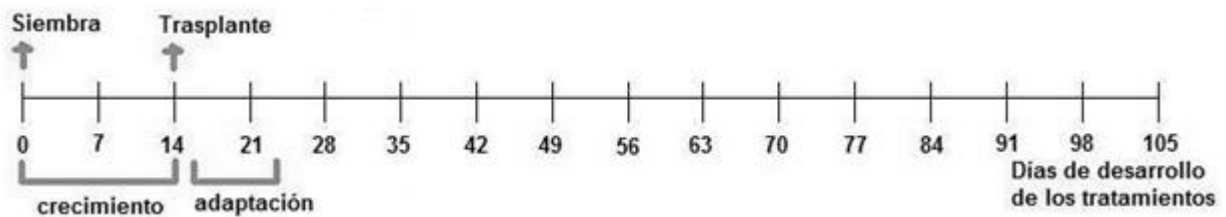
- 1) Aguirre, A. (1981). Síntesis y actividad fitohormonal de algunos ácidos fenoxiacéticos en *pelargonium inquinans*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 2) Aguirre, A. (2001). Química de los suelos ácidos, templados y tropicales. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- 3) Bautista, F. (1999). Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. México: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- 4) Bosiacki, M. (2009). Phytoextraction of cadmium and lead by selected cultivars of *Tagetes erecta* L. Part II. Contents of Cd and Pb in plants. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 8(2) 2009, 15-26.
- 5) Brooks, R. R., Chambers, M. F., Nicks, L. J. y Robinson, B. H. (1998). Phytomining. *Trends in plant science*, 3(9), 359-362.
- 6) Casanova, E. (2005). Introducción a la ciencia del suelo. Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- 7) Díaz, A. (1999). Diseño estadístico de experimentos. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
- 8) Guzmán, G. (2012). Estrategia para la remediación de sitios contaminados con Cu, Cd, Pb y Zn aplicando tratamientos químico-agronómicos a jales minero-metalúrgicos y suelos. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 9) Fassbender, H.W. (1975). Química de suelos. Costa Rica: Editorial IICA.
- 10) Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants. New York: CRC Press.
- 11) Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (2015). Cámara de diputados. H. Congreso de la Unión. México.
- 12) Mirsal, I. A. (2008). Soil Pollution: Origin, monitoring & remediation. Berlin: Springer.
- 13) Moreno, R., Téllez, J. y Monroy M.G. (2012). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(1), 203-218.
- 14) Morel, J.L., Echevarría G. y Goncharova, N. (2006). Phytoremediation of metal – contaminated soils. Holanda: Springer.

-
- 15) SEMARNAT (2001). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 7 de diciembre de 2001. México.
 - 16) SEMARNAT (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. Diario Oficial de la Federación. 13 de septiembre de 2004. México.
 - 17) Ortiz, A., Vázquez, G., Quezada, M. F., Serrano, T. y López, S. (2008). Compendio demográfico del estado de Hidalgo, 2007. México: Universidad Autónoma de Hidalgo.
 - 18) Raven, P.H., Evert, R.F. y Eichhorn, S.E. (1992). Biología de las plantas. Barcelona: Reverté.
 - 19) Rodríguez, M. A., Delgado, A., González, M. C., Carrillo, R., Mejía, J.M. y Vargas, M. (2010). Emergencia y crecimiento de plantas ornamentales en sustratos contaminados con residuos de mina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 979-990.
 - 20) Seoáñez, M. (1999). Contaminación del Suelo: Estudios, tratamiento y gestión. España: Mundi-Prensa.
 - 21) Serrato, M. A., Grimaldo, O. y González, V.A. (1998). Análisis de crecimiento y evolución bajo domesticación en dos especies de Cempoalxóchitl (*Tagetes erecta* y *Tagetes patula*). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 4(2), 75-82.
 - 22) Sheoran, V., Sheoran, A. S. y Poonia, P. (2009). Phytomining: A review. *Minerals Engineering*, 22(12), 1007-1019.
 - 23) Singh, A. y Ward, O. P. (2004). Applied bioremediation and phytoremediation. Berlin: Springer.
 - 24) Sivasankar, R., Kalaikandhan, R., Vijayarengan, P. (2012). Phytoremediating capability and nutrient status of four plant species under zinc stress. *International Journal of Research in Environmental Science and Technology*, 2(1).
 - 25) Volke, T. y Velasco, J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados: Red Latinoamericana de Prevención y Gestión de Sitios Contaminados ReLASC.
 - 26) William, G. C. y Gertude M. C. (1965). Diseños experimentales. México: Trillas.

APÉNDICES

Apéndice "A" Calendario de mediciones: Refiérase a la sección 2.3.7

La plantas crecieron durante 14 días en recipientes comunales, después de este periodo fueron trasplantadas a las distintas mezclas (Jal-Suelo). A partir de este punto, se propusieron los muestreos cada dos semanas para medir los parámetros más representativos de las plantas. Sin embargo, en el primer intervalo las plantas aún eran pequeñas para realizarse los muestreos, por lo que se les dejó una semana más, empezando las mediciones el día 35 del ciclo vegetativo, a partir de este punto los muestreos se realizaron cada 2 semanas.



- **Muestreos**

Primero → Día 35

Cuarto → Día 77

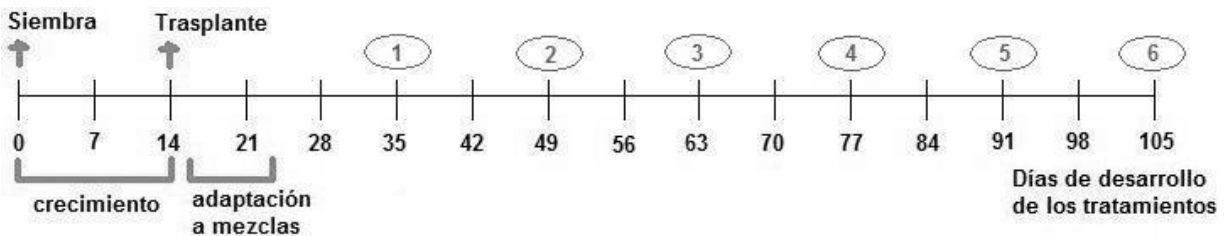
Segundo → Día 49

Quinto → Día 91

Tercero → Día 63

Sexto → Día 105

*** El rango entre cada uno es de 15 días.



- **Medición de parámetros**

Primera → Día 35

Sexta → Día 70

Segunda → Día 42

Séptima → Día 77

Tercera → Día 49

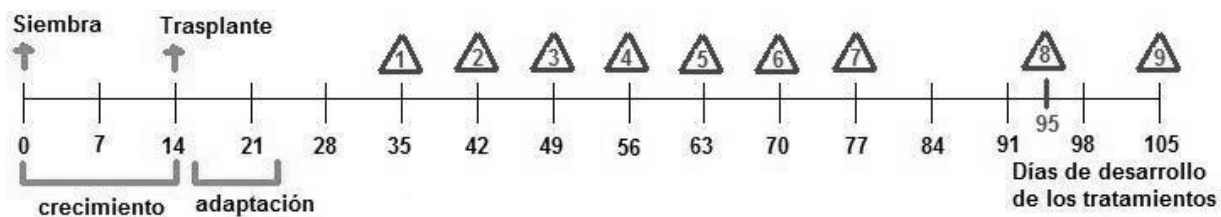
Octava → Día 95

Cuarta → Día 56

Novena → Día 105

Quinta → Día 63

**El rango entre cada uno es de 7 días cada uno, con una variación para las últimas dos.



- **Clorofila**

Durante la mayor parte de vida de las unidades experimentales sus hojas eran muy pequeñas, por lo que no se podía medir su contenido de clorofila, sino hasta el día 67 después de la siembra para el tratamiento 100% S y 75% S; una semana después también para el tratamiento 50% S.

Primera → Día 67

Segunda → Día 74

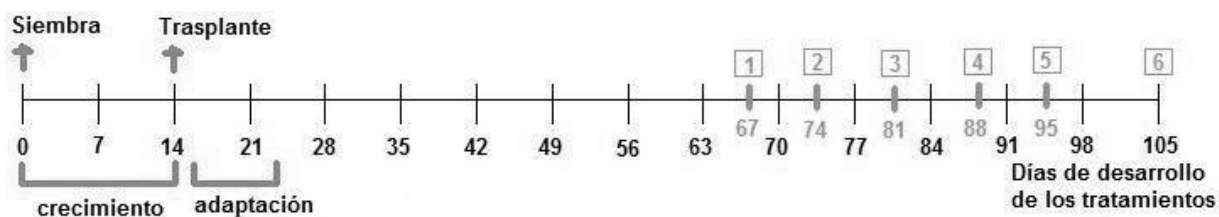
Tercera → Día 81

Cuarta → Día 88

Quinta → Día 95

Sexta → Día 105

* También es de 7 días entre cada uno, exceptuando la última fecha.



Apéndice "B". Disoluciones para curva de calibración. (Ver sección 2.4.3.2)

En el laboratorio se contaban con patrones ya preparados para la determinación de la curva de calibración para la espectroscopia de absorción atómica. Las soluciones se denominaron soluciones madres y, a partir de ellas, se hicieron disoluciones para obtener la serie estándar necesarios para el análisis. A continuación se verá un desglose de los metales y la preparación de los patrones para cada uno de ellos.

1) Cobre: La solución era de 50 mg L^{-1} . Para el experimento se necesitaban concentraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 mg L^{-1} . Por lo tanto, se hicieron disoluciones de la solución madre para obtener las concentraciones deseadas.

- 1 mg L^{-1} .- $500 \mu\text{L}$
 - 2 mg L^{-1} .- 1 mL
 - 3 mg L^{-1} .- 1.5 mL
 - 4 mg L^{-1} .- 2 mL
 - 5 mg L^{-1} .- 2.5 mL
- De solución madre disueltos en 25 mL de HNO_3

2) Plomo: La solución madre tenía 100 mg L^{-1} . Se requerían concentraciones de 0.5, 1, 2, 3 y 4 mg L^{-1} .

- 0.5 mg L^{-1} .- $125 \mu\text{L}$
 - 1 mg L^{-1} .- $250 \mu\text{L}$
 - 2 mg L^{-1} .- $500 \mu\text{L}$
 - 3 mg L^{-1} .- $750 \mu\text{L}$
 - 4 mg L^{-1} .- 1 mL
- De solución madre disueltos en 25 mL de HNO_3

3) Zinc. Tenía 20 mg L^{-1} . Las concentraciones necesarias eran de 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 y 1.6 mg L^{-1} .

- 0.2 mg L^{-1} .- $250 \mu\text{L}$
 - 0.4 mg L^{-1} .- $500 \mu\text{L}$
 - 0.8 mg L^{-1} .- 1 mL
 - 1.2 mg L^{-1} .- 1.5 mL
 - 1.6 mg L^{-1} .- 2 mL
- De solución madre disueltos en 25 mL de HNO_3

Apéndice "C" Diferencias significativas y comparación de medias (ALTURA). Referirse a la sección 3.2.1

Día 35													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
	Totales							Totales					
n	8	11	9	11	10	49	g.l.	7	10	8	10	9	44
suma	48.9	86.9	41.7	56.2	45.1	278.8	desvest	1.1	2.0	1.5	1.2	1.2	
promed	6.1	7.9	4.6	5.1	4.5	28.3	t	1.9	1.78	1.86	1.8	1.83	
S(x ²)	306.8	727.5	211.8	302.4	216.8	1765.3	t(student)	0.760	1.140	1.003	0.703	0.744	
(Sx) ² /n	298.9	686.5	193.2	287.1	203.4	1669.2	coef var	17.32	25.63	32.93	24.17	27.04	
DIF	7.8	41	18.62	15.25	13.39	96.10							

Comparación	X5	1.790	1.480	1.000	1.600
		X4	3.270	2.790	3.390
			X3	0.480	0.120
	F (tab)			X2	0.600
	2.595				X1

C=	317.263	s ² *g=	2.184	
		SC	CM	F-exp
	gl	Sum cuad	Cuad med	
Entre mezclas	4	1351.900	337.973	
Dentro de mezclas (error)	44	96.100	2.184	154.732

Día 42													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	6	11	9	10	10	46	g.l.	5	10	8	9	9	41
suma	44.6	95.3	45.6	57.2	54.1	296.8	desvest	1.3	2.1	1.6	1.1	1.2	
promed	7.4	8.7	5.1	5.7	5.4	32.3	t	1.94	1.78	1.86	1.80	1.83	
S(x ²)	339.4	870.2	251.1	337.8	306.0	2104.4	t(student)	1.09	1.19	1.04	0.65	0.74	
(Sx) ² /n	331.5	825.6	231.0	327.2	292.7	2008.1	coef var	16.90	24.37	31.22	18.95	22.46	
DIF	7.89	44.58	20.02	10.58	13.29	96.36							
Comparación	X5	1.20	2.37	1.71	2.02		C=	383.001	s ² *g=	2.350			
		X4	3.60	2.94	3.25				SC	CM	F-exp		
			X3	0.70	0.34			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	0.30		Entre mezclas	4	1625.100	406.269			
	2.61				X1		Dentro de mezclas (error)	41	96.364	2.350	172.856		

Día 49													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	7	12	8	10	10	47	g.l.	6	11	7	9	9	42
suma	75.7	111.3	46.4	63.3	60.7	357.4	desvest	2.2	2.8	1.7	1.3	1.5	
promed	10.8	9.3	5.8	6.3	6.1	38.3	t	1.94	1.78	1.90	1.81	1.83	
S(x ²)	846.6	1116.1	289.1	414.8	387.7	3054.3	t(student)	1.71	1.48	1.21	0.76	0.89	
(Sx) ² /n	818.6	1032.3	269.1	400.7	368.4	2889.2	coef var	19.95	29.76	29.13	19.79	24.11	
DIF	27.93	83.78	19.98	14.12	19.28	165.09							
Comparación	X5	1.539	5.014	4.484	4.744		C=	543.552	s ² *g=	3.931			
		X4	3.475	2.945	3.205				SC	CM	F-exp		
			X3	0.530	0.270			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	0.260		Entre mezclas	4	2345.700	586.414			
	2.605				X1		Dentro de mezclas (error)	42	165.090	3.931	149.185		

Día 56													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
	Totales							Totales					
n	7	13	8	11	10	49	g.l.	6	12	7	10	9	44
suma	83.4	128.5	49.4	72.5	64.9	398.7	desvest	2.3	3.1	1.8	1.9	1.4	
promed	11.9	9.9	6.2	6.6	6.5	41.1	t	1.94	1.78	1.90	1.81	1.83	
S(x ²)	1024.4	1388.9	327.7	513.1	438.1	3692.2	t(student)	1.79	1.62	1.29	1.08	0.84	
(Sx) ² /n	993.7	1270.2	305.0	477.8	421.2	3467.9	coef var	19.00	31.82	29.12	28.50	21.11	
DIF	30.75	118.72	22.64	35.29	16.89	224.28							
Comparación	X5	2.030	5.739	5.323	5.424		C=	648.820	s ² *g=	5.097			
		X4	3.710	3.294	3.395				SC	CM	F-exp		
			X3	0.416	0.315			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	0.101		Entre mezclas	4	2819.100	704.772			
	2.595				X1		Dentro de mezclas (error)	44	224.279	5.097	138.270		
Día 63													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
	Totales							Totales					
n	7	13	8	10	10	48	g.l.	6	12	7	9	9	43
suma	100.0	145.9	55.0	71.6	71.3	443.8	desvest	2.3	3.6	2.0	2.0	1.8	
promed	14.3	11.2	6.9	7.2	7.1	46.7	t	1.94	1.78	1.90	1.83	1.83	
S(x ²)	1475.7	1793.4	407.1	547.5	536.5	4760.2	t(student)	1.82	1.85	1.46	1.20	1.08	
(Sx) ² /n	1428.6	1637.4	378.1	512.7	508.4	4465.2	coef var	16.1	32.12	29.59	27.50	24.79	
DIF	47.11	155.92	28.98	34.88	28.12	338.01							
Comparación	X5	3.1	7.4	7.1	7.2		C=	820.660	s ² *g=	7.861			
		X4	4.3	4.1	4.1				SC	CM	F-exp		
			X3	0.3	0.3			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	0.0		Entre mezclas	4	3644.500	911.130			
	2.6				X1		Dentro de mezclas (error)	43	295.012	6.861	132.800		

Día 70													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	7	13	8	9	7	44	g.l.	6	12	7	8	6	39
suma	115.2	154.6	57.4	65.9	59.5	452.6	desvest	2.9	3.7	2.3	2.0	1.4	
promed	16.5	11.9	7.2	7.3	8.5	51.3	t	1.94	1.78	1.90	1.86	1.94	
S(x ²)	1965.7	2003.2	450.1	515.3	517.2	5451.4	t(student)	2.29	1.90	1.68	1.33	1.09	
(Sx) ² /n	1895.9	1838.6	411.8	482.5	505.8	5134.5	coef var	17.60	31.15	32.56	27.62	16.22	
DIF	69.82	164.69	38.22	32.72	11.4	316.84							

Comparación	X5	4.56	9.28	9.14	7.96	C=	931.122	s ² *g=	8.124	
		X4	4.72	4.57	3.39			SC		F-exp
			X3	0.15	1.32		gl	Sum cuad	Cuad med	
	F (tab)			X2	1.18	Entre mezclas	4	4203.400	1050.900	
	2.62				X1	Dentro de mezclas (error)	39	316.837	8.124	129.350

Día 77													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	7	13	6	8	7	41	g.l.	6	12	5	7	6	36
suma	164.4	175.1	50.8	61.3	63.8	515.4	desvest	6.9	4.9	2.7	1.9	1.7	
promed	23.5	13.5	8.5	7.7	9.1	62.2	t	1.94	1.78	2.13	1.90	1.94	
S(x ²)	4168.4	2641.3	466.5	494.1	598.2	8368.5	t(student)	5.48	2.49	2.57	1.34	1.32	
(Sx) ² /n	3861.1	2358.5	430.1	469.7	581.5	7700.8	coef var	29.48	36.04	31.87	24.33	18.33	
DIF	307.33	282.81	36.41	24.34	16.75	667.64							

Comparación	X5	10.02	15.02	15.82	14.37	C=	1295.79	s ² *g=	18.54	
		X4	5.00	5.81	4.36			SC		F-exp
			X3	0.80	0.65		gl	Sum cuad	Cuad med	
	F (tab)			X2	1.45	Entre mezclas	4	6405.00	1601.26	
	2.64				X1	Dentro de mezclas (error)	36	667.64	18.54	86.34

Día 95													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	7	13	4	8	7	39	g.l.	6	12	3	7	6	34
suma	200.9	219.9	54.0	60.3	64.4	599.5	desvest	5.8	7.1	2.0	1.8	1.7	
promed	28.7	16.9	13.5	7.5	9.2	75.9	t	1.94	1.78	2.35	1.90	1.94	
S(x ²)	6040.8	4321.8	740.5	477.5	609.6	12190.2	t(student)	4.58	3.64	2.66	1.30	1.34	
(Sx) ² /n	5765.8	3719.7	729.0	454.5	592.5	11261.5	coef var	20.15	41.88	14.5	24.02	18.37	
DIF	274.98	602.1	11.5	22.94	17.14	928.66							
Comparación	X5	11.80	15.20	21.16	19.50		C=	1843.10	s ² *g=	27.31			
		X4	3.42	9.38	7.72				SC	CM	F-exp		
			X3	5.96	4.30			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	1.66		Entre mezclas	4	9418.40	2354.61			
	2.65				X1		Dentro de mezclas (error)	34	928.66	27.31	86.21		
Día 105													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	7	13	4	8	7	71	g.l.	6	12	3	7	6	34
suma	238.4	250.8	62.1	58.9	65.5	1209.7	desvest	5.1	8.2	2.4	1.8	1.8	
promed	34.1	19.3	15.5	7.4	9.4	152.1	t	1.94	1.78	2.35	1.90	1.94	
S(x ²)	8341.2	5652.9	981	455.2	631.3	16061.5	t(student)	4.07	4.23	3.22	1.26	1.39	
(Sx) ² /n	8119.2	4838.5	964.1	433.7	612.9	14968.4	coef var	15.09	42.70	15.30	23.80	18.70	
DIF	221.94	814.41	16.93	21.50	18.38	1093.10							
Comparación	X5	14.76	18.53	26.70	24.70		C=	2341.40	s ² *g=	32.15			
		X4	3.77	11.93	9.94				SC	CM	F-exp		
			X3	8.16	6.17			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	2.00		Entre mezclas	4	12627.00	3156.75			
	2.65				X1		Dentro de mezclas (error)	34	1093.15	32.15	98.18		

Apéndice "D" Diferencias significativas y comparación de medias (Número de Hojas). Ver la sección 3.2.2

Día 35													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	8	13	9	12	10	52	g.l.	7	12	8	11	9	47
suma	50.0	88.0	49.0	60.0	50.0	297.0	desvest	2.5	1.8	0.9	1.3	0.9	
promed	6.3	6.8	5.4	5.0	5.0	28.5	t	1.9	1.78	1.86	1.8	1.83	
S(x ²)	356.0	636.0	273.0	320.0	258.0	1843.0	t(student)	1.790	0.942	0.580	0.732	0.575	
(Sx) ² /n	312.5	595.7	266.8	300.0	250.0	1725.0	coef var	39.88	27.07	16.20	26.97	18.86	
DIF	43.5	40.31	6.22	20	8	118.0							

Comparación	X5	0.52	0.81	1.25	1.25
		X4	1.32	1.77	1.77
			X3	0.44	0.44
	F (tab)			X2	0.00
	2.58				X1

C=	339.265	s ² *g=	2.511	
		SC	CM	F-exp
	gl	Sum cuad	Cuad med	
Entre mezclas	4	1385.700	346.426	
Dentro de mezclas (error)	47	118.000	2.511	137.948

Día 42													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
	Totales							Totales					
n	5	13	9	12	8	47	g.l.	4	12	8	11	7	42
suma	43.0	88.0	48.0	55.0	47.0	281.0	desvest	0.9	2.0	2.0	1.3	1.4	
promed	8.6	6.8	5.3	4.6	5.9	31.2	t	2.13	1.78	1.86	1.80	1.90	
S(x ²)	373.0	644.0	288.0	271.0	289.0	1865.0	t(student)	0.95	1.03	1.32	0.71	0.97	
(Sx) ² /n	369.8	595.7	256.0	252.1	276.1	1749.7	coef var	10.4	29.64	37.5	28.61	23.08	
DIF	3.2	48.31	32	18.92	12.88	115.30							
Comparación	X5	1.800	3.267	4.017	2.725		C=	336.004	s ² *g=	2.745			
		X4	1.400	2.186	0.894				SC	CM	F-exp		
			X3	0.800	0.542			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	1.300		Entre mezclas	4	1413.700	353.424			
	2.605			X1			Dentro de mezclas (error)	42	115.300	2.745	128.741		
Día 49													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
	Totales							Totales					
n	7	11	8	11	8	45	g.l.	6	10	7	10	7	40
suma	63.0	91.0	50.0	54.0	45.0	303.0	desvest	1.6	2.0	2.3	1.1	1.4	
promed	9.0	8.3	6.3	4.9	5.6	34.1	t	1.94	1.81	1.90	1.81	1.90	
S(x ²)	583.0	791.0	350.0	278.0	267.0	2269.0	t(student)	1.29	1.12	1.66	0.65	1.01	
(Sx) ² /n	567.0	752.8	312.5	265.1	253.1	2150.5	coef var	18.14	23.62	37.03	23.14	25.03	
DIF	16	38.18	37.5	12.91	13.88	118.47							
Comparación	X5	0.727	2.750	4.091	3.375		C=	408.04	s ² *g=	2.96			
		X4	2.023	3.364	2.648				SC	CM	F-exp		
			X3	1.341	0.625			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	0.716		Entre mezclas	4	1742.50	435.62			
	2.615			X1			Dentro de mezclas (error)	40	118.47	2.96	147.09		

Día 56													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
	Totales							Totales					
n	7	13	8	10	9	47	g.l.	6	12	7	9	8	42
suma	70.0	112.0	53.0	45.0	51.0	331.0	desvest	1.6	2.8	2.3	1.8	1.9	47
promed	10.0	8.6	6.6	4.5	5.7	35.4	t	1.94	1.78	1.90	1.83	1.86	331.0
S(x^2)	716.0	1060.0	389.0	233.0	317.0	2715.0	t(student)	1.29	1.45	1.67	1.12	1.23	35.4
(Sx)^2/n	700.0	964.9	351.1	202.5	289.0	2507.5	coef var	16.33	32.67	35.11	40.91	33.01	2715.0
DIF	16	95.08	37.88	30.5	28	207.45							
Comparación	X5	1.385	3.375	5.500	4.333		C=	466.22	s^2*g=	4.94			
		X4	1.990	4.115	2.949				SC	CM	F-exp		
			X3	2.125	0.958			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	1.167		Entre mezclas	4	2041.30	510.33			
	2.605				X1		Dentro de mezclas (error)	42	207.45	4.94	103.32		

Día 63													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
	Totales							Totales					
n	7	13	7	9	7	43	g.l.	6	12	6	8	6	38
suma	77.0	131.0	58.0	42.0	38.0	346.0	desvest	1.2	2.9	2.4	1.3	2.1	
promed	11.0	10.1	8.3	4.7	5.4	39.5	t	1.94	1.78	1.94	1.86	1.94	
S(x^2)	871.0	1423.0	514.0	210.0	232.0	3250.0	t(student)	0.97	1.50	1.87	0.87	1.64	
(Sx)^2/n	847.0	1320.1	480.6	196.0	206.3	3049.9	coef var	11.1	29.06	28.49	28.35	38.14	
DIF	24	102.92	33.43	14	25.71	238.07							
Comparación	X5	0.923	2.714	6.333	5.571		C=	556.819	s^2*g=	5.265			
		X4	1.791	5.410	4.648				SC	CM	F-exp		
			X3	3.619	2.857			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	0.762		Entre mezclas	4	2493.100	623.280			
	2.605				X1		Dentro de mezclas (error)	38	200.100	5.265	118.380		

Día 70													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	7	13	7	7	6	40	g.l.	6	12	6	6	5	35
suma	90.0	132.0	48.0	36.0	45.0	351.0	desvest	1.7	3.2	3.0	0.9	1.4	
promed	12.9	10.2	6.9	5.1	7.5	42.5	t	1.94	1.78	1.94	1.94	2.02	
S(x ²)	1182.0	1462.0	382.0	190.0	347.0	3563.0	t(student)	1.33	1.64	2.35	0.71	1.25	
(Sx) ² /n	1157.1	1340.3	329.1	185.1	337.5	3349.2	coef var	13.02	31.36	43.28	17.49	18.38	
DIF	24.86	121.69	52.86	4.86	9.5	213.76							
Comparación	X5	2.70	6.00	7.71	5.36		C=	616.00	s ² *g=	6.11			
		X4	3.30	5.01	2.65				SC	CM	F-exp		
			X3	1.71	0.64			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	2.36		Entre mezclas	4	2733.20	683.31			
	2.65				X1		Dentro de mezclas (error)	35	213.76	6.11	111.88		

Día 77													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J			100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	
						Totales							Totales
n	7	13	4	6	5	35	g.l.	6	12	3	5	4	30
suma	109.0	146.0	43.0	31.0	35.0	364.0	desvest	2.8	3.8	2.5	1.9	1.9	
promed	15.6	11.2	10.8	5.2	7.0	49.7	t	1.94	1.78	2.13	2.02	2.13	
S(x ²)	1755.0	1814.0	481.0	179.0	259.0	4488.0	t(student)	2.20	1.96	3.07	1.75	1.99	
(Sx) ² /n	1697.3	1639.7	462.3	160.2	245.0	4204.4	coef var	17.82	33.94	23.26	37.56	26.73	
DIF	57.71	174.31	18.75	18.83	14	283.60							
Comparación	X5	4.34	4.82	10.40	8.57		C=	757.12	s ² *g=	9.45			
		X4	0.48	6.06	4.23				SC	CM	F-exp		
			X3	5.58	3.75			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	1.83		Entre mezclas	4	3447.30	861.82			
	2.69				X1		Dentro de mezclas (error)	30	283.60	9.45	91.16		

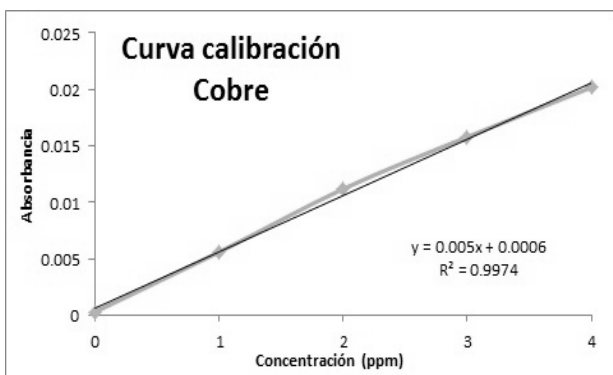
Día 95													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	Totales		100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	Totales
n	7	13	3	7	7	37	g.l.	6	12	2	6	6	32
suma	112.0	158.0	39.0	21.0	33.0	363.0	desvest	1.9	4.4	1.7	0.8	1.7	
promed	16.0	12.2	13.0	3.0	4.7	48.9	t	1.94	1.78	2.13	1.94	1.94	
S(x ²)	1832.0	2148.0	513.0	67.0	173.0	4733.0	t(student)	1.52	2.24	2.61	0.65	1.35	
(Sx) ² /n	1792.0	1920.3	507.0	63.0	155.6	4437.9	coef var	12.02	35.84	13.32	27.22	36.15	
DIF	40	227.69	6	4	17.43	295.12							
Comparación	X5	3.85	3.00	13.00	11.29		C=	712.26	s ² *g=	9.22			
		X4	0.85	9.15	7.44				SC	CM	F-exp		
			X3	10.00	8.29			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	1.71		Entre mezclas	4	3725.60	931.40			
	2.66			X1			Dentro de mezclas (error)	32	295.12	9.22	100.99		

Día 105													
	100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	Totales		100% S	75% S	50% S	25% S	100% J	Totales
n	7	13	3	4	6	64	g.l.	6	12	2	3	5	28
suma	126.0	177.0	40.0	7.0	22.0	713.0	desvest	3.4	5.3	1.5	0.5	1.4	
promed	18.0	13.6	13.3	1.8	3.7	95.6	t	1.94	1.78	2.13	2.35	2.02	
S(x ²)	2326.0	2743.0	538	13.0	90.0	5710.0	t(student)	2.72	2.71	2.30	0.68	1.23	
(Sx) ² /n	2268.0	2409.9	533.3	12.3	80.7	5304.2	coef var	19.08	38.70	11.46	28.57	37.26	
DIF	58	333.08	4.67	0.75	9.33	405.83							
Comparación	X5	4.4	4.7	16.2	14.3		C=	838.69	s ² *g=	14.49			
		X4	0.3	11.9	9.9				SC	CM	F-exp		
			X3	11.6	9.7			gl	Sum cuad	Cuad med			
	F (tab)			X2	1.9		Entre mezclas	4	4465.50	1116.37			
	2.7			X1			Dentro de mezclas (error)	28	405.83	14.49	77.02		

Apéndice "E" Curvas de calibración (ver sección 3.3)

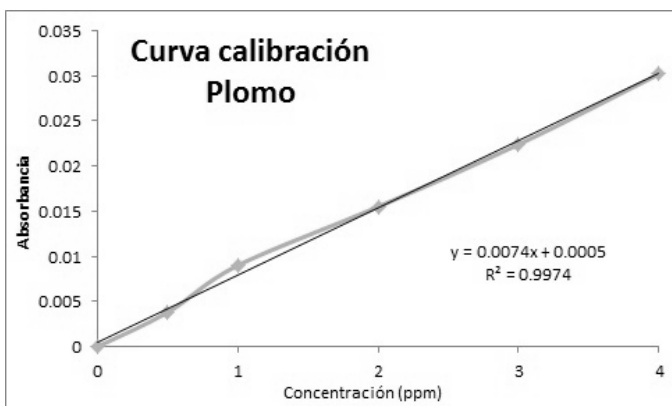
Aquí se muestran las curvas de calibración realizada por el equipo de espectroscopia de absorción atómica, que sirven para la cuantificación de cada metal en este trabajo, además se muestran las tablas de donde se obtuvieron los valores correspondientes.

- **Cobre:**



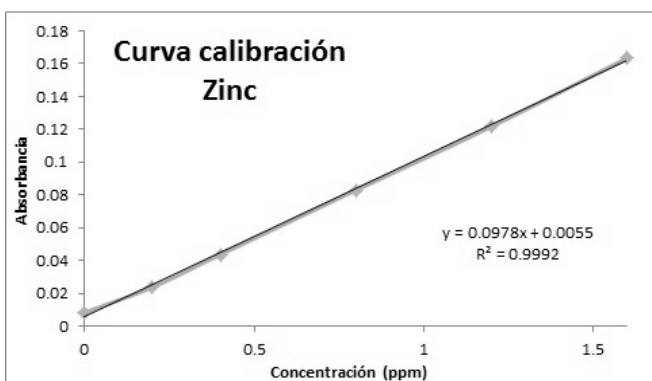
Estándar	Conc.	Abs.	% RSD
0	0 mg L ⁻¹	0.0003	90.1
1	1 mg L ⁻¹	0.0056	2.6
2	2 mg L ⁻¹	0.0112	5.2
3	3 mg L ⁻¹	0.0158	3.4
4	4 mg L ⁻¹	0.0202	2

- **Plomo:**



Estándar	Conc. (mg L ⁻¹)	Abs.	%RSD
0	0	0	29.2
1	0.5	0.0038	30.2
2	1	0.009	8.7
3	2	0.0155	3.1
4	3	0.0224	2.8
5	4	0.0302	5

- **Zinc:**



Estándar	Conc.	Abs.	% RSD
0	0 mg L ⁻¹	0.0003	90.1
1	1 mg L ⁻¹	0.0056	2.6
2	2 mg L ⁻¹	0.0112	5.2
3	3 mg L ⁻¹	0.0158	3.4
4	4 mg L ⁻¹	0.0202	2

Apéndice “F” Resultados de conversión de unidades de absorción atómica (Sección 3.3)

Se presentan los valores para cada metal cuantificados en mg L^{-1} , para determinar la cantidad de cada metal se debieron realizar una serie de conversiones para finalmente obtener $\mu\text{g g}^{-1}$ (debido al poco peso de las muestras).

En la tabla en primer lugar se muestra la concentración obtenida del equipo, posteriormente se toma en cuenta la disolución en la que se le involucró al momento de realizar la digestión ácida (15 ml) y se divide entre el peso seco de las muestras, al final se multiplica por 1000 para obtener los μg . Con este proceso se obtiene los μg de metal por cada g de planta. Se podría expresar como una fórmula matemática:

$$\frac{\text{Concentración} \times 0.015 \text{ L}}{\text{peso seco}} \times 1000 = \frac{\text{g de metal}}{\text{g de planta}}$$

Las siguientes tablas muestran los parámetros utilizados y los resultados finales para cada tratamiento de los distintos metales:

- **Cobre.**

Tratamiento 100% S				Tratamiento 75% S				Tratamiento 50% S			
Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final ($\mu\text{g/g}$)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final ($\mu\text{g/g}$)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final ($\mu\text{g/g}$)
35	0.284	0.0839	50.77	35	0.569	0.1104	77.31	35	0.469	0.0955	73.66
49	-	-	-	49	1.034	0.1911	81.16	49	-	-	-
63	1.71	0.5	51.3	63	0.837	0.2495	50.32	63	0.622	0.1214	76.85
77	-	-	-	77	0.786	0.2588	45.56	77	0.583	0.1139	76.78
91	0.508	0.5	15.24	91	1.444	0.5	43.32	91	0.791	0.2118	56.02
105	1.078	0.5	32.34	105	1.102	0.5	33.06	105	0.859	0.2215	58.17

Tratamiento 25% S				Tratamiento 100% J			
Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final ($\mu\text{g/g}$)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final ($\mu\text{g/g}$)
35	0.459	0.0744	92.54	35	0.376	0.0228	247.37
49	0.58	0.0547	159.05	49	-	-	-
63	-	-	-	63	-	-	-
77	0.292	0.0863	50.75	77	0.497	0.0617	120.83
91	-	-	-	91	0.746	0.0989	113.14
105	0.243	0.0923	39.49	105	0.456	0.0654	104.59

- **Plomo.**

Tratamiento 100% S				Tratamiento 75% S				Tratamiento 50% S			
Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)
35	-	-	-	35	0.28	0.1104	38.04	35	0.43	0.0955	67.54
49	-	-	-	49	0.66	0.1911	51.80	49	-	-	-
63	0.61	0.5	18.3	63	0.6	0.2495	36.07	63	0.46	0.1214	56.84
77	0.39	0.5	11.7	77	0.48	0.2588	27.82	77	0.38	0.1139	50.04
91	0.43	0.5	12.9	91	0.4	0.5	12	91	0.43	0.2118	30.45
105	0.44	0.5	13.2	105	0.52	0.5	15.6	105	0.61	0.2215	41.31

Tratamiento 25% S				Tratamiento 100% J			
Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)
35	0.47	0.0744	94.76	35	-	-	-
49	0.39	0.0547	106.95	49	0.55	0.0669	123.32
63	0.43	0.0785	82.16	63	-	-	-
77	0.39	0.0863	67.79	77	0.32	0.0617	77.80
91	0.39	0.1242	47.10	91	0.53	0.0989	80.38
105	-	-	-	105	-	-	-

- **Zinc.**

Tratamiento 100% S				Tratamiento 75% S				Tratamiento 50% S			
Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)
35	-	-	-	35	-	-	-	35	0.7929	0.0955	124.54
49	0.2644	0.081	48.96	49	-	-	-	49	0.3953	0.05	118.59
63	-	-	-	63	0.87	0.2495	52.30	63	0.9404	0.1214	116.19
77	0.833	0.5	24.99	77	1.03	0.2588	59.70	77	1.0709	0.1139	141.03
91	0.512	0.5	15.36	91	1.647	0.5	49.41	91	1.5149	0.2118	107.29
105	1.3511	0.5	40.53	105	-	-	-	105	-	-	-

Tratamiento 25% S				Tratamiento 100% J			
Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)	Días	Metal inicial (mg/L)	Peso seco (g)	Metal final (µg/g)
35	0.5077	0.0744	102.36	35	-	-	-
49	0.4986	0.0547	136.73	49	0.9554	0.0669	214.22
63	0.6141	0.0785	117.34	63	0.8873	0.0759	175.36
77	0.7571	0.0863	131.59	77	0.8738	0.0617	212.43
91	0.629	0.1242	75.97	91	1.025	0.0989	155.46
105	0.7434	0.0923	120.81	105	-	-	-

** Las celdas donde no hay datos es debido a que no hubo muestra suficiente a analizar.

Las columnas de concentración final ($\mu\text{g g}^{-1}$) fueron las utilizadas en las gráficas, en cuantificación de metales de este trabajo, para representar la cantidad de metal, de los diversos tratamientos, encontrada en las plantas o unidades experimentales.