



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Planeación Urbana y Regional

**“EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE METALES EN LA
ESPECIE VEGETAL (SUCULENTA) *Echeveria elegans*”**

TESIS PROFESIONAL

*Que para obtener el título de
Licenciada en Ciencias Ambientales*

Presenta:

Ivonne Santillán Malaquías

Director de Tesis:

Dr. en C. Huemantzin Balan Ortiz Oliveros

Toluca de Lerdo, Estado de México

ÍNDICE

CONTENIDO	Página
Resumen.....	7
Abstract.....	8
Introducción	9
1.- ESQUEMA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.2 Justificación	14
1.3 Pregunta de investigación	14
1.4 Hipótesis	14
1.5 Objetivo general.....	15
1.6 Objetivos específicos.....	15
1.7 Diagrama metodológico conceptual	16
1.8 Antecedentes.....	17
2. MARCO CONCEPTUAL	21
2.1 Contaminación del suelo.....	22
2.1.1 Contaminación del suelo por metales.....	22
2.1.2 Fuentes de contaminación por metales.....	25
2.2 Eliminación de metales del suelo.....	28
2.2.1 Tratamientos fisicoquímicos	28
2.2.1.1 Vitrificación	28
2.2.1.2 Electrocínética	29
2.2.1.3 Lavado se Suelos	29
2.2.1.4 Precipitación química	29
2.2.1.5 Carbono activado	29
2.2.1.6 Extracción de aire en el suelo.....	29
2.2.1.7 Extracción con disolventes.....	30
2.2.1.8 Extracción fase libre.....	30
2.2.1.9 Flushing.....	30
2.2.2 Tratamientos biológicos	30
2.2.2.1 Fitorremediación.....	31
2.2.2.2 Biorremediación animal.....	32
2.2.2.3 Bioventilación.....	32
2.2.2.4 Biopilas.....	32
2.2.2.5 Lodos biológicos.....	33
2.2.2.6 Compostaje.....	33
2.2.2.7 Landfarming.....	33
2.2.3 Tratamientos térmicos.....	34
2.2.3.1 Incineración.....	34

2.2.3.2 Desorción térmica.....	34
2.3 Mecanismos de retención de metales en plantas	36
2.3.1 Biosorción.....	36
2.3.2 Bioacumulación	37
2.3.3 Biotransformación	37
2.3.4 Biomineralización.....	38
2.4 Mecanismo de tolerancia de contaminantes en las plantas.....	38
2.5 <i>Echeveria elegans</i>	42
2.5.1 Información taxonómica	42
2.5.2 Descripción	43
2.5.3 Riego.....	45
2.5.4 Amenazas.....	45
2.6 Métodos de determinación de metales	46
2.6.1 Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).....	46
2.6.2 Espectrometría Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	47
2.6.3 Espectrometría de Masas por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS).....	48
2.6.4 Espectrometría de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).....	49
3. MARCO CONTEXTUAL	51
3.1 Localización.....	52
3.1.1 Sitio de muestreo	53
3.2 Clima.....	54
3.3 Hidrología	54
3.4 Geología.....	54
3.5 Edafología.....	55
3.6 Flora.....	55
3.7 Fauna.....	56
3.8 Uso de suelo y vegetación.....	56
3.9 Dinámica demográfica.....	56
4. MARCO LEGAL	58
4.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	59
4.2 Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.....	59
4.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.....	60
4.4 Normas Oficiales Mexicanas	61
5. METODOLOGÍA	62
5.1 Materiales y métodos.....	63
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	66
6.1 Adquisición de Especímenes de <i>Echeveria elegans</i>	67
6.2 Muestras de suelo.....	67

6.3 Cultivo, riego y cuidado de <i>Echeveria elegans</i> en las muestras de suelo.....	68
6.4 Preparación de muestras de <i>Echeveria elegans</i> (raíz y parte aérea) y suelo....	69
6.5 Análisis cualitativo y cuantitativo de las muestras de suelo y <i>Echeveria elegans</i>	72
6.5.1. Suelo.....	72
6.5.2 Parte Aérea de <i>Echeveria elegans</i>	75
6.5.3 Raíces de <i>Echeveria elegans</i>	77
6.6 Métodos estadísticos.....	79
6.6.1 Suelo.....	80
6.6.2 Parte aérea.....	80
6.6.3 Raíces.....	81
6.6.4 Relación planta con respecto al suelo.....	82
6.6.5. Diferencias de concentración entre suelo, raíz y parte aérea.....	84
6.7 Factor de Bioacumulación (RAF), Factor de Bioconcentración (SAF) y Factor de Translocación (FT).....	85
6.7.1 Factor de Bioacumulación en la raíz de la planta (RAF).....	85
6.7.2 Factor de Bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF).....	87
6.7.3 Factor de Translocación (FT).....	89
7. CONCLUSIONES	91
Apéndice A	93
Bibliografía.	100

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Página
Tabla I. Proyectos de investigación y remediación de suelos en México.....	18
Tabla II. Plantas utilizadas en fitorremediación.....	19
Tabla III. Características principales de algunos metales pesados.....	24
Tabla IV. Mecanismos de Fitorremediación.....	31
Tabla V. Tipos de contaminantes tratados en la recuperación de suelos.	35
Tabla VI. Fases del proceso por el cual las plantas incorporan y acumulan metales pesados.....	39
Tabla VII. Características de la <i>Echeveria elegans</i>	44
Tabla VIII. Pesos y medidas de los especímenes de <i>Echeveria elegans</i> y de sus raíces hidratados.....	70
Tabla IX. Medida y peso de raíces de <i>Echeveria elegans</i> secas.....	71
Tabla X. Medida y peso de parte aérea <i>Echeveria elegans</i> secas.....	71
Tabla XI. Contenido de metales por muestra (mg/km) en suelos.....	73
Tabla XII. Rangos de concentración de metales en las muestras de suelo.....	74
Tabla XIII. Contenido de metales (mg/L) en parte aérea de <i>Echeveria elegans</i>	76
Tabla XIV. Rangos de concentración de metales (mg/L) en parte aérea de <i>Echeveria elegans</i>	76
Tabla XV. Contenido de metales (mg/L) en raíces de <i>Echeveria elegans</i>	78
Tabla XVI. Rangos de concentración de metales (mg/L) en raíces de <i>Echeveria elegans</i> ..	78
Tabla XVII. Concentración de metales en suelo mg/kg.....	80
Tabla XVIII. Concentración de metales (mg/kg) en parte aérea de <i>Echeveria elegans</i>	81
Tabla XIX. Contenido de metales (mg/kg) en raíz de <i>Echeveria elegans</i>	82
Tabla XX. Factor de Bioacumulación en la raíz de la planta (RAF) en <i>Echeveria elegans</i> ...	85
Tabla XXI. Factor de Bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF) en <i>Echeveria elegans</i>	87
Tabla XXII. Factor de Translocación (FT) en <i>Echeveria elegans</i>	89

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA	Página
Figura 1. Metodología de la investigación.	16
Figura 2. Tabla periódica de los elementos.....	23
Figura 3. Información taxonómica de <i>Echeveria elegans</i>	42
Figura 4. Diagrama del proceso de Espectrometría de Absorción Atómica en llama.....	47
Figura 5. Esquema de la técnica Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X	48
Figura 6. Esquema del equipo ICP-MS XSeries 2 dotado de celda de colisión	49
Figura 7. Diagrama de niveles de energía que representa las transiciones, donde a y b: representan excitación, c: ionización, d: ionización/ excitación, e: emisión de la especie iónica y f, g y h: emisiones ópticas.	49
Figura 8. Diagrama del ICP-OES.....	50
Figura 9. Mapa de Localización del Municipio de Temascalapa, Estado de México.....	52
Figura 10. Localización de sitio de muestreo de suelo	54
Figura 11. Población por edades Municipio de Temascalapa, Estado de México	57
Figura 12. Diagrama general de preparación de muestras para análisis por ICP-OES	64
Figura 13. Proceso de homogenización de suelo, técnica de cuarteo; a) conjunto de suelo muestreado, b) aplicación de técnica de cuarteo, c) suelo homogenizado.....	68
Figura 14. a) Cajón para colocación de macetas, b) Muestras colocadas en el cajón, c) Etiquetado de macetas, d) Proceso de cultivo (20 semanas).	69
Figura 15. a) Muestras lavadas y separadas, b) Proceso de pesado de parte aérea hidratada, c) Proceso de pesado de muestras de suelo.....	69
Figura 16. a) Secado de muestras al sol, b) Muestras de partes aéreas secas, c) Preparación y etiquetado de muestras secas.....	70
Figura 17. Media (n=12) (mg/kg) del contenido de Cr, Cs, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en <i>Echeveria elegans</i> , cultivadas en suelo procedente del municipio de Temascalapa, Estado de México.....	84

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICAS	Página
Gráfica 1. Porcentaje de producción de residuos sólidos y semisólidos de países desarrollados.	26
Gráfica 2. Fuentes de emisión de metales pesados en suelos.	27
Gráfica 3. Principales fuentes de procedencia de metales pesados en suelos.	27
Gráfica 4. Relación entre contenido de Zn, Mn, Fe, Cu, Cs, Pb, Ni y Cr, en el suelo con relación al contenido de metales absorbidos por la parte aérea de <i>Echeveria elegans</i> (mg/kg) (n= 16).	83
Gráfica 5. Relación entre contenido de Zn, Mn, Fe, Cu, Cs, Pb, Ni y Cr, en el suelo en relación con el contenido de metales absorbidos por la raíz de <i>Echeveria elegans</i> (mg/kg) (n= 16)	83
Gráfica6. Factor de Bioacumulación en la raíz de la <i>Echeveria elegans</i> (RAF).....	86
Gráfica 7. Factor de Bioconcentración en la parte aérea de <i>Echeveria elegans</i> (SAF).....	88
Gráfica 8. Factor de Translocación de metales en <i>Echeveria elegans</i> (TF).....	90

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍAS	Página
Fotografía 1. <i>Echeveria elegans</i>	43

Resumen

En este trabajo se evalúa el potencial de acumulación de metales en la planta suculenta *Echeveria elegans*. La *E. elegans* es una planta semidesértica, altamente adaptable y con un metabolismo complejo, que se utiliza extensamente en jardines, muros y techos verdes en los centros urbanos. En contexto, especímenes de *E. elegans* fueron cultivados en suelos provenientes del noroeste del Estado de México, en las coordenadas geográficas: 19.797124, -98.834162, correspondientes al municipio de Temascalapa, Méx. En este sitio, durante la década de 1980, se depositaron jales mineros que causaron focos de contaminación, años más tarde estos jales fueron retirados. Adicionalmente, muestras de suelo fueron enriquecidas con CsNO_3 para simular la retención de ^{137}Cs .

Para determinar la acumulación de metales en la *E. elegans*, se utilizó el Factor de Acumulación en la Raíz o RAF (Root Accumulation Factor, por sus siglas en inglés) y el Factor de Acumulación en los brotes o SAF (Shoot Accumulation Factor, por sus siglas en inglés). Por otro lado, la transferencia o movilidad de los metales de la raíz a los brotes se determinó con el Factor de Translocación o TF (Translocation Factor, por sus siglas en inglés).

La composición elemental del suelo utilizado como sustrato se realizó por Fluorescencia de rayos X (FRX) dispersiva en energía. Por su parte, el análisis cuantitativo de los metales en el suelo, raíces y brotes se realizó por espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo o ICP-OES.

Los resultados y el análisis de varianza efectuado al tamaño y peso de las plantas en contacto con el Cs mostraron que no existen daños aparentes en la planta que se vieran reflejados en el desarrollo de las raíces y brotes de la *E. elegans*. Asimismo, la determinación de metales mostró que el suelo contiene los siguientes elementos: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb}$, donde las concentraciones de Cr y Pb se encuentran por arriba de los valores considerados como típicos. El análisis cuantitativo en los brotes y raíces mostró que los metales que presentan un $\text{RAF} > 1$, y que se acumulan en las raíces fueron el: $\text{Cu} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cs}$, el Pb y Cs presentaron valores similares. Asimismo, los metales que presentaron un $\text{SAF} > 1$, fueron el $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cs}$; $\text{SAF} < 1$ estuvieron vinculados al $\text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr}$. Los resultados obtenidos de los factores de bioacumulación evidenciaron que la *E. elegans* acumula metales preferentemente en la raíz (proceso de exclusión). Por su parte el TF mostró que el Pb es el elemento que se transfiere eficazmente de la raíz a los brotes. Tal como quedó evidenciado en este estudio, la *E. elegans* puede bioacumular metales como el Zn, Ni, Cr, Pb y Cs lo que sugiere que tiene las características necesarias para ser utilizada como biomonitor de la contaminación ambiental y apta para técnicas de fitoestabilización.

Abstract

In this work, the potential for metal accumulation in the succulent plant *Echeviera elegans* is evaluated. The *E. elegans* is a highly adaptable and a complex metabolism semidesertic plant, which is widely used in urban green garden walls and roofs in urban centers. In context, *E. elegans* specimens were cultivated in soils from the northwest of the State of Mexico, at geographic coordinates: 19.797124, -98.834162, corresponding to the municipality of Temascalapa, Mex. At this site, during the 1980s, mining tailings were deposited that caused sources of contamination, years later, these tailings were removed. Additionally, soil samples were enriched with CsNO_3 to simulate retention of ^{137}Cs .

To determine the metal accumulation in *E. elegans*, the Root Accumulation Factor or RAF and the Shoot Accumulation Factor or SAF were used. On the other hand, the transfer or mobility of metals from the roots to the shoots was determined with the Translocation Factor or TF.

The elemental composition of the soil used as substrate was made by energy-dispersive X-ray fluorescence (XRF). For its part, the quantitative analysis of the metals in the soil, roots and shoots was carried out by inductive coupling plasma spectrometry or ICP-OES.

The results and the analysis of variance carried out on the size and weight of the plants in contact with Cs showed that there is no apparent damage to the plant that is reflected in the development of the roots and shoots of *E. elegans*. Likewise, the determination of metals showed that the soil contains the following elements: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb}$, where the concentrations of Cr and Pb are above the values considered as typical. The quantitative analysis in the shoots and roots showed that the metals that present an $\text{RAF} > 1$, and that accumulate in the roots were: $\text{Cu} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cs}$, the Pb and Cs presented similar values. Likewise, the metals that presented a $\text{SAF} > 1$ were $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cs}$; $\text{SAF} < 1$ were linked to $\text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr}$. The results obtained from the bioaccumulation factors showed that *E. elegans* accumulates metals preferentially in the root (exclusion process). For its part, TF showed that Pb is the element that is efficiently transferred from the root to the shoots. As evidenced in this study, *E. elagans* can bioaccumulate metals such as Zn, Ni, Cr, Pb and Cs, which suggests that it has the necessary characteristics to be used as a biomonitor of environmental contamination and suitable for phytostabilization techniques.

Introducción

Los avances tecnológicos, las grandes innovaciones, el aumento acelerado de la población, la industrialización, la demanda de energía, entre otras cosas, llevan a una época de gran consumismo, contaminación y deterioro ambiental condenando a todo ser vivo a una calidad de vida deficiente.

Es cierto que la contaminación no es cosa del siglo XXI, siempre ha existido en el planeta sin embargo con el surgimiento de la revolución industrial y la demanda poblacional por producciones en masa, así como el requerimiento de energía asociada a la demanda de productos, ha generado un incremento indiscriminado de contaminantes (Suárez T. & Molina E., 2014). El volumen y complejidad fisicoquímica de estos contaminantes hace que el entorno natural no pueda degradarlos eficientemente (Garzón, Rodríguez M., & Hernández G., 2017).

La acumulación de metales en el ambiente proviene de diferentes tipos de contaminantes y actividades, por ejemplo, accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias en el cual se involucran las fugas, los derrames e incendios, así como durante la disposición clandestina e incontrolada de residuos que contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos (SEMARNAT, 2013). Todo evento en el que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que generen contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), en México cada año se presentan un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos (INEEC, 2007).

Como consecuencia, las zonas contaminadas representan un foco rojo para la población, debido al alto riesgo de efectos negativos que pudieran producir en salud humana.

Según la OMS, las malas condiciones ambientales son responsables de 12,6 millones de muertes al año en el planeta, esto supone que alrededor del 23% de los fallecimientos en el mundo se producen por "vivir o trabajar en ambientes poco saludables". Los factores de riesgo ambientales como la contaminación del aire, el agua y el suelo, la exposición a los productos químicos, el cambio climático y la radiación ultravioleta "contribuyen a más de 100 enfermedades o traumatismos" (OMS, 2016).

Por tal motivo, se han generado estrategias enfocadas a la disminución de los elementos contaminantes en el medio natural, encaminadas a eliminar, revocar, aislar e inmovilizar contaminantes. Por ejemplo, utilizando organismos y plantas capaces de realizar estas actividades.

En este contexto, en el presente trabajo se evaluó el potencial de bioacumulación de metales pesados y ^{137}Cs (simulado por CsNO_3) en la planta suculenta *E. elegans*. Cabe señalar, que la determinación de la concentración de metales en los suelos y especímenes de *E. elegans* se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Forense Nuclear (LANAFONU) del ININ.

En la primera etapa del estudio, se detalla el esquema general de la investigación en el que se mencionará el planteamiento del problema, la justificación del tema, los objetivos que persigue el estudio, pregunta de investigación, metodología de trabajo y finalmente antecedentes de la utilización de plantas para la bioacumulación de metales.

A continuación, en la segunda etapa, se describen los conceptos y teorías relacionadas con el objeto de estudio, algunos métodos para la eliminación de metales en suelos, los fenómenos de retención de metales en plantas, así como la tolerancia de contaminantes en las mismas y las características generales de la planta *Echeveria elegans*.

Posteriormente, el marco legal, se encuentra en la tercera etapa, en el cual se señala la normativa ambiental aplicable en materia de: suelos contaminados por metales y gestión integral de los residuos.

En la cuarta etapa se describe el contexto del lugar de procedencia de las muestras de suelo utilizadas para el presente estudio, perteneciente al Municipio de Temascalapa, Estado de México.

Para la quinta etapa se detallan los métodos y materiales utilizados en la investigación.

Finalmente, en la última etapa se señalan los resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo de la elaboración de esta tesis.

CAPÍTULO 1

Esquema general de la investigación.

Este apartado está integrado por el planteamiento del problema, justificación, pregunta de investigación, los objetivos que persigue el estudio, metodología de trabajo y finalmente antecedentes de la bioacumulación de metales en plantas.

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente el mundo está experimentando acontecimientos que afectan negativamente a la población y a la naturaleza, es decir a todo ser vivo, debido a la inconsciente forma de administrar los recursos utilizados en cada proceso, así como la gestión de los residuos generados por tales actividades, mismas que al paso de los años ponen en jaque la vida de algunas especies, la buena calidad del suelo, agua y aire. Según la OMS cada año podría evitarse la muerte de 1,7 millones de menores de cinco años y de 4,9 millones de adultos de entre 50 y 75 años con una mejor gestión del medio ambiente (OMS, 2016). Es así como la contaminación ha afectado de una manera directa e indirecta, para impactar desfavorablemente parte de la vida de cada persona.

La contaminación a causa de metales es uno de los motivos que aqueja a la población y la biodiversidad mundial dado sus efectos dañinos. Gran cantidad de metales han existido en el planeta de manera natural, sin embargo, las actividades antropogénicas aumentan los índices de estos elementos en los recursos naturales y por ende se genera la contaminación de agua, suelo y atmosfera por metales, metales pesados y metales radiactivos; esto resulta principalmente del uso industrial, agrícola y minero (Prieto M., González R., Román G., & Prieto G., 2009).

A nivel mundial cada país cuenta con una responsabilidad socio ambiental, que si bien, no todo el daño efectuado por metales es generado a causa de actividades humanas, actualmente son el sustento de la vida moderna y los podemos encontrar prácticamente en cualquier lugar, es por ello por lo que se han establecido distintos mecanismos para enfrentar los problemas que pueden conllevar estos elementos (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016; Bernal, Clemente, Vázquez, & Walker, 2007).

Por consiguiente, México cuenta con normas vigentes relacionadas con las emisiones de metales. Sin embargo comenta (Covarrubias, 2016) que a pesar de la legislación existente sobre la disposición y manejo de residuos, es evidente que el problema persiste. Lo anterior, aunado al remanente de desechos históricos de la minería. En México, existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos, donde se ha detectado la acumulación de metales tóxicos en tejidos de peces y moluscos de consumo humano.

Los metales pueden incorporarse al cuerpo humano a través del agua potable, ya sea por ingestión o por absorción dérmica. También pueden ser ingeridos, inhalados o absorbidos dérmicamente a partir de las partículas de polvo re suspendidas que provienen de los suelos (Zafra M., Rodríguez C., & Torres C., 2013). En el aire, la contaminación atmosférica de partículas que contienen metales implica una amplia variedad de potenciales efectos adversos sobre la salud (Ávila P., y otros, 2019). La creciente necesidad de movilidad de la sociedad moderna ha convertido al tráfico de automóviles en una de las principales causas de la contaminación atmosférica de partículas por combustibles fósiles. Las emisiones de ciertas actividades industriales (metalurgia, canteras, cementeras, etc.) son también una fuente importante de estos contaminantes del aire, así como los incendios forestales. (Ferré H., Schuhmacher, Llobet, & Domingo, 2007).

Los daños a la salud por metales en si son muy diversos dependiendo de cada metal, pero en general se puede decir que hay lesión celular (Romero L., 2009). Todo metal que se encuentra en el ambiente, al entrar en contacto con el ser humano, afecta al organismo de manera diferente, debido a que cada uno de estos elementos se acumula en distintas zonas del cuerpo y por ello causan efectos tóxicos distintos (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016).

Actualmente los avances científicos permiten realizar investigaciones con el fin de dar solución a los problemas que ocasionan los metales, si bien es un arduo trabajo que implica estar en laboratorio y campo, el esfuerzo reflejado por los interesados ha generado grandes resultados y es de esta forma que surgen las diferentes técnicas de remoción de metales, muchas de las cuales hacen participe a factores biológicos puesto que funcionan de forma armónica con el medio ambiente. Tal es el caso de plantas con características resistentes, a lo cual se le llama "fitorremediación" (Kelly, Gaither, Baca S., & Cruickshank, 2000; Miretzky, Saralegui, & Fernández C, 2004; Cherian & Oliveira, 2005; Delgadillo L., González R., Prieto G., Villagómez I., & Acevedo S., 2011).

La *E. elegans* es una planta semidesértica de hoja perenne del orden de los Saxifragales y la familia Crassulaceae (Monroy A. & Vázquez B., 2014). Tiene raíces fibrosas y fusiformes adaptadas para sustratos rocosos, así como la capacidad de almacenar agua en sus hojas, por lo que comúnmente se le conoce como planta suculenta. Estas características físicas y gran adaptabilidad les han permitido ser utilizados de forma extensiva, tanto en jardines como en muros y azoteas verdes, en los centros urbanos más importantes del mundo (Tovar J., Figueroa C., & Sánchez, 2014; Reyes G., y otros, 2018). Una característica importante de la familia Crassulaceae es su mecanismo de uso de agua altamente eficiente, conocido como metabolismo del ácido crasuláceo (Nobel, 1983). Este metabolismo complejo ha fomentado la investigación fitoquímica que ha demostrado la presencia de metabolitos secundarios de importancia farmacológica (Kumar, y otros, 2016); así como el potencial para ser utilizados como recolectores de agua o como materia prima para desarrollar membranas de separación de aceite/agua (Godeau, Laugier, Orange, & Godeau, 2017). Considerando el uso extensivo de *E. elegans* en paredes y techos verdes, jardines urbanos, entre otros, así como su complejo sistema metabólico, en este trabajo se evaluó el potencial de bioacumulación de metales en plantas suculentas *E. elegans*. Adicionalmente se evaluó el potencial de acumulación de ^{137}Cs utilizando CsNO_3 .

1.2 Justificación

La contaminación en los suelos es una problemática que se suscita tanto en México, como en todo el mundo, debido a la industrialización y al uso de agentes químicos que pueden llegar a perjudicar el estado natural de los suelos, este tipo de contaminación ha ido aumentando con el paso del tiempo, es por ello que se hace necesario y urgente establecer estrategias para la remediación de este recurso natural que es de vital importancia en la vida diaria (Guevara Espinosa, Cruz Miranda, Rivera Morales, & Fuentes Ortiz , 2018).

Las prácticas de fitorremediación representan a un grupo de actividades actualmente competitivas para llevar a cabo en la remediación de suelos contaminados, apostando su buen funcionamiento a la capacidad con la que cuentan distintas especies naturales capaces de almacenar, procesar o degradar elementos tóxicos.; así como, a la armonía que representan para el medio ambiente y en muchos casos a su bajo costo.

Bajo esta lógica, en la presente tesis se pretende evaluar la capacidad de acumulación y/o retención de metales en la planta suculenta *Echeveria elegans*. Esta especie nativa de México es reconocida por soportar diferentes condiciones tanto climáticas como geográficas, así como por ser bastante adaptable y con requerimientos mínimos de cuidado (Reyes S., y otros, 2011); cualidades que motivan el objeto de estudio.

Por otro lado, es importante fomentar el uso de plantas nativas de México con este tipo de investigaciones, de modo que indirectamente se dé a conocer la utilidad y potencial biodiverso con el que cuenta el país a fin de crear conciencia de los beneficios que posee la flora.

1.3 Pregunta de investigación

¿La especie *Echeveria elegans* es capaz de bioacumular metales?

1.4 Hipótesis

La planta suculenta *E. elegans* dado sus características biológicas y capacidad de adaptación, tendrá la capacidad de bioacumular metales.

1.5 Objetivo general:

Evaluar la capacidad de acumulación y/o retención de metales en la especie vegetal (suculenta) *Echeveria elegans*.

1.6 Objetivos específicos:

- Obtener muestras de suelo de zonas de cultivo.
- Cultivar *Echeveria elegans* en las muestras de suelo obtenidas.
- Preparar muestras de raíz y planta de *Echeveria elegans* cultivadas en el suelo.
- Realizar el análisis cualitativo y cuantitativo de las muestras de suelo y *Echeveria elegans* por Fluorescencia de rayos X e ICP-OES.
- Determinar la acumulación de metales en la *Echeveria elegans*.

1.7 Diagrama metodológico conceptual

Para obtener los resultados deseados en la investigación se llevaron a cabo las siguientes actividades (ver figura 1):

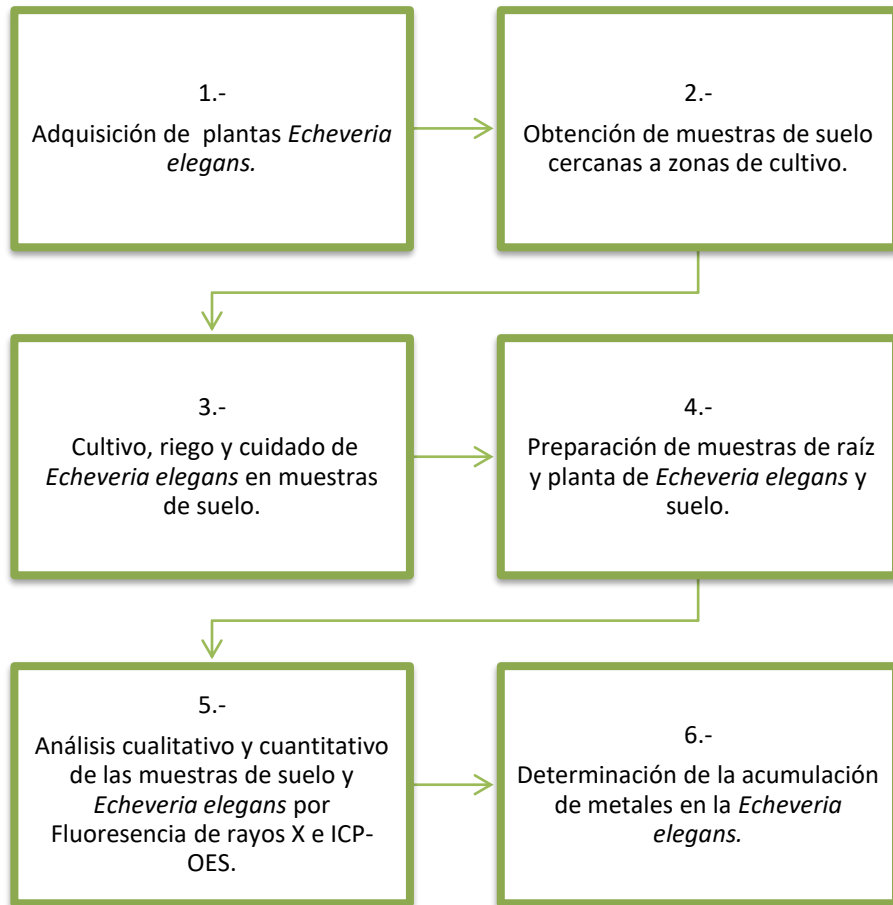


Figura 1. Metodología de la investigación.

Fuente: Elaboración propia

1.8 Antecedentes

La contaminación provocada por la industria tecnológica, actividades agropecuarias, minería y el uso excesivo de diversos fertilizantes químicos en el suelo, causa una rápida incorporación de metales en ríos, vegetales, animales y alimentos, los cuales alteran la sostenibilidad de la cadena trófica, provocando riesgos potenciales en la naturaleza y en la sociedad, debido a que originan serios problemas en la salud humana y animal (Waisberg, Joseph, Hale , & Beyersmann, 2013).

Estos hechos producen una creciente preocupación ambiental que ha dado como resultado un aumento en la investigación y el desarrollo de tecnologías sustentables, así como una normatividad cada vez más estricta, lo anterior, aunado a la introducción de tecnologías limpias en los procesos industriales que han logrado disminuir las descargas de sustancias contaminantes al medio ambiente.

Entre los procesos comúnmente utilizados para tratar efluentes con metales se encuentran: carbón activado, intercambio iónico, extracción con solventes, micro/nano/ultrafiltración, ósmosis inversa y flotación no convencional (Ortiz O. & Flores E., 2020; Ortiz Oliveros & Flores Espinosa, 2019; Ortiz O., Flores E., Ordoñez R., & Fernández V., 2017). Algunos de estos procesos pueden llegar a ser caros, implicando altos costos de operación y requerimientos energéticos, lo que ocasiona que los micro y pequeños empresarios no tengan acceso a ellos y generalmente opten por verter sus aguas a fosas sépticas comunes o incluso a pozos profundos y esto ocasiona una gran contaminación tanto del agua como del suelo (Cardona G., Cabañas V., & Zepeda P., 2013).

Debido a ello, se recurre a la fitorremediación que es una tecnología emergente, la cual pretende solventar problemas de contaminación mediante el uso de plantas, de manera económica y respetuosa con el medio ambiente, aunque todavía presenta algunas limitaciones, como es la identificación de variedades tolerantes y el conocimiento de los mecanismos que gobiernan la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas (Sánchez G. D., 2015).

Es de esta forma que, estudios realizados en los últimos años en México muestran la capacidad de distintas especies para acumular metales presentes en el suelo, así como el interés de diversas instituciones por la investigación de la fitorremediación en suelos; de este modo, se señalan algunos ejemplos en la siguiente tabla (Ver tabla I).

Tabla I. Proyectos de investigación y remediación de suelos en México

Línea de investigación y proyectos en desarrollo	Contaminante	Medio	Institución	Estado	Año
Bioacumulación de arsénico en las etapas de desarrollo de la cebada maltera (Prieto G., Prieto M., Callejas H., Román G., & Méndez M., 2010).	Arsénico	Suelo	UAEH	Pachuca, Hidalgo	2010
Caracterización química y fitorremediación de los jales mineros de El Fraile, de Taxco de Alarcón Gro México (Santiago D., 2011).	Metales pesados	Suelo	UAGro	Acapulco, Guerrero	2011
Bioacumulación de metales pesados en halófitas dominantes de maguey blanco, Valle del Mezquital, Ixmiquilpan, Hidalgo (Guerra C., 2014).	Metales pesados	Suelo	UNAM	México, D.F.	2014
Estudio de absorción, acumulación y potencial para la remediación de suelo contaminado por níquel usando <i>Ambrosia ambrosioides</i> (Contreras P., Valencia C., De la Fuente S., Linaje T., & Trejo C., 2016).	Níquel	Suelo	UAdeC	Torreón, Coahuila	2016
Efecto de la adición de ácidos orgánicos sobre la bioacumulación de Plomo, Talio y Vanadio en <i>Chrysopogon zizanioides</i> creciendo sobre suelos contaminados de un relleno sanitario (De la Cruz L., Ramos A., & López M., 2018).	Pb, Tl y V	Suelo	UJAT	Villa Hermosa, Tabasco	2018
Evaluación in vitro de la susceptibilidad a metales pesados en plantas de zonas áridas (Perales A., 2019).	Metales pesados	Suelo	UAA	Aguascalientes	2019

Hongos macroscópicos como bioacumuladores de metales pesados (De Lucio F., Otazo S., Romero B., & Gaytán O., 2020).	Metales pesados	Suelo	UAEH	Pachuca, Hidalgo	2020
---	-----------------	-------	------	------------------	------

Fuente: Elaboración propia con base en (Núñez L., Meas V., Ortega B., & J.O., 2004; Prieto G., Prieto M., Callejas H., Román G., & Méndez M., 2010; Santiago D., 2011; Guerra C., 2014; Contreras P., Valencia C., De la Fuente S., Linaje T., & Trejo C., 2016; De la Cruz L., Ramos A., & López M., 2018; Perales A., 2019; De Lucio F., Otazo S., Romero B., & Gaytán O., 2020).

Gracias a este tipo de investigaciones, se tienen identificadas alrededor de 415 especies de plantas hiperacumuladoras, distribuidas en 45 familias botánicas con capacidad para acumular selectivamente alguna sustancia. Los hiperacumuladores son especies capaces de acumular metales a niveles de 100 veces más que aquellos típicamente medidos en retoños de plantas no acumuladoras comunes (Marrero C., Amores S., & Coto P., 2012).

Por otra parte, en la Tabla II. se señalan algunas especies de plantas que han sido utilizadas con éxito en técnicas de fitorremediación.

Tabla II. Plantas utilizadas en fitorremediación.

Planta	Papel en fitorremediación
<i>Agropyron cristatum</i>	Remediación de compuestos orgánicos como PCP (fenilciclohexilpiperidina) y PAH (Polihidroxicanoatos)
<i>Alyssum spp.</i>	Acumula níquel
<i>Amaranthus retroflexus</i>	Acumula ¹³⁷ Cesio (Cesio)
<i>Armoracia rusticata</i>	Cultivos de pelos radiculares retiran metales pesados
<i>Armeria marítima</i>	Acumula plomo
<i>Asthenatherum forsskalii</i>	Remediación de hidrocarburos de petróleo
<i>Altriplex prostrata</i>	Retira sal del suelo
<i>Azolla pinnata</i>	Acumula plomo, cobre, cadmio y hierro
<i>Brassica canola</i>	Remedia suelos contaminados con ¹³⁷ Cs
<i>Brassica juncea</i>	Hiperacumuladora de metales
<i>Cannabis sativa</i>	Hiperacumuladora de metales
<i>Cardamonopsis hallerii</i>	Hiperacumuladora de metales
<i>Ceratophyllum demersum</i>	Acumuladora de metales. Retira TNT (trinitro tolueno)
<i>Cyperus conglomeratus</i>	Remediación de hidrocarburos de petróleo
<i>Datura innoxia</i>	Acumula bario

<u><i>Eucalyptus spp.</i></u>	Retira sodio y arsénico
<u><i>Eichornia crassipes</i></u>	Acumula plomo, cobre, cadmio y hierro
<u><i>Helianthus annuus</i></u>	Acumula plomo y uranio Retira ¹³⁷ Cesio y ⁹⁰ Sr (Estroncio) en reactores hidropónicos
<u><i>Hydrocotyle umbellata</i></u>	Acumula plomo, cobre, cadmio y hierro
<u><i>Salix sp</i></u>	Fitoextracción de metales pesados, tratamiento de aguas residuales y de escorrentía
<u><i>Populus trichocarpa x P. deltoides</i></u>	Eliminación de TCE, TCA (tricloroetano) y CT (tetracloruro de carbono)
<u><i>Myriophyllum spicatum</i></u>	Degrada TNT
<u><i>Phaseolus acutifolius</i></u>	Acumula ¹³⁷ Cesio
<u><i>Phragmites communis</i></u>	Tratamiento de contaminantes orgánicos en aguas residuales
<u><i>Potamogeton nodus</i></u>	Elimina TNT
<u><i>Populus deltoides</i></u>	Agua freática contaminada con TCE (tricloro etileno)
<u><i>Populus charkowiiensis x P. incrassata</i></u>	Degradación de TCE
<u><i>Lemna minor</i></u>	Acumula plomo, cobre, cadmio y hierro
<u><i>Paulownia sp.</i></u>	Disminuye el N. Posee altos niveles de absorción
<u><i>Sagittaria latifolia</i></u>	Elimina TNT
<u><i>Salicornia</i></u>	Elimina sal del suelo
<u><i>Kochia scoparia</i></u>	Retira ¹³⁷ Cesio y otros radionúclidos
<u><i>Solanum nigrum</i></u>	Cultivos de células pilosas detoxifican PCBs (Bifenilos policlorados)
<u><i>Spartina alternifolia</i></u>	Elimina sal
<u><i>Spergularia</i></u>	Elimina sal del suelo
<u><i>Stipaegrrostis plumosa</i></u>	Remediación de hidrocarburos del petróleo
<u><i>Tamarisk</i></u>	Elimina sodio y arsénico
<u><i>Typha spp.</i></u>	Volatilización de selenio
<u><i>Thlaspi spp.</i></u>	Acumuladora de zinc, cadmio y plomo
<u><i>Vicia faba</i></u>	Remediación de hidrocarburos del petróleo
<u><i>Yucca spp.</i></u>	Absorción y degradación TNT y RDX (explosivos)

Fuente: (Peña S., Madera P., Sánchez, & Medina V., 2013).

Como se puede observar, las investigaciones en cuanto a plantas capaces de acumular metales aún requieren trabajo, por lo cual es necesario estudiar otras especies, como las del género *Echeveria*.

CAPÍTULO 2

Marco conceptual

En esta fase se abordan los conceptos relacionadas con el objeto de estudio, algunos métodos para la eliminación de metales en suelos, los fenómenos de retención de metales en plantas, así como la tolerancia de contaminantes en las mismas y las características generales de la planta *Echeveria elegans*.

2.1 Contaminación del suelo

El suelo es uno de los sistemas más importantes con los que cuenta el planeta ya que es en éste en donde se llevan a cabo procesos como retención de carbono, regulación de clima, producción de alimentos y energía, etc. (Burbuano O., 2016), además de que funge como hábitat de diversas especies; debido a esto, su preservación y cuidado es indispensable para la vida.

Un suelo contaminado es considerado aquel cuyas características físicas, químicas y biológicas han sido alteradas negativamente en concentraciones que ha superado su capacidad de amortiguación y como consecuencia, pasa de actuar como un sistema protector a ser la causa de problemas (Macías G., 1993).

Por su origen la contaminación del suelo puede ser geogénico o antropogénico. Los primeros pueden proceder de la propia roca madre en la que se formó el suelo, de la actividad volcánica o del lixiviado de mineralizaciones. Por el contrario, los antropogénicos se producen por los residuos peligrosos derivados de actividades industriales, agrícolas, mineras, etc. y de los residuos sólidos urbanos. (Galán H. & Romero B., 2008)

2.1.1. Contaminación del suelo por metales

Una de las principales formas de contaminación que acechan al suelo es la producida por metales, los cuales dependiendo de las concentraciones en que se presenten, alteran la composición del suelo y su comportamiento con los organismos que habitan en él (Galán H. & Romero B., 2008). Esta situación se presenta debido principalmente a actividades antropogénicas, en las cuales no se tienen una adecuada disposición de residuos en el ambiente (Bernache P. , 2012).

La contaminación de suelo por metales se entiende como la introducción ya sea natural o antropogénica de un metal que no pertenece a un determinado sitio o bien, al aumento de sus niveles en donde ya se encuentra, de manera que se vea alterado, de forma que causan daños estructurales y provocan un desequilibrio ecológico en el sitio (Galán H. & Romero B., 2008). Esto genera afectaciones en los distintos tipos de vida que habitan en el lugar.

El suelo es un medio estático donde los contaminantes pueden permanecer durante mucho tiempo, esta permanencia a largo plazo es especialmente grave en el caso de contaminantes inorgánicos como los metales pesados que no pueden ser degradados (Becerril, Barrutia, García, Hernández, & Olano, 2007; Azpilicueta, Peña, & Gallego, 2010; Martí, y otros, 2011). El pH del suelo controla el comportamiento de los metales: 1) Los cationes son más móviles cuando el pH de la solución del medio es ácido pudiendo pasar a las cadenas tróficas, bien como tóxicos o en cantidades que producen deficiencia; 2) Los pH básicos producen el efecto inverso, quedándose inmovilizados en el medio. El cambio iónico es otro factor determinante en la dinámica de los metales, en el que intervienen factores como la naturaleza del cambiador y la del ion, la concentración, etc. (Vega, 2017).

1H																	2He																														
3Li	4Be											5B	6C	7N	8O	9F	10Ne																														
11Na	12Mg											13Al	14Si	15P	16S	17Cl	18Ar																														
19K	20Ca	21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	36Kr																														
37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe																														
55Cs	56Ba	57-71	72Hf	73Ta	74W	75Re	76Os	77Ir	78Pt	79Au	80Hg	81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Rn																														
87Fr	88Ra	89-103	104Db	105Jl	106Rf	107Bh	108Hn	109Mt	110	111																																					
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>57La</td> <td>58Ce</td> <td>59Pr</td> <td>60Nd</td> <td>61Pm</td> <td>62Sm</td> <td>63Eu</td> <td>64Gd</td> <td>65Tb</td> <td>66Dy</td> <td>67Ho</td> <td>68Er</td> <td>69Tm</td> <td>70Yb</td> <td>71Lu</td> </tr> <tr> <td>89Ac</td> <td>90Th</td> <td>91Pa</td> <td>92U</td> <td>93Np</td> <td>94Pu</td> <td>95Am</td> <td>96Cm</td> <td>97Bk</td> <td>98Cf</td> <td>99Es</td> <td>100Fm</td> <td>101Md</td> <td>102No</td> <td>103Lr</td> </tr> </tbody> </table>																		57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb	71Lu	89Ac	90Th	91Pa	92U	93Np	94Pu	95Am	96Cm	97Bk	98Cf	99Es	100Fm	101Md	102No	103Lr
57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb	71Lu																																	
89Ac	90Th	91Pa	92U	93Np	94Pu	95Am	96Cm	97Bk	98Cf	99Es	100Fm	101Md	102No	103Lr																																	
Elementos tóxicos			Elementos mayoritarios				Elementos minoritarios				Elementos traza			Elementos traza esenciales			gases nobles																														

Figura 2. Tabla periódica de los elementos.

Fuente: (Huertos & Baena, 2008).

La tabla periódica (Figura 2) incluye unos 70 elementos metálicos, y de ellos 59 pueden ser considerados “metales pesados”, que son aquellos con peso atómico mayor que el del hierro (55,85 g/mol). Con esta precisión se excluirían metales con pesos atómicos menores que el del Fe y que con frecuencia pueden ser metales contaminantes, como el V (50,95), Mn (54,44), Cr (52,01) y a otros que realmente no son metales como As, F y P. Por ello, resulta mejor hablar de contaminación por “elementos traza”, si bien hay que reconocer que la mayoría de los contaminantes inorgánicos son “metales pesados”. A veces, la contaminación se puede producir también por altas concentraciones de elementos mayoritarios (Na, Fe, Al) (Huertos & Baena, 2008).

Una de las características principales que hace a un elemento catalogarse como tóxico es la cantidad en la que se encuentra en un determinado sitio u organismo, dependiendo de cada metal, si se presenta en cantidades relativamente bajas, no genera afectaciones y por lo tanto se podría considerar que no hay una amenaza por su exposición (Nordberg, 2012). Sin embargo, al aumentar las cantidades de presencia y la duración, el grado de deterioro en donde se encuentre incrementará, presentando daños al medio de exposición.

En general se considera, que los metales son perjudiciales, pero muchos resultan esenciales en la dieta y en algunos casos, su deficiencia o exceso puede conducir a problemas de salud (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016). Debido a ello, es importante la evaluación del grado en que los metales se encuentran en un lugar u organismo ya que, es así como se establezcan criterios y acciones para su exposición con recursos vitales a modo de no propagar estos elementos a cuerpos que no lo necesitan.

Específicamente, la contaminación por metales pesados está afectando drásticamente la seguridad alimentaria y salud pública, se han encontrado metales en diferentes concentraciones en peces, carnes y leche resultado de la bioacumulación y movilidad desde el ambiente a las fuentes hídricas. A nivel global, se han reportado casos que dan cuenta de las afecciones en la salud por causa del consumo de alimentos contaminados por metales pesados. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y algunas autoridades

ambientales, han establecido niveles de riesgo en función de la concentración de metales en aguas de consumo humano y alimentos. (Reyes, Vergara, Torres, Díaz, & González, 2016). Actividades como el establecimiento de límites máximos permisibles de emisiones de metales a la atmosfera, ríos y suelos, principalmente por parte del sector industrial, minero y agrícola, favorece la salud del medio ambiente, que aunado a ello beneficia los estándares de calidad en salud humana.

Actividades como la industria y la minería aportan numerosas sustancias minerales y orgánicas al medio. La composición de estos efluentes y residuos es muy variable, dependiendo del origen de cada uno de ellos. Los residuos sólidos y líquidos pueden contaminar por contener metales, hidrocarburos e innumerables sustancias orgánicas. Los efluentes gaseosos, suelen contener estas sustancias en suspensión en la masa de aire, lo que les permite trasladarse a grandes distancias (Fergusson, 1990; Alloway, 1995). Una de las muchas consecuencias ambientales derivadas de la generación de los residuos mencionados es la elevación del tenor de metales en los suelos (Adriano, 2001; Kalavrouziotis, Koukoulakis, Papanikolaou, & Sakellariou M., 2008). Precisamente, los suelos son uno de los mayores reservorios en los cuales se evidencia la contaminación ambiental (Alloway, 1995).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, ha definido como posibles elementos peligrosos al Ba, Cd, Cu, Pb, Mn, Ni, Zn, Vn, Sn, su peligrosidad es potencial y deben mantenerse bajo control (Marrero C., Amores S., & Coto P., 2012). Estos metales cuando rebasan los límites máximos permitidos provocan efectos negativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas en suelo (Trejo C., Pedroza S., & Reveles H., 2015), el término que se usa o se emplea es “polución de suelo” (Prieto M., González R., Román G., & Prieto G., 2009) En la Tabla III se presentan las características de algunos metales pesados.

Tabla III. Características principales de algunos metales pesados

Metal pesado	Densidad	Número atómico	Nivel típico en suelos (mg/kg)	Tóxico
<u>Pb</u>	11.3	82	20	Animales, plantas y humanos
<u>Cd</u>	8.7	48	0.35	Animales, plantas y humanos
<u>Cu</u>	8.9	29	30	Plantas
<u>Zn</u>	7.1	30	90	Plantas
<u>Cr</u>	7.2	24	40	Plantas y humanos
<u>Ni</u>	8.9	28	20	Animales, plantas y humanos

Fuente: (Mico, 2005), Tomado de (Rueda S., Rodríguez V., & Madriñán M., 2011).

Los principales metales contaminantes en México, considerando su toxicidad y abundancia son: mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb) y en algunos lugares el cromo (Cr) (Fernández B., Yarto R., & Castro D., 2004; Volke S. T, Velasco T., & De la Rosa P., 2005; Romero & Gutiérrez R., 2008). La contaminación por metales pesados en México es un problema que va en aumento debido a la actividad antrópica. Existen

reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos, donde se ha detectado la acumulación de metales tóxicos en tejidos de peces y moluscos de consumo humano (Ávila P., y otros, 2019; Cortuelo M. & Marqués G., 1999; Chang & Yen, 2006; Medina & Montano, 2014; Roca F., 2019). Reportes indican que en México podrían existir millones de toneladas de apilamientos de rocas molidas, producto de la minería dispersos en el territorio nacional, de los que todavía se desconocen sus condiciones y su potencial de afectación al ambiente (Romero & Gutiérrez R., 2008). Entre los sitios más afectados por las altas concentraciones de metales pesados en suelos se encuentran los estados de Zacatecas, Querétaro, Hidalgo y San Luis Potosí. (Covarrubias, 2016).

La salud humana es uno de los principales motores que lleva a la población a tomar medidas de acción para la reducción de metales contaminantes en los productos de consumo, así como en las emisiones a causa de las diferentes actividades antropogénicas. Anteriormente los lanzamientos de contaminantes al ambiente eran tomados a la ligera y no estaban normados por alguna ley. Según la FAO en el caso de México fue hasta 1971 que se publicó la primera ley de carácter ambiental en el país titulada “Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental” (FAO, n/d).

2.1.2 Fuentes de Contaminación por metales

Debido a la importancia que funge el suelo en actividades antropogénicas, es susceptible a la contaminación desde diversas fuentes en las cuales se ven inmersos los metales.

De acuerdo con ello, las diferentes fuentes de contaminación se pueden distinguir dependiendo su origen. En ocasiones, la propia naturaleza del material originario y alteración son los responsables de la contaminación; en este caso, se denomina contaminación endógena. Otras veces los aportes contaminantes son externos, frecuentemente como resultado de actividades antropogénicas, denominándose contaminación exógena. Siendo la primera significativamente menos importante que la segunda. Las principales fuentes de contaminación exógena proceden de los aportes indirectos a través del aire, que con el tiempo se depositan por vía seca o húmeda sobre el suelo, siendo la minería y la producción de energía las actividades industriales que contribuyen en mayor medida a este tipo de contaminación, junto con la incineración de plásticos, los residuos orgánicos y los combustibles fósiles (Ávila P., y otros, 2019). Otras causas que contribuyen a la contaminación del suelo por aporte directo son el uso inadecuado de fertilizantes minerales y productos fitosanitarios, el vertido de los residuos que se generan (estiércol, purines, residuos sólidos urbanos, lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales), y la utilización de aguas de calidad inadecuada para uso agrícola. Los vertidos industriales o la implantación de vertederos donde se acumulan distintos tipos de residuos son otras fuentes importantes de contaminación por metales (Roca F., 2019).

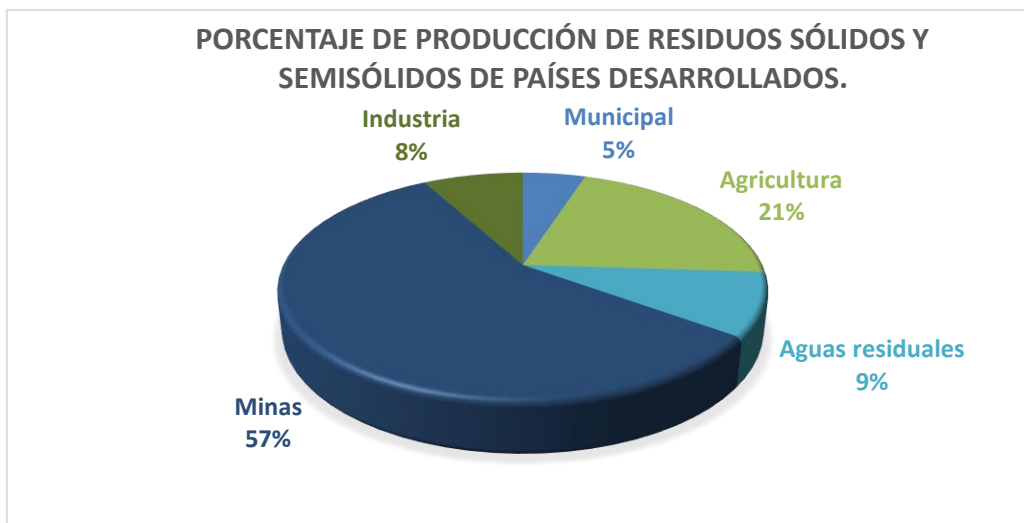
Este tipo de actividades contaminantes aportan metales a los suelos hasta que alcanza sus límites de depuración, causando frecuentemente efectos tóxicos para los organismos. Se estima, por ejemplo, que el aporte de metales como Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Mo, Zn y de metaloides es derivado de actividades

industriales y es aproximadamente de 10 a 20 veces mayor que la cantidad aportada por la meteorización natural de los materiales geológicos (Nriagu J. , 1990). Algunos autores, como (Nriagu & Pacyna, 1988) señalan, además, que la toxicidad de los metales pesados emitidos por año excede la de los contaminantes orgánicos y radioactivos. Al contrario de los contaminantes orgánicos, los metales no se biodegradan y generalmente se presentan en formas inmóviles, lo que supone un elevado tiempo de residencia en el ambiente.

Así como por actividades industriales, los metales pesados suelen llegar procedentes de pesticidas o tráfico rodado. Los más vertidos son Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Mo... y su grado de contaminación dependerá del estado en el que estén y las condiciones del medio (Vega, 2017).

Las fuentes de contaminación antrópica mencionadas anteriormente surgen como resultado del consumismo al que está sometido actualmente la población mundial, la demanda de grandes producciones en masa supone un peligro para el medio ambiente, debido al cantante requerimiento de insumos y al mal manejo de residuos (Rodríguez B., Martínez V., Martínez R., & Guzmán A. , 2011).

En la gráfica 1. se presentan las cantidades producidas (en porcentajes) de residuos sólidos y semisólidos en los países desarrollados

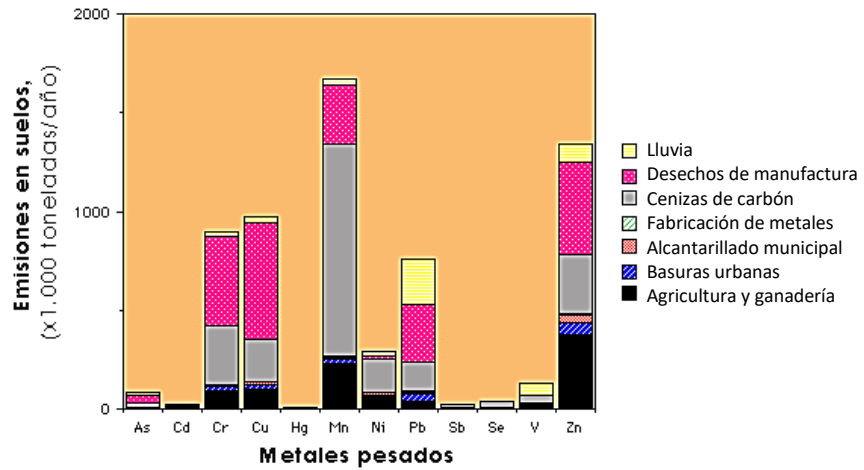


Gráfica 1. Porcentaje de producción de residuos sólidos y semisólidos de países desarrollados.

Fuente: (García & Dorronso, 2017).

A excepción de pH ácidos, los metales son poco móviles en suelos y tienden a acumularse en la parte superficial, en el horizonte biológicamente más activo, lo que hace que los metales estén fácilmente accesibles para los vegetales (García & Dorronso, 2017).

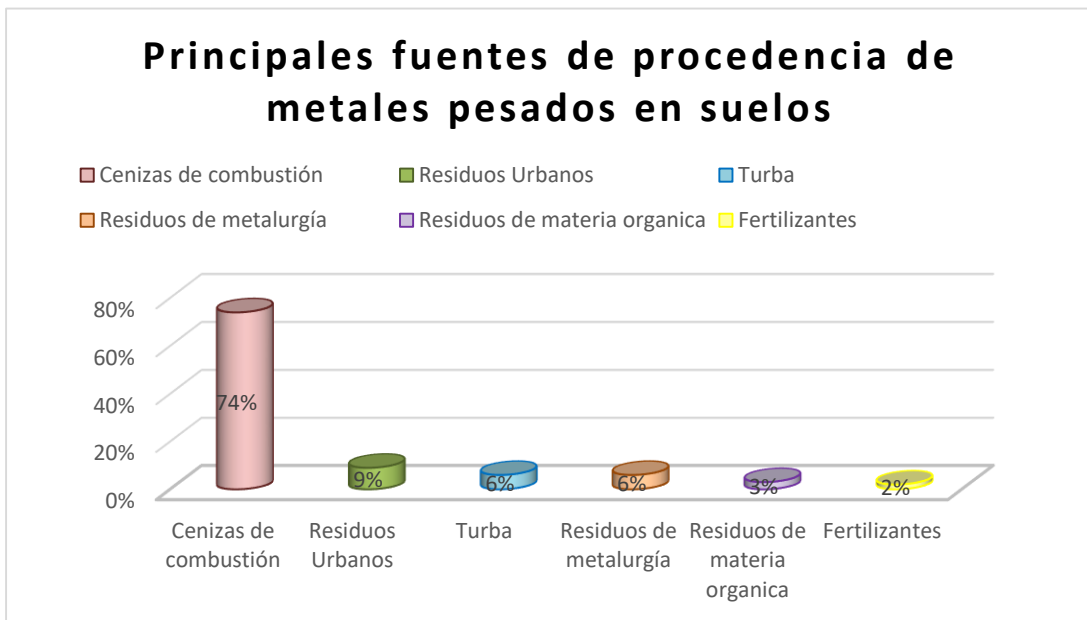
Tal como se muestra en la Gráfica 2. Fuentes de emisión de metales pesados en suelos, la contaminación de metales pesados en suelos tiene orígenes muy diversos:



Gráfica 2. Fuentes de emisión de metales pesados en suelos,

Fuente: (García & Dorronso, 2017).

Por su parte (Diez L., 2008) muestra otras fuentes de procedencia de metales (ver gráfica 3).



Gráfica 3. Principales fuentes de procedencia de metales pesados en suelos

Fuente: Elaboración propia con base en (Mas & Azcúe, 1993) tomado de (Diez L., 2008).

Como se puede observar en las gráficas anteriores, las fuentes de contaminación de suelos por metales pesados y radiactivos son emitidas principalmente por actividades antrópicas, facilitando la disponibilidad de estos contaminantes para plantas y animales, que los absorben como parte de sus procesos metabólicos y generando una de las problemáticas más severas en cuestiones alimenticias y de salud pública a nivel local y global: la incorporación de los metales en las cadenas tróficas.

2.2 Eliminación de metales del suelo

Debido a la problemática que representan los metales en el suelo, se desarrollan métodos para la recuperación de ambientes contaminados. Dichas técnicas se presentan de diversas formas, como son los métodos fisicoquímicos, biológicos, térmicos y mixtos (Ortiz B., Sanz G., Dorado V., & Villar F., 2007; FCH (Fundación Chile), 2019); sin embargo, la utilización de cada uno de ellos dependerá de las características especiales de cada sitio, del material con el que se disponga, presupuesto económico, entre otras cosas.

Las técnicas mencionadas anteriormente se pueden llevar a cabo de manera *in situ*, que quiere decir que se trabaja sobre los contaminantes en el lugar en el que se localizan, y *ex situ*, que necesitan dragado, excavación u otro método para mudar el suelo y darle un adecuado tratamiento ya sea en el mismo sitio (on-site) o en otra instalación que requiera transporte del suelo (off-site) (INECC, 2007). Dichos procesos se describen a continuación.

2.2.1 Tratamientos fisicoquímicos

Los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado, de modo que sean separados, contenidos o destruidos. Estos tratamientos suelen ser los más costosos debido a los análisis, maquinaria e infraestructura que se necesita para llevarlos a cabo (FCH (Fundación Chile), 2019).

Como se describe a continuación, la mayor parte de las técnicas fisicoquímicas se realizan de manera *in situ*, debido al equipamiento con el que se debe contar y las acciones a realizar; no obstante, también es posible realizarlos fuera del sitio.

2.2.1.1 Vitrificación

El proceso de vitrificación puede llevarse a cabo *in situ* o *ex situ*, y utiliza una corriente eléctrica para fundir los suelos contaminados con temperaturas que van de 1600 a 2000 °C. Es un proceso de solidificación/estabilización que estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los orgánicos. El producto de la vitrificación es un material cristalino químicamente estable que no produce lixiviados, en el cual quedan incorporados los compuestos inorgánicos. Durante el proceso, las altas

temperaturas, provocan la destrucción o remoción de los materiales orgánicos (EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 2001).

2.2.1.2 Electrocinética

La remediación electrocinética es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones). Implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad entre un electrodo positivo y uno negativo (Cauwenberghe, 1997; Paillat, 2000). Los iones metálicos, iones amonio y compuestos orgánicos con carga positiva, migran hacia el cátodo; mientras que los aniones como el cloruro, cianuro, fluoruro, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente se mueven hacia el ánodo (EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 2001).

2.2.1.3 Lavado de suelos

Es una técnica aplicada ex situ y basada en principios de acción fisicoquímicos, mediante los cuales, los contaminantes adsorbidos en la matriz del suelo se tratan en una solución acuosa. Se llevan a cabo procesos de disolución o suspensión en el agua de lavado, la cual se depura posteriormente y, con frecuencia, se recircula como agua de proceso (Melo, 2007).

2.2.1.4 Precipitación química

Consiste en la retención de metales pesados haciéndolos insolubles con la adición de lechada de cal, hidróxido sódico y otros compuestos que suben el pH (Cortuelo M. & Marqués G., 1999; Förstner & Wittmann, 1983).

2.2.1.5 Carbono activado

Los carbones activados presentan una considerable capacidad de adsorción de diversos compuestos, tanto en fase gaseosa como líquida, principalmente gracias a su estructura porosa altamente desarrollada que les confiere una gran superficie específica. Por esta razón, es interesante su aplicación en la remoción de iones metálicos pesados (Cortuelo M. & Marqués G., Los metales pesados en las aguas (I), su origen. Acción de agentes biológicos., 1999; Förstner & Wittmann, 1983).

2.2.1.6 Extracción de aire en el suelo

Se emplea para extraer los contaminantes adsorbidos en las partículas de suelos no saturados mediante su volatilización o evaporación a través de pozos de extracción verticales y/u horizontales que conducen el aire con los contaminantes a la superficie. Allí, pueden ser tratados en plantas especializadas (generalmente adsorbidos a carbono) o ser degradados en la atmósfera de forma natural. La volatilización de los contaminantes también se puede ver favorecida por prácticas como el arado, y el riego puede

contribuir a la solubilización y desorción de contaminantes que pueden ser arrastrados a la superficie por evaporación. (Grasso, 1993; Fischer, 1996; Khan, 2004).

2.2.1.7 Extracción con disolventes

Este tratamiento, aplicado ex situ, se basa en la extracción de los contaminantes mediante la mezcla en un tanque del suelo con un disolvente orgánico como acetona, hexano, metanol, éter di metílico y trietilamina. El disolvente orgánico arrastra los contaminantes y se separa del suelo por evaporación, y mediante la adición de nuevos disolventes o destilación los contaminantes se eliminan para que el disolvente orgánico empleado pueda ser reutilizado. A su vez, el suelo tratado se lava para arrastrar cualquier resto que pueda quedar del disolvente (Ortiz B., Sanz G., Dorado V., & Villar F., 2007).

2.2.1.8 Extracción fase libre

Se aplica en suelos contaminados con hidrocarburos en fase libre, situados por encima del nivel freático. Normalmente se extraen mediante pozos verticales a los que fluye el contaminante, a profundidades del nivel freático superiores a 80 m, y que pueden extraer sólo la fase libre, la fase libre y agua simultáneamente, o una mezcla de ambos. Los equipos que extraen únicamente fase libre utilizan generalmente bombas de skimmer, situadas a una profundidad que se corresponda con la interface agua-fase libre, con un filtro en su interior que facilita el paso selectivo de sustancias orgánicas en función de su densidad (Ortiz B., Sanz G., Dorado V., & Villar F., 2007).

2.2.1.9 Flushing

El flushing es un tratamiento in situ, que consiste en anegar los suelos contaminados con una solución que transporte los contaminantes a una zona determinada y localizada donde puedan ser eliminados. Así, los contaminantes son extraídos del suelo haciéndole pasar agua u otras soluciones acuosas mediante un sistema de inyección o infiltración. El agua subterránea y los fluidos extractantes se capturan y bombean a la superficie utilizando pozos de extracción, donde son tratados y, en ocasiones, reciclados (Son, 2003).

2.2.2. Tratamientos biológicos

Como su nombre lo indica, los tratamientos biológicos se basan en la utilización de organismos y microorganismos vivos para el tratamiento de elementos orgánicos e inorgánicos presentes en el suelo, los cuales generan contaminación en él (FCH (Fundación Chile), 2019). Estas técnicas además de significar un menor costo en su ejecución suponen un beneficio para el medio ambiente, ya que todo el proceso se realiza dependiendo las capacidades depuradoras con las que cuente el organismo que se va a utilizar; sin embargo, es por ello por lo que posiblemente se requiera un mayor tiempo de tratamiento.

2.2.2.1 Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica emergente que utiliza la capacidad de ciertas especies vegetales para sobrevivir en ambientes contaminados con metales pesados y sustancias orgánicas y a la vez extraer, acumular, inmovilizar o transformar estos contaminantes del suelo. Las plantas utilizadas en la fitorremediación presentan mecanismos constitutivos y adaptados para tolerar o acumular un elevado contenido de metales en su rizosfera y en sus tejidos. El éxito de este tratamiento está controlado por la selección de las especies vegetales adecuadas para recuperar un suelo determinado, así como de la cuidada selección de enmiendas (materia orgánica, agentes quelantes, cal, etc.) que permitan mejorar las propiedades del suelo y fomenten la supervivencia y el crecimiento de las plantas (Clemente , Walter, & Bernal, 2005).

Por otro lado, el incremento en identificación de especies remediadoras sirve para la realización de trabajos de remediación de suelos como se menciona en la Tabla 1; Puesto que, estas técnicas representan una estrategia de limpieza con ventajas para cualquier país, aunque son procesos que llevan un periodo de tiempo relativamente tardado (FCH (Fundación Chile), 2019), su rentabilidad hace ver a estas tecnologías muy llamativas en tanto que de manera indirecta se fomenta el cultivo o expansión de flora en sitios con suelos contaminados.

Las técnicas de fitorremediación se basan en el empleo de especies tolerantes a los contaminantes, es por eso, por lo que las plantas seleccionadas para dicha actividad deben cumplir con ciertos criterios y así poder ser aprobadas en la utilización de estos procesos; debido a que, la eficiencia de la remoción del contaminante va a depender especialmente de la planta que sea utilizada (Ortiz B., Sanz G., Dorado V., & Villar F., 2007; FCH (Fundación Chile), 2019).

Así mismo, las fitotecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición (Tabla IV.)

Tabla IV. Mecanismos de fitorremediación

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fitoestabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fitoextracción	Hiperacumulación	Inorgánicos
Fitovolatilización	Volatilización a través de las hojas	Orgánicos e inorgánicos
Fitoinmovilización	Acumulación en rizosfera	Orgánicos e inorgánicos
Fitodegradación	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes	Orgánicos
Rizofiltración	Uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

Fuente: (Ghosh & Singh, 2005).

Según (Thangavel & Subhram, 2004), dependiendo del tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido; las tecnologías de fitorremediación se pueden utilizar como medio de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización).

En este sentido, de acuerdo con (Acosta, 2016) hay tres características principales que describen a las plantas hiperacumuladoras (plantas que acumulan metales pesados sin sufrir efectos fitotóxicos):

- Fuerte aumento de la tasa de absorción de metales pesados.
- Raíces que realizan la translocación más rápidamente.
- Gran habilidad por detoxificar y acumular metales pesados en hojas.

Finalmente, comentan (Bernal, Clemente, Vázquez, & Walker, 2007) que cuando las plantas han absorbido los contaminantes acumulados, pueden ser cosechadas. Si los contaminantes químicos orgánicos se degradan en las moléculas como el dióxido de carbono, las plantas pueden no requerir ningún método especial de disposición. La incineración controlada es el método más común para disponer las plantas que han absorbido grandes cantidades de contaminantes. Este proceso produce cenizas, que se deben desechar en los sitios destinados para tal fin, ya que los metales que han absorbido estas plantas, durante el proceso de incineración se ven reflejados en las cenizas.

2.2.2.2 Biorremediación animal

En esta técnica se utilizan animales, como los crustáceos, que actúan como agentes descontaminantes, ya que pueden desarrollarse en medios con fuerte toxicidad y poseen en su interior microorganismos capaces de retener los metales pesados (Torres R., 2003).

2.2.2.3 Bioventilación

La bioventilación es una técnica de aplicación *in situ* relativamente nueva, que se centra en la recuperación de la zona no saturada. La base de esta tecnología consiste en hacer circular aire limpio a bajo caudal a través del suelo contaminado. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción, por movimiento forzado (extracción o inyección), con el fin de incrementar la concentración de oxígeno y estimular la actividad microbiológica y los procesos de biodegradación (INECC, 2007).

2.2.2.4 Biopilas

Este tratamiento se utiliza especialmente para biodegradar compuestos del petróleo. Para ello, los suelos contaminados con estos compuestos orgánicos son apilados en montones o pilas sucesivas y se estimula la actividad microbiana aerobia mediante aireación y adición de nutrientes, minerales y agua, obteniendo

la degradación a través de la respiración microbiana. Estas pilas se suelen cubrir para prevenir la escorrentía, la evaporación y la volatilización y para promover el calentamiento por el sol. El periodo de tratamiento de esta tecnología biológica es corto, puede durar desde unas pocas semanas a unos pocos meses y además de para compuestos del petróleo, también se puede utilizar para compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas (FRTR, 1999; Mohn W., Radziminski, Fortin M., & Reimer, 2001; Li, 2004; Plaza, 2005).

2.2.2.5 Lodos biológicos

Es otro tratamiento de biodegradación en el que el suelo contaminado es excavado, tamizado para eliminar los elementos gruesos y mezclado con agua y otros aditivos en un biorreactor controlado. La mezcla del lodo resultante mantiene a los sólidos en suspensión y a los microorganismos biodegradadores en contacto con los contaminantes. En estos biorreactores se controlan parámetros que pueden limitar el crecimiento microbiano en la naturaleza como la disponibilidad de substratos, nutrientes y oxígeno, la temperatura, el pH y la humedad. Asimismo, el proceso de mezcla facilita la homogeneidad del material contaminado para evitar la concentración de los contaminantes en bolsas. Además de procesos de biodegradación, también pueden actuar mecanismos de adsorción/desorción, disolución/precipitación, intercambio iónico, complejación, transferencia de oxígeno, volatilización y reducción del tamaño de partícula (Christodoulatos & Koutsospyros, 1998)

2.2.2.6 Compostaje

El compostaje es un proceso biológico que consiste nuevamente en estimular la actividad biodegradadora, aerobia y anaerobia, de microorganismos indígenas bajo condiciones termofílicas (12-18 °C) que permita transformar compuestos orgánicos tóxicos en sustancias inocuas (USEPA, 1996). Para ello, los suelos contaminados son excavados y mezclados con residuos animales y vegetales como abonos, estiércol, paja, trozos de madera, etc., que proporcionan una porosidad óptima y un balance adecuado de carbono y nitrógeno. El calor generado metabólicamente con este proceso es atrapado dentro de la matriz del compost, lo que da lugar a la elevación de la temperatura característica del compostaje (Williams, Ziegenfuss, & Sisk, 1992).

2.2.2.7 Landfarming

Se trata de un tratamiento de recuperación biológica practicado en todo el mundo desde hace un siglo, que reduce la concentración de hidrocarburos del petróleo de peso mediano que no pueden ser eliminados por evaporación pero que sí pueden ser degradados por microorganismos. Generalmente, el suelo se excava y se extiende en una delgada capa (no más de 1.5 m) sobre la superficie del lugar donde se está realizando la recuperación y se estimula la actividad microbiana aeróbica mediante aireación y/o adición de nutrientes, minerales y agua (USEPA, 1998; Hejazi, 2002).

El desarrollo tecnológico en los últimos años ha llevado a un incremento de métodos y técnicas en cuanto a reparación de ambientes contaminados por metales tóxicos, basándose en el uso de organismos vivos, principalmente en ambientes dañados por actividad antrópica. Es así como las técnicas de biorremediación se presentan como un método ventajoso bastante utilizado para el aprovechamiento de plantas en la remoción tanto de metales, presentes en el suelo, agua y atmosfera. La utilización estas técnicas y métodos pueden ser aplicadas con mayor facilidad económica en cuanto a los tratamientos convencionales lo que significa un mayor alcance para tratar territorios contaminados.

2.2.3 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos representan una mayor rapidez de resultados de limpieza, sin embargo, por la utilización de energía que requieren, la mano de obra y el equipo suelen ser más caros. También presentan técnicas *in situ* y *ex situ*, las cuales se basan en separar, inmovilizar y destruir los contaminantes.

2.2.3.1 Incineración

Se trata de un tratamiento *ex situ* en el que los contaminantes son destruidos mediante el suministro de calor. El suelo se somete a elevadas temperaturas, alrededor de los 1000 °C, con el fin de oxidar y volatilizar los compuestos orgánicos contaminantes. Este proceso genera gases y cenizas residuales, orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos y sulfurados, compuestos oxigenados, compuestos aromáticos nitrogenados, etc.) e inorgánicos (metales pesados volátiles, CO₂, NO_x, SO_x) (Ross et al., 2002) que deben ser depurados. Está indicado para recuperar suelos contaminados con explosivos y residuos peligrosos, particularmente hidrocarburos clorados, PCBs y dioxinas (Silcox, Larsen, Owens, & Choroszy-Marshall, 1995).

2.2.3.2 Desorción térmica

Se trata de otro tratamiento térmico *ex situ* en el que se somete al suelo a unas temperaturas más bajas (90-320 °C, desorción térmica de baja temperatura; 320-560 °C, desorción térmica de alta temperatura) para conseguir la desorción en vez de la destrucción de los contaminantes que persigue la incineración (Ortiz B., Sanz G., Dorado V., & Villar F., 2007). Las temperaturas empleadas están elegidas para volatilizar contaminantes orgánicos, pero no para oxidarlos. En concreto, durante la desorción térmica de baja temperatura, el suelo retiene sus propiedades físicas y sus componentes orgánicos, lo que hace posible que pueda conservar su capacidad para soportar futura actividad biológica. Mediante la desorción térmica de baja temperatura se pueden recuperar suelos contaminados con compuestos orgánicos volátiles no halogenados, combustibles y en algunos casos compuestos orgánicos semivolátiles. Mediante la desorción térmica de alta temperatura se pueden tratar las sustancias anteriores además de hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCBs, pesticidas (Piña, Merino, Errazu, & Bucalá, 2002; Risoul, Renauld, Trouvé, & Gilot, 2002; Araruna, y otros, 2004) y metales pesados volátiles como el Hg (Chang & Yen, 2006).

A continuación, se muestra en la tabla V. los tipos de contaminantes tratados en cada uno de los procesos expuestos anteriormente.

Tabla V. Tipos de contaminantes tratados en la recuperación de suelos.

Tratamiento	Tipo de contaminantes tratados
Extracción	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, combustibles, metales, PCBs, hidrocarburos aromáticos policíclicos, disolventes halogenados y clorados, etc.
Lavado	Compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos derivados del petróleo, cianuros y metales
Flushing	Todo tipo de contaminantes, especialmente inorgánicos
Electrocínética	Especialmente metales solubles o complejados
Adición de enmiendas	Fundamentalmente sales y metales
Barreras permeables activas	Contaminantes orgánicos biodegradables, metales, nitratos, sulfatos
Inyección de aire comprimido	Solventes clorados, sustancias volátiles y semivolátiles ligeras como xileno, benceno, tolueno, tetracloruro de carbono, tricloroetano, cloruro de metilo, etc.
Pozos de recirculación	Tricloroetileno, derivados del petróleo, compuestos orgánicos no halogenados, semivolátiles, pesticidas y compuestos inorgánicos
Oxidación ultravioleta	Amplio espectro de contaminantes orgánicos y explosivos (hidrocarburos del petróleo, hidrocarburos clorados, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, alcoholes, cetonas, aldehídos, fenoles, éteres, pesticidas, dioxinas, PCBs, TNT, RDX y HMX)
Biodegradación asistida	Amplio espectro de contaminantes orgánicos biodegradables
Biotransformación de metales	Metales
Fitorrecuperación	Metales, pesticidas, solventes, explosivos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, crudo
Bioventing	Hidrocarburos del petróleo de peso mediano, explosivos (DDT, DNT)
Landfarming	Fundamentalmente hidrocarburos del petróleo de peso mediano
Biopilas	Derivados del petróleo, compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas
Compostaje	Explosivos (TNT, RDX y HMX), hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos del petróleo, clorofenoles y pesticidas
Lodos biológicos	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados, explosivos, hidrocarburos del petróleo, petroquímicos, solventes y pesticidas
Incineración	Explosivos, hidrocarburos clorados, PCBs y dioxinas
Desorción térmica	Compuestos orgánicos volátiles no halogenados, combustibles, algunos compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCBs, pesticidas y metales volátiles

Extracción multifase	Compuestos orgánicos volátiles, en disolución y compuestos orgánicos no acuosos en fase libre
Atenuación natural	Compuestos BTEX (benceno, tolueno, etil benceno y xileno), hidrocarburos clorados, algunos pesticidas y compuestos inorgánicos
Barreras horizontales	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras verticales	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras de suelo seco	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Sellado profundo	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras hidráulicas	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Estabilización fisicoquímica	Fundamentalmente compuestos inorgánicos como metales pesados, limitada eficacia para contaminantes orgánicos y pesticidas
Inyección de solidificantes	Fundamentalmente compuestos inorgánicos, eficacia mucho menor para compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas
Vitrificación	Contaminantes inorgánicos (principalmente Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros) y algunos orgánicos

Fuente: Tornado de (Ortiz B., Sanz G., Dorado V., & Villar F., 2007).

Como se puede observar hay distintos procesos que se pueden llevar a cabo para descontaminar suelos; sin embargo, la presente investigación se centra en la evaluación de la bioacumulación de metales como fundamento inicial de la fitorremediación, técnica basada en el empleo de plantas para remediar suelos contaminados principalmente por metales.

2.3. Mecanismos de retención de metales en plantas

Actualmente el empleo de plantas y microorganismos en los procesos de retención de metales tiene un alto potencial para la remediación de suelos, por lo tanto, se muestra como un método alternativo en cuanto a las tecnologías convencionales.

Las plantas y los microorganismos (bacterias y hongos) del suelo pueden interactuar con los metales mediante mecanismos de extracción, estabilización, biosorción, bioacumulación, biomineralización y biotransformación (Lloyd & Macaskie, 2000). Dichos mecanismos se describen a continuación.

2.3.1 Biosorción

La biosorción es un proceso fisicoquímico para captación de metales, que incluye mecanismos tales como la adsorción, absorción, el intercambio iónico, la complejación y la precipitación, (Gadd, 2009). Los cuales se pueden llevar a cabo en biomasa viva o muerta.

El proceso de biosorción involucra una fase sólida (sorbente) y una fase líquida (solvente, que es normalmente el agua) que contiene las especies disueltas que van a ser sorbidas (sorbato, e. g. iones

metálicos). Debido a la gran afinidad del sorbente por las especies del sorbato, este último es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. Este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido (a una concentración final o en el equilibrio) (Ortíz O., Flores E., Ordoñez R., & Fernández V., 2014; Ordoñez R., Ortíz O., Fernández V., & Granados C., 2014; Ortíz O., Ordoñez R., & Fernández V., 2009). La afinidad del sorbente por el sorbato determina su distribución entre las fases sólida y líquida. La calidad del sorbente está dada por la cantidad del sorbato que puede atraer y retener en forma inmovilizada (Cañizares, 2000).

2.3.2 Bioacumulación

La bioacumulación se define como la cantidad total de un contaminante que es absorbida y retenida por los organismos que están en contacto con él, por lo tanto, es el resultado de la asimilación de estas sustancias de diferentes fuentes, ya sea agua, aire o sólidos (ej. respiración, alimentación); y los procesos de pérdida (ej. difusión pasiva, metabolismo, crecimiento, transferencia a la descendencia) (Newman, 2014). Para describir este proceso se utiliza el factor de bioacumulación, el cual consiste en la proporción del contaminante en el organismo con respecto a la concentración de este en sus fuentes potenciales, como su alimento o el medio al que están expuestos (Newman, 2014; Jorgensen, 2016; Galal & Shehata, 2015).

La bioacumulación es un proceso natural que tienden a tener todos los seres vivos el cual puede resultar maligno para la mayoría de ellos si lo que acumulan son elementos contaminantes, debido a que se pueden incorporar rápidamente en las cadenas tróficas, pasando los contaminantes de un organismo a otro afectando a más de uno, es aquí cuando se debe tener cuidado con la elección de plantas en procesos de bioacumulación para remediación de ecosistemas (Prieto M., González R., Román G., & Prieto G., 2009).

Existen diversos factores que intervienen en el proceso de bioacumulación, como la biología de la especie, la tasa de filtración, la tasa de absorción, el contenido lipídico y la capacidad de detoxificación, además de factores externos como el punto de muestreo de las fuentes contaminantes, la salinidad, cantidad de materia orgánica y la temperatura ambiental (León, Moreno, González, & Martínez, 2013).

Las plantas capaces de bioacumular grandes cantidades de elementos tóxicos en su organismo son aliadas beneficiosas para investigadores que se dedican a la remoción de contaminantes de determinados sitios, es por ello por lo que para los procesos de fitorremediación se emplean principalmente plantas previamente analizadas y catalogadas como acumuladoras, para evitar que mueran o sean dañadas (Peña S., Madera P., Sánchez, & Medina V., 2013).

2.3.3 Biotransformación

Los mecanismos de biotransformación se tratan básicamente de la modificación de un elemento tóxico en uno menos tóxico, por medio de un organismo vivo. Es cualquier alteración de la estructura atómica o molecular de una especie química, por parte de microorganismos. Este es un proceso que involucra un

cambio químico sobre el metal pesado, como por ejemplo en el estado de oxidación o metilación. Esta transformación biológica de los metales pesados que resultan tóxicos mediada por enzimas microbianas puede dar como resultado compuestos poco solubles en agua o bien compuestos volátiles (Vullo, 2003).

2.3.4 Biomineralización

La biomineralización, de cierta forma, es el mecanismo por el cual los seres vivos producen minerales (FCH (Fundación Chile), 2019).

Algunas plantas tienen la capacidad de precipitar minerales, principalmente oxalatos, carbonatos y silicatos. Se cree que estos tienen diferentes funciones metabólicas: regulación del metabolismo del calcio, proveer resistencia a la presencia de metales pesados o inmovilizarlos, funciones hormonales y como factores importantes en la captación de luz. Asimismo, se cree que la producción de minerales tiene funciones ecológicas, como parte de los ciclos biogeoquímicos (He, Veneklaas, Kuo, & Lambers, 2014).

Todos estos mecanismos muestran la eficiencia y eficacia de algunas plantas en su labor en los procesos involucradas como remediadoras de suelos y aunque aún hacen falta más investigaciones a fin de aumentar el catálogo de dichas especies para estas actividades, los beneficios que ya han manifestado son extraordinarios para la ciencia.

2.4. Mecanismo de tolerancia de las plantas a los metales

Las plantas acumuladoras de metales han creado una flexibilidad en su organismo en cuanto a metales, la cual está limitada por la admisión celular y por la resistencia que tienen las células al metal al entrar en ellas, puesto que generaron mecanismos de tolerancia para resistir y sobrevivir a su exposición (González M. & Zapata P., 2008).

La tolerancia de algunas plantas a elementos tóxicos se basa en la aplicación de mecanismos que involucran estrategias de exclusión, mineralización, reducción, solubilización, quelación, redistribución y acumulación; La exclusión es una acumulación de metales preferentemente en las raíces de la planta; La mineralización baja la biodisponibilidad de los metales, por lo que, no son absorbidos; en la solubilización la planta transforma al metal insoluble en soluble; La reducción se da cuando cambia un elemento altamente tóxico a menos tóxico; Una vez dentro del organismo, se realiza una quelación con los metales, formando un complejo muy estable que puede ser transferido y acumulado en las vacuolas de la planta, de esta manera, el metal se encuentra “secuestrado” y no está disponible para ejercer su toxicidad. (Núñez L., Meas V., Ortega B., & J.O., 2004).

No obstante, el papel de las plantas en la tolerancia no está claro y puede variar entre las especies de organismos vegetales y el tipo de metal, de acuerdo con los trabajos de (Schat, Llugany, Vooijs, Hartley W., & Bleeker, 2002; Ebss, Lau, Ahner, & Kochian, 2002).

El trabajo que realizan diversas plantas en sus procesos como fitorremediadoras es significativo, puesto que conlleva cualidades sobresalientes en cada especie, el encontrar estas especies en el medio natural convierte a estas técnicas bastante atractivas para remediación de suelos en la actualidad (Peña S., Madera P., Sánchez, & Medina V., 2013).

Las plantas poseen tres estrategias básicas como son la exclusión, la indicación y la acumulación para crecer en suelos contaminados. La exclusión previene la entrada de metales o mantienen baja y constante la concentración de estos en un amplio rango de concentraciones en el suelo, principalmente restringiendo la acumulación de los metales en las raíces. La segunda estrategia la llevan a cabo las plantas llamadas indicadoras, que acumulan los metales en sus tejidos aéreos y generalmente reflejan el nivel de metal en el suelo, la tercera estrategia es la de acumulación, que se basa en distribuir, translocar o enviar los metales a los diferentes órganos vegetativos o sus partes aéreas, en niveles que excedan varias veces el nivel presente en el suelo (Medina & Montano, 2014).

En la Tabla VI. se presenta y describen las fases del proceso o mecanismo de incorporación de los metales pesados en las plantas.

Tabla VI. Fases del proceso por el cual las plantas incorporan y acumulan metales pesados

Fase	Características
Fase I.	Implica el transporte de los metales pesados al interior de la planta y, después, al interior de la célula. La raíz constituye el tejido de entrada principal de los metales, los cuales llegan por difusión en el medio, mediante flujo masivo o por intercambio catiónico. La raíz posee cargas negativas en sus células, debido a la presencia de grupos carboxilo, que interaccionan con las positivas de los metales pesados, creando un equilibrio dinámico que facilita la entrada hacia el interior celular, ya sea por vía apoplástica o simplástica
Fase II.	Una vez dentro de la planta, las especies metálicas son secuestradas o acomplejadas mediante la unión a ligandos específicos. Entre los quelantes producidos por las plantas se encuentran los ácidos orgánicos (ácidos cítrico, oxálico y málico), algunos aminoácidos (histidina y cisteína) y dos clases de péptidos: fitoquelatinas y metaloteínas.

	<p>Las fitoquelatinas son ligandos de alta afinidad que tienen como sustrato al glutatión. Están constituidas básicamente por 3 aminoácidos: ácido glutámico, cisteína y glicina, unidos por enlaces peptídicos.</p> <p>Las metalotioneinas son polipéptidos de unos 70-75 aminoácidos con un alto contenido en cisteína, aminoácido capaz de formar complejos con cationes mediante el grupo sulfidrilo. Tienen una marcada afinidad por las formas iónicas de Zn, Cd, Hg y Cu.</p>
Fase III.	Involucra la compartimentalización y detoxificación, proceso por el cual, el complejo ligando-metal queda retenido en la vacuola

Fuente: Elaboración propia con base en: (Navarro A., Aguilar A., & López, 2007).

Las plantas se clasifican como hiperacumuladoras, si éstas son capaces de acumular y translocar altos niveles de contaminantes en raíces, tallos y hojas (Medina & Montano, 2014). Para ello se calcularán dos parámetros, el Factor de Bioacumulación y Translocación. Para que las plantas sean consideradas como hiperacumuladoras, debe cumplir con estas 3 características:

1.- Factor de Bioconcentración (BCF, Bioconcentration Factor): Este factor se utiliza para medir la capacidad de captación de un metal por una planta (raíz y parte aérea) con relación a su concentración en el suelo. Para las plantas el factor de bioacumulación, se utiliza como una medida de la eficiencia de acumulación de metales en biomasa, donde valores mayores a 1 indican que las especies son potencialmente hiperacumuladoras y aquellas especies exclusoras poseen un BCF menores a 1, cuanto más menor sea este valor, mayor es su capacidad de exclusión (Medina & Montano, 2014; Mentaberry, 2011). Existen dos factores de bioacumulación, los cuales son:

Factor de Bioacumulación en la raíz de la planta (RAF, Root Accumulation Factor): Se calcula como la relación entre la concentración de metales en la raíz de la planta respecto a la concentración de metales en el suelo (Medina & Montano, 2014).

$$RAF = \frac{\text{Concentración de metales en la raíz}}{\text{Concentración de metales en el suelo}}$$

Si $RAF > 1$, la planta es potencialmente hiperacumuladora

Si $RAF < 1$, la planta es exclusora.

Factor de Bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF, Shoot Accumulation Factor): Es la proporción del elemento contenido en la parte aérea de la planta con respecto al suelo (Medina & Montano, 2014).

$$SAF = \frac{\text{Concentración de metales en la parte aérea}}{\text{Concentración de metales en el suelo}}$$

Si SAF > 1, la planta es potencialmente hiperacumuladora

Si SAF < 1, la planta es exclusora.

2.- Factor de Translocación (FT, Translocation Factor): En la relación entre la concentración en el órgano de interés (tallo, hojas, flores, semillas o frutos) y la concentración en la raíz. Factores de translocación mayores a 1 sugieren gran capacidad para transportar metales desde las raíces hasta los vástagos, explicada en su mayor parte, por eficientes sistemas de transporte de metales y, probablemente, por secuestro de metales en las vacuolas de las hojas y en el apoplasto. Las plantas hiperacumuladoras se caracterizan por una relación concentración de metal parte aérea/Concentración de metal raíz, mayor a 1. En cambio, las plantas no acumuladoras tienen una más alta concentración de metal en raíces que en las hojas y tallo (Cubillos, 2011; Medina & Montano, 2014).

Un valor del factor de translocación mayor a 1 indica una eficiente translocación del metal en brotes, por lo que la planta puede usarse con fines de fitoextracción. Si, por el contrario, dicho valor es menor a 1, la translocación del metal es baja, por lo que éste es retenido principalmente por las raíces y puede usarse para fitoestabilización (Medina y Montano, 2014; Ocampo, 2016).

$$FT = \frac{\text{Concentración de metales en la parte aérea}}{\text{Concentración de metales en la raíz}}$$

Si TF > 1, significa que la planta traslada eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de hiperacumular metales en su parte aérea.

Si TF < 1, significa que la planta no traslada eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de fitoestabilizar metales en sus raíces.

3.- Concentración del metal en la parte aérea de la planta: En el caso de la concentración de los metales pesados, las plantas se consideran como hiperacumuladoras, si en su parte aérea tienen concentraciones superiores a : 100 mg/Kg para Cd, 1000 mg/Kg para Al, As, Co, Cu, Cr, Ni, Se, Pb, 10000 mg/Kg para Zn y Mn (Medina & Montano, 2014).

Para el caso de la fitoestabilización, la planta, para aplicar esta técnica en ella, debe cumplir con al menos uno de los requisitos mencionados a continuación:

- Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF), tiene que ser < 1
- Factor de Translocación (FT) < 1

Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) y/o Factor de Translocación (FT) menores a 1.

2.5 *Echeveria elegans*

México, gracias a sus múltiples climas y otras características biogeográficas, permiten la concentración y establecimiento de gran cantidad de especies animales y vegetales, por lo cual es considerado como un país catalogado a nivel mundial como megadiverso. Entre las múltiples especies y géneros alojados en el país, se encuentran las *Echeverias*.

El género *Echeveria*, perteneciente a la familia *Crassulaceae*, es un grupo exclusivo de América. México es el centro de mayor diversidad y endemismo de este grupo de plantas. Que está conformado por alrededor de 127 especies, de las cuales 83% se restringen exclusivamente al territorio mexicano (Reyes S., y otros, 2011).

Las *Echeverias* son un grupo de plantas suculentas que tienen gran variedad de ventajas en cuanto a otras plantas, como su resistencia a diferentes tipos de suelos y climas, así como la poca necesidad de cuidados, sin embargo, no le ha ido muy bien en los últimos años, con el incremento de la población humana y la creciente industrialización y sus efectos, se ven afectados sus hábitats poniendo a muchas de estas plantas en el catálogo de especies en peligro (Piña P., Valverde, & Reyes S., 2007).

Dentro de México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana de la Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres (NOM-059-ECOL-2001), la cual alberga 1023 especies vegetales de diversas familias botánicas que están catalogadas como: probablemente extinta en el medio silvestre, en peligro de extinción, amenazadas y sujetas a protección especial; en la Norma, en cuanto a la familia de *Crassulaceae*, se cuenta con 18 especies catalogadas y protegidas entre las que se destacan *Echeveria laui*, *Echeveria elegans* y *Echeveria setosa* (SEMARNAT, 2002)

2.5.1 Información Taxonómica de *Echeveria Elegans*

Las características taxonómicas de la especie *Echeveria elegans* se muestran a continuación. (ver figura 3.)

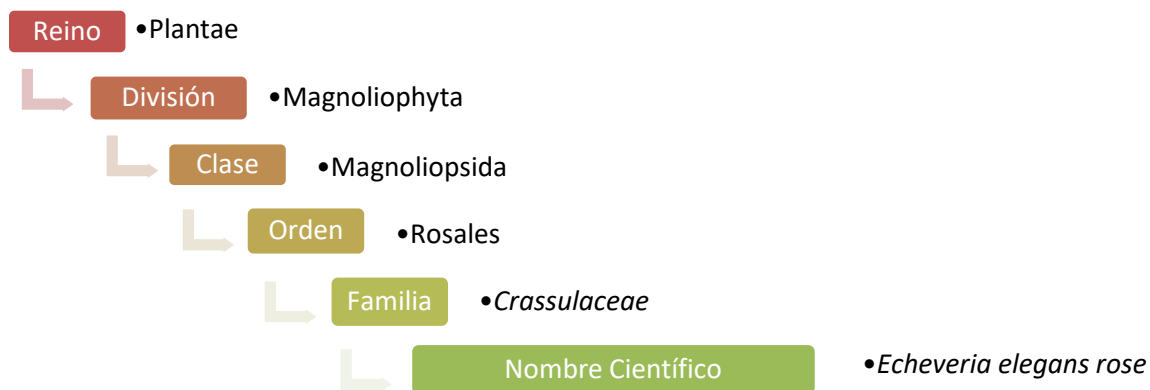


Figura 3. Información taxonómica de *Echeveria elegans*. Fuente: (García M., 2003).

2.5.2 Descripción

Las *Echeveria elegans* son plantas de tallo corto, rosetas globosas, cespitosas o solitarias. Hojas 3-6 cm de longitud, 1-2 cm de ancho, de forma alargada y elíptica, textura suave, margen hialino. Inflorescencias racemosas, tres o más, 10-15 cm de alto, con pocas brácteas inferiores, 10-12 mm de longitud, deltoide-lanceoladas, agudas, adpresas, excepto los ápices, curvadas hacia afuera, flores 6 a 10, rosadas; sépalos desiguales, ovado-deltoides a lanceolados, agudos, extendidos, connados en la base; corola anchamente urceolada, rosada; pétalos delgados, erectos, verdes en botón, amarillo-anaranjados en el interior (García M., 2003).

La *Echeveria elegans* es una especie en forma de roseta (ver fotografía 1), que en primavera tiende a florecer, es una planta que actualmente es cotizada por personal dedicado a tecnologías de azoteas verdes, así como para diseños de adornos principalmente en navidad o nuevas invenciones que han surgido de pequeños jardines. Debido a su belleza y escasos requerimientos de cuidado las personas se ven atraídas por esta planta. En la tabla VII se muestran las principales características de la planta suculenta *Echeveria elegans*.



Fotografía 1. *Echeveria elegans*

Fuente: Elaboración propia

Tabla VII. Características de la *Echeveria elegans*

Tema	Aspectos	Descripción
Distribución	Histórica - Actual	México – Hidalgo - Omitlan de Juárez Conocida sólo de la localidad tipo en las montañas cerca de Pachuca. Mpios. Omitlán de Juárez, Mineral del Chico, Real del Monte (existe un rango de incertidumbre sobre la distribución de la especie en este sitio).
	Macroclima	Habita en climas templados y secos; en altitudes de 2200-2900 m.
	Hábitat	<i>E. elegans</i> crece sobre las rocas, al pie de laderas, sobre suelos de origen volcánico

Ambiente	Situación actual del hábitat con respecto a las necesidades de la especie	Sus hábitats se han visto destruidos y fragmentados por el cambio de uso de suelo.
	Tipo de vegetación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Matorral xerófilo ▪ Bosque mesófilo de montaña ▪ Bosque de Abies religiosa. ▪ Bosque de Pinus ▪ Bosque de Pinus-Quercus y Matorral xerófilo
Historia natural de la especie	Relevancia de la especie	Endémica, rara, de distribución restringida, descrita de una planta cultivada en California. Especie ampliamente cultivada en Omitlán, Hgo.
	Fenología	La floración se ha observado en marzo en plantas cultivadas.
Categorías y factores de riesgo	Conservación	No existen proyectos o estrategias de conservación y manejo específicas para la especie o sus hábitats.
	Factores de riesgo	Especie endémica de distribución restringida, conocida únicamente de plantas cultivadas. No existen colectas de material silvestre. Se desconoce el hábitat original.
	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN)	I (Indeterminada).
	NOM-059-ECOL-2001	P en peligro de extinción

Fuente: Elaboración propia con base en (García M., 2003).

2.5.3. Riego

De acuerdo con (Sánchez, M., 2018) las plantas crasas como la *Echeveria elegans* son bastante sensibles al exceso de riego. Su sistema radicular no está capacitado para absorber tanta agua, ni siquiera para estar en contacto con ella durante demasiado tiempo. Por este motivo, es importante comprobar la humedad de la tierra antes de regar, ya que hay que dejar que la tierra se seque por completo entre un riego y otro.

Método de comprobación de humedad de la planta (Sánchez, M., 2018):

1. “Introducir un palo delgado de madera hasta el fondo: si al sacarlo sale con mucha tierra adherida no hay que regar puesto que ello indicará que aún sigue húmeda.
2. Pesarse la maceta una vez regada y de nuevo al cabo de unos días: la tierra húmeda siempre pesará más que la seca, por lo que esta diferencia de peso servirá de orientación.
3. Utilizar un medidor de humedad digital: introduciéndolo más cerca de la planta y de nuevo más lejos para que sea fiable al 100%.
4. Escarbar unos cinco centímetros alrededor de la planta: así si la tierra a esa profundidad está más oscura que la de la superficie, no se deberá de regar aún.”

Para fines prácticos, se aconseja regar 2 veces por semana en la época más calurosa del año, y una vez por semana el resto del año. Durante el invierno hay que regar menos: una vez cada 15 o 20 días (Pérez & Loli, 2019).

2.5.4. Amenazas

Las plantas suculentas, no padecen de enfermedades en especial, son plantas sumamente resistentes a distintos climas y superficies, sin embargo, estas especies están expuestas a varias plagas entre las que se encuentran las cochinillas blancas, arañas rojas, moscas blancas, gorgojos y cocoideos que afectan a las hojas y sobre todo en las raíces (Reyes S., y otros, 2011). El controlar las bajas temperaturas, el exceso de agua y las hojas secas que se van formando ayuda a mantener a las suculentas en condiciones saludables.

2.6. Métodos de determinación de metales

Existen diversos métodos o técnicas para la determinación de metales presentes en el ambiente, el tipo de estudio, materiales, alcances económicos y función será clave en la elección de cualquiera de ellos.

2.6.1 Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)

La Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS) es una técnica analítica eficiente y precisa para el análisis de elementos trazas, siendo capaz de determinar concentraciones en la escala de partes por billón (ppb ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$)) en una muestra. Tiene la capacidad de cuantificar al menos unos 70 elementos diferentes con excelentes resultados, aún en matrices complejas como suelos, agua, alimentos, muestras orgánicas, metales y aleaciones, petróleo y sus subproductos; y de amplia gama de muestras de industrias químicas y farmacéuticas (Razmilic, 2017; Castellanos, Velandia, González, Varela, & Ramirez, 2018).

La Espectroscopia de Absorción Atómica con llama es comúnmente empleado para la determinación de metales. Se debe a la especificidad, sensibilidad y facilidad de operación. En este método la muestra, que contiene el analito, es directamente aspirada a la llama de flujo laminar, la cual tiene como función generar átomos en el estado fundamental, de los elementos presentes en la muestra. Temperaturas cercanas a los

1,500 - 3,000 °C son suficientes para producir la atomización de un gran número de elementos, los que absorberán parte de la radiación proveniente de la fuente luminosa (Razmilic, 2017; Martínez G., 2020). En la figura 4 se observan los procesos por los que pasa una solución de muestra bajo este sistema.

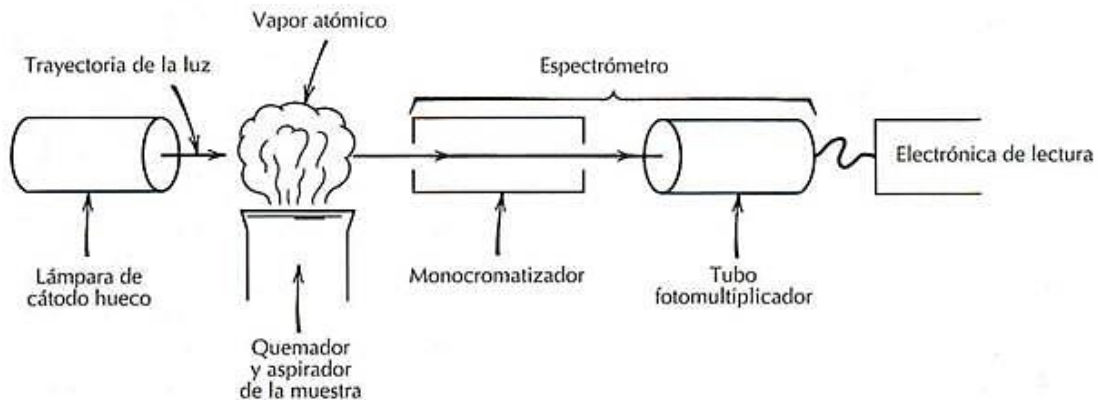


Figura 4. Diagrama del proceso de Espectrometría de Absorción Atómica en llama.

Fuente: (SGN (Servicio Geológico Nacional), 2017).

2.6.2. Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Técnica analítica, anteriormente llamada Espectrografía de Emisión de Rayos X, se utiliza en laboratorios de investigación que estudian la química de las sustancias inorgánicas, y en aplicaciones industriales como: la minería, en el control de calidad, en la industria del vidrio y la cerámica, en la manufactura de metales y aleaciones, en el control de la contaminación y protección ambiental (SGN (Servicio Geológico Nacional), 2017; Meléndez P. & Camacho D., 2009).

En esta técnica, la muestra de análisis es molida en finas partículas y se comprime en forma de píldora esférica o en un disco con la ayuda de un aglutinante. En la preparación de la muestra la esferita o disco de muestra se irradia (durante un corto período de tiempo) con los rayos X generados en un tubo de rayos X de alta intensidad (ININ, 2019). Como se puede observar en la figura 5, la energía de rayos X que se absorbe en la muestra da lugar a la generación de un espectro de emisión de estos característico de cada elemento de la muestra (SGN (Servicio Geológico Nacional), 2017). Estos rayos X característicos se denominan rayos X secundarios, y el fenómeno de emisión se conoce como fluorescencia de rayos X, en el que cada elemento posee líneas espectrales características. (Meléndez P. & Camacho D., 2009) El espectro de dichos rayos generado puede estar formado por un gran número de líneas espectrales en una muestra de más de uno o dos elementos (SGN (Servicio Geológico Nacional), 2017; Meléndez P. & Camacho D., 2009; ININ, 2019).

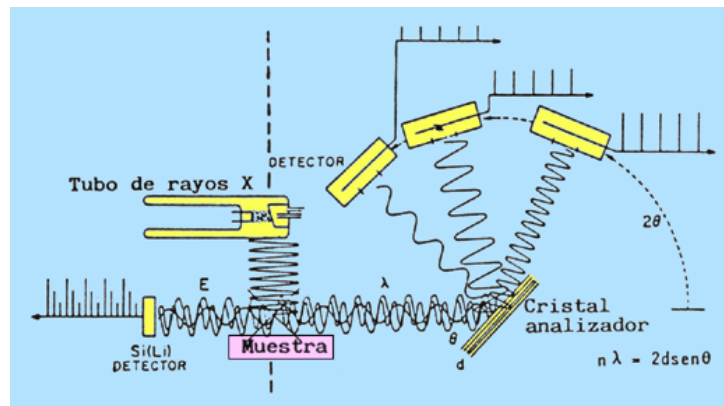


Figura 5. Esquema de la técnica Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X

Fuente: (UNED, 2020).

2.6.3. Espectrometría de Masas por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS)

La espectrometría de masas con fuente de plasma (ICP-MS) es una técnica de análisis multielemental con alta sensibilidad y rapidez que permite cuantificar concentraciones a lo largo de un rango mínimo de 5 órdenes de magnitud, que va de unos pocos ppt a muchos ppm. Por tanto, esta técnica permite analizar, en principio, un gran número de elementos a partir de una pequeña cantidad de muestra ($\ll 1$ g) y en un breve espacio de tiempo: teóricamente hasta 70 elementos o más en 2 ml de muestra y menos de 2 min. Mediante esta técnica se pueden analizar todos los elementos de la Tabla Periódica excepto H, He, C, N, O, F, Ne, Cl, S, I, Br y gases nobles en general (ININ, 2020; Vanina L., 2019; Universidad de Burgos, 2020; Sánchez L., 2013).

La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 8000 K. En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadrupolar a través de una interfaz de vacío creciente, allí son separados según su relación carga/masa. Cada una de las masas sintonizadas llegan al detector donde se evalúa su abundancia en la muestra (Vanina L., 2019). En la figura 6 se puede observar el procedimiento de esta técnica.

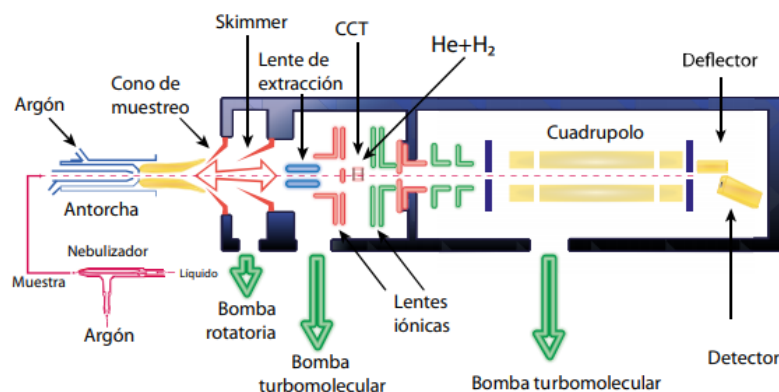


Figura 6. Esquema del equipo ICP-MS XSeries 2 dotado de celda de colisión.

Fuente: (Sánchez L., 2013).

2.6.4. Espectrometría de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

Esta técnica se basa en la producción y detección de espectros de línea emitidos durante el proceso de desexcitación de electrones que sufren transiciones entre niveles excitados superiores y niveles excitados inferiores (ver figura 7). Cuando un elemento químico en forma gaseosa o de vapor recibe energía por el plasma, sus electrones ubicados en orbitales externos pasan de niveles fundamentales (de menor energía) a niveles excitados (de mayor energía). Inmediatamente los electrones excitados regresan a su estado fundamental emitiendo la energía primeramente absorbida. Esos electrones pertenecen a las órbitas externas de los átomos y se llaman electrones ópticos. Los espectros de líneas son específicos de cada elemento y la adecuada selección de una línea y su aislamiento por medio de un sistema dispersivo permite verificar la presencia del elemento y por la intensidad determinar la concentración del elemento en la muestra (Agilent, 2018; Vanina L., 2019).

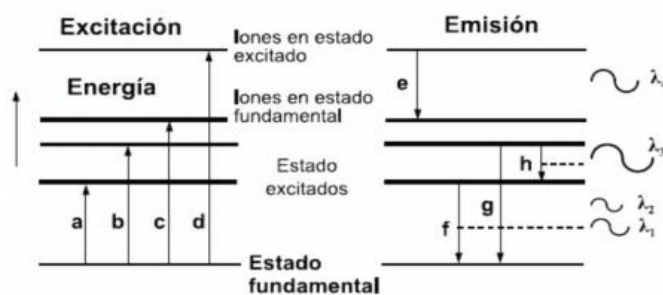


Figura 7. Diagrama de niveles de energía que representa las transiciones, donde a y b: representan excitación, c: ionización, d: ionización/ excitación, e: emisión de la especie iónica y f, g y h: emisiones ópticas.

Fuente: Iberoarsen-Cyted (Litter, 2008; Vanina L., 2019).

El ICP-OES, como podemos ver en el esquema de la figura 8, consiste en una fuente de radiación, un sistema de introducción de la muestra, un sistema óptico, un detector y la correspondiente electrónica para adquisición, procesamiento y edición de resultados (Litter, 2008; Vanina L., 2019).

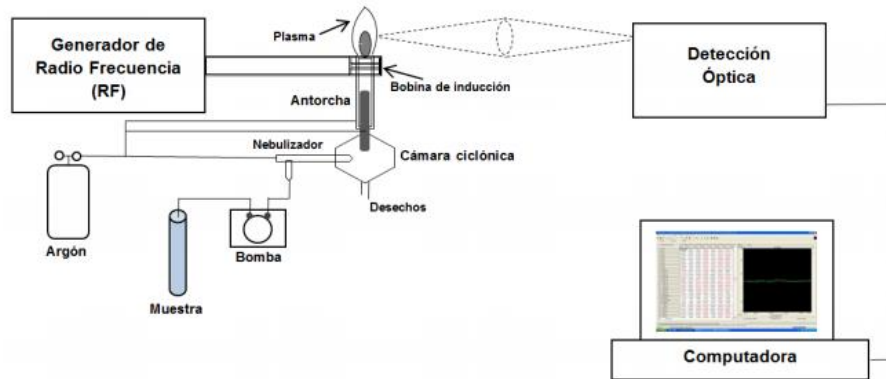


Figura 8. Diagrama del ICP-OES

Fuente: (Vanina L., 2019).

Mediante ICP-OES se pueden detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del Sistema Periódico, pudiéndose analizar una amplia variedad de tipos de muestra entre los cuales se encuentran la agricultura y alimentos, análisis clínicos, geología, evaluación de la contaminación de suelos y aguas (Universidad de Alicante, 2020).

En la presente investigación el método utilizado para la detección de metales en las partes aéreas y raíces de *Echeveria elegans*, fue el de Espectrometría de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).

CAPÍTULO 3

Marco contextual

En este capítulo se presenta una caracterización del municipio de Temascalapa, sitio de donde se extrajeron las muestras de suelo para esta investigación partiendo desde su localización, localización del sitio de muestreo, las características físicas, geográficas y biológicas y el contexto demográfico, con el fin de comprender de qué manera influyen estos factores.

3.1 Localización

Temascalapa es un municipio del Estado de México, se localiza en el Noroeste del Estado y colinda al Norte con los municipios de Tolcayuca y Villa de Tezontepec, pertenecientes al estado de Hidalgo; al Sur con los municipios de San Martín de las Pirámides y San Juan Teotihuacán; al Este con el municipio de Axapusco y al Oeste con el municipio de Tizayuca, del estado de Hidalgo y con el municipio de Tecámac, del Estado de México (ver figura 9).

De acuerdo con el Plan de Desarrollo Urbano de Temascalapa 2016-2018, el Municipio se ubica entre los paralelos 19° 43' 35'' latitud mínima y 19°54'42'' latitud máxima y los meridianos 99° 42'03'' longitud mínima y 98°57'04'' longitud máxima. Su altura media sobre el nivel del mar es de 2,400 metros. Tiene una superficie de 165.099 km² y comprende el 32,8% del territorio de la entidad (Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa , 2016).



Figura 9. Mapa de localización del Municipio de Temascalapa, Estado de México.

Fuente: Elaboración Propia con base en (INEGI, 2010).

3.3.1 Sitio de muestreo

El sitio de muestreo de la presente investigación se encuentra en las coordenadas geográficas: 19.797124, -98.834162 y las localidades más cercanas a este punto son Santa María Maquixco al Sur y al Oeste San Juan Teacalco. En esta zona se depositaron temporalmente jales mineros de los años 80's, que posteriormente fueron retirados (Maragas S. & Morales D., 2010). Actualmente el punto minero más cercano al sitio de muestreo es la "Mina Camsa", la cual se encuentra a 4 kilómetros de distancia hacia el Noroeste, la mina produce agregados con trituración de material basáltico para la elaboración de mezcla asfáltica, así como materiales tepetate, tezontle y grava controlada para la conformación de estructuras en vías de comunicación (CAMSA, 2010).



Figura 10. Localización de sitio de muestreo de suelo

Fuente: Elaboración Propia con base en (Google Earth, 2020).

3.2 Clima

De acuerdo con INEGI el clima presente en el Municipio de Temascalapa está catalogado como (Bs1kw) Semiseco templado con lluvias en verano con el 96.19% de su territorio y C(w0)(w) Templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad representado por el 3.81%, (INEGI, 2010).

La temperatura media del municipio es de 16 °C, su rango térmico va de los 14°C a los 18 °C, registrándose la temperatura más alta en los meses de junio y julio y la más baja en diciembre y enero; En cuanto al periodo de heladas generalmente comienza en noviembre y termina a principios de marzo, se presentan en un rango de 10 a 100 días, aunque la mayor incidencia se da en un rango de 40 a 60 días al año, concentrándose en los meses de diciembre, enero y febrero. Por su parte las granizadas son intermitentes a lo largo del año y están asociadas a los periodos de precipitación. (Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa , 2016; INEGI, 2010).

Las muestras obtenidas para el presente estudio tienen las características del clima (Bs1kw) (ver Figura 2 del apéndice A)

3.3. Hidrología

El Municipio de Temascalapa pertenece a la Región hidrológica del Alto Panuco de la cuenca del río Moctezuma, subcuencas Río Tezontepec en el 86.66% y Lago de Texcoco y Zumpango en un 13.34%, (INEGI, 2009).

Como se puede observar en la Figura 3 del apéndice A, Temascalapa carece de recursos acuíferos, puesto que no existe un río de cause constante, solamente algunos de temporal, entre los que destacan; El Papalote y Las Avenidas. Asimismo, los pequeños ríos que se forman en las barrancas son Tecualtlitolco, Tepuazquiazco, La Lobera y El Capulín, los cuales nacen en el Cerro Gordo; También en las épocas de lluvia, se puede observar la formación jagüeyes, que sirven principalmente como bebederos para el ganado y riego en actividades agrícolas (Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa , 2016).

Debido a las condiciones mencionadas anteriormente cerca de la zona de muestreo no se encuentra ningún río o cuerpo de agua.

3.4 Geología

Geológicamente Temascalapa pertenece a la provincia del Eje Neovolcánico Transversal, por lo tanto, se encuentra ubicado sobre una loma de material pétreo cuya forma es un polígono irregular inclinado; las

zonas urbanas se sitúan sobre suelos y rocas ígneas extrusivas del cuaternario, suelo andesita-basalto, también hay presencia de roca sedimentaria, suelo aluvial tal como se ilustra en la Figura 4 del apéndice A (INEGI, 2009).

El relieve muestra altitudes que van desde los 2,240 metros, hasta los 2,650 metros sobre el nivel del mar. La montaña más importante es la conocida como “Cerro Gordo” que tiene una altura de 3,046 metros sobre el nivel del mar (Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa , 2016).

El sitio de muestreo presenta características de roca ígnea extrusiva del cuaternario, suelo andesita-basalto.

3.5. Edafológica

Existen en el Municipio cinco unidades de suelo: Feozem Háplico, Feozem Luvio, Cambisol Eutríco, Vertisol Pelico y Litosol (ver Figura 5 del apéndice A) (INEGI, 2010).

Los Feozem Háplico se encuentran en casi todo el territorio municipal, se caracterizan por presentar una capa superficial rica en materia orgánica y nutrientes, aptos para el desarrollo de actividades agropecuarias y muy susceptibles a la erosión; los Cambisoles Eutríco, tiene textura arcillosa se caracterizan por ser suelos idóneos para el desarrollo de actividades pecuarias y para el desarrollo urbano, los Vertisoles Pelicos caracterizados por la formación de profundas y anchas grietas y los Litosoles, se caracterizan por ser poco profundos, de origen rocoso de vocación netamente forestal (Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa , 2016; Jazo C., 2015).

Según la edafología mencionada anteriormente el sitio de muestreo de esta investigación corresponde al suelo Cambisol Eutríco.

3.6. Flora

En Temascalapa la vegetación se encuentra constituida por diversos tipos de matorrales y una gran variedad de árboles, entre los que se encuentra el pino, alcanfor, pirúl, mezquite, fresnos, truenos, casuarina, jacaranda, eucalipto, huizache; en cuanto a las cactáceas predominan nopales, cardonal, tetechera, órgano, biznaga, maguey, abrojo, entre otros; para el caso de hierbas y verduras están presentes haba, frijol, quelites, nopales calabacitas, trigo, hindagan o hierba de venado. También hay presencia de plantas con usos medicinales como poleo, maguey de sábila, diente de león, gordolobo, epazote zorrillo, hierba del cáncer, té de monte, trébol, santa maría, ajonjolín, salvia, estafiate, malva, árnica, manzanilla, ajeno, ruda, mejorana, etc., (Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa , 2016).

3.7. Fauna

La fauna presente en el Municipio está comprendida por arácnidos como alacranes, tarántulas, arañas rojas; en el caso de los reptiles hay presencia de camaleón, lagartija, escorpión, cencuate, culebra, trucha; las aves están representadas por la tórtola, aguililla, gavilancillo, ceniztonle, calandria, golondrina, verdugo, chupamirto (colibrí), correcaminos, huitlacoche, lechuza, coquita, pecho rojo, choya, tecolote, entre otros. Asimismo, se encuentran ocasionalmente animales silvestres, sin embargo, la mayoría se encuentran en peligro de extinción, principalmente debido a la caza inmoderada (Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa , 2016).

3.8. Usos del suelo y vegetación

Temascalapa presenta diversos usos de suelo y vegetación de acuerdo a las principales actividades que se llevan a cabo, los cuales se dividen en agricultura (76.33%), zona urbana (10.07%), pastizal (11.22%), matorral (2.31%) y vegetación secundaria (0.07%), (ver Figura 6 del apéndice A) (INEGI, 2009).

Lo que predomina en el Municipio es la agricultura de temporal con cultivos de cebada y maíz principalmente. El uso pecuario ocupa terrenos que de acuerdo a la geología en su mayoría son cerros y laderas con vegetación de matorrales, pastizales inducidos en combinación con vegetación de tipo árido como magueyeras y nopaleras. En los lomeríos predomina vegetación de tipo arbórea representada por pirules. (Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa , 2016).

3.9. Dinámica demográfica

De acuerdo con la última encuesta intercensal realizada por el INEGI en 2015; Temascalapa presenta una población total de 38,622 habitantes, que representan el 0.2 % del total de la población de la entidad del Estado de México, de las cuales 19,556 son mujeres que representa un 48.6 % y 19,08 hombres que representan el 51.4% de la población total (ver figura 11), su densidad de población es de 234.6 habitantes por kilómetro cuadrado (INEGI, Encuesta Intercensal, 2015).

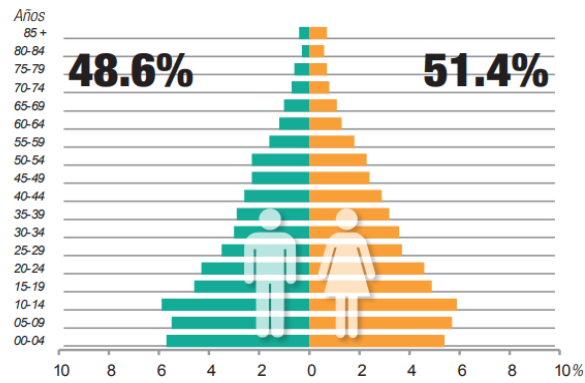


Figura 11. Población por edades Municipio de Temascalapa, Estado de México

Fuente: (INEGI, Encuesta Intercensal, 2015).

Debido a las características geográficas mencionadas anteriormente el sitio de muestreo es competente para la presente investigación.

CAPÍTULO 4.

Marco legal

En este capítulo se menciona los diferentes ordenamientos jurídicos vigentes aplicables a la contaminación industrial del suelo, conformado por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente Normas Oficiales Mexicanas.

A continuación, se describe la normativa mexicana aplicable para el desarrollo de la presente investigación.

4.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de febrero de 1917 y reformada en el DOF 6 de junio de 2019, señala lo siguiente:

Artículo 4° (Párrafo V). “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2019).

4.2 Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada el 28 de enero de 1988 en el DOF y reformada por última vez el 5 de junio de 2018, menciona lo siguiente:

Artículo 15° (Párrafo IV). “Quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo, debe incentivarse a quien proteja el ambiente y aproveche de manera sustentable los recursos naturales.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2019).

Artículo 134° (Párrafo II). Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;

(Párrafo III). Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes;

(Párrafo V). “En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2019).

Artículo 135°. “Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en; (Párrafo III). La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así

como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2019).

Artículo 139°. “Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2019).

4.3. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), publicada el 8 de octubre de 2003 en el Diario Oficial de la Federación y reformada por última vez el 19 de enero de 2018, menciona que:

Artículo 1° (Párrafo X). “Prevenir la contaminación de sitios por el manejo de materiales y residuos, así como definir los criterios a los que se sujetará su remediación

(Párrafo XII). Fortalecer la investigación y desarrollo científico, así como la innovación tecnológica, para reducir la generación de residuos y diseñar alternativas para su tratamiento, orientadas a procesos productivos más limpios” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).

Artículo 45°. “Los generadores de residuos peligrosos, deberán identificar, clasificar y manejar sus residuos de conformidad con las disposiciones contenidas en esta Ley y en su Reglamento, así como en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría. En cualquier caso, los generadores deberán dejar libres de residuos peligrosos y de contaminación que pueda representar un riesgo a la salud y al ambiente, las instalaciones en las que se hayan generado éstos, cuando se cierren o se dejen de realizar en ellas las actividades generadoras de tales residuos” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).

Artículo 69°. “Las personas responsables de actividades relacionadas con la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación de sitios con éstos, están obligadas a llevar a cabo las acciones de remediación conforme a lo dispuesto en la presente Ley y demás disposiciones aplicables” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).

4.4 Normas Oficiales Mexicanas

Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Entro en vigor el 2 de marzo de 2007 y sin modificaciones, establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio y sus compuestos inorgánicos; así como los criterios de remediación (Secretaría de Economía, 2016).

Norma Técnica Mexicana. NMX-AA-132-SCFI-2006.

Esta norma entro en vigor el 06 de marzo de 2017 y establece las técnicas de muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra en México (Secretaría de Economía, 2017).

CAPÍTULO 5

Metodología

En este capítulo se describe el proceso, los métodos, así como las técnicas e instrumentos a partir de los cuales se realizó la evaluación de la bioacumulación de metales en la planta suculenta *Echeveria elegans* con respecto a la figura 1.

5.1 Materiales y métodos

Tal como fue esquematizado en el diagrama metodológico (Figura 1), la parte experimental de este trabajo se integró de las siguientes etapas:

1) **Adquisición de los especímenes de *Echeveria elegans*.**

Los especímenes de adquirieron de invernaderos de la zona central del Valle de Toluca, con la finalidad de garantizar la adaptación rápida del organismo a las condiciones ambientales a las que se realizó el experimento.

2) **Obtención de muestras de suelo.**

La recolección y la extracción de las muestras del suelo utilizadas en este trabajo se obtuvieron del municipio de Temascalapa, Estado de México, en un predio localizado en las siguientes coordenadas geográficas: 19.797124, -98.834162 debido a sus antecedentes como depósito de jales mineros en décadas anteriores como se menciona en el apartado 3.1.1. El punto de muestreo y recolección de muestras de suelo se realizaron conforme a las recomendaciones señaladas por la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra”.

3) **Cultivo, riego y cuidado de *Echeveria elegans* en las muestras del suelo.**

Las muestras del suelo del punto anterior fueron colocadas en macetas, en estas se trasplantaron los especímenes de *Echeverias elegans* previamente elegidas. Por su parte, el riego fue realizado una vez cada 10 días por ser temporada de otoño-invierno, tomando en cuenta las especificaciones del apartado 2.5.3. Asimismo, se mantuvo una vigilancia y control de plagas estricto. Finalmente, y con la intención de estudiar de manera adicional, la selectividad de retención de Cs (simulando ^{137}Cs) en *Echeveria elegans* se adicionaron 10 mL de nitrato de cesio CsNO_3 194,91 g/mol, en dos macetas escogidas arbitrariamente. El ^{137}Cs es un elemento radioactivo que normalmente se encuentra presente en residuos de actividades de fisión nuclear y aparatos empleados en el campo de la medicina, tiene una vida media de 30 años y es altamente tóxico al contacto, por lo cual, al ser vertido en suelo, este último se convierte en un espacio contaminado (ATSDR, 2004); es así que, la *E. elegans* al ser un espécimen altamente resistente a condiciones extremas puede resultar óptima para su bioacumulación en suelos contaminados.

4) **Preparación de muestras de *Echeveria elegans* (raíz y sección aérea) y suelo.**

Transcurridas el tiempo de contacto entre el suelo y los especímenes, se realizó la disección, pesado y secado de las plantas. El secado de la planta diseccionada se realizó en una mufla a 45 °C con el objeto de evitar la volatilización de metaloides. De manera análoga, se realizó la extracción de muestras de suelo de cada maceta y se procedió a su secado a temperatura ambiente y

expuesto al sol. Finalmente, las muestras secas de raíz, sección aérea y suelo fueron enviadas al Laboratorio Nacional de Forense Nuclear del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares para su análisis cualitativo y cuantitativo por ICP-OES.

5) **Análisis cualitativo y cuantitativo de las muestras de suelo y *Echeveria elegans* por el método ICP-OES.**

Para el análisis cualitativo y cuantitativo de las muestras, fue necesario la preparación de estas, lo cual se realizó con la finalidad de eliminar interferencias en la identificación y cuantificación del analito. La preparación fisicoquímica de las muestras quedo a cargo del Laboratorio Nacional de Forense Nuclear del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (LANAFONU), proceso que se menciona de manera general en la figura 12.

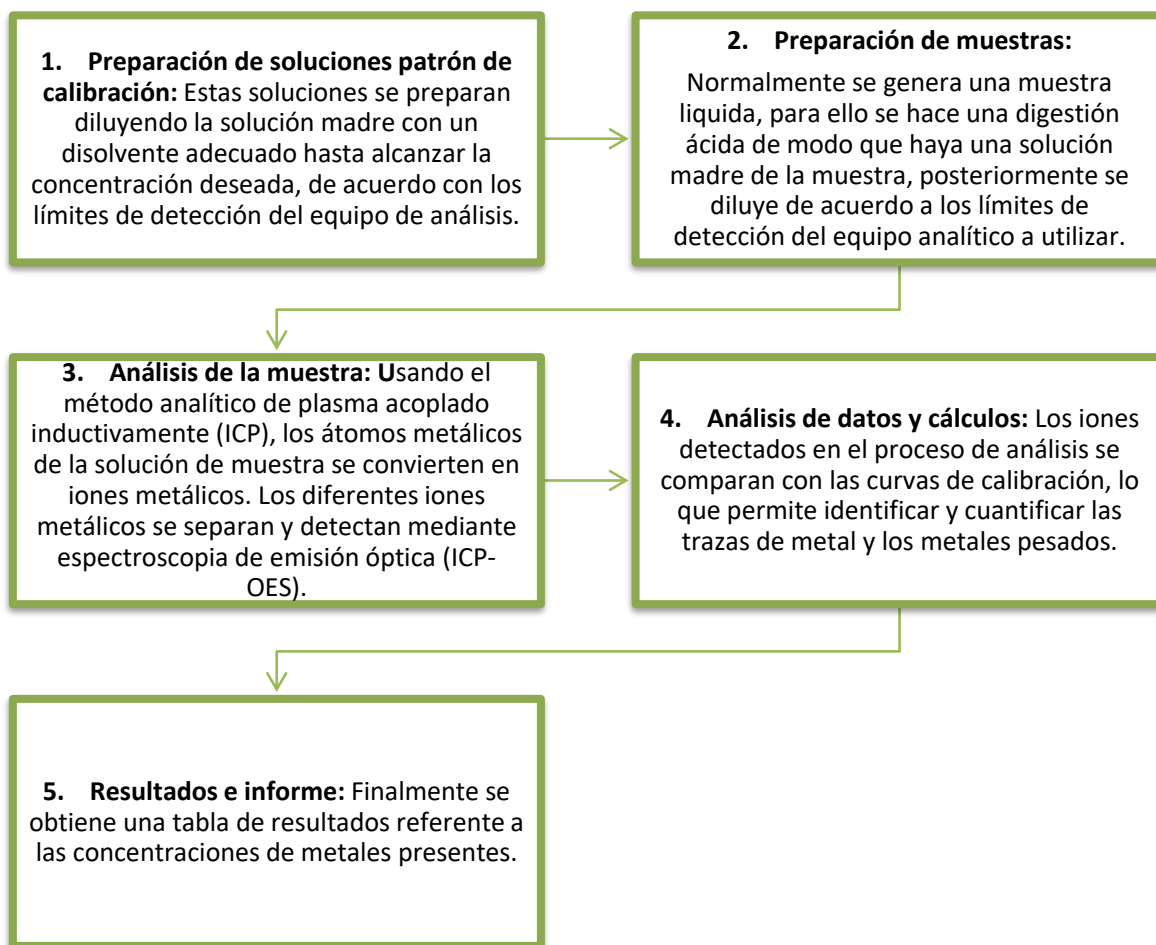


Figura 12. Diagrama general de preparación de muestras para análisis por ICP-OES.

Fuente Elaboración propia con base en (Padilla R., 2001).

6) **Determinación de la acumulación de metales en la *Echeveria elegans*.**

La evaluación de la acumulación de metales de la *Echeveria elegans* se realizó estimando el factor de bioacumulación en la raíz de la planta (RAF), factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF) y factor de translocación (TF). Los factores RAF, SAF y TF, se calcularon siguiendo las ecuaciones (1), (2) y (3), las cuales han sido utilizadas por varios autores (Chen , y otros, 2011; Majid, Islam, Rauf, Ahmadpour, & Abdu, 2011; Xiong C, 2013; Medina & Montano, 2014; Galal & Shehata, 2015).

$$RAF = \frac{C_{raiz}}{C_{suelo}} \quad (1)$$

$$SAF = \frac{C_{parte\ aérea}}{C_{suelo}} \quad (2)$$

$$TF = \frac{C_{parte\ aérea}}{C_{raiz}} \quad (3)$$

Donde *C* es la concentración del metal en el suelo, raíz y parte aérea o comestible.

CAPÍTULO 6

Resultados y discusiones

En este capítulo se presentan los resultados y discusiones de la determinación de metales en las muestras de suelo, parte aérea y raíces de *Echeveria elegans*, así como la estimación de los factores de bioacumulación y translocación, respectivamente.

6.1 Adquisición de especímenes de *Echeveria elegans*

Para esta investigación se obtuvieron 12 ejemplares de la especie *Echeveria elegans*, cultivadas sin cuidados especiales y bajo condiciones ambientales típicas del Valle de Toluca. Los ejemplares adquiridos contaban con las siguientes características físicas:

- Color verde vivo.
- Hojas gruesas.
- Diámetro de 3 cm.
- Altura de 8-11 cm.
- Peso entre 9-14 g.
- Raíz de 2-3 cm de largo.
- Sin presencia aparente de plagas.

6.2 Muestras de suelo

Tal como fue descrito en la sección 5, la recolección y la extracción de las muestras del suelo se obtuvieron del municipio de Temascalapa, Estado de México, en un predio localizado en las siguientes coordenadas geográficas: 19.797124, -98.834162. El sitio se encuentra en suelos agrícolas, sin cobertura vegetal significativa, observándose restos de vegetación tipo matorral. Desde el punto de vista edafológico, el suelo es del tipo Cambisol eutrico descritos en la sección 3.5.

La selección del punto de muestreo y recolección de muestras de suelo se realizaron conforme a las recomendaciones señaladas por la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006. En este sentido, para la extracción del suelo se utilizó un muestreo de tipo exploratorio para superficies menores a 0.29 hectáreas, estableciéndose siete puntos de muestreo superficiales (horizontal). El criterio utilizado se fundamentó en la ubicación del sitio, así como en las características edafológicas y de uso del suelo, con lo anterior se buscó adquirir muestras de suelo representativas. En relación con eso, el muestreo superficial se realizó utilizando un nucleador de acero inoxidable. Se extrajeron muestras compuestas constituidas por cinco muestras simples distribuidas uniformemente y tomadas utilizando la técnica de “tresbolillo”.

Tal como se muestra en la Figura 13, las muestras de suelo fueron homogenizadas y fraccionadas por la técnica de cuarteo. Fracciones de 400 g de suelo fueron utilizadas para el cultivo de las *Echeveria elegans*. De igual manera, se seleccionaron dos muestras (blancos) de 400 g de suelo, para realizar el análisis de línea base de metales del sitio en estudio.

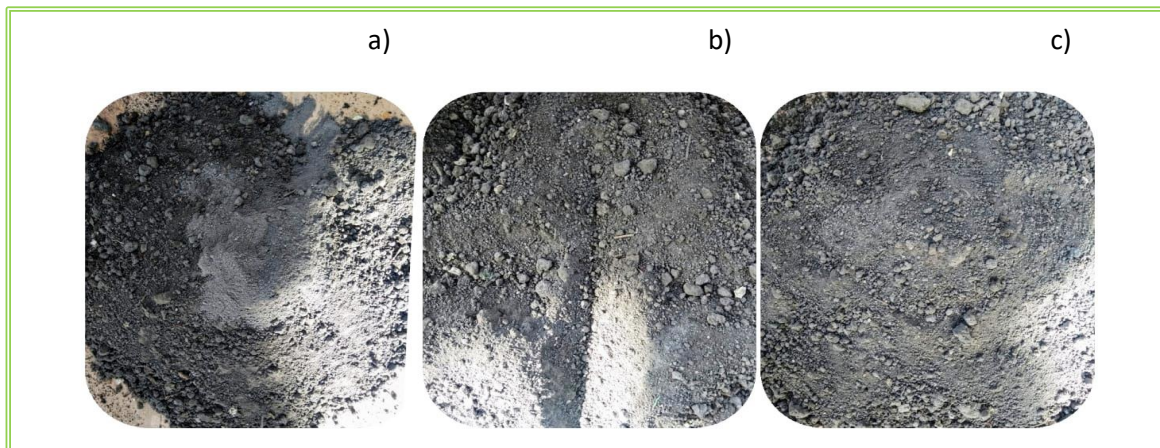


Figura 13. Proceso de homogenización de suelo, técnica de cuarteo; a) conjunto de suelo muestreado, b) aplicación de técnica de cuarteo, c) suelo homogenizado

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Cultivo, riego y cuidado de *Echeveria elegans* en las muestras de suelo

Tal como se presenta en la figura 14, las muestras del suelo fueron colocadas en las macetas, en estas se cultivaron 11 plantas en muestras de suelo de Temascalapa, de las cuales a 2 se les suministro 10 mL de nitrato de cesio CsNO_3 (simulando ^{137}Cs). Adicionalmente 1 planta se utilizó como blanco. A su vez, las macetas se colocaron en un cajón con un plástico impermeable para disminuir la lixiviación de metales durante el riego. Después de preparar las plantas, se colocaron en el cajón descrito, el cual se ubicó en un lugar a la exposición indirecta de los rayos solares.

El riego fue realizado una vez cada 10 días por ser temporada de otoño-invierno, utilizando únicamente 50 mL de agua, con la finalidad de no generar un exceso de humedad. Con respecto al manejo de plagas, no hubo la necesidad de realizar ningún control de plagas, ya que no se presentaron y el crecimiento fue progresivo. Algunas plantas mostraron, durante el crecimiento, resequedad y caída de hojas que se incorporaron como materia orgánica al mismo suelo, esto ocurrió en todas las muestras, sin embargo, no fue limitante para el crecimiento de las plantas.

Finalmente, el tiempo de cultivo y por ende de contacto de cada ejemplar de *Echeverias elegans* con el suelo, duró 28 semanas sin excepción alguna. Se trabajaron 12 macetas en total; en el caso del suelo se conservaron 2 muestras originales a las que no se les cultivo *Echeverias elegans* para utilizar como control.

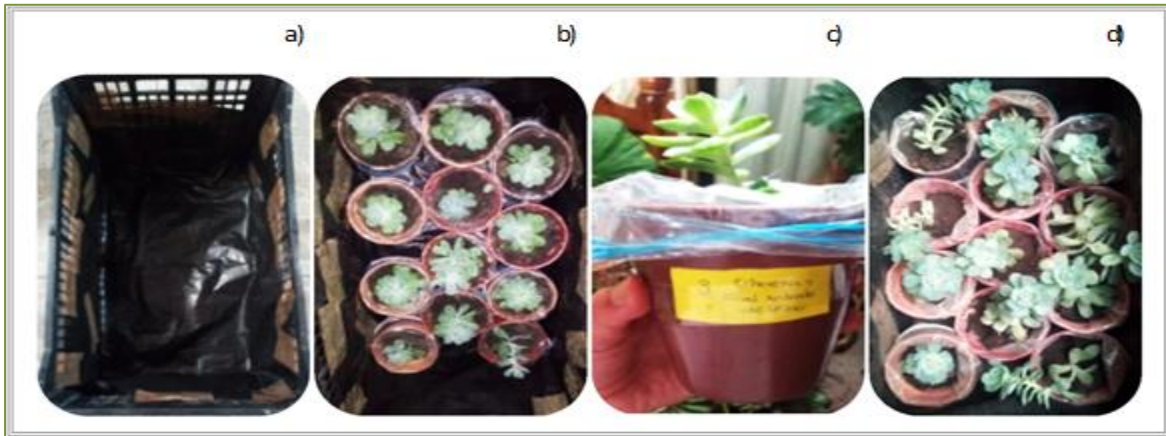


Figura 14. a) Cajón para colocación de macetas, b) Muestras colocadas en el cajón, c) Etiquetado de macetas, d) Proceso de cultivo (28 semanas).

Fuente: Elaboración propia.

6.4 Preparación de muestras de *Echeveria elegans* (raíz y parte aérea) y suelo.

Transcurridas las 28 semanas de cultivo, se procedió a la extracción y preparación de las muestras de *Echeveria elegans* y de suelo. Con el cuidado necesario, se extrajeron las plantas cultivadas de cada maceta. Tal como se muestra en la figura 15, los especímenes fueron lavados con agua desionizada para retirar los restos de suelo y materia orgánica. De manera análoga, se realizó la extracción de muestras de 20 g suelo de cada maceta, la extracción se efectuó con el método del cuarteo.

En seguida, se separaron las raíces de la sección aérea de la planta, registrando el peso y dimensiones (Tabla VIII), asimismo se realizó el etiquetado correspondiente.

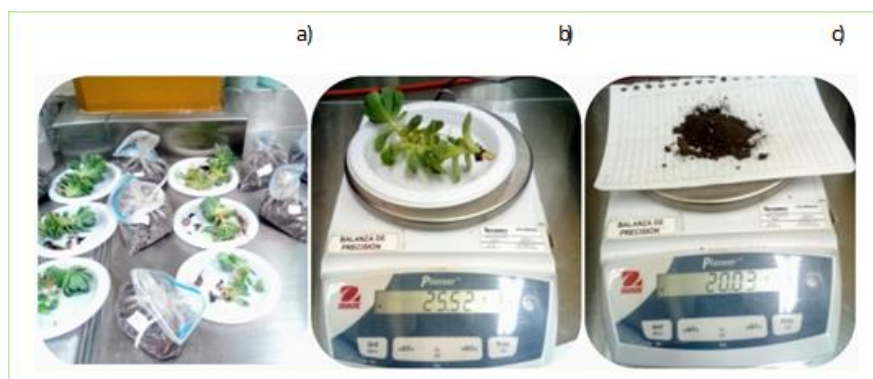


Figura 15. a) Muestras lavadas y separadas, b) Proceso de pesado de parte aérea hidratada, c) Proceso de pesado de muestras de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla VIII. Pesos y medidas de los especímenes de *Echeveria elegans* y de sus raíces hidratados.

N° de muestra	Peso de parte aérea (g)	Peso de raíz (g)	Medida parte aérea y raíz (cm)
1	35.33	1.56	21
2	25.55	0.92	24
3	22.49	0.95	23.9
4	31.19	1.08	25.4
5	44.48	2.72	22.4
6	45.80	2.23	23.2
7	34.60	1.64	17.6
8	23.77	1.46	18.8
9	31.80	1.85	20.6
10	28.44	1.12	23.3
11	17.93	0.92	15.6
12	22.62	0.64	20.4

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, las muestras de raíces, sección aérea y suelo fueron etiquetadas y secadas. Tal como se muestra en la Figura 16, las raíces y secciones aéreas se colocaron en bolsas de papel y se introdujeron en una estufa de laboratorio a una temperatura de 45 °C. Este proceso se realizó hasta lograr un secado total de las plantas (37 días).

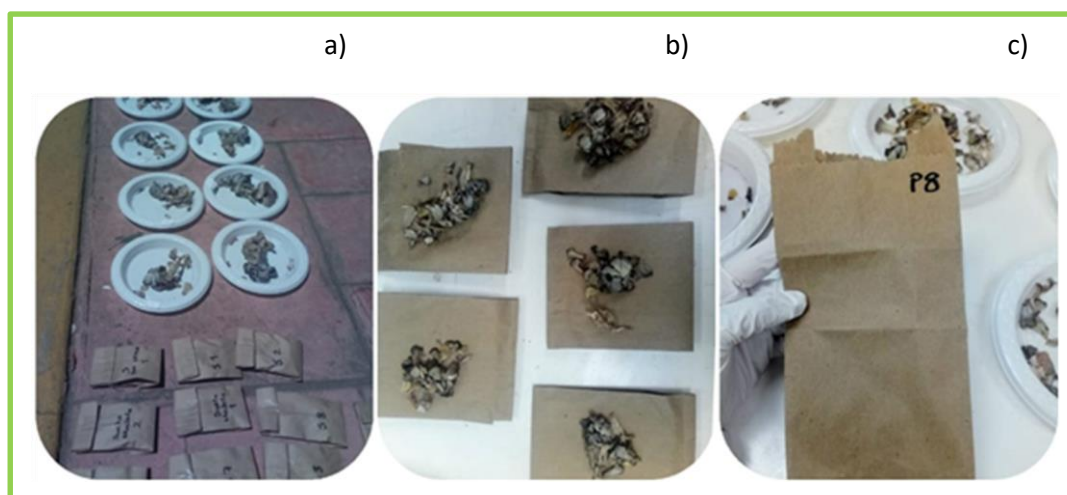


Figura 16. a) Secado de muestras al sol, b) Muestras de partes aéreas secas, c) Preparación y etiquetado de muestras secas.

Fuente: Elaboración propia.

Al tener las muestras totalmente secas se midieron y pesaron, los resultados obtenidos se presentan en las Tablas IX y X. Finalmente, cada muestra fue etiquetada y enviado para su análisis cualitativo y cuantitativo.

Tabla IX. Medida y peso de raíces de *Echeveria elegans* secas.

N° de Muestra	Peso de Raíz (g)	Media de Raíz (Cm)
1	0.14	3.9
2	0.25	7.2
3	0.12	6.1
4	0.14	4.3
5	0.42	4.7
6	0.29	7.1
7	0.20	5.6
8	0.19	4.6
9	0.31	4.1
10	0.17	4.7
11	0.12	4.2
1 2	0.11	4.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla X. Medida y peso de parte aérea *Echeveria elegans* secas.

N° de Muestra	Peso de Parte aérea (g)	Media de Planta (cm)
1	1.35	8.0
2	0.99	6.5
3	0.88	7.0
4	0.79	6.4
5	1.56	6.6
6	1.57	7.2
7	1.34	7.9
8	0.89	5.4
9	1.02	6.1
10	1.43	5.9
11	0.71	6.8
12	0.80	5.5

Fuente: Elaboración propia.

6.5 Análisis cualitativo y cuantitativo de las muestras de suelo y *Echeveria elegans*.

6.5.1. Suelo

La determinación de concentración de metales en los suelos se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Forense Nuclear (LANAFONU) del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), empleando la técnica Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X Dispersiva en Energía (FXR), bajo condiciones ambientales de 22 °C y 48 % de humedad relativa.

La incertidumbre se estimó de acuerdo con la norma NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”. Este valor de incertidumbre corresponde a un factor de cobertura $k=2$, para dar un nivel de confianza de aproximadamente 95% (ver tabla XI).

Los metales que se determinaron en suelos fueron Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, P, S, Cl, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Cs, Ba, Pb, Th y U. Por muestra, el suelo reveló variables datos, siendo Si, Al y Fe los rangos más altos con (28.667 – 31.5), (9.17 – 9.797) y (3.793 – 3.987) %, respectivamente; al contrario de As (< 6), Th (9 – 11.5) y U (12 – 14.9) mg/kg, siendo las estimaciones más bajas.

En cuanto a las muestras, el SM1, S8 y S2**, señalan los valores más altos; por otro lado, S1*, S6 y S9 indican las concentraciones más bajas.

Del mismo modo, se realizó un análisis para la determinación de los rangos de concentración de los metales en todas las muestras, lo cual reveló que en este estudio no hay diferencias significativas entre los resultados de concentración de cada metal (ver tabla XII).

Tabla XI. Contenido de metales por muestra (mg/km) en suelos.

Muestra	S1*	S2**	S3**	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	SM1	SM2
Na %	1.005	1.006	1.03	1.025	1.033	1.004	1.07	1.05	1.007	1	0.992	0.97	1.047	0.979
Inc.	± 0.53	± 0.03	± 0.026	± 0.028	± 0.031	± 0.068	± 0.053	± 0.036	± 0.039	± 0.034	± 0.05	± 0.009	± 0.25	± 0.048
Mg %	0.928	0.824	0.892	0.811	0.892	0.802	0.857	0.943	0.747	0.827	0.809	0.83	0.884	0.832
Inc.	± 0.009	± 0.013	± 0.004	± 0.005	± 0.011	± 0.009	± 0.01	± 0.007	± 0.008	± 0.01	± 0.008	± 0.012	± 0.012	± 0.008
Al %	9.6	9.3530	9.4870	9.307	9.69	9.283	9.553	9.797	9.170	9.473	9.47	9.49	9.577	9.49
Inc.	± 0.01	± 0.015	± 0.015	± 0.055	± 0.01	± 0.021	± 0.031	± 0.006	± 0.017	± 0.049	± 0	± 0.01	± 0.021	± 0.01
Si %	28.667	30.467	28.967	30.3	30.233	30.167	30.4	29.5	31.5	30.867	31.233	31.133	30.333	31.004
Inc.	± 0.058	± 0.058	± 0.058	± 0.173	± 0.058	± 0.058	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.115	± 0.058	± 0.058	± 0.058	± 0.004
P %	504	489.3	542.7	426.3	467.7	464.7	449	508.7	466	481.7	415.7	420.7	508	457.3
Inc.	± 9.5	± 5.7	± 0.6	± 2.1	± 5.5	± 3.1	± 2.6	± 12.5	± 7.2	± 8.7	± 3.5	± 1.5	± 6.1	± 4.2
S %	524.3	451	571	409.3	594.3	497	469.7	528.3	450.7	479	352.3	352	571.3	463.7
Inc.	± 3.1	± 7.2	± 6.1	± 5.5	± 26	± 7.9	± 4.7	± 7.6	± 6.8	± 8.7	± 5.5	± 5.3	± 1.5	± 0.6
Cl %	82.2	85.4	77	109	91.7	96.5	116.3	108	114.3	114.7	99.6	101.1	138	112.7
Inc.	± 1.9	± 2.8	± 1.6	± 1.7	± 2.1	± 3.8	± 2.3	± 3.6	± 4	± 1.5	± 1.7	± 1.9	± 2	± 1.2
K %	0.879	0.841	0.865	0.842	0.827	0.808	0.823	0.834	0.801	0.838	0.815	0.830	0.829	0.827
Inc.	± 0.025	± 0.028	± 0.025	± 0.013	± 0.004	± 0.008	± 0.005	± 0.009	± 0.003	± 0.005	± 0.015	± 0.018	± 0.019	± 0.019
Ca %	1.507	1.349	1.435	1.356	1.461	1.374	1.437	1.517	1.311	1.391	1.33	1.344	1.407	1.435
Inc.	± 0.006	± 0.015	± 0.02	± 0.012	± 0.012	± 0.006	± 0.006	± 0.006	± 0.015	± 0.006	± 0.01	± 0.01	± 0.01	± 0.01
Ti mg/kg	5386.7	5530	5556.7	5573.3	5440	5403.3	5756.7	5833.3	5470	5393.3	5683.3	5683.3	5440	5540
Inc.	± 70.9	± 62.4	159.5	± 55.1	± 52.9	± 85	± 80.2	± 51.3	± 96.4	± 15.3	± 49.3	± 35.1	± 26.5	± 65.6
V mg/kg	92.7	108.7	98.3	85.5	97.3	95.2	77.3	97.3	78.8	97.8	95	85.6	75.9	84.5
Inc.	± 1.1	± 3.1	± 1.7	± 6.3	± 8.4	± 5.3	± 3	± 8.5	± 7.6	± 10.6	± 1.8	± 6.4	± 6.5	± 5.9
Cr mg/kg	69.6	66.9	70.3	69.7	71.4	67.7	67.5	70	64.9	64.1	67.7	69.7	73	67.7
Inc.	± 3.3	± 3.5	± 2.2	± 4.3	± 2.6	± 2.4	± 5.4	± 2.4	± 64.9	± 3.9	± 1.7	± 2.2	± 4.4	± 1.5
Mn mg/kg	557	643.3	618.3	607.7	563.7	598.7	585.3	611	576	557.7	587	602.7	594.3	581
Inc.	± 9.6	± 5	± 5.9	± 9.9	± 16.8	± 5.9	± 585.3	± 3.5	± 14.1	± 10.8	± 5.3	± 6.1	± 6.7	± 15.7
Fe %	3.91	3.883	3.917	3.85	3.94	3.847	3.953	3.987	3.793	3.873	3.9	3.93	3.927	3.87
Inc.	± 100	± 60	± 60	± 170	± 100	± 60	± 120	± 120	± 60	± 230	± 100	± 100	± 60	± 100

Ni mg/kg	40.7	41.5	40.6	44.1	43.5	42.5	42.1	43.3	40.8	40.5	39.7	42.5	42.7	41.9
Inc.	± 1.1	± 1.2	± 0.6	± 1.3	± 1.6	± 1.3	± 0.7	± 1	± 0.09	± 1.9	± 0.5	± 1.7	± 1.3	± 0.7
Cu mg/kg	26.9	31.5	27.3	27.2	27.2	26.9	27.4	26.2	27.6	28.1	28.9	28.4	29.2	28.9
Inc.	± 1.5	± 0.3	± 1.3	± 1.9	± 1	± 2.8	± 1.8	± 3.7	± 1.4	± 1.9	± 1.6	± 0.8	± 2.1	± 2.4
Zn mg/kg	86.4	89.3	89.4	88.4	88.4	87.2	89.2	87.6	85.4	88.3	85.1	86.4	91.7	88.2
Inc.	± 0.6	± 0.9	± 2.5	± 0.8	± 0.9	± 1	± 0.2	± 3.1	± 1.8	± 1.3	± 1.1	± 1.8	± 2.1	± 1.7
Ga mg/kg	17.5	18	17.7	17.4	17.6	17.4	18.1	17	17.6	16.8	17.7	17.7	17.1	16.4
Inc.	± 1.3	± 1.2	± 0.7	± 1.1	± 1.7	± 0.8	± 2	± 1	± 1	± 1.3	± 1.1	± 0.6	± 0.5	± 0.1
As mg/kg	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6
Inc.	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rb mg/kg	69.4	70.4	69.5	68.5	68.7	67.9	72.3	69.9	69.2	69.8	70	71.8	72.9	69.9
Inc.	± 2.9	± 1.9	± 0.8	± 1.8	± 0.4	± 0.6	± 0.3	± 1	± 1.7	± 0.1	± 1.8	± 1.4	± 1.5	± 1.3
Sr mg/kg	367	331	353	340.3	363.7	339.7	356	357	324.3	339	336.3	330	341.3	335.3
Inc.	± 1.7	± 1.7	± 1.7	± 1.5	± 1.2	± 1.5	± 1.7	± 2	± 1.2	± 2.6	± 0.6	± 2.6	± 1.2	± 0.6
Cs mg/kg	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80
Inc.	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ba mg/kg	539.7	568.3	419	510.7	452.3	496.3	466.3	471	475	501.3	448.3	449.7	521.7	509.3
Inc.	± 11.7	± 11.9	± 23.6	± 13.2	± 17	± 11.5	± 11.6	± 10.8	± 4.4	± 3.5	± 14.7	± 9.9	± 23.4	± 4.9
Pb mg/kg	18.2	19.8	20.7	20.7	20.1	20.4	21	21.5	20.5	21.1	21.1	21.3	21.8	22.3
Inc.	± 0.4	± 1.1	± 0.8	± 1.6	± 1.6	± 0.9	± 3	± 1	± 0.6	± 2.2	± 1.4	± 0.2	± 1.4	± 1.3
Th mg/kg	9.6	10.8	< 9	10.4	10.5	10.8	10.7	10.9	< 9	11.5	10.8	< 9	< 9	10.8
Inc.	± 1.2	± 0.6	NA	± 0.4	± 0.9	± 0.2	± 0.3	± 0.3	NA	± 0.8	± 0.8	NA	NA	± 0.5
U mg/kg	12.2	< 12	< 12	< 12	13.8	12.4	< 12	14.9	< 12	12.5	12.9	< 12	< 12	12.5
Inc.	± 1.7	NA	NA	NA	± 1.2	± 0.4	NA	± 1.1	NA	± 0.5	± 1.6	NA	NA	± 0.2
Inc. = Incertidumbre, Sn= Suelo Temascalapa con planta Sn*= Suelo de planta blanco, Sn** = Suelo Temascalapa con planta y Cs; SMn° = Suelo Temascalapa (blanco); NA = No aplica.														

Fuente: Resultados proporcionados por el Laboratorio Nacional de Forense Nuclear (LANAFONU) del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

Tabla XII. Rangos de concentración de metales en las muestras de suelo

Metal	Rango de concentración (%)	Metal	Rango de concentración (mg/km)
Na	0.97 – 1.07	P	415.7 - 542.7
Mg	0.747 – 0.943	S	352 – 594.3
Al	9.17 – 9.797	Cl	77 – 138
Si	28.667 – 31.50	Ti	5386.7 – 5833.3
K	0.801 – 0.879	V	75.9 - 108.7
Ca	1.311 – 1.517	Cr	64.1 – 73
Fe	3.793 – 3.987	Mn	557 – 743.3
		Ni	39.7 – 44.1
		Cu	26.2 – 31.5
		Zn	85.1 – 91.7
		Ga	16.4 – 18.1
		As	< 6
		Rb	67.9 – 72.9
		Sr	324.3 – 367
		Cs	< 80
		Ba	419 – 568.8
		Pb	18.2 – 22.3
		Th	9 – 11.5
		U	12 – 14.9

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados proporcionados por el Laboratorio Nacional de Forense Nuclear del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

6.5.2 Parte aérea de *Echeveria elegans*

La absorción de metales del suelo en plantas se produce de forma pasiva con el flujo de masa del agua en las raíces, o a través del transporte activo que cruza la membrana plasmática de las células epidérmicas de la raíz. En condiciones normales de cultivo, las plantas pueden potencialmente acumular ciertos iones metálicos en un orden de magnitud mayor que el medio circundante (Kim, Kang, Johnson-Gree, & Lee, 2003).

En esta investigación, el cálculo de metales en la parte aérea (hoja – tallo), se realizó mediante la técnica de ICP-OES, bajo condiciones ambientales de 24 °C y 57% de humedad relativa, la incertidumbre se calculó por repetitividad, de acuerdo con la norma NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”. Este valor de incertidumbre corresponde a un factor de cobertura $k=2$, para dar un nivel de confianza de aproximadamente 95%. Para el caso de partes aéreas y raíces los metales que se calcularon fueron B, Cr, Cs, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn.

Los resultados (Tabla XIII) evidenciaron al Fe con los más altos valores; sin embargo, de acuerdo con la Tabla XIV se presenta una diferencia significativa entre los rangos de este metal, que van desde 5.52 a 839.3 mg/L; por otro lado, el Pb se sitúa con los más bajos rangos entre < 0.05 a 3.16; en cuanto a las muestras los mayores valores fueron P5 y P6, contrario de P1* (muestra blanco) que presento los más bajos.

Tabla XIII. Contenido de metales (mg/L) en parte aérea de Echeveria elegans.

Muestra	B	Inc	Cr	Inc	Cs	Inc	Cu	Inc	Fe	Inc	Mn	Inc	Ni	Inc	Pb	Inc	Zn	Inc
P1*	30.94	0.38	0.05	-	< 10	-	9.09	0.11	5.52	0.94	47.08	0.55	1.26	0.05	< 0.05	-	10.9	0.15
P2**	37.41	1.41	1.03	0.04	< 10	-	14.48	0.72	323.38	9.02	28.57	0.96	2.12	0.09	< 0.05	-	49.6	1.5
P3**	57.8	1.81	0.74	0.03	< 10	-	14.01	0.48	126.78	3.75	40.25	1.18	1.94	0.09	< 0.05	-	49.6	1.53
P4	30.68	1.18	0.76	0.04	< 10	-	11.02	0.05	270.3	9.8	33.15	1.25	1.37	0.09	1.02	0.16	53.38	2.07
P5	78.2	3.48	1.16	0.05	< 10	-	11.79	0.6	432.67	15.96	47.98	1.88	1.82	0.06	3.16	0.19	44.82	2.01
P6	46.69	2.09	0.86	0.04	< 10	-	16.17	0.85	301.78	10.5	62.31	2.25	2.19	0.07	< 0.05	-	47.95	1.87
P7	30.25	0.05	0.87	0.02	< 10	-	17.15	0.34	172.41	2.83	36.64	0.57	1.56	0.04	1.65	0.08	32.58	0.55
P8	22.74	0.04	1.72	0.04	< 10	-	11.35	0.04	839.3	3.3	52.34	0.07	2.04	0.07	< 0.05	-	40.3	0.07
P9	47.27	0.52	0.35	0.01	< 10	-	12.51	0.015	28.63	0.49	58.94	0.73	1.95	0.07	< 0.05	-	50.53	0.06
P10	22.16	0.62	0.94	0.02	< 10	-	13.1	0.48	243.87	5.63	56.67	1.46	1.64	0.06	< 0.05	-	46.01	0.07
P 11	40.4	0.24	1.03	0.01	< 10	-	7.52	0.05	344.26	2.8	63.04	0.5	1.82	0.07	< 0.05	-	33.71	0.23
P 12	32.3	0.15	0.58	0.02	< 10	-	6.11	0.06	273.12	1.52	41.83	0.22	1.45	0.06	< 0.05	0.16	30.87	0.015

Inc = Incertidumbre, Pn* = parte aérea blanco, Pn** = parte aérea con Cs.

Fuente: Resultados proporcionados por el Laboratorio Nacional de Forense Nuclear del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

Tabla XIV. Rangos de concentración de metales (mg/L) en parte aérea de Echeveria elegans.

Metal	Rango de concentración (mg/L)	Metal	Rango de concentración (mg/L)
B	22.16-78.2	Mn	28.57-63-04
Cr	0.05-1.72	Ni	1.26-2.19
Cs	<10	Pb	<0.05-3.16
Cu	6.11-16.17	Zn	10.9-53.38
Fe	5.52-839.04		

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados proporcionados por el Laboratorio Nacional de Forense Nuclear del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

6.5.3 Raíces de *Echeveria elegans*.

El cálculo de metales en las raíces se llevó a cabo bajo la misma técnica y condiciones ambientales que las partes aéreas.

De acuerdo con los resultados se puede observar (Tabla XV) que la muestra R4 presenta de las concentraciones más altas en los casos del B, Cu, Ni y Zn; por otro lado, en el caso de la muestra R12 se encuentran los valores más bajos de B, Cr, Cs y Pb; de igual forma, en R6 se observó al Cs, Ni, Pb y Zn en sus estimaciones más bajas.

En cuanto a los rangos de concentración el más significativo según la Tabla XVI corresponde al Cs en donde el mínimo es <10 y el máximo corresponde a 24279 (mg/L). Es importante destacar esto en la presente investigación puesto que, en estos resultados se muestran datos positivos de Cs en las muestras R2**, R4, R10, así como su máximo valor anteriormente mencionado en la muestra R3**.

Para el caso de partes aéreas y raíces los metales que se calcularon fueron B, Cr, Cs, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn

Tabla XV. Contenido de metales (mg/L) en raíces de Echeveria elegans

Muestra	B	Inc	Cr	Inc	Cs	Inc	Cu	Inc	Fe	Inc	Mn	Inc	Ni	Inc	Pb	Inc	Zn	Inc
R1*	31.89	0.29	2.6	0.01	< 10	-	48.4	0.26	962.96	9.12	46.45	0.36	3.33	0.09	< 0.05	-	53.38	0.48
R2**	34.56	0.1	2.39	0.01	12467	146	25.71	0.2	1414.2	4.7	42.05	42.05	3.46	3.45	1.44	1.44	32.75	32.75
R3**	34.74	0.09	2.16	0.05	24279	111	29.65	0.15	752.87	1.68	20.74	0.05	3.26	0.18	0.9	0.36	40.75	0.07
R4	61.32	0.23	2.82	0.05	1960.2	152.2	79.43	0.29	835.61	1.75	31.95	0.1	4.96	0.35	< 0.05	-	100.78	0.35
R5	38.73	1	1.11	0.04	< 10	-	20.42	0.72	333.97	6.86	104.76	2.25	3.3	0.09	< 0.05	-	87.98	2.01
R6	29.99	0.25	1.41	0.05	< 10	-	46.76	0.23	783.1	8.07	28.88	0.28	2.18	0.08	< 0.05	-	25.57	0.27
R7	40.27	0.26	2.62	0.06	< 10	-	5.37	0.3	1323.25	5.99	42.13	0.14	3.61	0.14	< 0.05	-	36.8	0.11
R8	36.88	0.17	2.13	0.04	< 10	-	10.74	0.12	1125.4	3.9	43.15	0.17	3.13	0.09	< 0.05	-	60.98	0.14
R9	31.11	0.11	2.92	0.1	< 10	-	16.71	0.12	1369.4	4.7	42.42	0.2	3.48	0.13	< 0.05	-	71.69	0.17
R10	34.76	0.11	2	0.04	5673	153	31.2	0.04	685.46	2.29	33.21	0.09	3.47	0.03	< 0.05	-	27.97	0.1
R11	45.11	0.47	2.2	0.05	< 10	-	20.36	0.13	1180.84	2.79	41.81	0.11	4.29	0.29	< 0.05	-	38.43	0.15
R12	36.64	0.22	2.28	0.07	< 10	152.2	22.1	0.35	835.57	4.11	29.2	0.2	4.41	0.26	< 0.05	-	30.34	0.06

Inc = Incertidumbre, Rn*= raíz blanco, Rn**=raíz con Cs

Fuente: Resultados proporcionados por el Laboratorio Nacional de Forense Nuclear del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

Tabla XVI. Rangos de concentración de metales (mg/L) en raíces de Echeveria elegans.

Metal	Rango de concentración (mg/L)	Metal	Rango de concentración (mg/L)
B	29.99-61.31	Mn	20.74-104.76
Cr	1.11-2.92	Ni	2.18-4.96
Cs	<10-24279	Pb	<0.05-1.44
Cu	5.37-79.43	Zn	25.57-100.78
Fe	333.97-1369.4		

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados proporcionados por el Laboratorio Nacional de Forense Nuclear del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

6.6 Métodos estadísticos

Para los siguientes análisis se realizó una homogenización de datos (Cr, Cs, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) en unidades mg/kg. Para este procedimiento se utilizó la fórmula (4).

$$C = (Ci) * \left(\frac{V}{Pm}\right) \quad (4)$$

Donde:

C= Concentración de mg/kg; Ci= Concentración en mg/L (Lectura en la curva e calibración); Pm= Peso de muestra (kg); V= volumen de aforo(L).

Para el tratamiento estadístico de los resultados se realizó estadística descriptiva y posteriormente pruebas de normalidad para verificar la distribución de las variables, otras pruebas paramétricas han incluido correlaciones de Pearson, y análisis de la varianza.

Normalidad de las variables

La ley normal está caracterizada por dos parámetros: la media m y la varianza 2 de la variable aleatoria. La prueba de normalidad según Kolmogorov, mucho más potente que la de x^2 , verifica la hipótesis de normalidad de una variable cuantitativa continua en una población a partir de una muestra (Deménech, 1977; Duran C., 2010).

Correlación

El estudio de correlaciones permite establecer posibles relaciones entre los diferentes parámetros cuantitativos estudiados. El modelo de la correlación supone que la correlación conjunta de las variables x e y sigue una ley normal bivariante (Duran C., 2010).

Correlación lineal de Pearson

El coeficiente de correlación lineal de Pearson (r_{xy}) es el índice del grado con que una recta se ajusta a la nube de puntos del fenómeno. Se debe aplicar cuando las dos variables x e y son aleatorias y normales (Deménech, 1977).

Regresión lineal múltiple

La regresión lineal múltiple se utilizó en los casos en los que era necesario efectuar predicciones de una variable dependiente asociada a más de una variable independiente

6.6.1 Suelo

Para el caso del suelo se realizó la conversión de a unidades mg/kg, obteniendo los resultados de la Tabla XVII., en la cual se observa que la muestra S1* tiene los contenidos de metales más bajos en el caso del Mn y Pb, al igual que S11 en Ni y Zn. Por otro lado, en la muestra S2** se observaron dos de las concentraciones más altas en Cu y Mn, igualmente en S11 la cual mostró a Cr y Zn en sus contenidos más altos.

Tabla XVII. Concentración de metales en suelo mg/kg

Muestra de suelos	Cr	Cs	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
S1*	69.6	80	26.9	1161	557	40.7	18.2	86.4
S2**	66.9	80	31.5	1164.9	643.3	41.5	19.8	89.3
S3**	70.3	80	27.3	1175.1	618.3	40.6	20.7	89.4
S4	69.7	80	27.2	1155	607.7	44.1	20.7	88.4
S5	71.4	80	27.2	1182	563.7	43.5	20.1	88.4
S6	67.7	80	26.9	1154.1	598.7	42.5	20.4	87.2
S7	67.5	80	27.4	1185.9	585.3	42.1	21	89.2
S8	70	80	26.2	1196.1	611	43.3	21.5	87.6
S9	64.9	80	27.6	1137.9	576	40.8	20.5	85.4
S10	64.1	80	28.1	1161.9	557.7	40.5	21.1	88.3
S11	67.7	80	28.9	1178.1	587	39.7	21.1	85.1
S12	69.7	80	28.4	1161	602.7	42.5	21.3	86.4
SM1	73	80	29.2	1170	594.3	42.7	21.8	91.7
SM2	67.7	80	28.9	1179	581	41.9	22.3	88.2

Sn= Suelo Temascalapa con planta Sn*= Suelo de planta blanco, Sn** = Suelo Temascalapa con planta y Cs; SMn° = Suelo Temascalapa (blanco); NA = No aplica.

En ninguno de los casos se mostraron diferencias significativas de cantidad de concentración de metales con respecto a las muestras; no obstante, el Pb y Cu son los metales presentes en menor cantidad.

6.6.2 Parte aérea

Conforme con los resultados de las partes aéreas en unidades mg/kg (Tabla XVIII), la muestra P1* tiene los contenidos de metales más bajos en Cr, Fe, Ni, Pb y Zn. En el caso de la muestra P8 se observaron dos de las concentraciones más altas en Cr y Fe, igualmente en P11 que mostro al Cs y Mn en sus cantidades más altas.

Tabla XVIII. Concentración de metales (mg/kg) en parte aérea de *Echeveria elegans*

Muestra parte aérea	Cr	Cs	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
P1*	1.0	252.5	180.3	109.5	2334.9	25.0	1.0	216.2
P2**	20.5	316.5	288.6	6444.4	1423.4	42.2	1.0	860.5
P3**	14.8	284.1	279.9	2533.1	2010.5	38.8	1.0	991.0
P4	15.0	185.2	217.8	5341.9	1637.8	27.1	20.2	1054.9
P5	23.2	160.3	235.7	8649.9	2398.0	36.4	63.2	896.0
P6	17.1	159.2	321.2	5994.8	3094.5	43.5	1.0	952.5
P7	17.4	186.6	342.4	3442.0	1828.7	31.1	32.9	650.4
P8	34.1	280.9	224.8	16626.4	2542.6	40.4	1.0	798.3
P9	7.0	245.1	249.5	571.0	2938.8	38.9	1.0	1007.8
P10	18.6	174.8	259.8	4836.8	2909.1	32.5	1.0	912.5
P11	20.5	352.1	149.9	6860.5	3140.7	36.3	1.0	671.8
P12	11.5	312.5	121.1	5412.6	2072.4	28.7	1.0	611.8

Pn*= parte aérea blanco, Pn**=parte aérea con Cs.

Las concentraciones de metales en la parte aérea de la *Echeveria elegans*, no mostraron diferencias significativas, a excepción del Fe que en la muestra P8 tuvo una máxima concentración de 16626.4 mg/kg y en P9 una mínima de 109.5 mg/kg; superando 151.8 veces la cantidad máxima de la mínima. Por el contrario, el Ni, presenta la menor variedad en rango de cantidades que van desde 25.0 a 43.5 mg/kg; superando únicamente 1.7 veces el máximo del mínimo.

6.6.3 Raíces

Los resultados de la concentración de metales (mg/kg) en las raíces de la *Echeveria elegans* se presentan en la Tabla XIX. En esta se observa que la muestra R5 tiene los contenidos de metales más bajos en Cs, Fe, Ni y Pb. En el caso de la muestra R4 se observaron las concentraciones más altas en Cr, Cu y Zn.

El Cs se encontró en las muestras R2**, R3**, R4 y R10, sin embargo, en las demás muestras su concentración fue por debajo del límite de detección del equipo.

Tabla XIX. Contenido de metales (mg/kg) en la raíz de la *Echeveria elegans*.

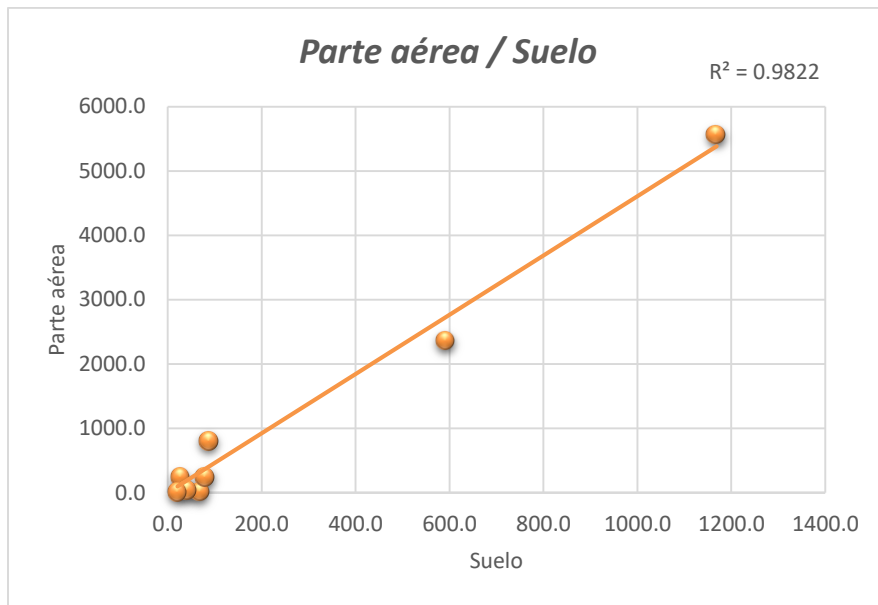
Muestra Raíz	Cr	Cs	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
R1*	341.7	0.0	2544.7	50628.8	2442.2	437.7	2.6	2806.5
R2**	592.8	123.0	2550.6	140297.6	4171.6	858.1	142.9	3249.0
R3**	673.3	302.0	3697.0	93874.1	2586.0	1016.2	112.2	5081.0
R4	876.9	243.0	9879.4	103931.6	3973.9	1542.3	6.2	12534.8
R5	77.0	0.0	566.3	9261.5	2905.2	228.8	1.4	2439.8
R6	152.3	0.0	2019.9	33827.2	1247.5	235.4	2.2	1104.5
R7	444.4	0.0	364.3	89772.7	2858.2	612.3	3.4	2496.6
R8	373.2	0.0	752.6	78864.8	3023.8	548.4	3.5	4273.3
R9	283.4	0.0	648.7	53159.9	1646.7	337.7	1.9	2783.0
R10	394.6	447.0	2462.5	54101.0	2621.2	684.7	3.9	2207.6
R11	767.1	0.0	2839.6	164691.8	5831.2	1495.8	7.0	5359.8
R12	18.5	0.0	3269.2	123605.0	4319.5	1630.9	7.4	4488.2
Rn*= raíz blanco, Rn**=raíz con Cs								

Al igual que en las muestras de suelo y partes aéreas, el Fe es el metal con mayor concentración en las raíces, las cuales van de 9261.5 a 164691.8 mg/kg. Caso contrario, el Pb tuvo la concentración más baja desde 1.4 a 142.9 mg/kg. No obstante, el Cs fue el único metal que mostró concentraciones por debajo del límite de detección del equipo. Por otro lado, el Mn fue el metal con mayor regularidad de concentración entre muestras, con un rango desde 1247.5 a 4319.5 mg/kg., superando solo 3.4 veces la cantidad mayor de la menor.

6.6.4 Relación planta con respecto al suelo

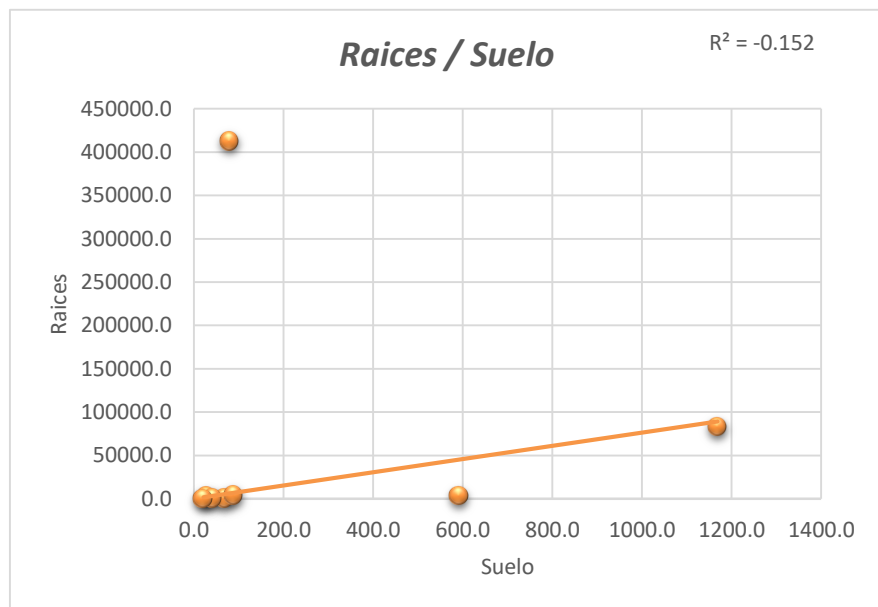
Existe una relación directamente proporcional entre el contenido total de metales pesados presentes en el suelo, con respecto a la concentración encontradas en las partes aéreas y raíces de *Echeveria elegans*, con una correlación de Pearson de $r=0.991436$ (gráfica 4) y $r=0.000193$ (gráfica 5) respectivamente.

De igual manera, se observa una correlación significativa ($p > 0.5$) entre las concentraciones de metales en las partes aéreas y el contenido total del suelo.



Gráfica 4. Relación entre contenido de Zn, Mn, Fe, Cu, Cs, Pb, Ni y Cr, en el suelo con relación al contenido de metales absorbidos por la parte aérea de *Echeveria elegans* (mg/kg) (n= 16).

En el caso de las raíces, se observa que no existe correlación ($p < 0.5$), entre la concentración de metales en las raíces y el suelo.



Gráfica 5. Relación entre contenido de Zn, Mn, Fe, Cu, Cs, Pb, Ni y Cr, en el suelo con relación al contenido de metales absorbidos por la raíz de *Echeveria elegans* (mg/kg) (n= 16).

6.6.5. Diferencias de concentración entre suelo, raíz y parte aérea

En esta investigación las plantas han acumulado un mayor contenido de metales en la raíz en todos los casos, a excepción del Cs, que en algunas raíces presentó valores iguales que 0 mg/kg (figura 17).

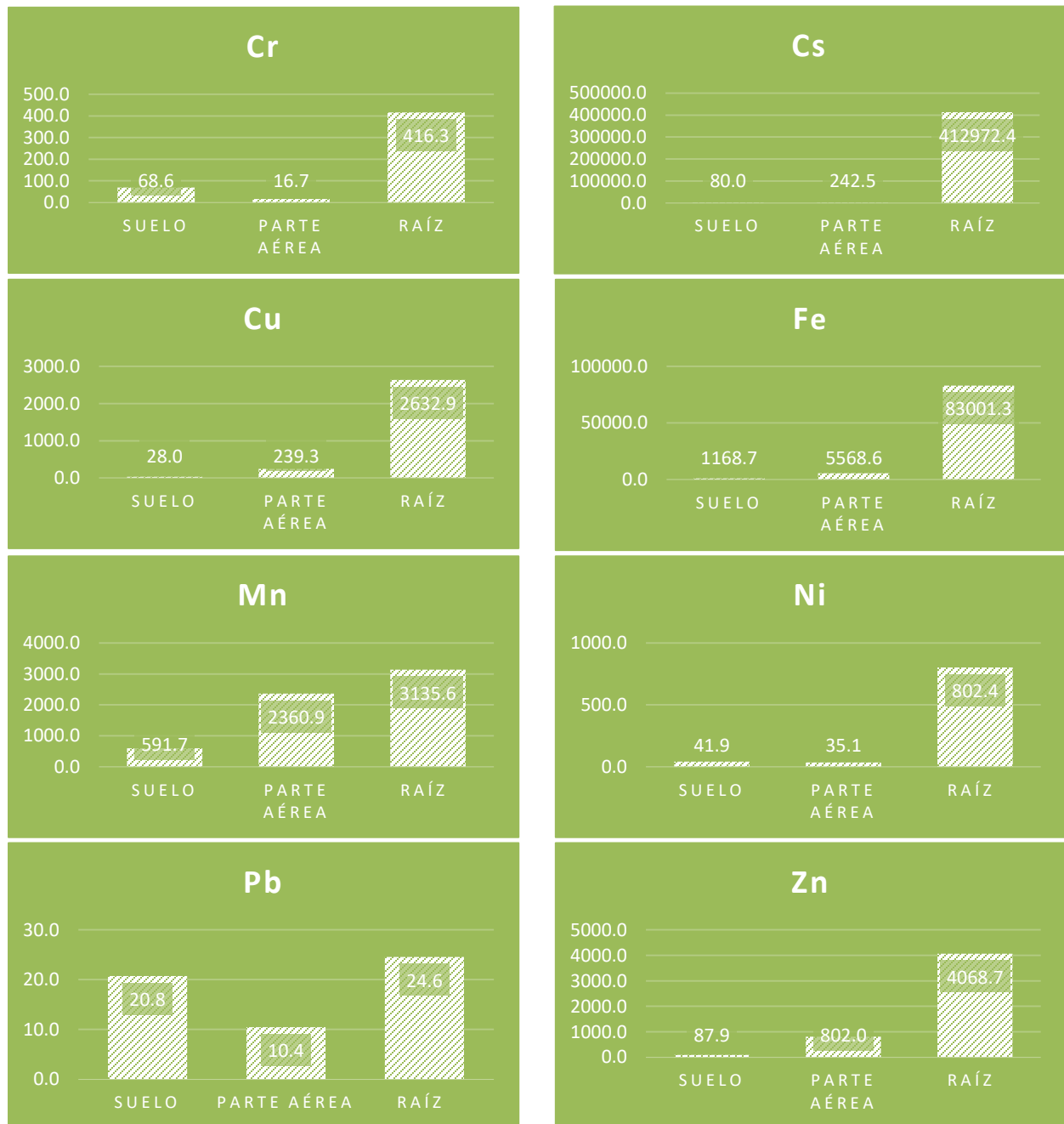


Figura 17. Media (n=12) (mg/kg) del contenido de Cr, Cs, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en *Echeveria elegans*, cultivadas en suelo procedente del municipio de Temascalapa, Estado de México

6.7 Factor de Bioacumulación (RAF), Factor de Bioconcentración (SAF) y Factor de Translocación (FT).

El factor de bioacumulación en la raíz de la planta (RAF), factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF) y factor de translocación (FT) se calculó bajo las formulas:

$$RAF = \frac{C_{raiz}}{C_{suelo}} \quad (1)$$

$$SAF = \frac{C_{parte\ aérea}}{C_{suelo}} \quad (2)$$

$$TF = \frac{C_{parte\ aérea}}{C_{raiz}} \quad (3)$$

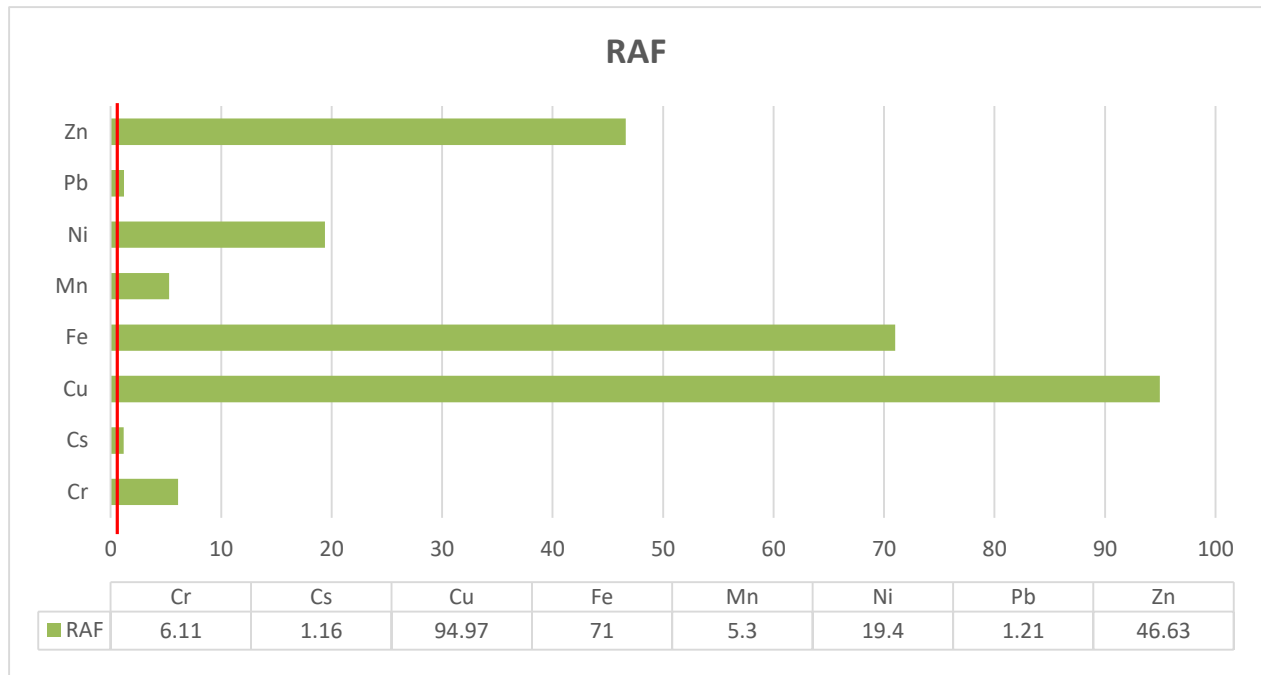
6.7.1 Factor de Bioacumulación en la raíz de la planta (RAF).

Los valores de RAF presentes en la Tabla XX, indican que las raíces de las plantas de *Echeveria elegans* en la mayoría de los casos tuvo un valor mayor que 1. En orden descendente de bioacumulación en los especímenes con respecto a la media, se tiene el: Cu>Fe>Zn>Ni>Cr>Mn>Pb>Cs.

Tabla XX. Factor de Bioacumulación en la raíz de la planta (RAF) en *Echeveria elegans*.

RAF	Cr	Cs	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
RAF1*	4.90	0.00	93.55	43.83	4.02	9.93	0.13	31.75
RAF2**	8.86	1.54	80.97	120.44	6.48	20.68	7.22	36.38
RAF3**	9.58	3.78	135.42	79.89	4.18	25.03	5.42	56.83
RAF4	12.60	3.04	367.26	89.52	7.13	37.89	0.34	145.08
RAF5	1.08	0.00	20.82	7.84	5.15	5.26	0.07	27.60
RAF6	2.25	0.00	75.09	29.31	2.08	5.54	0.11	12.67
RAF7	6.58	0.00	13.30	75.70	4.88	14.54	0.16	27.99
RAF8	5.33	0.00	28.73	65.93	4.95	12.66	0.16	48.78
RAF9	4.37	0.00	23.50	46.72	2.86	8.28	0.09	32.59
RAF10	6.16	5.59	87.63	46.56	4.70	16.91	0.19	25.00
RAF11	11.33	0.00	98.26	139.79	9.93	37.68	0.33	62.98
RAF12	0.27	0.00	115.11	106.46	7.17	38.37	0.35	51.95
Media	6.11	1.16	94.97	71.00	5.30	19.40	1.21	46.63
RAFn*= muestras blanco, RAFn**=muestras con Cs.								

Conforme a estos resultados se puede establecer que el $RAF > 1$, en todos los casos con respecto a la media (gráfica 6).



Gráfica 6. Factor de Bioacumulación en la raíz de la *Echeveria elegans* (RAF).

Recordando que:

- Si $RAF > 1$, la planta es potencialmente hiperacumuladora
- Si $RAF < 1$, la planta es exclusora.

La *Echeveria elegans*, al tener valores de $RAF > 1$, se evidencia como una planta potencialmente hiperacumuladora.

6.7.2 Factor de Bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF).

Los resultados del Factor de Bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF), mostrados en la Tabla XXI, indican que las partes aéreas de las *Echeveria elegans* en los casos de Cs, Cu, Fe, Mn y Zn tuvieron un valor mayor que 1 y en el caso de Cr, Ni y Pb sus valores fueron menores que 1

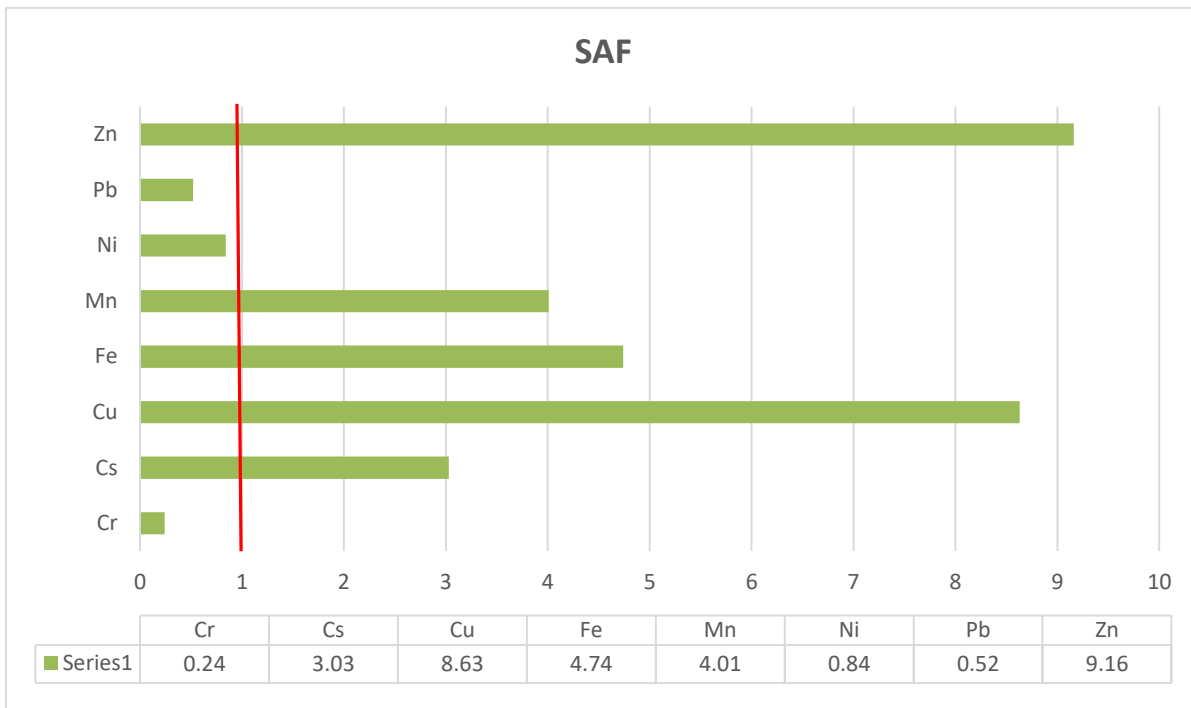
Tabla XXI. Factor de Bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF) en *Echeveria elegans*

SAF	Cr	Cs	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
SAF1*	0.01	3.16	6.63	0.09	3.84	0.57	0.05	2.45
SAF2**	0.31	3.96	9.16	5.53	2.21	1.02	0.05	9.64
SAF3**	0.21	3.55	10.25	2.16	3.25	0.95	0.05	11.09
SAF4	0.22	2.31	8.10	4.60	2.94	0.67	1.11	12.21
SAF5	0.32	2.00	8.67	7.32	4.25	0.84	3.14	10.14
SAF6	0.25	1.99	11.94	5.19	5.17	1.02	0.05	10.92
SAF7	0.26	2.33	12.50	2.90	3.12	0.74	1.57	7.29
SAF8	0.49	3.51	8.58	13.90	4.16	0.93	0.05	9.11
SAF9	0.11	3.06	9.04	0.50	5.10	0.95	0.05	11.80
SAF10	0.29	2.19	9.25	4.16	5.22	0.80	0.05	10.33
SAF11	0.30	4.40	5.19	5.82	5.35	0.91	0.05	7.89
SAF12	0.16	3.91	4.26	4.66	3.44	0.68	0.05	7.08
Media	0.24	3.03	8.63	4.74	4.01	0.84	0.52	9.16
SAFn*= muestras blanco, SAFn**=muestras con Cs.								

Recordando que:

- Si $SAF > 1$, la planta es potencialmente hiperacumuladora
- Si $SAF < 1$, la planta es exclusora.

Tal como se muestra en la gráfica 7, la *Echeveria elegans* tuvo valores de $SAF > 1$ en el Zn, Mn, Fe, Cu, Cs, por lo tanto, para estos casos actuó como una planta potencialmente hiperacumuladora. Así mismo obtuvo $SAF < 1$ para el Pb, Ni y Cr, actuando como exclusora.



Gráfica 7. Factor de Bioconcentración en la parte aérea de *Echeveria elegans* (SAF).

6.7.3 Factor de Translocación (FT)

De acuerdo con el Factor de Translocación (FT), que relaciona la acumulación de metales en la parte aérea con respecto a la raíz, las plantas de *E. elegans* tuvieron en su mayoría un valor FT inferior a 1 (Tabla XXII.), indicando una baja translocación de metales desde las raíces a la parte aérea; y, por lo tanto, la inmovilización de metales pesados en la zona radical. Sin embargo, en el caso de Pb la media presento un valor de TF superior a 1, lo cual refleja la translocación de ese metal a la parte aérea

Tabla XXII. Factor de Translocación (FT) en *Echeveria elegans*.

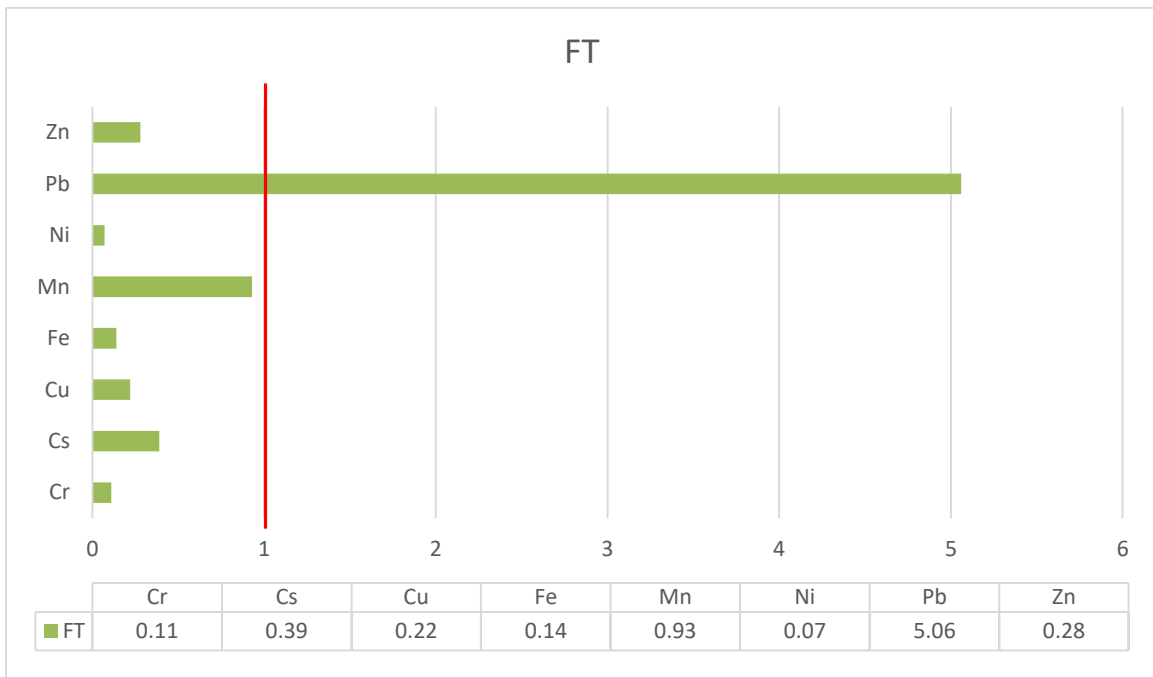
TF	Cr	Cs	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
TF1*	0.00	0.00	0.07	0.00	0.96	0.06	0.38	0.08
TF2**	0.03	2.57	0.11	0.05	0.34	0.05	0.01	0.26
TF3**	0.02	0.94	0.08	0.03	0.78	0.04	0.01	0.20
TF4	0.02	0.76	0.02	0.05	0.41	0.02	3.24	0.08
TF5	0.30	0.00	0.42	0.93	0.83	0.16	45.56	0.37
TF6	0.11	0.00	0.16	0.18	2.48	0.18	0.46	0.86
TF7	0.04	0.00	0.94	0.04	0.64	0.05	9.71	0.26
TF8	0.09	0.00	0.30	0.21	0.84	0.07	0.28	0.19
TF9	0.02	0.00	0.38	0.01	1.78	0.12	0.51	0.36
TF10	0.05	0.39	0.11	0.09	1.11	0.05	0.25	0.41
TF11	0.03	0.00	0.05	0.04	0.54	0.02	0.14	0.13
TF12	0.62	0.00	0.04	0.04	0.48	0.02	0.13	0.14
Media	0.11	0.39	0.22	0.14	0.93	0.07	5.06	0.28
TFn*= muestras blanco, TFn**= muestras con Cs.								

Recordando que:

Si $TF > 1$, significa que la planta traslada eficazmente los metales de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de hiperacumular metales en su parte aérea.

Si $TF < 1$, significa que la planta no traslada eficazmente los metales de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de fitoestabilizar metales en sus raíces.

En este caso la *Echeveria elegans* tuvo valores de $TF < 1$, en todos los casos con excepción de Pb (gráfica 8), lo cual representa que no tiene la capacidad de trasladar eficazmente los metales de la raíz a la parte aérea, por ende, su uso potencial es en la fitoestabilización. En el caso de Pb, se obtuvo evidencia que indica que la planta es potencialmente hiperacumuladora de este metal.



Gráfica 8. Factor de Translocación de Metales en *Echeveria elegans* (TF).

De acuerdo con los resultados anteriores, se puede señalar que la mayor presencia de metales afecta la capacidad de las plantas de transportar estos metales desde la raíz a la parte aérea.

En esta investigación la *E. elegans* acumulo significativamente más metales en la raíz que en la parte aérea, por lo que se ha ubicado dentro de la categoría de plantas acumuladoras. Sin embargo, no cumple con las 3 características para ser catalogada como hiperacumuladora. Por el contrario, se muestra apta para aplicar la técnica de fitoestabilización en suelos con presencia de Cr, Cs, Cu, Fe, Mn, Ni y Zn.

CAPÍTULO 7

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones referentes a todo lo expuesto en esta investigación.

A la vista de todo lo expuesto en esta investigación, según los resultados se puede concluir que:

El suelo utilizado en esta investigación contiene los siguientes metales: Fe>Mn>Zn>Cr>Ni>Cu>Pb, de los cuales el Cr (62.1-73 mg/kg) y Pb (18.2-22.3 mg/kg) se encuentran por arriba de los valores considerados como típicos (40 y 20 mg/kg). Esta concentración de Pb podría estar relacionada con la presencia de plomo radiogénico secundario de los pequeños restos de jales mineros que permanecen en el sitio aún después de ser retirados en la década de 1990.

Del estudio estadístico realizado al tamaño y peso de los especímenes de *E. elegans* se pudo determinar que no existen diferencias significativas entre los brotes y raíces de las plantas que estuvieron en contacto con Cs, respecto a aquellos que no lo estuvieron, esto sugiere que la *E. elegans* es aparentemente tolerante y/o resistente a los metales estudiados.

Con respecto a la determinación de los metales en los brotes y raíces de las plantas, fue posible establecer que los elementos que aumentaron su concentración en los brotes con respecto al suelo fueron Fe>Mn>Zn>Cu>Pb, la concentración de Ni y Cr fue inferior que en el suelo. Asimismo, el análisis comparativo realizado por análisis de Pearson mostró que si existe correlación estadísticamente significativa entre la concentración de los metales del suelo y los brotes ($r=0.99$). Por otro lado, se evidenció que la concentración de metales en las raíces (Fe>Zn>Mn>Cu>Ni>Cr) fueron mayores que a las observadas en el suelo y los brotes. En el caso de la concentración de Pb es menor a la observada en el suelo y brotes. El análisis comparativo entre los metales de la raíz, mostró que existen relaciones estadísticamente significativas entre la concentración de metales considerados esenciales: Cu y Zn, Fe y Mn, Fe y Ni y Mn y Ni.

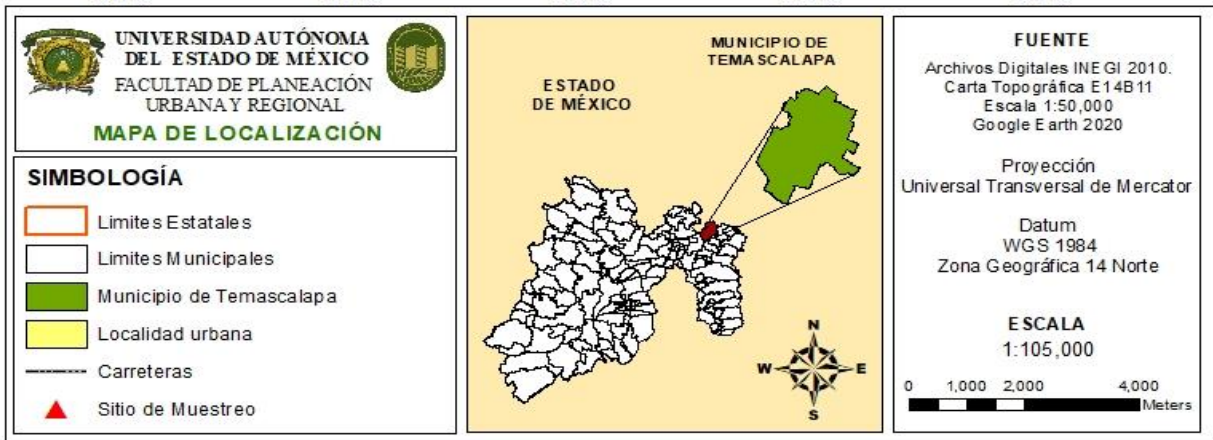
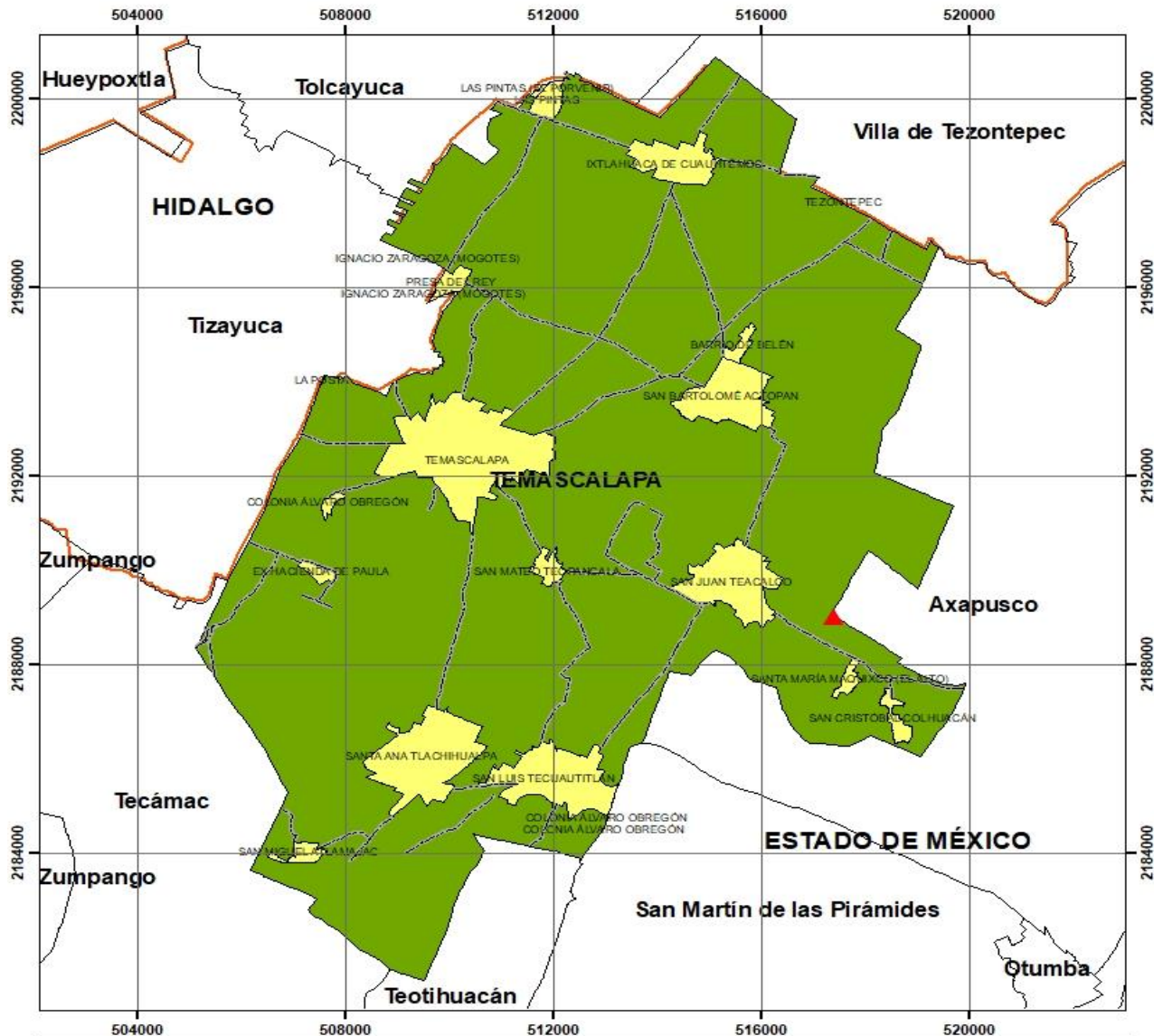
Los resultados del estudio de los Factores de Bioacumulación mostraron que los elementos con un RAF>1 fueron: Cu>Fe>Zn>Ni>Cr>Mn>Pb>Cs, donde el Pb y Cs presentaron valores similares (1.16 y 1.21). Quedó en evidencia que la *E. elagans* cuenta con el potencial de bioacumular Cr, Pb y Cs elementos de interés desde el punto de vista toxicológico y del monitoreo ambiental pasivo. Las plantas del genero *Echeveria* poseen un mecanismo de alta eficiencia en el uso del agua, que pudiera potencializar la acumulación de metales en las raíces. Asimismo, los metales que presentaron un SAF>1, fueron el Zn>Cu>Fe>Mn>Cs; SAF<1 estuvieron vinculados al Ni>Pb>Cr. Lo cual permiten establecer que la *E. elegans* acumula metales preferentemente en las raíces en un proceso de exclusión. El TF mostró valores <1, por lo cual, la *E. elegans* no tiene la capacidad de trasladar eficazmente los metales de la raíz a la parte aérea, sin embargo, el Pb con TF 5.06 es el elemento que se transfiere mejor de la raíz a la parte aérea. Lo cual permite establecer que la *E. elegans* tiene potencial de para ser aplicada en técnicas de fitoestabilización de metales en sus raíces.

De manera general la pregunta de investigación del presente trabajo se responde afirmativamente y la hipótesis se cumple, debido a que la *Echeveria elegans* demuestra que tiene la capacidad de bioacumular metales (RAF) como el Zn (46.63), Ni (19.4), Cr (6.11), Pb (1.21) y Cs (1.16), lo que sugiere que tiene las características para ser utilizado como biomonitor de la contaminación ambiental.

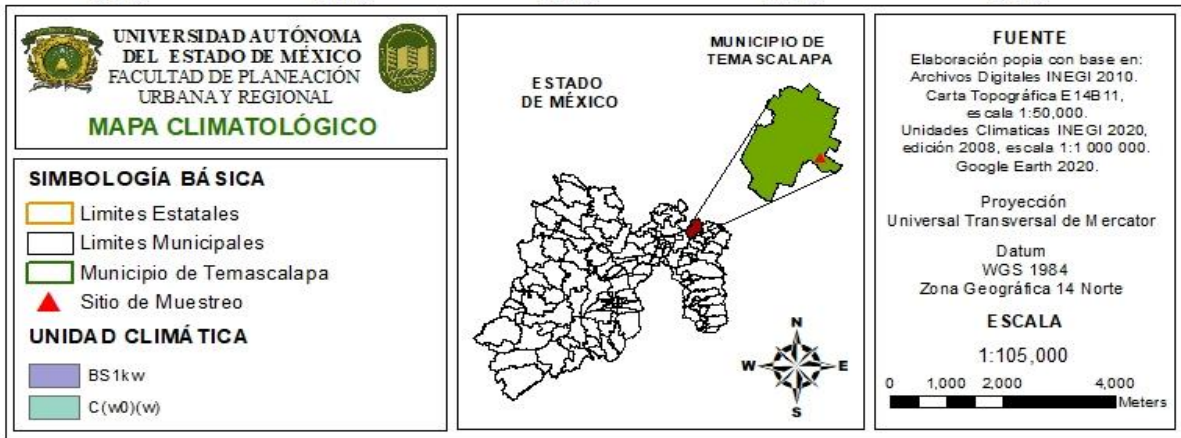
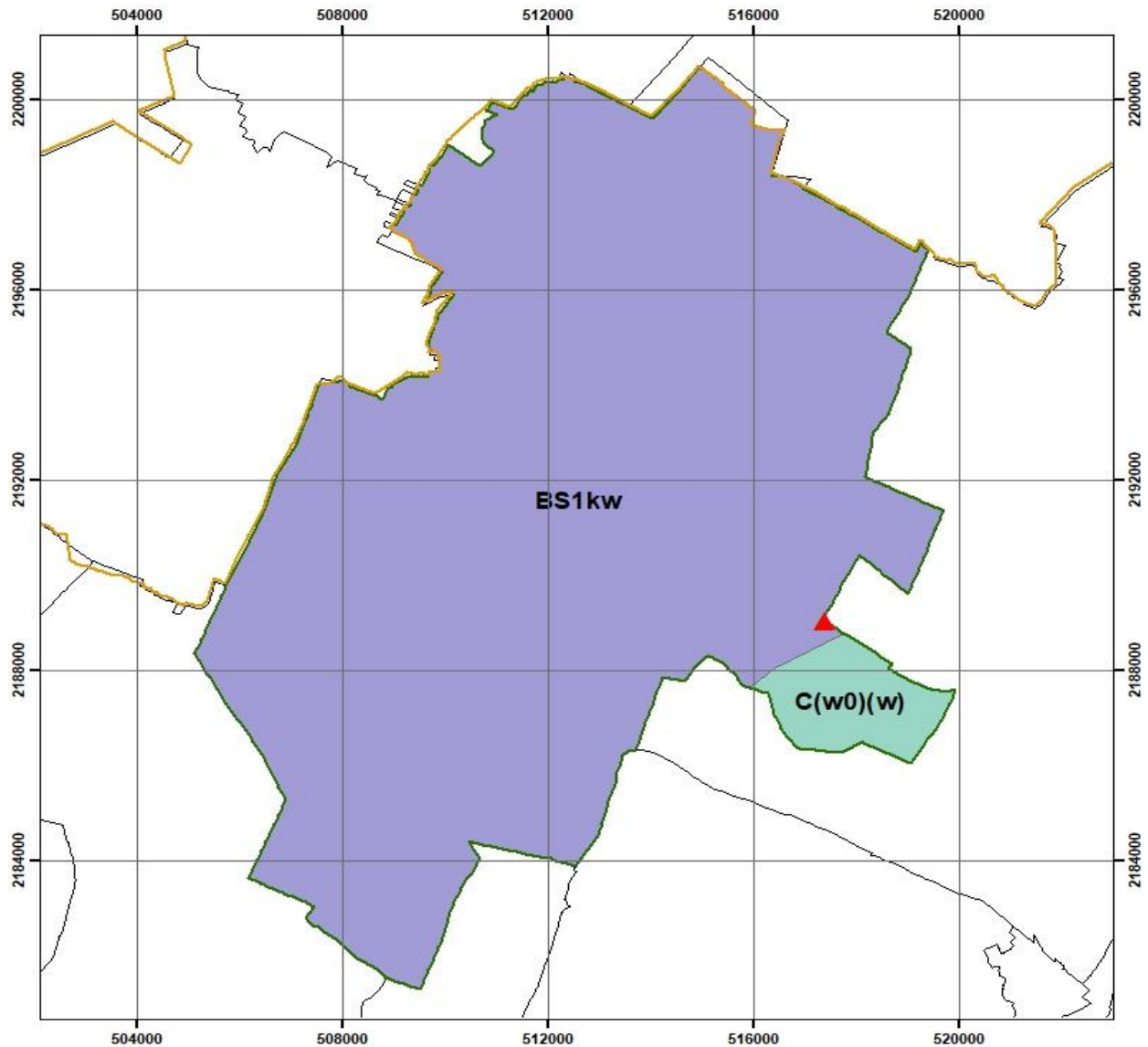
APÉNDICE A

Cartografía

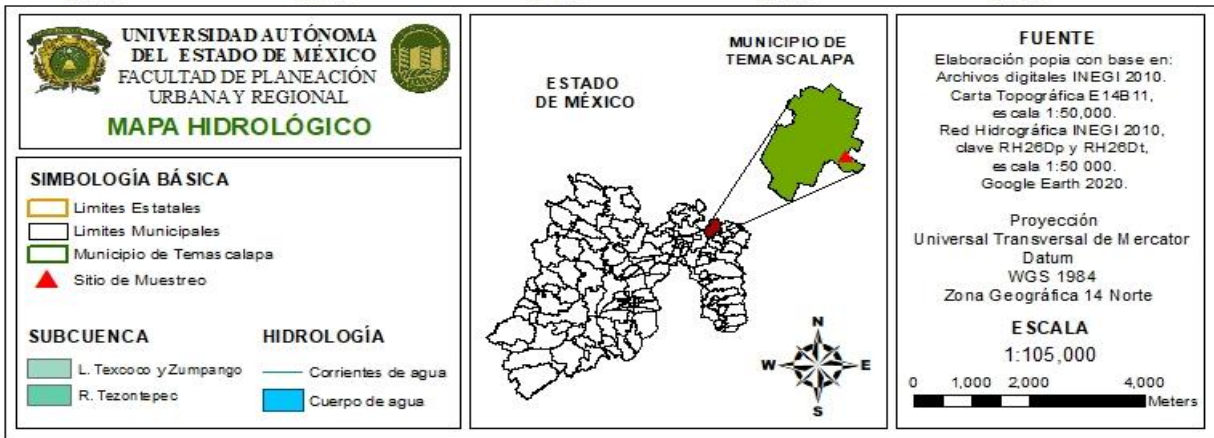
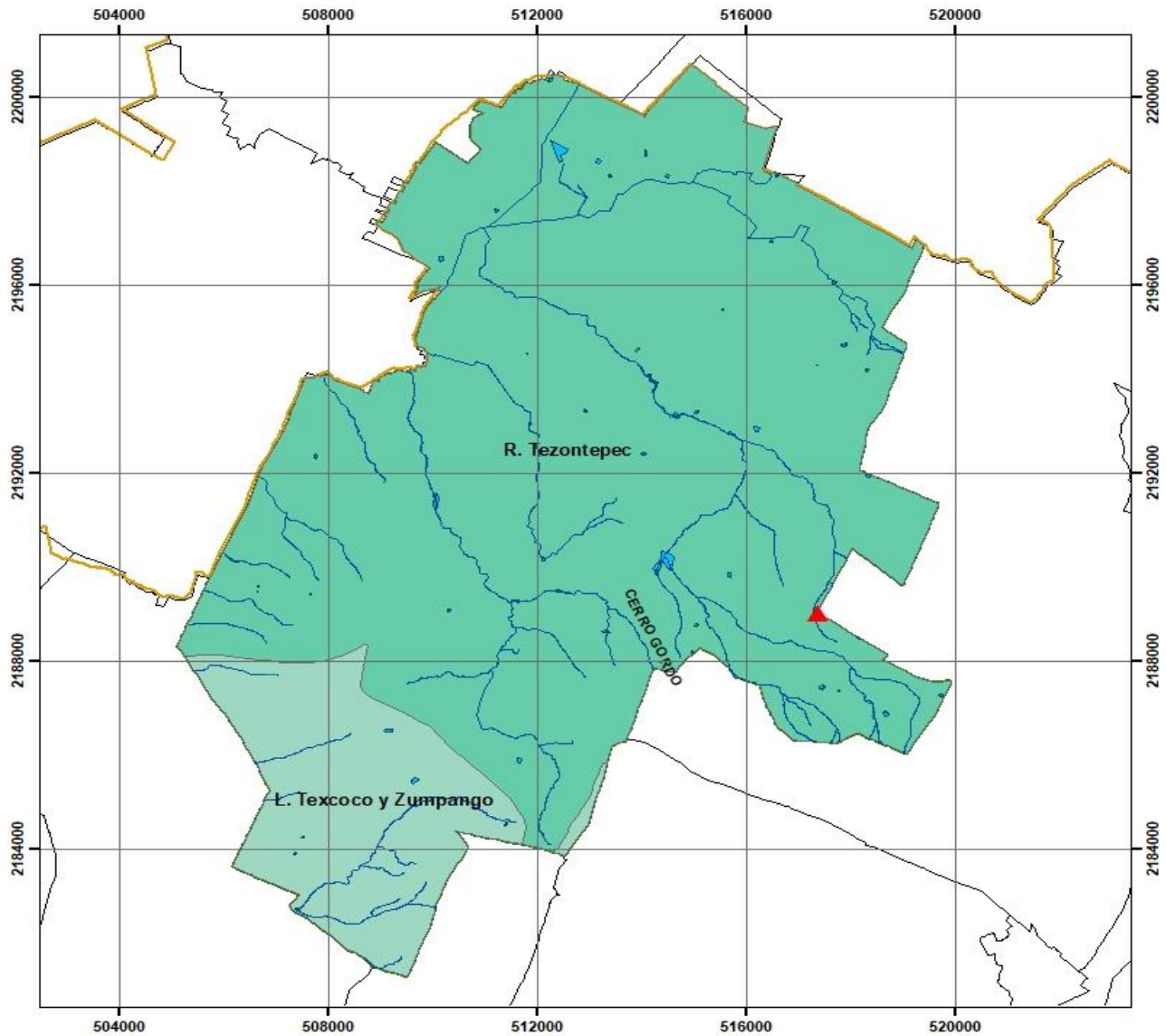
A.1 Mapa de localización de Temascalapa y sitio de muestreo



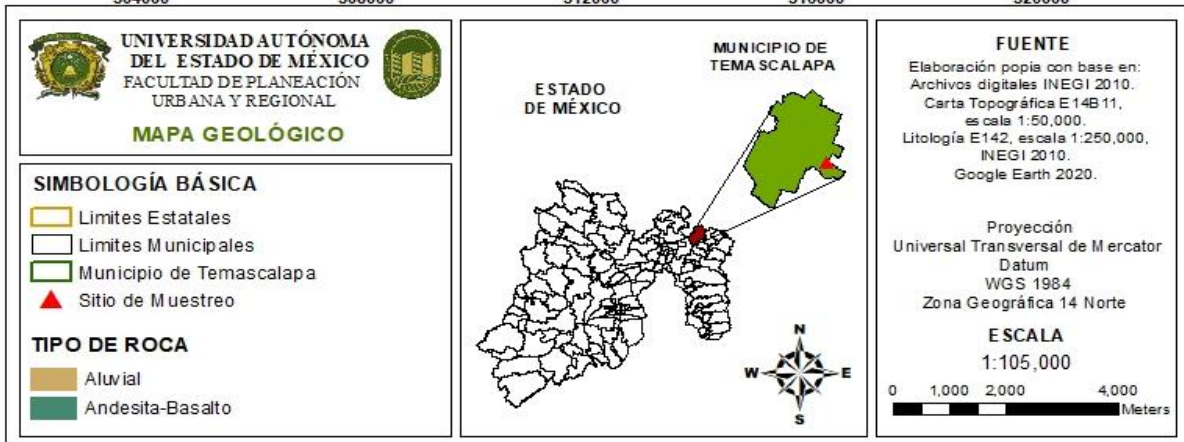
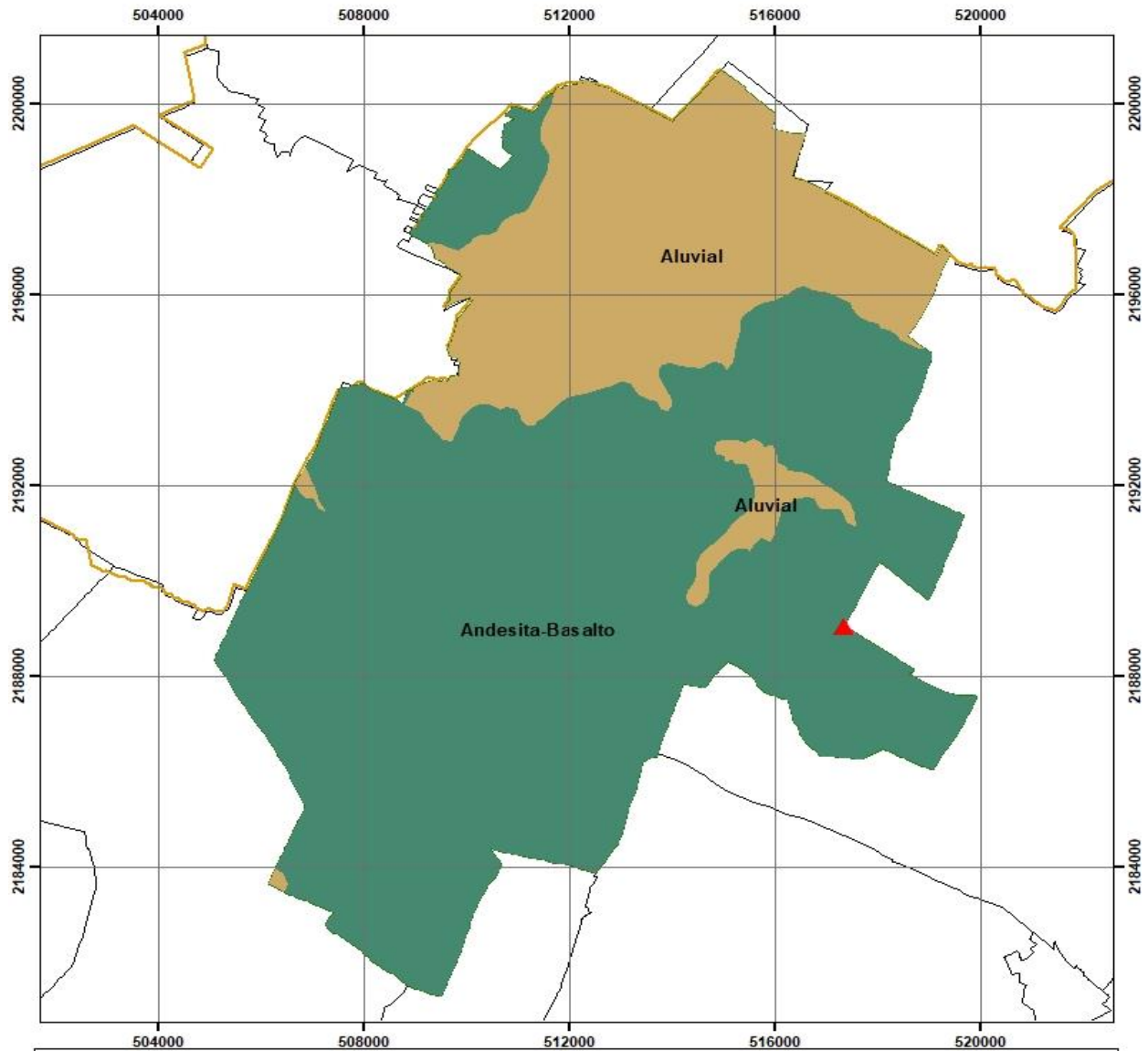
A.2 Mapa Climatológico de Temascalapa



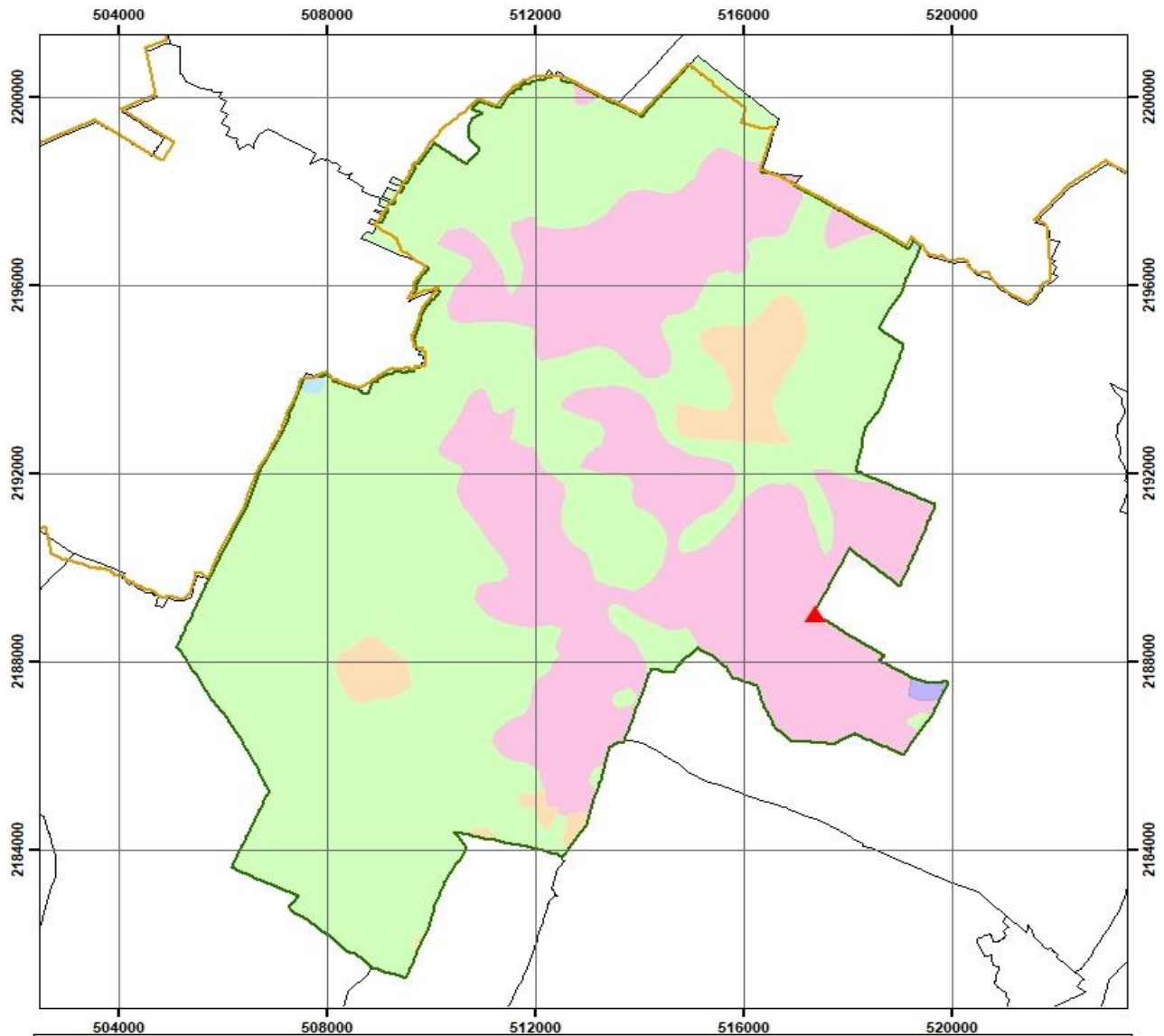
A.3 Mapa Hidrológico de Temascalapa





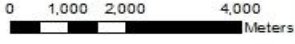











A.4 Mapa geológico de Temascalapa

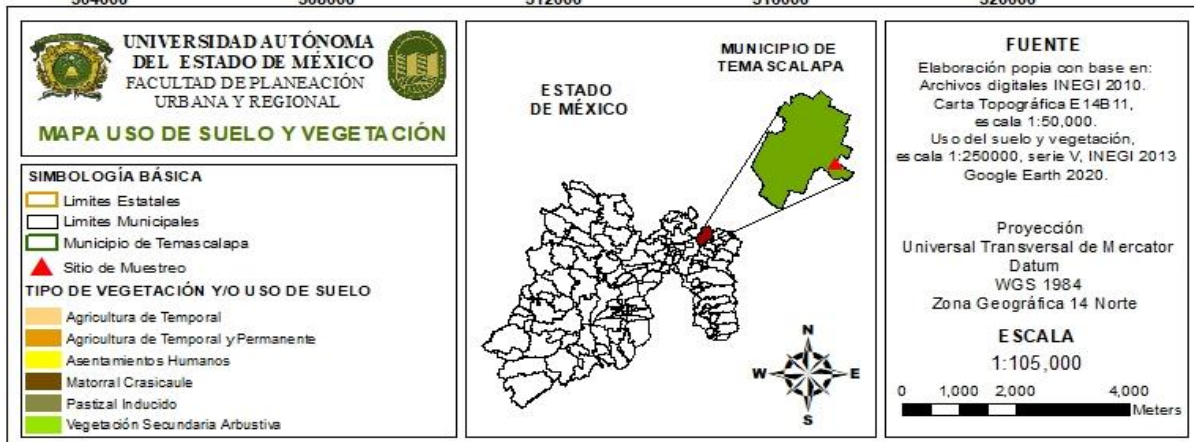
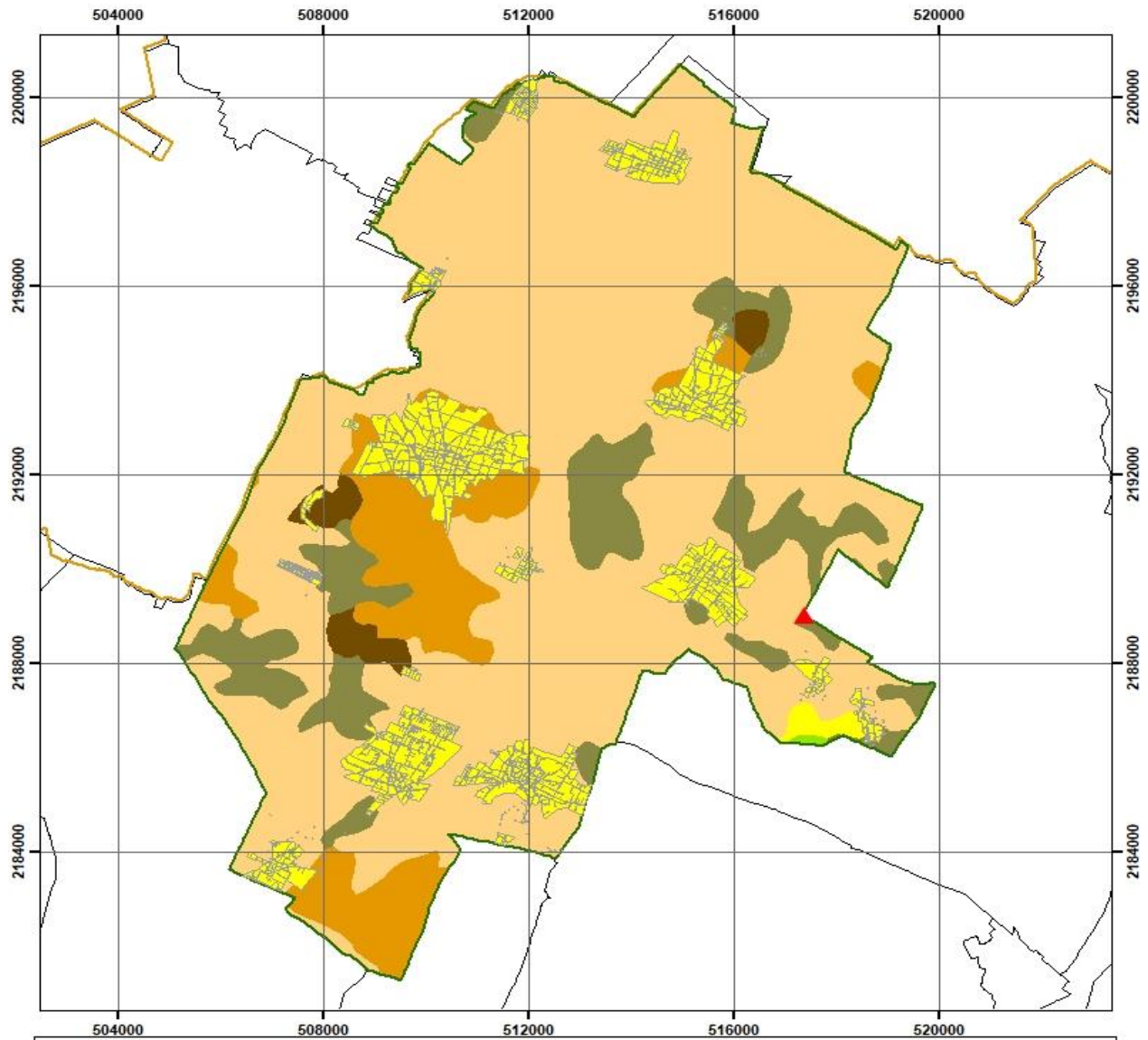


A. 5 Mapa Edafológico de Temascalapa



 <p>UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL</p>  <p>MAPA EDAFOLÓGICO</p>	<p>ESTADO DE MÉXICO</p> <p>MUNICIPIO DE TEMASCALAPA</p>  	<p>FUENTE</p> <p>Elaboración propia con base en: Archivos digitales INEGI 2010. Carta Topográfica E 14B 11, escala 1:50,000. Conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250000 Serie II INEGI 2014, SNIB. Google Earth 2020.</p> <p>Proyección Universal Transversal de Mercator Datum WGS 1984 Zona Geográfica 14 Norte</p> <p>ESCALA 1:105,000</p> 
<p>SIMBOLOGÍA BÁSICA</p> <ul style="list-style-type: none">  Límites Estatales  Límites Municipales  Municipio de Temascalapa  Sitio de Muestreo <p>TIPO DE SUELO</p> <ul style="list-style-type: none">  Cambisol Eutricto  Feozem Háplico  Litosol  Feozem Luvio  Vertisol Pelico 		

A.6 Mapa de Uso de Suelo de Temascalapa



Bibliografía

- Acosta, A. (10 de Diciembre de 2016). *Plantas Hiperacumuladoras de metales pesados*. Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de All you need is biology: <https://allyouneedisbiology.wordpress.com/2016/12/10/plantas-hiperacumuladoras-de-metales-pesados/>
- Adriano, D. (2001). *Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry bioavailability, and risks of heavy metals*. New York: Springer-Verlag.
- Agilent. (Junio de 2018). *User's Guide, Agilent 700 Series ICP Optical Emission Spectrometers*. California: Agilent Technologies, Inc. doi:<https://www.agilent.com/cs/library/usermanuals/public/2301.pdf>
- Alloway, B. (1995). *Heavy metals in soils. Second Edition*. London UK: Blackie and professional.
- Araruna, J., Portes, V., Soares, A., Silva, M., Sthel, M., Schramm, D., . . . Vargas, H. (2004). Oil spills debris clean up by thermal desorption. . *Journal of Hazardous Materials*, 110 (1-3): 161-171.
- ATSDR. (2004). *Resumen de salud pública Cesio CAS#: 7440-46-2*. Atlanta, E.U.: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Recuperado el 25 de Octubre de 2019, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs157.pdf
- Ávila P., P., Ortiz O., H. B., Zarazúa O., G., Tejada V., S., Villalva, A., & Sánchez M., R. (2019). Determining of risk areas due to exposure to heavy metals in the Toluca Valley using epiphytic mosses as a biomonitor,. *Environmental Management*, vol. 241, 138-148.
- Azpilicueta, C., Peña, L., & Gallego, S. (2010). Los metales y las plantas, entre la nutrición y la toxicidad. *La Ciencia*, 12-16.
- Becerril, J., Barrutia, O., García, P. J., Hernández, A., & Olano, J. y. (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas*, 50-55.
- Bernache P. , G. (2012). Riesgo de contaminación por disposición final de residuos. Un estudio de la región centro occidente de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28, 99-107.
- Bernal, M., Clemente, R., Vázquez, S., & Walker, D. (2007). Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Ecosistemas*, vol. 16, núm. 2,, 1-14.
- Burbuano O., H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas* , 117-124.

- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión . (12 de Diciembre de 2019). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Obtenido de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/cpeum.htm>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (19 de enero de 2018). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Recuperado el 25 de Octubre de 2019, de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_190118.pdf
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (10 de 11 de 2019). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Recuperado el 25 de Octubre de 2019, de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgeepa.htm>
- CAMSA. (10 de Enero de 2010). *Camsa, Planta de asfalto y urbanización*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de <http://www.camsamexico.com.mx/>
- Cañizares, V. R. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42:131-143.
- Cardona G., A. F., Cabañas V., D. D., & Zepeda P., A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 1-9.
- Castellanos, C. I., Velandia, C. J., González, C. M., Varela, M. D., & Ramirez, V. E. (2018). *Aplicaciones y generalidades de un espectrofotómetro de absorción atómica AA-700 de Shimadzu*. Bogotá: Universidad EAN.
- Cauwenberghe, L. V. (1997). *Electrokinetics*. Pittsburgh, PA: Ground-Water Remediation Technology Analysis Center.
- Chang, T., & Yen, J. (2006). On-site mercury-contaminated soils remediation by using thermal desorption technology. *Journal of Hazardous Materials.*, 128(2-3):208-17.
- Chen , L., Long, X. H., Zhang, Z. H., Zheng, X. T., Rengel, Z., & Liu, Z. P. (2011). Cadmium accumulation and translocation in two Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) cultivars. *Pedosphere*, 21:573–580.
- Cherian, S., & Oliveira, M. (2005). Plantas transgénicas en fitorremediación: avances recientes y nuevas posibilidades. *Ciencia y tecnología ambientales.*, 39, 9377-9390. Recuperado el 13 de Enero de 2020, de <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es051134l>
- Christodoulatos, C., & Koutsospyros, A. (1998). Bioslurry reactors. En G. Lewandowski, & L. DeFilippi, *Biological Treatment of Hazardous Wastes* (págs. 69-101). New York: John Wiley and Sons, Inc.

- Clemente , R., Walter, D., & Bernal, M. (2005). Uptake of heavy metals and As by Brassica juncea grown in a contaminated soil in Aznalcóllar (Spain): the effect of soil amendments. *Environmental Pollution*, 138: 46-58.
- Contreras P., L. A., Valencia C., C. M., De la Fuente S., N. M., Linaje T., M. S., & Trejo C., R. (2016). Estudio de absorción, acumulación y potencial para la remediación de suelo contaminado por níquel usando Ambrosia ambrosioides. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 244-250.
- Cortuelo M., L. M., & Marqués G., M. D. (1999). Los metales pesados en las aguas (I), su origen. Acción de agentes biológicos. *Ingeniería Química.*, 263-266.
- Covarrubias, S. A. (2016). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación . *Revista internacional de contaminación ambiental*, 7-21.
- Cubillos, A. (2011). *Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos*. Pereira: Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira.
- De la Cruz L., C. A., Ramos A., S. A., & López M., S. (2018). Efecto de la adición de ácidos orgánicos sobre la bioacumulación de Plomo, Talio y Vanadio en Chrysopogon zizanioides creciendo sobre suelos contaminados de un relleno sanitario. *Nova Scientia*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.21640/ns.v10i21.1582>
- De Lucio F., S. A., Otazo S., E. M., Romero B., L., & Gaytán O., J. C. (2020). Hongos macroscópicos como bioacumuladores de metales pesados. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 1-6.
- Delgadillo L., A., González R., C., Prieto G., F., Villagómez I., J., & Acevedo S., O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597-612. Recuperado el 28 de Septiembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es
- Deménech, J. (1977). *Bioestadística. Métodos estadísticos para investigadores*. . Barcelona: Editorial Herder.
- Diez L., F. J. (2008). *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- Duran C., A. (2010). *Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana*. Brcelona: Universidad de Barcelona.

- Ebss, S., Lau, I., Ahner, B., & Kochian, L. (2002). Phytochelatin synthesis is not responsible for Cd tolerance in the Zn/Cd hyperaccumulator. *Thlaspi caerulescenes* (J. & C. Presl). *Planta*, 214, 635-640.
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency. (2001). *Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report*. Office of Solid waste and Emergency Response.
- FAO. (n/d). Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de Capitulo 8. Legislación ambiental: <http://www.fao.org/3/x6372s09.htm#:~:text=8.1.1.&text=La%20primera%20ley%20de%20car%20C3%A1cter,Secretar%C3%ADa%20de%20Salubridad%20y%20Asistencia>.
- FCH (Fundación Chile). (2019). *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. Chile: FCH.
- Fergusson, J. (1990). *The heavy elements: Chemistry, environmental impact, and health effects*. Inglaterra: Oxford.
- Fernández B., A., Yarto R., M., & Castro D., J. (2004). *Las sustancias tóxicas persistentes*. Ciudad de México, México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.
- Ferré H., N., Schuhmacher, M., Llobet, J. M., & Domingo, J. L. (2007). Diseño de un software para evaluar los riesgos de la exposición ambiental a través del agua, suelos y aire. Metales pesados y salud. *Mapfre, seguridad y ambiente*, 50-58.
- Fischer, U. S. (1996). Environmental and numerical investigation of soil vapor extraction. *Water Resources Research*, 3413–3427.
- Förstner, U., & Wittmann, G. T. (1983). *Metal pollution in the aquatic environment*. New York: Springer-Verlag. 2da ed.
- FRTR. (1999). Biopiles. *Federal Remediation Technologies Roundtable*. 401 M Street, S. W., Washington, DC: USEPA. Recuperado el 08 de Noviembre de 2019, de http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_12.html.
- Gadd, G. (2009). Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology.*, 84, 13-28.
- Galal, T. M., & Shehata, H. S. (2015). Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological Indicators*, 244–251.
- Galán H., E., & Romero B., A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la sociedad española de minerología*, 48- 60.

- García M., A. J. (13 de Diciembre de 2003). *CONABIO*. Recuperado el 13 de Enero de 2020, de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/ise/fichasnom/Echeveriaelegans00.pdf>
- García, I., & Dorronso, C. (10 de 10 de 2017). *Edafología.net*. Recuperado el 11 de Septiembre de 2019, de <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/proced.htm>
- Garzón, J. M., Rodríguez M., J. P., & Hernández G., C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2):309-318.
- Ghosh, M., & Singh, S. (2005). A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of yto remediation of Heavy Metals and Utilization of. *Energy*, 6(04), 214-231 .
- Godeau, G., Laugier, J. P., Orange, F., & Godeau, R. (2017). A travel in the Echeveria genus wettability's world. *Applied Surface Science*, 411, 291–302. Recuperado el 05 de Mayo de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433217308735?via%3Dihub>
- González M., D., & Zapata P., O. (2008). Mecanismos de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 82, 53-61. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-21282008000100005&lng=es&tlng=es.
- Google Earth. (Septiembre de 2020). Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de <https://www.google.com/intl/es-419/earth/>
- Grasso, D. (1993). *Hazardous Waste Site Remediation, Source Control*. Lewis Publisher, Inc. Connecticut.
- Guerra C., F. A. (2014). *Bioacumulación de metales pesados en halófitas dominantes de maguey blanco, Valle del Mezquital, Ixmiquilpan, Hidalgo*. Mexico, D.F.: UNAM.
- Guevara Espinosa, M. D., Cruz Miranda, N., Rivera Morales, M. C., & Fuentes Ortiz , A. K. (2018). Fitorremediación de suelos contaminados con Mn y Cu a partir de Ocimum. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 76-89.
- He , H., Veneklaas , E., Kuo, J., & Lambers, H. (2014). Physiological and ecological significance of biomineralization in plants. . *Trends in Plant Science* , 19:3. 166 -174.
- Hejazi, R. F. (2002). *Oily sludge degradation study under arid conditions using a combination of landfarm and bioreactor technologies*. St. John's, Canada.: Faculty of Engineering and Applied Science. Memorial University of Newfoundland.
- Huertos, E. G., & Baena, A. R. (2008). Contaminación de suelos por Metales Pesados. *La sociedad española de mineralogía*, 48-69.

- INECC. (15 de Noviembre de 2007). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2020, de Semarnat: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html>
- INECC. (15 de Noviembre de 2007). *Intituto Nacional de Cambio Climático*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html>
- INEEC. (15 de Noviembre de 2007). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climatico*. Recuperado el 25 de Agosto de 2020, de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/fuentes.html>
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado el 01 de Enero de 2020, de Temascalapa, México Clave geoestadística 15084: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15084.pdf
- INEGI. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el Octubre de 26 de 2019, de Temas: <https://www.inegi.org.mx/default.html>
- INEGI, Encuesta Intercensal. (2015). *INEGI Panorama sociodemográfico del Estado de México*. Recuperado el 02 de Enero de 2020, de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/panorama/702825082246.pdf
- ININ. (2019). *Espectrómetro de Fluorescencia de rayos, Laboratorio Nacional de Investigaciones en Forense Nuclear*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de Gobierno de México: https://www.inin.gob.mx/mini_sitios/tercer_plano.cfm?cve_area=LABFON&codigo_opc=180005006
- ININ. (1 de Enero de 2019). *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de <https://www.gob.mx/inin/acciones-y-programas/centro-de-almacenamiento-de-desechos-radiactivos-cader>
- ININ. (Julio de 2020). *Laboratorio de espectrometría de masa (ICP-MS) Laboratorio Nacional de Investigaciones en Forense Nuclear*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2020, de http://www.inin.gob.mx/mini_sitios/tercer_plano.cfm?cve_area=LIFN&codigo_opc=170006001#:~:text=La%20Espectrometr%C3%ADa%20de%20Masas%20con,tipo%20de%20matrices%20en%20disoluci%C3%B3n.&text=En%20el%20interior%20del%20plasma,temperaturas%20de%20hasta%208000
- Jazo C., M. (2015). *Caracterización y manejo de suelo Vertisol (Aakalché) en el Instituto Tecnológico de la Zona Maya*. Juan Sarabía, Quintana Roo: ITZM.
- Jorgensen, S. E. (2016). *Ecotoxicology and Chemistry Applications in Environmental*. Denmark.: CRC Press. Copenhagen University, Denmark.

- Kalavrouziotis, I., Koukoulakis, P. H., Papanikolaou, C., & Sakellariou M., M. (2008). Effects of municipal reclaimed water on the macro-, micronutrients of soil and *Brassica oleracea* var. *Italica*, and *Brassica oleracea* var. *Gemmifera*. *Journal of agricultural water management*, 95:419-426.
- Kelly, C., Gaither, K. K., Baca S., A., & Cruickshank, B. J. (2000). Incorporation of Phytoremediation Strategies into the Introductory Chemistry Laboratory. *Chem Educator*, 5(3), 140-143. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=8345588&pid=S1870-0462201100020000200056&lng=es
- Khan, F. I. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, 95–122.
- Kim, I. S., Kang, H. K., Johnson-Gree, P., & Lee, E. J. (2003). Investigation of heavy metal accumulation in *Polygonum thunbergii* for phytoextraction. *Environmental Pollution*, 235-243. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00190-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00190-8)
- Kumar, S., Nair, P., Ganesan, K., Sinaga, M., Letha, N., & Gani, S. B. (2016). Preliminary phytochemical screening of different solvent extracts of leaves of *Echeveria elegans* Rose, an Endangered Mexican Succulent Herb. *Global Biosciences*, 5(1), 3429-3432. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/317645703_Preliminary_phytochemical_screening_of_different_solvent_extract_of_leaves_of_Echeveria_elegans_Rose_an_endangered_Mexican_succulent_herb
- León, V., Moreno, G. R., González, E., & Martínez, F. (2013). Interspecific comparison of polycyclic aromatic hydrocarbons and persistent organochlorines bioaccumulation in bivalves from a Mediterranean coastal lagoon. *Science of the Total Environment*, 463-464: 975-987.
- Li, L. C. (2004). Field trial of a new aeration system for enhancing biodegradation in a biopile. *Waste Management*, 24 (2): 127-137.
- Litter, M. I. (2008). Arsénico en la región iberoamericana. La Red Iberoasen y una posible solución económica de remoción para zona rurales aisladas. *Conferências Plenárias* (pág. 94). Buenos Aires, Argentina: CYTED.
- Lloyd, J., & Macaskie, L. (2000). Bioremediation of Radionuclide-Containing Wastewaters. En D. R. Lovley, *Environmental Microbe-Metal Interactions* (págs. 277-327). Washington: American Society for Microbiology.
- Lodoño, L. F., Lodoño, P. T., & Muñoz, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. Recuperado el 30 de Septiembre de 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>

- Macias G., J. (1993). Formulación y nomenclatura en química inorgánica. *COU. Badajoz 1° Ed.*, 224.
- Majid, N. M., Islam, M. M., Rauf, R. A., Ahmadpour, P., & Abdu, A. (2011). Assessment of heavy metal uptake and translocation in *Dyera costulata* for phytoremediation of cadmium contaminated soil. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil Plant Sci*, 62(3):245–250.
- Maragas S., N., & Morales D., M. A. (2010). *Estudios de Antropología e Historia: Arqueología y Patrimonio en el Estado de Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo: UAEH.
- Marrero C., J., Amores S., I., & Coto P., O. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento. *Redalyc*, 52-61.
- Martí, L., Filippini, M. F., Carlos, S., Drovandi, A., Troilo, S., & Valdés, S. (2011). Evaluación de metales pesados en suelos de los oasis irrigados de la Provincia de Mendoza: concentraciones totales de Zn, Pb, Cd y Cu. *Rev. Fac. Cienc. Agr.* 42(2), 203-221.
- Martínez G., M. R. (2020). *Análisis instrumental: Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mas, A., & Azcúe, J. (1993). *Metales en sistemas biológicos*. Barcelona: Promociones y Publicaciones Universitarias, S.A.
- Medina, K., & Montano, Y. (2014). *Determinación del factor de Bioconcentración y Traslocación de metales pesados en el Juncus arcticus willd. y Cortaderia rudiuscula Stapf. de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero alianza*. Huaraz, Ancash, Perú: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Meléndez P., C. O., & Camacho D., A. A. (2009). *Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X*. Chihuahua: Aventuras del Pensamiento.
- Melo, S. H. (2007). *E-Reding*. Recuperado el 24 de Diciembre de 2019, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20229/fichero/2.+Memoria+del+Proyecto%252F4.++Principales+m%C3%A9todos+de+descontaminaci%C3%B3n+de+suelos.pdf>
- Mentaberry, A. (2011). *Fitorremediación Exponencia de Agrobiotecnología*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Mico, C. (2005). *Estudio de metales pesados en suelos agrícolas con cultivos hortícolas de la provincia de Alicante*. España: Universidad de Valencia.
- Miretzky, P., Saralegui, A., & Fernández C, A. (2004). Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina). *Chemosphere*, 57, 997-1005. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=8345626&pid=S1870-0462201100020000200075&lng=es

- Mohn W., W., Radziminski, C. Z., Fortin M., C., & Reimer, K. J. (2001). On site bioremediation of hydrocarbon-contaminated Arctic tundra soils in inoculated biopiles. *Applied Microbiology and*, 57 (1-2): 242-247.
- Monroy A., A., & Vázquez B., B. (2014). Jardín xerófito para divulgación científica. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 17(2), 155-159. Recuperado el 20 de Julio de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2014000200006&lng=es&tlng=es.
- Navarro A., J., Aguilar A., I., & López, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16: 10-25.
- Newman, M. C. (2014). *Fundamentals of Ecotoxicology: The Science of Pollution*. New York.: Fourth Edition. CRC Press.
- Nobel, P. (1983). *Biophysical plant physiology and ecology*. New York, USA.: W. H. Freeman and Company.
- Nordberg, G. (2012). *Capítulo 63 Metales: propiedades químicas y toxicidad*. España: Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo.
- Nriagu, J. (1990). Global metal pollution. Poisoning the biosphere. *Environment*, 32: 7-33.
- Nriagu, J., & Pacyna, J. (1988). Quantitative assessment of World-wide contamination of air, water and soils with trace metals. *Nature*, 333: 134-139.
- Núñez L., R. A., Meas V., Y., Ortega B., R., & J.O., E. (2004). Fitorremediación Fundamentos y Aplicaciones. *Ciencia*, 69.
- OMS. (15 de Marzo de 2016). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de <https://www.who.int/es/news-room/detail/15-03-2016-an-estimated-12-6-million-deaths-each-year-are-attributable-to-unhealthy-environments>
- OMS. (2016). *Preventing Disease Through Healthy Environments*. Geneva, Switzerland: Vivien Stone.
- Ordoñez R., E., Ortíz O., H. B., Fernández V., F., & Granados C., F. (2014). Eu (III) sorption from an aqueous solution onto SrTiO₃ and surface complex behavior. *Chemical Engineering Journal*, Volume 254, 349-356. Recuperado el 08 de Noviembre de 2019, de <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.130>
- Ortiz B., I., Sanz G., J., Dorado V., M., & Villar F., S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. Alcalá, Madrid: Universidad de Alcalá, Dirección General de Universidades e Investigación.

- Ortiz O., H. B., & Flores E., R. M. (2019). Simultaneous removal of oil, total Co and ^{60}Co from radioactive liquid waste by dissolved air flotation. *International journal of Environmental Science and Technology*, 16(20), 3679-3686. Recuperado el 08 de Julio de 2020, de <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1984-4>
- Ortiz O., H. B., & Flores E., R. M. (2020). Design of a Mobile Dissolved Air Flotation System with High Rate for the Treatment of Liquid Radioactive Waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 144, 23-31. Retrieved Septiembre 25, 2020, from <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.016>
- Ortíz O., H. B., Flores E., R. M., Ordoñez R., E., & Fernández V., S. M. (2014). Synthesis of $\alpha\text{-Ti}(\text{HPO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ and sorption of Eu (III). *Chemical Engineering Journal*, Volume 236, 398-405. Recuperado el 12 de Mayo de 2020, de <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.103>.
- Ortiz O., H. B., Flores E., R. M., Ordoñez R., E., & Fernández V., S. M. (2017). Titanium Pyrophosphate for Removal of Trivalent Heavy Metals and Actinides Simulated by Retention of Europium. *The Scientific World Journal*, Article ID 2675897, 12 pages. Recuperado el 24 de Julio de 2020, de <https://doi.org/10.1155/2017/2675897>
- Ortíz O., H. B., Ordoñez R., E., & Fernández V., S. M. (2009). Sorption of uranium(VI) onto strontium titanate in KNO_3 medium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, volume 279, 601-610. Recuperado el 02 de Julio de 2020, de <https://doi.org/10.1007/s10967-007-7142-y>
- Padilla R., I. (2001). *Evaluación y desarrollo de metodologías para la determinación de elementos traza en aceros por ICP-MS*. Madrid: CENIM.
- Paillat, T. E. (2000). Electrokinetic phenomena in porous media applied to soil decontamination. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 693-704.
- Peña S., E., Madera P., C. A., Sánchez, J. M., & Medina V., J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: Caso Heliconia Psittacorum (Heliconiaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 469-479. Recuperado el 10 de Julio de 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a04.pdf>
- Perales A., L. (2019). *Evaluación in vitro de la susceptibilidad a metales pesados en plantas de zonas áridas*. Aguascalientes: EAA.
- Pérez, L., & Loli, E. (2019). *Cactus y suculentas*. Copenhague, Dinamarca: Yopublico.
- Perr, A., Baxter, R., Richards, L., Freeman, L., & Murphy, S. (2005). *Phytoremediation and hyperaccumulator plants in Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification*.
- Piña P., P., Valverde, T., & Reyes S., J. (2007). Propagación de la especie en peligro de extinción Echeveria laui con fines de conservación. *Cactáceas y suculentas mexicanas*, 52(2), 4-19.

- Piña, J., Merino, J., Errazu, A., & Bucalá, V. (2002). Thermal treatment of soils contaminated with gas oil: influence of soil composition and treatment temperature. *Journal of Hazardous Materials*, 94 (3): 273-290. .
- Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa . (2016). *Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa 2016-2018*. Toluca: Gobierno Municipal. Obtenido de ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2016/47/11/3179c8536ed979a30530e17d1811d47f.pdf
- Plaza, G. U. (2005). Respirometry for assessing the biodegradation of petroleum hydrocarbons. *Environmental Technology*, 26 (2): 161-169. .
- Prieto G., F., Prieto M., J., Callejas H., J., Román G., A. D., & Méndez M., M. A. (2010). Bioacumulación de arsénico en las etapas de desarrollo de la cebada maltera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 37-44. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v1n1/v1n1a4.pdf>
- Prieto M., J., González R., C. A., Román G., A. D., & Prieto G., F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003>
- Razmilic, B. (2017). *Espectroscopia de absorción atómica*. Merck química Chilena Soc. Ltda. Recuperado el 26 de Octubre de 2019, de FAO: <http://www.fao.org/3/ab482s/ab482s04.htm>
- Reyes G., C. E., Torres M., J. P., Ramírez H., B. C., Portillo, L., Pimienta B., E., & Torres M., M. I. (2018). Morphological changes of mexican native succulent plants in a vertical greenery system compared with pot conditions. *Horttechnology*, 28, 304-309. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <https://doi.org/10.21273/horttech03988-18>
- Reyes S., J., Islas L., M., González Z., O., Carrillo R., P., Vergara S., F., & Brachet I., C. P. (2011). *Echeveria, Manual de perfil diagnóstico del género Echeveria en México*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, Vol. 16 Nº 2, 66-77.
- Risoul, V., Renauld, V., Trouvé, G., & Gilot, P. (2002). A laboratory pilot study of thermal decontamination of soils polluted by PCBs. Comparison with thermogravimetric analysis. *Waste Management*, 22 (1): 61-72.
- Roca F., A. I. (2019). *Contaminación de Suelo por Metales Pesados*. Xunta de Galicia.: Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo. INGACAL.

- Rodríguez B., A. M., Martínez V., M., Martínez R., I., & Guzmán A., T. (2011). Desarrollo tecnológico, impacto sobre el medio ambiente y la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 49(2), 308-319. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032011000200016&lng=es&tlng=es
- Romero L., K. P. (2009). Contaminación por metaes pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*, 12(1), n/d. Recuperado el 26 de Octubre de 2019, de http://www.scielo.org.bo/pdf/rccm/v12n1/v12n1_a13.pdf
- Romero, F. M., & Gutiérrez R., M. (2008). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43-53. Recuperado el 1 de Mayo de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222010000100004&lng=es&nrm=iso
- Rueda S., G., Rodríguez V., J. A., & Madriñán M., R. (2011). Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. *Acta Agronómica*, 203-218. Recuperado el 25 de Mayo de 2020, de <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v60n3/v60n3a01.pdf>
- Sánchez G. D., V. (2015). *Tolerancia al estrés por cadmio y mercurio en Medicago spp: Análisis de los mecanismos implicados y potencial aplicación en fitorremediación*. Madrid: UAM.
- Sánchez I, R. (2008). *Capacidad de bioacumulación y resistencia a cadmio y zinc de las raíces pilosas de Arabidopsis halleri*. Ciudad de México: UNAM.
- Sánchez L., M. E. (2013). *Avances en espectrometría de masas con fuente de plasma: análisis simultáneo de elementos mayores y trazas mediante Q-ICP-MS y análisis de isótopos de Sm-Nd mediante HR-MC-ICP-MS. Aplicación en estudios geoquímicos*. País Vasco: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
- Sánchez, M. (2017). *JardineriaON*. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de <https://www.jardineriaon.com/echeveria-elegans.html#comment-52928>
- Sánchez, M. (17 de Octubre de 2018). *AB Internet: Jardineria On*. Recuperado el 08 de Noviembre de 2019, de Jardineria On: <https://www.jardineriaon.com/echeveria-elegans.html>
- Santiago D., M. C. (2011). *Caracterización química y fitorremediación de los jales mineros de El Fraile, de Taxco de Alarcón Gro México*. Acapulco, Guerrero: UAGro. Recuperado el 20 de Junio de 2020, de <http://ri.uagro.mx/handle/uagro/297>

- Schat, H., Llugany, M., Vooijs, R., Hartley W., J., & Bleeker, P. M. (2002). The role of phytochelatins in constitutive and adaptive heavy metal tolerances in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes. *Journal of Experimental Botany*, 53, 2381-2392.
- Secretaría de Economía. (13 de septiembre de 2016). *Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004*. Recuperado el 15 de Febrero de 2020, de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf
- Secretaría de Economía. (06 de marzo de 2017). *Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016*. Recuperado el 26 de Enero de 2020, de https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Varios/Leyes_y_Normas_SEMARNAT/NMX/Contaminaci%C3%B3n%20del%20Suelo/2.2006.pdf
- SEMARNAT. (2002 de Marzo de 2002). *DOF*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2020, de Diario Oficial de la Federación: <https://www.biodiversidad.gob.mx/pdf/NOM-059-ECOL-2001.pdf>
- SEMARNAT. (2013). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2012*. México: Semarnat.
- SGN (Servicio Geológico Nacional). (2017). *Técnicas químicas analíticas*. Ciudad de México: Gobierno de México.
- Silcox, G., Larsen, F., Owens, W., & Choroszy-Marshall, M. (1995). Kinetics of hydrocarbon and pesticide removal from clay soils during thermal treatment in a pilot-scale rotary kiln. *Waste Management*, 15 (5-6): 339-349. .
- Son, A. J. (2003). Chemical and ecotoxicity assessment of PAH-contaminated soils remediated by enhanced soil flushing. *Environmental Engineering Science*, 197-206.
- Suárez T., S., & Molina E., E. (2014). El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(3), 357-363. Recuperado el 11 de Enero de 2019, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032014000300008&lng=es&tlng=es
- Thangavel, P., & Subhram, C. (2004). "Phytoextraction - Role of hiper-acumuladores en suelos contaminados con metales". *IEEE Indian National Science Academy*, vol. 70, págs. 109-130.
- Torres R., D. (2003). *El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos*. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Ecosistemas. año 12, No 2, mayo-agosto.
- Tovar J., E., Figueroa C., A., & Sánchez, M. G. (2014). Criteria for selection of plant species for its deployment in thermally efficient architectural green roofs in the Metropolitan Area of Mexico City: methodological guidelines. *Energy Procedia*, 1798-1807. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.043>

- Trejo C., R., Pedroza S., A., & Reveles H., M. (2015). *Tópicos selectos de sustentabilidad: Un reto permanente*. Ciudad Juárez: UJED.
- UNED. (18 de julio de 2020). *Espectrometría de Fluorescencia de Rayos*. Recuperado el 18 de julio de 2020, de <https://www2.uned.es/cristamine/mineral/metodos/xrfs.htm>
- Universidad de Alicante. (2020). *Servicios Técnicos de Investigación*. Recuperado el 18 de Julio de 2020, de ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN POR PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis/espectroscopia-de-emision-por-plasma-de-acoplamiento-inductivo.html#:~:text=Aplicaciones,variedad%20de%20tipos%20de%20muestra.&text=Determi naci%C3%B3n%20de%20elementos%20t%C3%B3xicos%20e>
- Universidad de Burgos. (4 de Marzo de 2020). *Universidad de Burgos*. Recuperado el 11 de Junio de 2020, de Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS): <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms>
- USEPA. (1996). Composting. *Engineering Bulletin*. EPA/540/5-96/502.
- USEPA. (1998). Landfarming. *Office of the Underground Storage Tank*. US Environmental Protection Agency. Publication # EPA 510-B-95-007.
- Vanina L., L. (2019). *Comparación de dos métodos (ICP-OES vs. ICP-MS) para la determinación de arsénico en agua*. Mendoza, Argentina: Alex Stewart International Argentina S.A.
- Vega, N. B. (2017). *Metales Pesados en Suelos y sus Efectos Sobre la Salud*. Madrid: Universidad Complutense.
- Volke S. T, T., Velasco T., J. A., & De la Rosa P., D. A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología.
- Vullo, D. L. (2003). Microorganismos y metales pesados: Una interacción en beneficio del medio ambiente. *Química Viva*.
- Waisberg, M., Joseph, P., Hale , B., & Beyersmann. (2013). Molecular and celular mechanisms of cadmium carcinogenesis. *Toxicology*, 95 -117.
- Williams, R., Ziegenfuss, P., & Sisk, W. (1992). Composting of explosives and propellant contaminated soils under thermophilic and mesophilic conditions. . *Journal of Industrial Microbiology* , 9: 137-144. .
- Xiong C, Z. Y. (2013). Lotus roots accumulate heavy metals independently from soil in main production regions of China. . *Sci Horti* , 164:295–302.

Zafra M., C. A., Rodríguez C., L. G., & Torres C., Y. A. (2013). Metales pesados asociados con las partículas atmosféricas y sedimentadas de superficies viales: Soacha (Colombia). *Revista Científica*, 17(1), 113-124. Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de <https://doi.org/10.14483/23448350.4571>