



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Captura de metales pesados por *Echeveria elegans* y *E. gigantea*
(Crassulaceae)

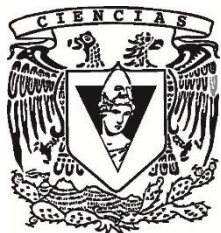
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

P R E S E N T A

LUIS FERNANDO CISNEROS LEMUS



DIRECTOR DE TESIS
DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx; 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTE TRABAJO SE DESARROLLÓ EN EL LABORATORIO DE DESARROLLO EN PLANTAS, DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA COMPARADA, FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

SE REALIZÓ CON EL APOYO DEL PROYECTO CONACyT 247078: “Iniciativa interdisciplinaria para el aprovechamiento sustentable del género *Echeveria* (Crassulaceae), plantas con potencial hortícola para la producción de áreas rurales de México”

ASESORA DEL TRABAJO:

Dra. Margarita Collazo Ortega

SUSTENTANTE:

Luis Fernando Cisneros Lemus

Agradecimientos

- A la Dra. Margarita Collazo Ortega por todo el apoyo, guía y paciencia durante el planteamiento y desarrollo de este trabajo que no hubiera sido posible sin ella.
- Al M. en C. Jorge Arturo Ramírez Villegas y a la Dra. María Guadalupe Barajas Guzmán por su apoyo en el análisis estadístico.
- Al Biól. Jerónimo Reyes Santiago del Jardín Botánico del IB-UNAM por permitir el acceso al material biológico.
- A la Dra. María Eugenia Muñiz Díaz de León por permitir el uso de equipos e instalaciones para el procesamiento de muestras vegetales.
- A la Doctora Lucia Mora por permitir el uso de los molinos en el Instituto de Geología para el procesamiento de las muestras.
- A la M. en C. Elizabeth Hernández Álvarez y su equipo de colaboradores por su apoyo analítico en la determinación de elementos traza por ICP-MS, Instituto de Geofísica, UNAM.
- A los laboratorios MEDIX por permitir el uso de material vegetal proveniente de la azotea verde ubicada sobre sus instalaciones.
- A los profesores que imparten el taller “Biología de la reproducción, propagación y fisiología de angiospermas que viven en ambientes contrastantes” en la Facultad de Ciencias de la UNAM.
- A mi familia, principalmente a mis padres, por todo el apoyo brindado en este trayecto.
- A mis compañeros y amigos de la Facultad de Ciencias por los ánimos y apoyo moral.

Índice	Página
1. Resumen.....	8
2. Antecedentes.....	10
Problemática.....	10
Sistemas de naturación.....	11
Metales pesados.....	14
Dinámica de los metales pesados	15
Metales pesados y organismos vegetales.....	17
Selección de plantas para las azoteas verdes.....	22
Crasuláceas.....	22
Estado del arte.....	23
3. Justificación.....	25
4. Hipótesis.....	25
5. Objetivos.....	26
6. Materiales y Métodos.....	26
Especies de estudio.....	26
Sitios de estudio.....	28
Colecta y procesamiento del material.....	30
Análisis de metales pesados.....	32
Análisis estadístico.....	33
7. Resultados.....	34
8. Discusión.....	62
9. Conclusiones.....	79
10. Bibliografía.....	80
11. Anexos.....	93

Índice de tablas

Tabla 1. Concentraciones de metales pesados en agua pluvial del Valle de México (Obtenido de García, 2007).....	16
Tabla 2. Micronutrientes esenciales de las plantas superiores ordenados de mayor a menor concentración en los tejidos vegetales y su papel fisiológico (Modificado de Quiróz <i>et al.</i> , 2013).....	19
Tabla 3. Concentraciones típicas promedio de metales pesados ($\mu\text{g g}^{-1}$ [ppm] peso seco) en plantas no hiperacumuladoras e hiperacumuladoras. (Obtenida de Brooks, 2000).....	20
Tabla 4. Criterios establecidos para determinar el potencial de una planta para fitorremediación (Adaptado de: Gómez-Bernal, <i>et al.</i> , 2014).....	21
Tabla 5. Concentraciones observadas en las muestras de <i>E. gigantea</i> , colectadas en MEDIX en época de lluvia, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.....	35
Tabla 6. Concentraciones observadas en las muestras de <i>E. elegans</i> , colectadas en MEDIX en época de lluvia comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.....	36
Tabla 7. Concentraciones observadas en muestras de <i>E. gigantea</i> , colectadas en MEDIX en época seca, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.....	37
Tabla 8. Concentraciones observadas en muestras de <i>E. elegans</i> , colectadas en MEDIX en época seca, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.....	38
Tabla 9. Concentraciones observadas en muestras de <i>E. gigantea</i> , colectadas en Invernadero en época de lluvia, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.....	39

Tabla 10. Concentraciones observadas en muestras de <i>E. elegans</i> , colectadas en el Invernadero en época de lluvia, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.....	40
Tabla 11. Concentraciones observadas muestras de <i>E. gigantea</i> , colectadas en el Invernadero en época seca, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.....	41
Tabla 12. Concentraciones observadas en las muestras de <i>E. elegans</i> , colectadas en el Invernadero en época seca, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.....	42
Tabla 13. Resumen del análisis discriminante (AD) usando el órgano al que pertenece la muestra como factor para agrupar.....	44
Tabla 14. Resumen del AD usando la especie a la que pertenece cada muestra como factor para agrupar.....	46
Tabla 15. Resumen del AD usando el sitio de colecta como factor para agrupar.	48
Tabla 16. Resumen del AD usando la época de colecta como factor para agrupar.	50
Tabla 17. Resumen del AD usando los grupos obtenidos del análisis de clúster.	52
Tabla 18. Factor de Bioconcentración en <i>E. elegans</i> y <i>E. gigantea</i> colectadas en las áreas de estudio de la CDMX.....	61
Tabla 19. Factor de Translocación en <i>E. elegans</i> y <i>E. gigantea</i> colectadas en las áreas de estudio de la CDMX.....	62

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplos de azoteas verdes.....	13
Figura 2. Tipos de deposición de contaminantes atmosféricos.....	15
Figura 3. Ejemplar de <i>Echeverria elegans</i>	27
Figura 4. Ejemplar de <i>Echeverria gigantea</i>	28
Figura 5. Azotea verde del edificio MEDIX. Delegación Coyoacán, CDMX.....	29
Figura 6. <i>E. elegans</i> creciendo en vivero. San Andrés Totolcingo, Estado de México.....	30
Figura 7. Concentraciones de Al y Zn observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con el órgano del que fueron colectadas.....	43
Figura 8. Concentraciones de Zn y Ba observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con la especie a la que pertenecen.....	45
Figura 9. Concentraciones de As, Cd, Mn y V observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con el sitio de colecta.....	47
Figura 10. Concentraciones de As, Ba y Hg observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con la época de colecta.....	49
Figura 11. Dendrograma de distancias.....	51
Figura 12. Concentraciones de As, Hg y Fe observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de clúster....	53
Figura 13. Concentraciones de Al y V en las muestras de suelo.....	55
Figura 14. Concentraciones de Co y Ni en las muestras de suelo.....	56
Figura 15. Concentraciones de Hg en las muestras de suelo.....	57
Figuras 16. Concentraciones de Ba, Cr y Fe en las muestras de suelo.....	58
Figuras 17. Concentraciones de Cu, Mn y Pb en las muestras de suelo.....	59
Figuras 18. Concentraciones de Cd, Co, Mn, Cu y V en las muestras de suelo...	60
Figuras 19. Ejemplo de la dinámica del Cr en el sistema atmósfera-suelo-planta en <i>E. gigantea</i> . Sitio MEDIX en época de lluvias.....	76

Resumen

La naturación es la acción de incorporar vegetación en espacios urbanos, con la finalidad de aminorar el desequilibrio ambiental generado por procesos de urbanización. Las azoteas o techos verdes consisten en la naturación de techos, estos brindan diversos servicios ecosistémicos, entre ellos la retención de metales pesados.

Desde hace años existe un aumento en las concentraciones ambientales de metales pesados debido a actividades humanas, en el Valle de México se han reportado altas concentraciones de metales pesados en el agua pluvial. Debido a la alta urbanización de la zona, estos contaminantes se retienen en el suelo y en la atmósfera, donde la toxicidad de estos elementos es un factor de riesgo para la mayoría de los organismos.

Las plantas han desarrollado estrategias tanto de evasión como de tolerancia ante los metales pesados presentes en el ambiente. Algunas plantas pueden ser organismos idóneos para brindar los servicios ecosistémicos que se han perdido en zonas urbanas. Por ello se requiere estudiar la respuesta de organismos vegetales a la presencia de estos elementos.

La familia Crassulaceae presenta adaptaciones morfológicas y fisiológicas que la vuelve ideal para ser usada en sistemas de naturación en la Ciudad de México. Dentro de esta familia, el género *Echeveria* es de especial interés para su uso en techos verdes en México.

En este estudio se evaluó la capacidad que tienen los órganos (hoja, tallo y raíz) de *Echeveria gigantea* y *Echeveria elegans* para acumular metales pesados en dos sitios de estudio (una zona rural y una urbana) y su variación estacional (época de

lluvias y seca), aportando información que promueva su uso en techos verdes y otros espacios destinados a mitigar los efectos negativos de la urbanización.

E. elegans y *E. gigantea* capturaron metales pesados en los dos sitios de muestreo. Ambas presentaron concentraciones de V, Cr, Ni, Cu, Pb y Hg que pueden ser consideradas excesivas. *E. elegans* presentó una mayor concentración de Zn que *E. gigantea*, esta última presentó una mayor concentración de Ba. Ambas especies presentaron mayor concentración de Zn en tallos, y de Al en raíces. Las propiedades del suelo y condiciones climáticas también tuvieron un efecto importante sobre las concentraciones de metales pesados observadas en las muestras. Los valores del factor de translocación y del factor de bioconcentración sugieren que existe bajo riesgo de que metales pesados se transfieran en cantidades significativas a la planta. Por lo anterior, se sugiere que *E. elegans* y *E. gigantea* son una opción adecuada para usar en techos verdes y otros espacios destinados a mitigar los efectos negativos de la urbanización.

Antecedentes

Problemática

Entre 1980 y 2010, la población de México aumentó de 66,8 a 112,3 millones de habitantes, acompañando este crecimiento poblacional el grado de urbanización pasó del 61% al 70.3% en este mismo periodo. México se hizo preferentemente urbano a partir de la década de 1970, concentrando a partir de este punto a más de la mitad de su población en ciudades. Para el año 2010, en México se reportaban 11 metrópolis con más de un millón de habitantes, 79 áreas urbanas de tamaño mediano y 309 áreas urbanas de tamaño pequeño (CEPAL, 2012). Estos procesos de urbanización acelerados, y a menudo descontrolados, reducen la viabilidad de los ecosistemas para proveer servicios ecosistémicos fundamentales para una adecuada calidad de vida en las urbes (Latterra *et al.*, 2011).

Los procesos de urbanización a menudo van de la mano con el crecimiento económico e industrialización, tal ha sido el caso en diversas regiones de México desde hace ya varias décadas (CEPAL, 2012). Actividades humanas tales como las agrícolas, el uso de fertilizantes inorgánicos, pesticidas, estiércol, enmiendas calizas, la combustión de carbón y otros combustibles fósiles como el petróleo, cuya combustión es fuente de Pb, Ni, y V, procesos de minería, refinamiento de hierro y acero, así como la fabricación de pilas, entre otras, son las causas principales del aumento persistente en las concentraciones de metales pesados en el ambiente. Las industrias de productos químicos, fármacos, pigmentos, tintes, y el curtido de pieles liberan distintos tipos de metales pesados al ambiente. En general, los suelos en áreas altamente industrializadas muestran altas cantidades de As, Cd, Cr, Hg,

Fe, Ni, Pb y Zn. En este análisis no se pueden obviar los desechos domésticos, pues aproximadamente el 10% de estos se componen por metales, su entierro contamina los suelos y las aguas subterráneas, por otro lado, su quema contamina la atmósfera y suelos (Galán y Romero, 2008; Wuana y Okieimen, 2011).

La urbanización en el país ha ido emparejada al daño a diversos ecosistemas. Este daño impide parcial o totalmente la provisión de servicios ecosistémicos tales como formación de suelos, reciclaje de nutrientes, retención de contaminantes, provisión de materias primas y recreación, entre otros. (Camacho y Ruíz, 2011).

Debido a la falta de ecosistemas nativos o espacios donde establecer ambientes secundarios, se hace necesario recurrir a sistemas de naturación, los cuales pueden restablecer en cierta medida algunos servicios ambientales (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Sistemas de naturación

La naturación es la acción de incorporar vegetación en espacios urbanos con la finalidad de aminorar el desequilibrio ambiental generado por procesos de urbanización. Incorpora y fomenta la naturaleza mediante la recuperación de flora y fauna de manera sostenible y aceptable (Briz, 1999; Briz y de Felipe, 2005; Urbano-López, 2013).

Los sistemas de naturación pueden clasificarse, según la superficie en que se instalen, en verticales y horizontales. Los primeros, representados por los muros verdes, consisten en la incorporación duradera de plantas ya sea mediante las capacidades del organismo o con ayuda de estructuras de soporte. Los segundos son los techos verdes, estos consisten en el enverdecimiento de espacios

horizontales o ligeramente inclinados que recubren las edificaciones por medio de una gran variedad de sistemas (Urbano-López, 2013).

En la ciudad de México, los techos representan más del 65% de la superficie total de la ciudad (Díaz-Herrera, 2008), por ello son superficies importantes en procesos de naturación. Un techo verde cumple, primordialmente, con las funciones de impermeabilidad, impiden la penetración de agua a la estructura que soporta el techo verde; drenaje, permite el flujo del agua a través del sistema; retención de agua, es capaz de captar y almacenar el agua necesaria para garantizar la integridad de la cubierta vegetal; consistencia, garantiza la integridad física del sistema; nutrición, proporciona los nutrientes para mantener la cubierta vegetal sana; y filtración, permitir el paso de agua a través del sistema restringiendo el paso de partículas finas. Esto se logra mediante la integración del inmueble, la vegetación, un sustrato adecuado y los factores ambientales (SDA, 2011).

Las azoteas verdes pueden clasificarse en intensivas, semi-intensivas y extensivas (Figura 1) dependiendo de la profundidad del sustrato, el tipo de vegetación y el uso al que esté destinada el área (Dunnett, 2004; Oberndorfer *et al.*, 2007).

Las azoteas verdes extensivas son aquellas capas de vegetación bien adaptadas, con un propósito principalmente funcional, con peso menor a 170 kg m^{-2} , con una capa de sustrato ligero de profundidad menor a los 20 cm, con plantas pequeñas, resistentes al estrés, generalmente nativas, que requieren mantenimiento y riego mínimo o nulo. Por otro lado, los techos verdes intensivos son aquellos similares a un jardín, con un propósito tanto funcional como estético, por su peso mayor generalmente requieren una edificación reforzada, la capa de sustrato tiene una profundidad mayor a 20 cm, en estos se usan plantas de mayor peso (arbustivas o

arborescentes pequeñas) y requieren de riego y mantenimiento constante. Finalmente, los techos verdes semi-intensivos son aquellos que combinan los beneficios de techos verdes intensivos y extensivos, tienen una capa de sustrato de hasta 20 cm de profundidad la cual permite que una mayor diversidad de plantas, como herbáceas, arbustos, cactáceas y suculentas sean usadas, solo requieren riego en ciertas temporadas y rara vez requieren soporte estructural adicional (Obendorfer *et al.*, 2007; Urbano-López, 2013; Berardi *et al.*, 2014).



Figura 1. Ejemplos de azoteas verdes. Intensiva (A), semi intensiva (B) y extensiva (C).

Los techos verdes, muros verdes, y otros espacios similares son opciones para contrarrestar algunos de los efectos negativos que tiene la urbanización en los seres vivos. La instalación de techos verdes presenta numerosos beneficios como: regular la temperatura al interior de las edificaciones, lo cual disminuye los niveles de consumo energético, reducir el efecto de isla de calor urbano, mitigar la contaminación atmosférica, disminuir el ruido, aumentar la biodiversidad animal y vegetal, y mejorar la calidad del agua de escorrentía pluvial. Estos efectos varían dependiendo del tipo de azotea verde (extensiva o intensiva) y de las características de la construcción que lo va a albergar (Obendorfer *et al.*, 2007; Berardi *et al.*, 2014).

Estudios sobre techos verdes como el de Selas *et al.* (1995) y Arellano (2012) demuestran que los espacios naturados son capaces de acumular metales pesados.

Metales pesados

Existen diversos criterios para definir qué elementos son considerados metales pesados. Es útil para las ciencias químicas y biológicas aquel que los define como elementos con densidad mayor a 5 g mL^{-1} , pues los elementos con densidad menor a esta no presentan lo que se conoce como comportamiento químico de metal pesado (Peso molecular alto, reacción ante la presencia de ácidos grasos formando soluciones jabonosas, reaccionan con la ditizona, etc) (Duffus, 2002).

Los metales pesados representan un riesgo para la salud humana, se vuelven tóxicos al ser acumulados en los tejidos debido a la falta de vías metabólicas para su procesamiento. Cuando la dosis máxima de exposición o consumo de metales pesados es excedida, comienzan a presentarse síntomas de envenenamiento por metales pesados. Estos síntomas varían según el metal que provoque el envenenamiento, algunos síntomas generales son: desordenes gastrointestinales, temblores, hemoglobinuria, ataxia, parálisis, vómito, convulsiones, depresión y neumonía (Jaishankar *et al.*, 2014).

Para la mayoría de los organismos es extremadamente tóxica la exposición a niveles altos de metales pesados como Cd, Hg, Cr, Ni y Pb (Cervantes y Moreno, 1999). En el 2009, Wang y colaboradores recopilaron información de diversas fuentes y señalaron que incluso cantidades mínimas de metales pesados como Cd, Hg, Pb y Cr son una amenaza. Por tanto, las concentraciones, aun mínimas, de metales pesados en organismos vegetales no deben ser consideradas irrelevantes.

Dinámica de los metales pesados

Los contaminantes pasan de la atmósfera a los suelos y cuerpos de agua por medio de dos procesos: deposición húmeda y seca (Figura 2). La deposición húmeda implica la transferencia de partículas hacia las gotas de lluvia, nubes o neblina. Este tipo de deposición involucra mecanismos de transferencia de masa en múltiples fases (fase gaseosa, aerosoles y fase acuosa). Además, la posibilidad de encontrar la fase acuosa en diversas formas (lluvia, nieve, granizo, neblina, etc.) complica estos procesos aún más (Raja, 2003). La deposición seca se puede definir como un proceso de sedimentación gravitacional y de transferencia turbulenta, que remueve partículas de la atmósfera. La deposición seca ocurre con mayor frecuencia que la deposición húmeda, sin embargo, es menos eficiente para la remoción de aeropartículas en la atmósfera (Bridgman, 1990).

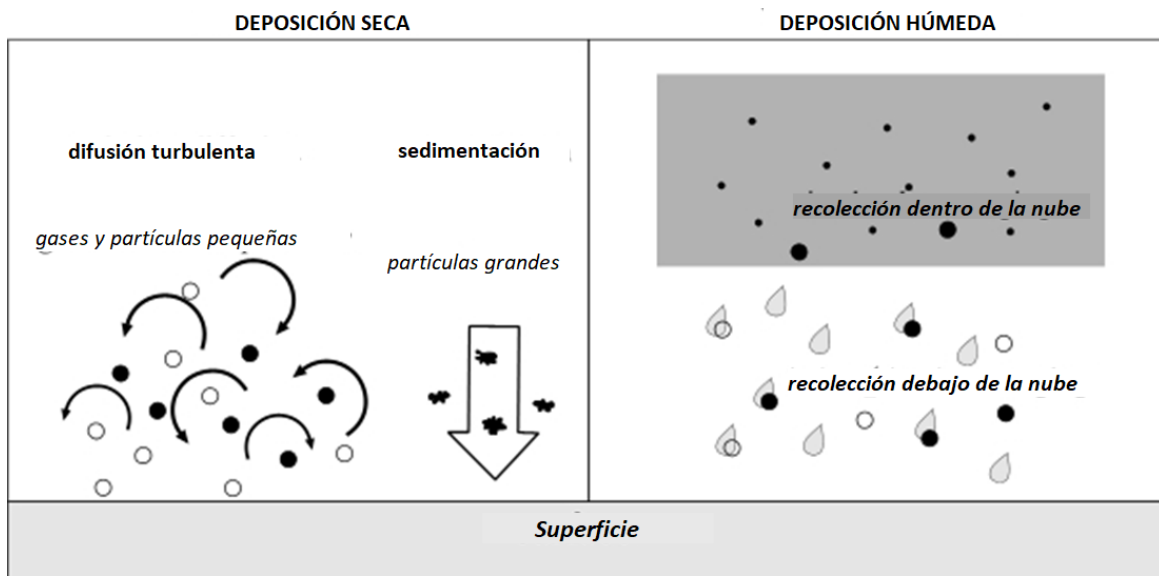


Figura 2. Formas de deposición de contaminantes atmosféricos. Del lado izquierdo se pueden observar los dos procesos principales de la deposición seca, difusión y posterior sedimentación; del lado derecho se observan los momentos clave de la deposición húmeda, recolección de particular contaminantes en diversas capas de la atmósfera y posterior caída al suelo (Modificado de Lagzi *et al.*, 2013).

En la Tabla 1 se presentan las concentraciones de metales pesados en agua de origen pluvial reportadas por García (2007) para la Ciudad de México y para una zona rural del estado de México. En época de lluvia, la deposición húmeda es fuente de un flujo considerable de metales pesados en el Valle de México

Tabla 1. Concentraciones de metales pesados en agua pluvial del Valle de México (Obtenido de García, 2007).

Metal	Zona urbana ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	Zona rural ($\mu\text{g mL}^{-1}$)
Al	0.08395	0.10722
Cd	0.00088	0.00147
Cr	0.00124	0.0015
Mn	0.01433	0.00158
Ni	0.00320	0.003
Pb	0.00541	0.00243

De forma similar, en estudios relacionados con la concentración de metales pesados en suelos, se hace hincapié en la importancia de evaluar las cantidades de metales pesados que representan un riesgo ecológico (Gupta, 1991). Teniendo en cuenta que los metales pesados pueden ser transportados por diversos medios, como el agua o el aire hacia el suelo y vegetación, entrando finalmente a la cadena alimenticia.

Metales pesados y organismos vegetales

Los metales pesados suelen penetrar al medio celular por las mismas vías que utilizan los iones metálicos fisiológicamente importantes. En la cadena alimenticia las plantas son la principal vía de acceso de los metales pesados (Cervantes y Moreno, 1999).

Los metales pesados pueden entrar a los organismos vegetales a través de diversas vías en las raíces, tallo u hojas (Dasgupta-Schubert *et al.*, 2008). La absorción de compuestos vía raíz inicia con la solubilización de los iones metálicos presentes en el suelo, lograda mediante la acidificación del suelo o la secreción radicular de compuestos quelantes (Dasgupta-Schubert *et al.*, 2008). Una vez solubilizados, los metales pueden ser absorbidos de forma pasiva o activa, dependiendo de la naturaleza de los iones metálicos, su concentración y movilidad en el suelo, así como por la superficie radicular, mecanismos de entrada y antagonismo iónico (Kabata-Pendias *et al.*, 2011; Stottmeister *et al.*, 2003). Al interior de la raíz, los metales pueden ser transportados hacia las partes aéreas de la planta por el flujo vascular del xilema (Hall, 2002).

Otra forma importante de entrada de metales a las plantas es la absorción foliar y caulinar, proceso dependiente de factores especie específicos, la edad y el estado nutricional de la planta, el grosor de la cutícula y de la epidermis, el número de estomas y la presencia de células acompañantes, la temperatura, la humedad relativa y la naturaleza de los solutos (Alloway, 1990; Rowe, 2010).

Al interior de la planta, los metales pueden ser transportados a distintos órganos según su naturaleza y vía de entrada. El xilema es el principal medio de transporte de solutos de la raíz a las partes aéreas y viceversa. Durante el transporte, los

metales atraviesan varias membranas celulares para incorporarse a los tejidos, donde pueden alojarse en el interior de las células o permanecer en el espacio intercelular (Dasgupta-Schubert *et al.*, 2008).

El transporte de compuestos metálicos al interior de la planta culmina su secuestro dentro de los sitios adecuados para evitar la alteración de los procesos celulares esenciales. El secuestro de metales pesados, de manera general, consiste en la formación de compuestos con péptidos de unión a metales, como fitoquelantes y metalotioneínas (Callahan *et al.*, 2006; Schmidt *et al.*, 2004). Estos compuestos quedan almacenados al interior de vacuolas o son capturados en los sitios de la pared celular que presentan cargas negativas (Wang *et al.*, 1994).

En las plantas, las concentraciones tóxicas de iones metálicos pueden provocar diversas afecciones como la alteración del balance iónico de la membrana plasmática, el antagonismo con iones nutritivos, la inhibición del crecimiento y alteraciones metabólicas, entre otras. Ante la presencia frecuente de estos compuestos en el suelo y precipitación, los organismos vegetales han desarrollado estrategias tanto de evasión como de tolerancia (Levitt, 1980).

Entre los mecanismos de evasión se hallan los de exclusión, como la impermeabilidad, la captación disminuida y precipitación, y los de expulsión, ya sea por transporte activo o por volatilización; los mecanismos de tolerancia se resumen en acumulación inocua, esta acumulación puede darse en vacuolas, en citoplasma de forma no iónica, precipitados, o unidos a agentes quelantes (Levitt, 1980).

Las plantas requieren de ciertos elementos para su funcionamiento, por la concentración que requieren de ellos se pueden dividir en macronutrientes (C, H, O, N, P, K, S, Ca y Mg) y micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn) (Mahler, 2003;

Taiz y Zeiger, 2014). Algunos micronutrientes son metales pesados y aunque presentan papeles fisiológicos importantes, como se señala en la Tabla 2, en altas concentraciones se vuelven tóxicos y perjudiciales.

Tabla 2. Micronutrientes esenciales de las plantas superiores ordenados de mayor a menor concentración en los tejidos vegetales y su papel fisiológico (Modificado de Quiróz *et al.*, 2013).

Elemento y símbolo químico	Papel fisiológico
Hierro (Fe)	Participa en sistemas redox: ferredoxina, citocromo, nitrito reductasa, y sulfito reductasa; activador de las enzimas catalasa, aminolevulínico sintetasa y protoclorofilida (ambas participan en la síntesis de clorofilas).
Manganeso (Mn)	Forma parte de la manganeso-proteína, enzima clave del fotosistema II; componente de superóxido dismutasa (antioxidante).
Zinc (Zn)	Activador de la enzima anhidrasa carbónica, ARN polimerasa, alcohol deshidrogenasa.
Cobre (Cu)	Participa en sistemas redox: plastocianina, citocromo c oxidasa; activador de enzimas lactasa y fenolasa.
Molibdeno (Mo)	Componente de la nitrato reductasa (enzima clave en el metabolismo de nitrógeno) y de la nitrogenasa.
Níquel (Ni)	Cofactor de la ureasa.

Algunas plantas son capaces de captar ciertas cantidades de algunos metales pesados sin comprometer su viabilidad, plantas tolerantes que pueden crecer y desarrollarse en ambientes contaminados. Existen dos grupos dentro de estas dependiendo de la cantidad de metales pesados que absorben: las acumuladoras,

capaces de absorber altas concentraciones de metales sin afectar su desarrollo, con absorción inespecífica, y las hiperacumuladoras (Baker y Whiting, 2002).

Se considera hiperacumuladora a aquella planta que presenta concentraciones mucho mayores de un determinado metal pesado, y que resultan tóxicas incluso para especies cercanamente emparentadas a la misma creciendo en el mismo sustrato (Brooks, 2000; Rascio y Navari-Izzo, 2011). En la Tabla 3 se comparan las concentraciones promedio de metales pesados presentes en plantas no hiperacumuladoras e hiperacumuladoras creciendo en el mismo sustrato, con alta concentración de metales pesados.

Tabla 3 Concentraciones típicas promedio de metales pesados ($\mu\text{g g}^{-1}$ [ppm] peso seco) en plantas no hiperacumuladoras e hiperacumuladoras. (Obtenida de Brooks, 2000).

Elemento	Planta no hiperacumuladora (ppm peso seco)	Hiperacumuladora (ppm peso seco)
Cadmio	0.1	100
Cobalto	1	5000
Cobre	10	5000
Manganeso	400	10000
Níquel	3	5000
Zinc	70	10000

Gracias a su capacidad para secuestrar y acumular diversos iones metálicos, se considera a las plantas hiperacumuladoras como organismos ideales para procesos

como la fitorremediación de suelos con concentraciones altas de metales pesados (Brooks, 2000).

En términos generales, podemos decir que las plantas hiperacumuladoras muestran un factor de translocación (FT) entre tallo y raíz mayor a uno, mientras que las no hiperacumuladoras usualmente acumulan mayores concentraciones en las raíces que en los tallos. Las plantas hiperacumuladoras, además, muestran un factor de bioconcentración (FBC) mayor a uno (Tabla 4), lo cual se refiere a la tasa entre la concentración de metal en la planta y el suelo (McGrath y Zhao, 2003; Sun *et al.*, 2008).

Tabla 4. Criterios establecidos para determinar el potencial de una planta para fitorremediación (Adaptado de Gómez-Bernal *et al.*, 2014).

	Plantas adecuadas para fitorremediación*	Plantas no adecuadas para fitorremediación
FT	>1 Plantas capaces de acumular o tolerar metales pesados	<1 Plantas que con mecanismos de evitación de metales pesados
FBC	>1 Planta acumuladora	<1 Planta exclusora

*Para esta clasificación también deben tomarse en cuenta aspectos ecológicos de los organismos

Otros criterios como una producción de biomasa considerable o un ciclo de vida adecuado para un determinado proyecto de remediación también son tomados en cuenta al momento de escoger candidatos vegetales para procesos de fitorremediación (Gómez-Bernal *et al.*, 2014).

Otro índice de interés para evaluar procesos de remediación es el índice de fitodisponibilidad, cuyo valor es indicativo de la relación entre las características físicas y químicas de la planta, y su interacción con los metales pesados presentes en el suelo (Gómez-Bernal *et al.*, 2018), puede ser obtenido mediante técnicas de

marcaje y medición con radioisótopos o estimado a partir de la concentración total de determinado metal pesado en suelos y la concentración total del mismo metal en el organismo vegetal.

Selección de plantas para las azoteas verdes

En teoría, un techo verde adecuado puede sostener cualquier taxón vegetal que las condiciones ambientales y climáticas permitan en la zona. Sin embargo, las plantas en techos verdes están sujetas a muchos factores estresantes tales como la baja disponibilidad de agua, la alta insolación y los fuertes vientos; por estos factores es importante considerar el uso de plantas tolerantes al estrés, sobre todo cuando se trabaja con techos verdes extensivos (Obendorfer *et al.*, 2007).

Las plantas suculentas son las ideales para la naturación en la Ciudad de México ya que presentan adaptaciones morfológicas y fisiológicas que le permiten prosperar en las condiciones de aridez en que se desarrollan (López, 2003). Algunas familias notables con especies suculentas en México son *Cactaceae*, *Crassulaceae* y *Agavaceae*.

Crasuláceas

La familia *Crassulaceae* es cosmopolita. Sus raíces fibrosas y poco profundas permiten una óptima captación de agua y crecimiento en suelos someros. Sus hojas son suculentas, sub-cilíndricas a trigonales para minimizar insolación (Klak *et al.*, 2004). Presentan altos contenidos de agua que, combinados con paredes celulares elásticas y polisacáridos apoplásticos, permiten que las hojas eviten potenciales hídricos bajos aun después de una deshidratación excesiva (Nobel, 1988; von Willert *et al.*, 1992). Además, tienen cutículas gruesas que, aunadas a la succulencia de las hojas, permiten que estas resistan largos periodos de sequía (Hoffman *et al.*,

2009). Finalmente es importante mencionar los mecanismos fisiológicos como el metabolismo ácido de las crasuláceas (por sus siglas en inglés, CAM), y peculiar morfofisiología estomática (estomas relativamente pequeños con la capacidad de cerrarse parcialmente) (López, 2003). El CAM se refiere a diversos mecanismos relacionados a la absorción de CO₂ que permiten maximizar la eficiencia con que el agua es utilizada y el mantenimiento de la fotosíntesis en condiciones extremas de desecación. Este tipo de metabolismo se encuentra en diversas familias de angiospermas y provee una ventaja adaptativa en condiciones desérticas (Hopkins, 1995; Taiz y Zeiger, 2014).

Entre las plantas que presentan CAM, el género *Echeveria* es de especial interés para su uso en techos verdes en México. Muchas especies son endémicas de México, se pueden hallar en diversos climas donde crecen a menudo bajo condiciones de alta insolación. Son de forma cespitosa y crecimiento arrosetado, ambas adaptaciones les permiten minimizar la insolación y sobrevivir a periodos largos de sequía. Son capaces de perder hojas para evitar la desecación o el congelamiento y no presentan predilección por algún tipo de suelo (López, 2003).

Captura de metales pesados por crasuláceas: Estado del arte

Se han realizado diversos estudios en cuanto a la capacidad de captura de metales pesados en especies de la familia Crassulaceae.

Dentro del género *Sedum*, distintas especies presentan diferente tolerancia y capacidad de movilización de metales pesados. *S. alfredii* ha sido estudiada extensivamente con respecto a su capacidad para hiperacumular Zn y Cd. Esta especie presenta una alta tasa de movilización de dichos metales del suelo al tallo,

comparada con plantas no acumuladoras, y mayor tolerancia a estos metales comparada con otras especies de su género (Long *et al.*, 2002; Ye *et al.*, 2003).

En el género *Kalanchoe* se ha observado la capacidad de sobrevivir en suelos que presentan altas concentraciones de metales pesados. En *K. integra* se han encontrado altas concentraciones de metales como Mn, Fe, Ni, Mo, V, Cu y Zn, mientras que *K. lacinata* tiene la capacidad de aumentar rápidamente su biomasa presentado poco efecto detrimental ante las altas concentraciones de metales pesados en el suelo. *K. pinnata* es capaz de acumular altas concentraciones de Fe en tallo (Yi-Hao, 2009; Frimpong-Manso *et al.*, 2015; Chandra y Kumar, 2017).

En la Ciudad de México, Arellano (2012) reportó una disminución en la concentración de metales pesados al comparar muestras de agua de lluvia y agua de escorrentía de una azotea verde extensiva, indicando que los metales fueron retenidos por el sustrato y estarían disponibles para la asimilación por la planta.

En 2014, Leal reportó concentraciones considerables de Cr, Ba y Zn en diversos órganos de *E. elegans* en su investigación acerca de la captación de metales pesados por plantas en azoteas verdes. Además, observó partículas metálicas en la epidermis de los tallos, las cuales interpretó como un indicio de absorción caulinar.

Finalmente, Hernández (2017) documentó la captura de metales pesados en ejemplares de *E. gigantea* creciendo en techos y muros verdes. Este autor reportó la acumulación de metales pesados en todos los órganos de la planta, con una mayor concentración de estos en la raíz. Señala que las concentraciones particularmente altas de Al, Ba y Hg califican a la planta como tolerante, acumuladora y candidata para la captación de contaminantes en ciertas zonas.

Teniendo en cuenta la importancia de conocer la capacidad de captura de metales pesados en los órganos de diferentes especies, así como su variación estacional, se planteó este estudio. En este se evaluó la concentración de metales pesados en dos especies de *Echeveria*, así como la relación entre esta y la concentración de metales pesados en el sustrato y el agua de lluvia en dos sitios con diferente grado de urbanización, tomando también en consideración la variación estacional.

Justificación

La alta urbanización y pérdida de vegetación en la ciudad de México constituyen un grave problema. Tiene consecuencias como la pérdida de biodiversidad, el desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos, una menor captura de contaminantes como metales pesados, entre otras. Esta pérdida de servicios ecosistémicos trae consigo una mala calidad del agua, el suelo y el aire que afectan la calidad de vida de los habitantes de la ciudad. Las plantas del género *Echeveria* son estéticamente agradables y presentan adaptaciones morfo-fisiológicas que las hacen adecuadas para su uso en techos verdes. Por ello, es importante y necesario conocer su capacidad de captura de metales pesados, de manera que conozcamos si son un género ideal para enfrentar algunos de los problemas anteriormente planteados.

Hipótesis

Dado que se conoce que *Echeveria* es un género capaz de acumular metales pesados, se espera que *E. elegans* y *E. gigantea* puedan acumularlos, y que su concentración varíe dependiendo de los factores ambientales, el sitio de estudio y la época del año.

Objetivos

General

Determinar si *Echeveria elegans* y *Echeveria gigantea* acumulan metales pesados y As en sus diversos órganos y como esta acumulación se ve afectada por diversos factores ambientales.

Particulares

Determinar si *E. elegans* y *E. gigantea* acumulan metales pesados y As en raíz, tallo u hojas.

Determinar si existen diferencias en la concentración de metales pesados y As en función de la especie.

Determinar si existen diferencias en la concentración de metales pesados y As en función del sitio y la época de colecta en ambas especies

Determinar de qué manera están relacionadas las concentraciones de metales pesados y As en el sustrato y agua de lluvia con las observadas en los organismos.

Obtener más información sobre la dinámica de los metales pesados entre el ambiente y las especies de interés.

Materiales y métodos

Biología de las especies de estudio

Echeveria elegans Rose

Rosetas cespitosas, globosas, hojas oblongo-ovaladas, agudas y mucronadas, bordes algo hialinos, de 3-6 cm de largo, 1-2 cm de ancho, verdes más o menos pruinosas. Tallos florales varios, de 10-15 cm de alto con pocas hojas deltoide-lanceoladas, agudas, apresadoras excepto la punta recurvada, de 10-12 mm de

largo, cincinos con 6-10 flores, pedicelos hasta 6 mm de largo; sépalos desiguales extendidos, ovado-deltoides a lanceolados, agudos, el mayor de 5 mm de largo; corola conoide-urceolada, de 12 mm de largo, 8 mm de diámetro en la base, rosa begonia, las puntas de los pétalos verdes en el botón, luego anaranjados (Figura 3) (Meyran y López, 2003).



Figura 3. Ejemplar de *Echeveria elegans*

Echeveria gigantea Rose & Purpus

Tallo hasta de 50 cm de largo, 4-8 cm de diámetro, roseta semidensa hasta 60 cm de diámetro, 15-20 hojas obovadas, ápice redondeado, emarginado y apiculado, de 15-30 cm de largo y 10-20 cm de ancho, verde con tonos rojizos, algo pruinosas con bordes rojos. Tallos florales 1-3, de 1-2 m de altura con hojas ascendentes, oblongo-espátuladas, obtusas a agudas; inflorescencia en panícula de 3-7 cincinos de 7-16 flores cada uno, pedicelos de 2-8 mm de largo; sépalos desiguales, deltoides a

lanceolados, acuminados, extendidos o recurvados, el mayor de 15 mm de largo; corola urceolada de 12-17 mm de longitud, 9-11 mm de diámetro basal, rojo oscuro a rosado; nectarios blancos. Cromosomas $n=54$ (Figura 4) (Meyran y López, 2003).



Figura 4. Ejemplar de *Echeveria gigantea*

Sitios de estudio

El primer sitio es la azotea verde extensiva del edificio MEDIX. Ubicado en Calzada del Hueso 45, Ejido Viejo de Sta. Úrsula Coapa, 04910, Coyoacán, Ciudad de México, México, en la latitud Norte $19^{\circ}18'32.9''$ y longitud Oeste $99^{\circ}08'26.2''$. La temperatura media anual es de 17° C y la precipitación media anual es de 808.8 mm (Gobierno de Coyoacán, 2015).

En la ficha técnica se especifica que el proyecto de naturación ERA VERDE se instaló en 2015 en la azotea del Laboratorio MEDIX. Cuenta con una superficie total de 55,997 m². Dicha extensión incluye el sistema de azotea verde, zona deck y muros verdes (Figura 5).

En la azotea se encuentran las siguientes especies: *Agave attenuata*, *A. celsii*, *A. cupreata*, *A. filifera*, *A. macroacantha*, *A. potatorum*, *A. vilmoriniana*, *Beucarnea recurvata*, *Dasyllirion acotriche*, *Echeveria agavoides*, *E. elegans*, *E. gigantea*, *Graptosedum* “Darley sunshine”, *Graptosedum* “Vera Higgins”, *Nolina longiflora*, *Opuntia robusta*, *Pelargonium graveolens*, *Salvia leucantha*, *Sedum dendroideum*, *S. griseum*, *S. moranense*, *S. pachyphyllum*, *S. rubroinctum* y *S. stahlia* (Jerónimo Reyes, com. pers.).



Figura 5. Azotea verde del edificio MEDIX. Delegación Coyoacán, CDMX.

El segundo sitio de colecta fue un vivero en San Miguel Totolcingo (Figura 6). Ubicado cerca de Camino Real del Líbano, San Miguel Totolcingo, Ejido de Totolcingo, Municipio de Acolman, Estado de México, México, en la latitud Norte

19°38'07.4" y longitud Oeste 98°57'16.3", La temperatura media anual es de 15.4°C y la precipitación media anual es de 602.9 mm (Juárez, 1999).



Figura 6. *E. elegans* creciendo en vivero. San Miguel Totolcingo, Estado de México.

Colecta y procesamiento de material

Plantas

Se realizaron dos muestreos puntuales, uno en la primer semana de agosto del 2017 (época de lluvias) y otro en la última semana de noviembre (época seca) del 2017. En ambos muestreos se siguió el mismo protocolo.

En cada sitio y época se colectaron tres ejemplares completos de *E. gigantea* y tres de *E. elegans*. Estos ejemplares fueron trasladados al laboratorio de Desarrollo en Plantas de la Facultad de Ciencias, UNAM, en bolsas de tela para su procesamiento.

En el laboratorio se limpió cada ejemplar para remover el exceso de sustrato. Cada individuo se separó en raíz, tallo y hojas. Se tomó el peso fresco de los órganos de cada individuo.

Para el lavado de la raíz se prepararon cuatro palanganas; la primera con ácido clorhídrico 0.1M y las siguientes tres con agua destilada. Se colocaron una por una las raíces de cada individuo en la primera palangana, que contiene el ácido clorhídrico, se restregó cuidadosamente la superficie de forma rápida. Después se colocaron en la segunda palangana y se enjuagaron. Finalmente se repitió el enjuague en la tercera y cuarta palangana respectivamente.

Para el secado, las muestras fueron seccionadas y colocadas en una cámara de secado precalentada a 40°C, alrededor de dos semanas, hasta que estuvieran secas y crujientes. Se registró el peso seco y se embolsaron las muestras por separado para su posterior molido. Las medidas de peso fresco y seco de cada muestra colectada se pueden encontrar en los anexos 4 y 5.

El material seco se molió en un molino de rotor de velocidad variable marca Fritsch, modelo Pulverisette 14 línea clásica, en el Laboratorio de Edafología Experimental del Instituto de Geología.

Muestras de suelo y agua

Se tomaron 3 muestras puntuales del sustrato en ambas épocas, de cada sitio, cada una de 50 g.

Para el agua se tomaron 3 muestras puntuales en cada sitio. En el caso de MEDIX, estas muestras fueron colecta de agua pluvial, en el caso del invernadero las muestras fueron tomadas del agua usada para riego (mezcla de agua de pozo y pluvial contenida en una cisterna abierta). Las muestras se colectaron en botellas PET con capacidad de 100 mililitros, previamente lavadas con ácido nítrico y enjuagadas con agua ultrapura. A estas muestras se les agregó aproximadamente 10 mL de ácido nítrico ultrapuro.

Análisis de metales pesados

Hoy en día existen diversos métodos para determinar la concentración de metales pesados, La elección de un método debe realizarse según los propósitos del estudio. Para estudios relacionados con bioacumulación se opta por los métodos más delicados que ofrecen resultados finos (Alloway, 2013). El ICP-MS provee información acerca de la presencia de elementos en una muestra a nivel de isótopo, presenta poca interferencia, permite el análisis de una amplia variedad de elementos, y tiene una sensibilidad superior, siendo capaz de detectar partes por billón en diversos medios (Hall, 1990).

En el laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM mediante espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado (ICP-MS por sus siglas en inglés), se determinó la concentración de Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Ba, Pb y Hg en raíz, tallo y hoja de *Echeveria elegans* y *Echeveria gigantea*, así como en las muestras de agua y sustrato.

Para llevar a cabo este proceso, las muestras vegetales previamente molidas fueron sometidas a una digestión ácida. Se pesaron 0.5 g de cada muestra y se adicionaron 10 mL de HNO₃ grado ultra puro. Las muestras se dejaron en pre-digestión toda la noche bajo campana de extracción, después se llevó a cabo la digestión usando un horno de microondas. Las muestras se enfriaron y aforaron a 50 mL con HNO₃ al 2%. Se filtraron, etiquetaron y almacenaron a 4°C hasta su análisis.

Se realizó la medición de los metales pesados en el espectrómetro de masas modelo iCAP Qc de la marca Thermo Scientific. Todas las muestras se hicieron por triplicado. Además, se digirieron dos Materiales de Referencia Certificados (MRC), “1547 Peach Leaves” y “1573^a Tomato Leaves” y dos blancos reactivos para

monitorear el porcentaje de recuperación y la aportación de contaminantes, respectivamente.

Factores de translocación y de bioconcentración.

Las mediciones de concentración de metales pesados fueron utilizadas para estimar el factor de bioconcentración (FBC) y el factor de translocación (FT) (Gómez-Bernal, 2014) con las siguientes fórmulas:

FBC= Concentración de metal pesado en tejido vegetal con mayor concentración/Concentración de metal pesado en suelo

FT= Concentración de metal pesado en tallo/Concentración de metal pesado en raíz

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en muestras vegetales se realizaron una serie de análisis discriminantes (AD) que determinaron las relaciones entre los factores que agrupan las muestras vegetales y las variables que explican dichas agrupaciones. Estos análisis se realizaron utilizando el software STATISTICA, versión 8.0. El AD busca la mejor combinación lineal de variables para producir un empate adecuado entre elementos pertenecientes a grupos pre-asignados y una clasificación basada en el conjunto de variables.

Estadísticamente hablando, el AD es similar a un MANOVA, el concepto central es que, si la media para una variable es significativamente distinta entre dos grupos, esa variable puede ser utilizada para discriminar entre ellos. En el método forward stepwise, a cada paso se evalúan todas las variables para evaluar cuál contribuye más a la discriminación, esta variable es incluida y el proceso se repite; este proceso es guiado mediante una metodología en la que se agregan aquellas variables que presentan una mayor significatividad para la predicción de la pertenencia a un

grupo. Un AD nos ayuda a determinar cuáles son las variables que discriminan entre dos grupos que ocurren naturalmente.

A partir de la matriz de datos con las concentraciones de metales pesados observadas en cada muestra vegetal se creó una matriz de distancias. Esta matriz expresaba la distancia euclidiana con los datos escalados en términos de z y fue sometida a un análisis de clúster. El análisis de clúster fue realizado en R versión 3.5.3 (2019-03-11) "Great Truth", la medida de similitud usada fue distancia Euclideana al cuadrado y el análisis se llevó a cabo mediante el método de Ward. Los AD fueron aplicados basados en los resultados del análisis de clúster y en agrupaciones formadas según los factores de interés del estudio (época de colecta, sitio, especie y órgano).

Para analizar las concentraciones de metales pesados en muestras de suelo y agua se analizó la normalidad y la homogeneidad de varianza en cada conjunto de datos. Posteriormente se aplicaron pruebas de ANOVA para analizar si existía diferencias significativas en las concentraciones de metales pesados entre muestras de suelo, de existir diferencias significativas se aplicó una prueba de Tukey para saber entre que muestras se hallaba tal diferencia.

Se utilizaron pruebas de ANOVA de una vía para analizar si existían diferencias significativas en las concentraciones de metales pesados en las muestras de agua.

Resultados

Se encontraron diversas concentraciones de todos los metales pesados analizados en las muestras vegetales. Dichas concentraciones difirieron entre especies, órganos y condiciones de colecta. En las tablas 5 a 12 se presentan las

concentraciones de metales pesados observadas en las diferentes muestras vegetales colectadas y se hace una comparación entre estas y las concentraciones que pueden considerarse tóxicas para las plantas o perjudiciales para la salud humana.

Tabla 5. Concentraciones (ppm) encontradas en las muestras de *E. gigantea*, colectadas en MEDIX en época de lluvia, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.

Elemento	Normal (Kabata- Pendías, 2001)	Excesivo (Kabata- Pendías, 2001)	Máximo permitido (CXS 193, 1995; Kabata Pendías, 2001)	MLIEgH	MLIEgT	MLIEgR
V	0.2-1.5	5-10	-	0.10	0.94	1.11
Cr	0.1-0.5	5-30	2	1.02	3.78	1.61
Mn	30-300	400-1000	300	72.27	28.73	28.09
Co	0.02-1	15-50	5	0.17	0.33	0.17
Ni	0.1-5	10-100	1-10	0.99	2.35	0.92
Cu	5-30	20-100	5-20	3.30	5.96	5.12
Zn	27-150	100-400	50-100	20.60	22.61	11.81
As	1-1.7	5-20	0.35*	0.17	0.18	0.22
Cd	0.05-0.2	5-30	0.2**	0.04	0.07	0.05
Sb	7-50	150	-	0.22	0.23	0.19
Ba	-	500	-	135.13	113.78	49.39
Pb	5-10	30-300	0.5-10	0.86	1.00	0.63
Hg	-	1-3	0.3**	15.16	9.15	3.21

*Arsénico inorgánico

**En vegetales de hoja verde

(En negritas las concentraciones de metales observadas que pueden considerarse tóxicas o están por encima del máximo permitido).

En la nomenclatura de las muestras la primera letra indica el sitio de colecta (Medix o Invernadero), la segunda la época (Lluvia o Seca), la tercera y cuarta la especie (*E. elegans* o *E. gigantea*) y la última el órgano al que pertenece la muestra (Hoja, Tallo o Raíz)

Tabla 6. Concentraciones (ppm) encontradas en las muestras de *E. elegans*, colectadas en MEDIX en época de lluvia comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.

Elemento	Normal (Kabata- Pendias, 2001)	Excesivo (Kabata- Pendias, 2001)	Máximo permitido (CXS 193, 1995; Kabata Pendias, 2001)	MLIEeH	MLIEeT	MLIEeR
	V	0.2-1.5	5-10	-	0.85	0.49
Cr	0.1-0.5	5-30	2	3.90	6.92	3.87
Mn	30-300	400-1000	300	50.94	37.88	21.00
Co	0.02-1	15-50	5	0.39	0.24	0.34
Ni	0.1-5	10-100	1-10	2.79	4.36	3.12
Cu	5-30	20-100	5-20	6.16	2.74	4.02
Zn	27-150	100-400	50-100	27.55	97.53	27.89
As	1-1.7	5-20	0.35*	0.12	0.36	0.16
Cd	0.05-0.2	5-30	0.2**	0.07	0.07	0.11
Sb	7-50	150	-	0.21	0.16	0.24
Ba	-	500	-	108.03	80.94	89.01
Pb	5-10	30-300	0.5-10	1.03	1.00	1.60
Hg	-	1-3	0.3**	17.22	12.59	10.24

*Arsénico inorgánico

**En vegetales de hoja verde

(En negritas las concentraciones de metales observadas que pueden considerarse tóxicas o están por encima del máximo permitido).

En la nomenclatura de las muestras la primera letra indica el sitio de colecta (Medix o Invernadero), la segunda la época (Lluvia o Seca), la tercera y cuarta la especie (*E. elegans* o *E. gigantea*) y la última el órgano al que pertenece la muestra (Hoja, Tallo o Raíz)

Tabla 7. Concentraciones (ppm) encontradas en las muestras de *E. gigantea*, colectadas en MEDIX en época seca, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.

Elemento	Normal (Kabata- Pendias, 2001)	Excesivo (Kabata- Pendias, 2001)	Máximo permitido (CXS 193, 1995; Kabata Pendias, 2001)	MSEgH	MSEgT	MSEgR
V	0.2-1.5	5-10	-	0.41	0.08	4.36
Cr	0.1-0.5	5-30	2	2.68	1.39	8.82
Mn	30-300	400-1000	300	38.86	29.71	38.45
Co	0.02-1	15-50	5	0.19	0.08	0.89
Ni	0.1-5	10-100	1-10	3.54	0.88	7.53
Cu	5-30	20-100	5-20	4.84	2.66	4.77
Zn	27-150	100-400	50-100	24.62	51.94	16.52
As	1-1.7	5-20	0.35*	0.11	0.04	0.11
Cd	0.05-0.2	5-30	0.2**	0.12	0.14	0.20
Sb	7-50	150	-	0.05	0.02	0.02
Ba	-	500	-	73.65	56.36	44.55
Pb	5-10	30-300	0.5-10	1.94	1.68	1.66
Hg	-	1-3	0.3**	0.04	0.01	0.01

*Arsénico inorgánico

**En vegetales de hoja verde

(En negritas las concentraciones de metales observadas que pueden considerarse excesivas o están por encima del máximo permitido).

En la nomenclatura de las muestras la primera letra indica el sitio de colecta (Medix o Invernadero), la segunda la época (Lluvia o Seca), la tercera y cuarta la especie (*E. elegans* o *E. gigantea*) y la última el órgano al que pertenece la muestra (Hoja, Tallo o Raíz)

Tabla 8. Concentraciones (ppm) encontradas en las muestras de *E. elegans*, colectadas en MEDIX en época seca, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.

Elemento	Normal (Kabata- Pendias, 2001)	Excesivo (Kabata- Pendias, 2001)	Máximo permitido (CXS 193, 1995; Kabata Pendias, 2001)	MSEeH	MSEeT	MSEeR
V	0.2-1.5	5-10	-	0.90	0.84	6.69
Cr	0.1-0.5	5-30	2	4.84	7.50	21.48
Mn	30-300	400-1000	300	75.46	67.50	53.12
Co	0.02-1	15-50	5	0.34	0.34	1.89
Ni	0.1-5	10-100	1-10	2.87	5.61	21.36
Cu	5-30	20-100	5-20	9.69	3.95	12.95
Zn	27-150	100-400	50-100	15.63	116.59	21.79
As	1-1.7	5-20	0.35*	0.05	0.05	0.14
Cd	0.05-0.2	5-30	0.2**	0.07	0.10	0.12
Sb	7-50	150	-	0.04	0.03	0.03
Ba	-	500	-	91.23	51.97	30.01
Pb	5-10	30-300	0.5-10	0.94	1.37	3.08
Hg	-	1-3	0.3**	0.01	0.01	0.01

*Arsénico inorgánico

**En vegetales de hoja verde

(En negritas las concentraciones de metales observadas que pueden considerarse tóxicas o están por encima del máximo permitido).

En la nomenclatura de las muestras la primera letra indica el sitio de colecta (Medix o Invernadero), la segunda la época (Lluvia o Seca), la tercera y cuarta la especie (*E. elegans* o *E. gigantea*) y la última el órgano al que pertenece la muestra (Hoja, Tallo o Raíz)

Tabla 9. Concentraciones (ppm) encontradas en las muestras de *E. gigantea*, colectadas en Invernadero en época de lluvia, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.

Elemento	Normal (Kabata- Pendias, 2001)	Excesivo (Kabata- Pendias, 2001)	Máximo permitido (CXS 193, 1995; Kabata Pendias, 2001)	ILIEgH	ILIEgT	ILIEgR
V	0.2-1.5	5-10	-	0.21	0.19	0.84
Cr	0.1-0.5	5-30	2	4.75	1.16	5.84
Mn	30-300	400-1000	300	74.96	19.80	35.15
Co	0.02-1	15-50	5	0.22	0.09	0.37
Ni	0.1-5	10-100	1-10	3.36	2.33	4.23
Cu	5-30	20-100	5-20	3.04	3.02	3.73
Zn	27-150	100-400	50-100	7.86	42.13	21.83
As	1-1.7	5-20	0.35*	0.02	0.00	0.00
Cd	0.05-0.2	5-30	0.2**	0.06	0.09	0.09
Sb	7-50	150	-	0.14	0.06	0.00
Ba	-	500	-	136.42	493.31	182.39
Pb	5-10	30-300	0.5-10	0.48	0.74	1.32
Hg	-	1-3	0.3**	0.01	0.01	0.02

*Arsénico inorgánico

**En vegetales de hoja verde

(En negritas las concentraciones de metales observadas que pueden considerarse tóxicas o están por encima del máximo permitido).

En la nomenclatura de las muestras la primera letra indica el sitio de colecta (Medix o Invernadero), la segunda la época (Lluvia o Seca), la tercera y cuarta la especie (*E. elegans* o *E. gigantea*) y la última el órgano al que pertenece la muestra (Hoja, Tallo o Raíz)

Tabla 10. Concentraciones (ppm) encontradas en las muestras de *E. elegans*, colectadas en el Invernadero en época de lluvia, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.

Elemento	Normal (Kabata- Pendias, 2001)	Excesivo (Kabata- Pendias, 2001)	Máximo permitido (CXS 193, 1995; Kabata Pendias, 2001)	ILIEeH	ILIEeT	ILIEeR
V	0.2-1.5	5-10	-	0.48	0.40	2.94
Cr	0.1-0.5	5-30	2	3.87	3.76	12.76
Mn	30-300	400-1000	300	22.87	27.00	22.05
Co	0.02-1	15-50	5	0.27	0.33	0.59
Ni	0.1-5	10-100	1-10	3.30	3.58	9.40
Cu	5-30	20-100	5-20	8.11	5.84	9.88
Zn	27-150	100-400	50-100	31.62	211.98	40.07
As	1-1.7	5-20	0.35*	0.00	0.00	0.00
Cd	0.05-0.2	5-30	0.2**	0.12	0.08	0.11
Sb	7-50	150	-	0.06	0.01	0.02
Ba	-	500	-	125.28	214.78	64.53
Pb	5-10	30-300	0.5-10	1.11	0.77	1.13
Hg	-	1-3	0.3**	0.02	0.02	0.03

*Arsénico inorgánico

**En vegetales de hoja verde

(En negritas las concentraciones de metales observadas que pueden considerarse tóxicas o están por encima del máximo permitido).

En la nomenclatura de las muestras la primera letra indica el sitio de colecta (Medix o Invernadero), la segunda la época (Lluvia o Seca), la tercera y cuarta la especie (*E. elegans* o *E. gigantea*) y la última el órgano al que pertenece la muestra (Hoja, Tallo o Raíz)

Tabla 11. Concentraciones (ppm) encontradas en las muestras de *E. gigantea*, colectadas en el Invernadero en época seca, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.

Elemento	Normal (Kabata- Pendias, 2001)	Excesivo (Kabata- Pendias, 2001)	Máximo permitido (CXS 193, 1995; Kabata Pendias, 2001)	ISEgH	ISEgT	ISEgR
V	0.2-1.5	5-10	-	0.10	0.13	25.14
Cr	0.1-0.5	5-30	2	1.06	2.08	22.42
Mn	30-300	400-1000	300	23.72	16.06	64.60
Co	0.02-1	15-50	5	0.06	0.04	1.34
Ni	0.1-5	10-100	1-10	1.51	0.66	9.51
Cu	5-30	20-100	5-20	2.27	4.05	13.47
Zn	27-150	100-400	50-100	4.31	28.70	35.07
As	1-1.7	5-20	0.35*	0.03	0.03	0.11
Cd	0.05-0.2	5-30	0.2**	0.06	0.06	0.21
Sb	7-50	150	-	0.02	0.03	0.04
Ba	-	500	-	40.51	43.75	56.71
Pb	5-10	30-300	0.5-10	0.66	0.57	2.69
Hg	-	1-3	0.3**	0.01	0.00	0.01

*Arsénico inorgánico

**En vegetales de hoja verde

(En negritas las concentraciones de metales observadas que pueden considerarse tóxicas o están por encima del máximo permitido).

En la nomenclatura de las muestras la primera letra indica el sitio de colecta (Medix o Invernadero), la segunda la época (Lluvia o Seca), la tercera y cuarta la especie (*E. elegans* o *E. gigantea*) y la última el órgano al que pertenece la muestra (Hoja, Tallo o Raíz)

Tabla 12. Concentraciones (ppm) encontradas en las muestras de *E. elegans*, colectadas en el Invernadero en época seca, comparadas con concentraciones aproximadas de elementos traza en tejidos vegetales, generalizadas para diversas especies, y concentraciones máximas permitidas en variedades comestibles.

Elemento	Normal (Kabata- Pendias, 2001)	Excesivo (Kabata- Pendias, 2001)	Máximo permitido (CXS 193, 1995; Kabata Pendias, 2001)	ISEeH	ISEeT	ISEeR
V	0.2-1.5	5-10	-	0.51	0.74	37.58
Cr	0.1-0.5	5-30	2	4.72	6.26	23.76
Mn	30-300	400-1000	300	10.84	21.29	146.65
Co	0.02-1	15-50	5	0.22	0.36	2.87
Ni	0.1-5	10-100	1-10	4.08	4.61	10.10
Cu	5-30	20-100	5-20	2.90	2.97	27.61
Zn	27-150	100-400	50-100	10.23	97.49	74.59
As	1-1.7	5-20	0.35*	0.04	0.05	0.14
Cd	0.05-0.2	5-30	0.2**	0.05	0.06	0.21
Sb	7-50	150	-	0.03	0.03	0.05
Ba	-	500	-	10.41	15.62	111.69
Pb	5-10	30-300	0.5-10	0.82	1.11	3.36
Hg	-	1-3	0.3**	0.01	0.01	0.02

*Arsénico inorgánico

**En vegetales de hoja verde

(En negritas las concentraciones de metales observadas que pueden considerarse tóxicas o están por encima del máximo permitido).

En la nomenclatura de las muestras la primera letra indica el sitio de colecta (Medix o Invernadero), la segunda la época (Lluvia o Seca), la tercera y cuarta la especie (*E. elegans* o *E. gigantea*) y la última el órgano al que pertenece la muestra (Hoja, Tallo o Raíz)

Para cada análisis sobre las diferencias entre diversas muestras se utilizó el conjunto de datos de concentraciones de metales pesados completo, armando grupos solo entre las variables de interés para cada análisis, e.g. para el análisis por órganos se utilizaron los datos de ambas especies, sitios y épocas. Solo se presentan gráficas para resultados estadísticamente significativos, dichas gráficas

varían ampliamente en escala de acuerdo con la concentración de metal pesado que representan.

Análisis por órgano

Entre distintos órganos, en ambas especies, existen concentraciones significativamente distintas de Al y Zn.

En la figura 7 se muestran las concentraciones de Al y Zn. Las muestras de raíz presentaron una concentración significativamente mayor de Al mientras que las de hoja y tallo presentaron concentraciones similares de dicho metal; por otro lado, las muestras de tallo presentaron una concentración significativamente superior de Zn mientras que las de hoja y raíz presentaron una concentración menor y similar.

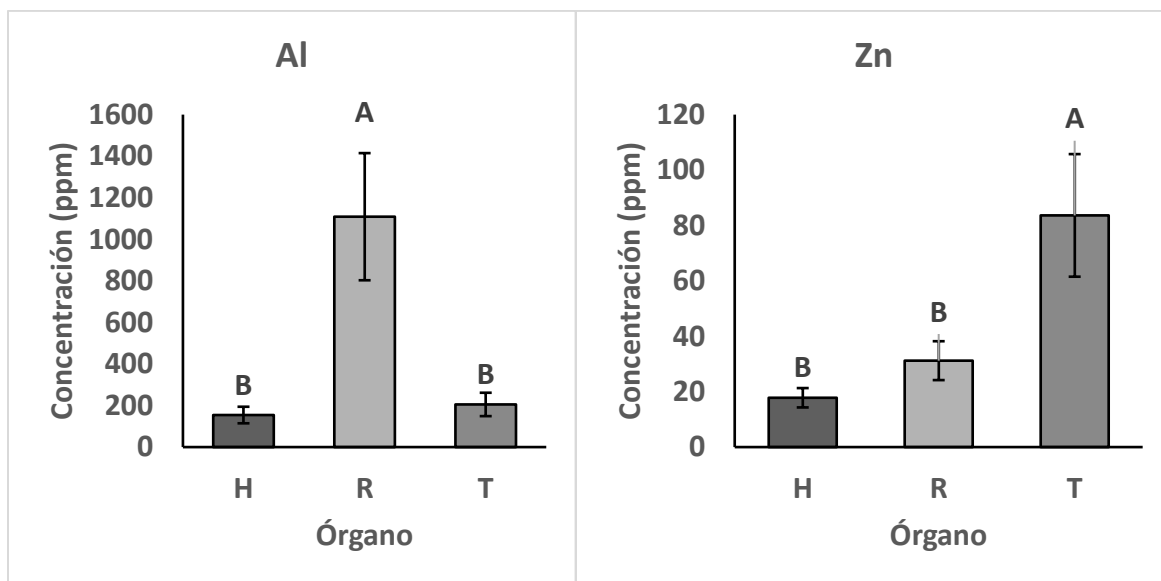


Figura 7. Concentraciones promedio (N=24) de Al y Zn observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con el órgano del que fueron colectadas de las muestras (H, hoja; T, tallo o R, raíz). Las líneas representan el error estándar.

Esto se determinó a través de un AD al analizar los grupos formados utilizando el órgano del que se colectó la muestra como variable categórica (Tabla 13)

Tabla 13. Resumen del AD realizado usando el órgano al que pertenece la muestra como factor para agrupar.

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (2,19)	p-level	Toler.	1-Toler. - (R-Sqr.)
Al	0.434788	0.389527	14.88854	0.000129	0.67999	0.32001
Zn	0.369988	0.457749	11.25373	0.000597	0.834433	0.165567
Mn	0.212401	0.797366	2.41423	0.116345	0.680346	0.319654

Pasos 3, Número de variables en el modelo: 3; Wilks' Lambda: .16936
 $F_{(6,38)}=9.0562$ $p < .0001$. En negritas se resaltan las variables con una contribución significativa a la discriminación entre grupos.

Análisis por especie

Entre *E. elegans* y *E. gigantea* existen concentraciones significativamente distintas de Zn y Ba (Tabla 14). En la figura 8 se muestran las concentraciones de Zn y Ba. Las muestras de *E. elegans* (Ee) presentaron una mayor concentración de Zn y una menor concentración de Ba comparadas con las muestras de *E. gigantea* (Eg)

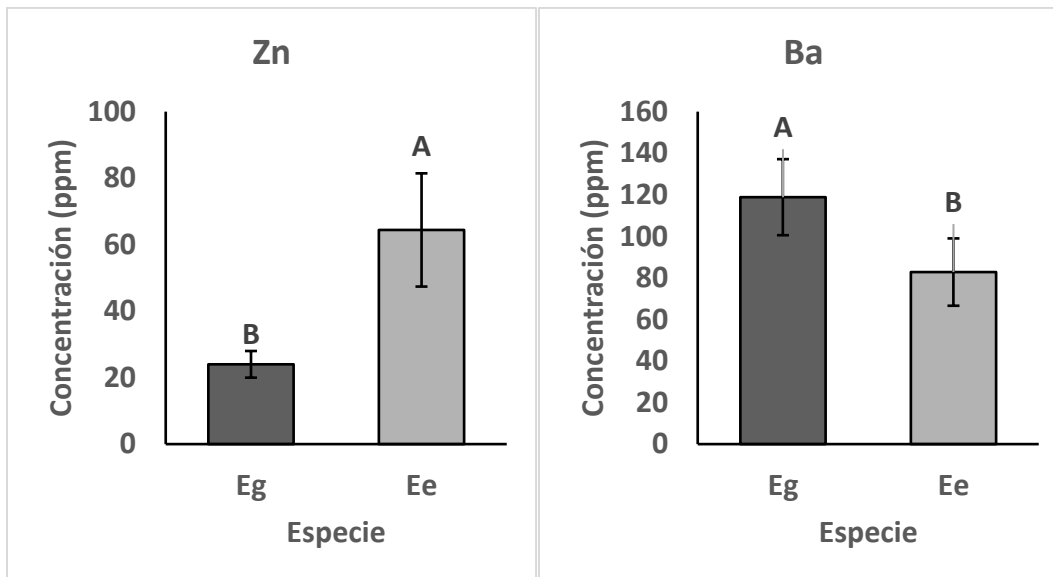


Figura 8. Concentraciones promedio (N=24) de Zn y Ba observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con la especie a la que pertenecen las muestras (Eg, *Echeveria gigantea*, Ee *Echeveria elegans*). Las líneas representan el error estándar.

Esto se determinó mediante un AD al analizar grupos formados utilizando la especie a la que pertenecen las muestras como variable categórica.

Tabla 14. Resumen del AD realizado usando la especie a la que pertenece cada muestra como factor para agrupar.

	Wilks' - Lambda	Partial - Lambda	F-remove - (1,15)	p-level	Toler.	1-Toler. - (R- Sqr.)
Zn	0.521108	0.623011	9.076638	0.008743	0.735483	0.264517
Ni	0.421998	0.76933	4.497494	0.051023	0.446494	0.553506
Cd	0.336535	0.964702	0.548848	0.470228	0.333132	0.666868
Cu	0.421543	0.770161	4.476439	0.051503	0.181473	0.818527
V	0.358901	0.904585	1.582198	0.227674	0.117314	0.882686
Ba	0.424226	0.76529	4.60042	0.048747	0.444749	0.555251
Hg	0.394816	0.822297	3.241593	0.09193	0.260532	0.739468
As	0.365832	0.887446	1.902437	0.188024	0.244191	0.755809

Pasos 8, Número de variables en el modelo: 8; Wilks' Lambda: .32466
 $F_{(8,15)}=3.900$ $p < .05$ En negritas se resaltan las variables con una contribución significativa a la discriminación entre grupos.

Análisis por sitio de colecta

Entre las muestras colectadas en diferentes sitios de colecta existen concentraciones significativamente distintas de As, V, Mn y Cd (Tabla15). En la figura 9 se muestran las concentraciones de As, Cd, V y Mn presentes en las muestras de distintos sitios. Las muestras colectadas en MEDIX presentaron una concentración significativamente mayor de As y Mn, por otro lado, las muestras colectadas en el Invernadero presentaron una mayor concentración de Cd y V.

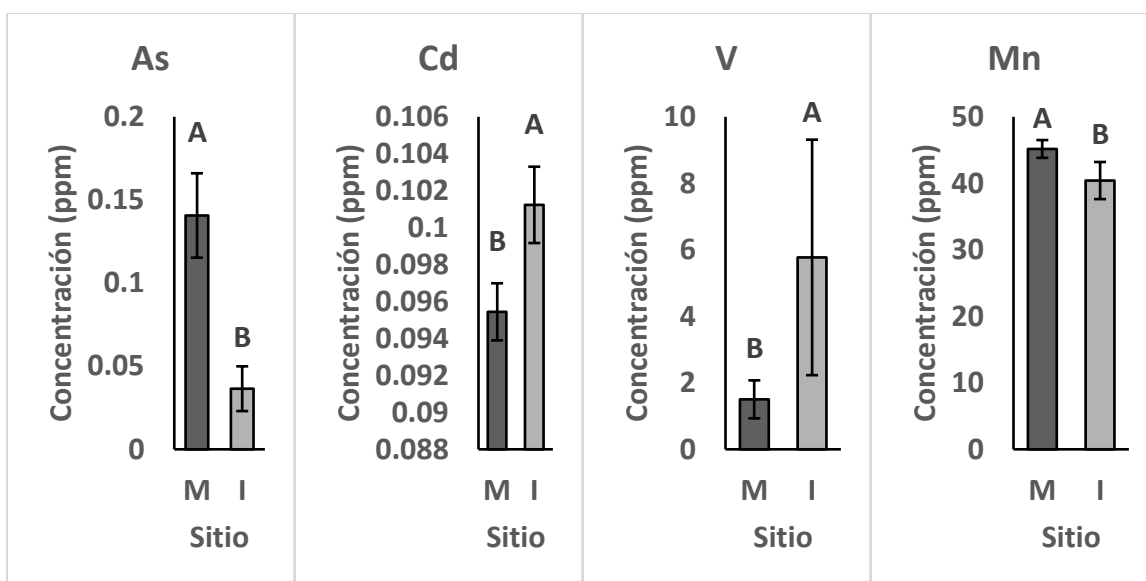


Figura 9. Concentraciones promedio (N=36) de As, Cd, Mn y V observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con el sitio de colecta de las muestras (M, MEDIX e I, Invernadero). Las líneas representan el error estándar.

Para este análisis se realizó un AD usando grupos formados utilizando el sitio de colecta como variable categórica (Tabla 15).

Tabla 15. Resumen del AD usando el sitio de colecta como factor para agrupar.

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (1,16)	p-level	Toler.	1-Toler. - (R-Sqr.)
As	0.51162	0.240165	50.62096	0.000002	0.252099	0.747901
V	0.479148	0.256441	46.39259	0.000004	0.031398	0.968602
Pb	0.133351	0.921424	1.36443	0.259883	0.196572	0.803428
Al	0.154443	0.79559	4.11086	0.059602	0.148345	0.851655
Mn	0.160901	0.763654	4.9519	0.040792	0.4081	0.5919
Cd	0.164105	0.748745	5.3691	0.034077	0.154491	0.845509
Cu	0.144627	0.849586	2.8327	0.111771	0.143607	0.856393

Pasos 7, Número de variables en el modelo: 7; Wilks' Lambda: .12287
 $F_{(7,16)}=16.317$ $p < .0001$ En negritas se resaltan las variables con una contribución significativa a la discriminación entre grupos.

Análisis por época de colecta

En la figura 10 se muestran las concentraciones de As, Ba y Hg obtenidas en muestras de distintas épocas. Las muestras colectadas en época de lluvia presentaron una concentración significativamente mayor de As, Ba y Hg. Posteriormente, se analizaron grupos formados utilizando la época de colecta como variable categórica, el AD determinó que entre las épocas de colecta existen concentraciones significativamente distintas de As, Ba y Hg (Tabla 16).

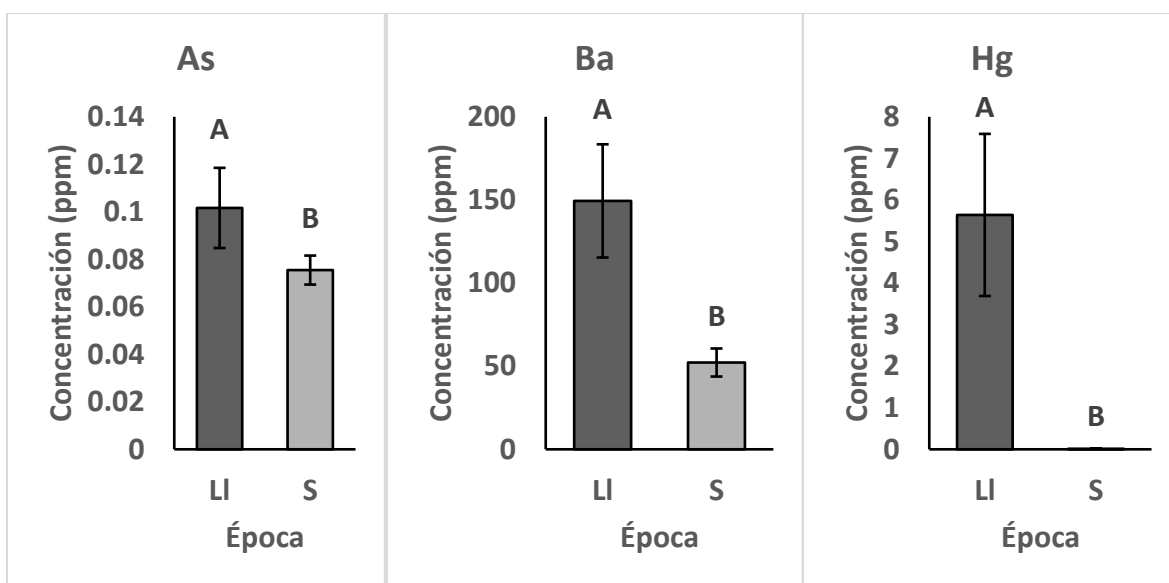


Figura 10. Concentraciones promedio (N=36) de As, Ba y Hg observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con la época de colecta de las muestras. Las líneas representan el error estándar.

Tabla 16. Resumen del AD realizado usando la época de colecta como factor para agrupar.

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (1,17)	p-level	Toler.	1-Toler. - (R-Sqr.)
Ba	0.252748	0.764538	5.235659	0.035209	0.685369	0.314631
Hg	0.28903	0.668565	8.427583	0.009899	0.242924	0.757076
As	0.249783	0.773615	4.974756	0.039484	0.175634	0.824366
Sb	0.213892	0.903427	1.817245	0.195331	0.258247	0.741753
Ni	0.23931	0.80747	4.053401	0.060194	0.36886	0.63114
Pb	0.225017	0.858762	2.795947	0.112806	0.355461	0.644539

Pasos 6, Número de variables en el modelo: 6; Wilks' Lambda: .19324.
 $F_{(6,17)}=11.829$ $p < .0001$ En negritas se resaltan las variables con una contribución significativa a la discriminación entre grupos.

Análisis global

El análisis de clúster permitió obtener un dendrograma de distancias (figura 11), usando este y examinando el proceso de aglomeración, se buscó el punto en que hubiera saltos inconsistentemente grandes en las medidas de similitud entre clusters menores y un arreglo que facilitara la interpretación.

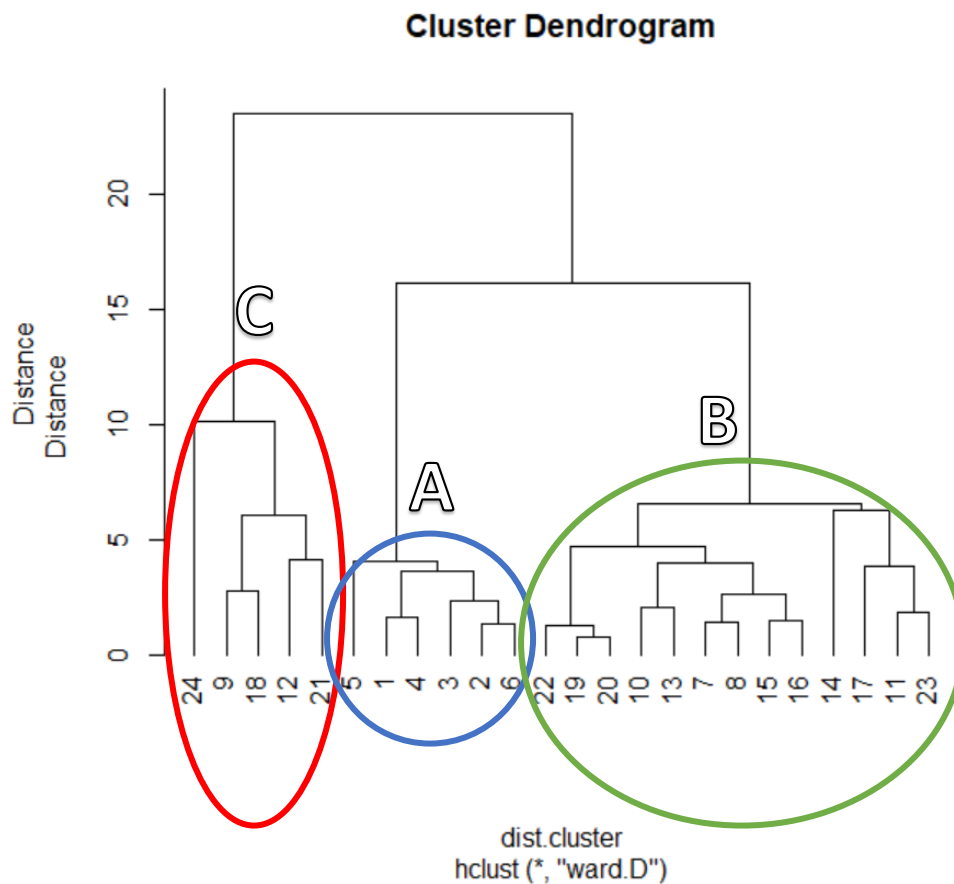


Figura 11 Dendrograma de distancias.

Se distinguieron 3 grupos basados en las similaridad de las entidades (siendo cada entidad el conjunto de valores de concentración de metales pesados para una determinada combinación de época y sitio de colecta, órgano y especie al que pertenece la muestra).

Al grupo A (azul) pertenecen todas las muestras colectadas en MEDIX en la época de lluvia, sin importar la especie u órgano de la planta de la cual fueron colectadas. Al grupo B (verde) pertenecen más de la mitad de las muestras, principalmente muestras de tallo y hojas de ambas especies y provenientes de la colecta de MEDIX en época seca o de las colectas realizadas en el Invernadero en ambas épocas. Al grupo C (rojo) pertenecen muestras de raíz, colectadas en ambos sitios, en ambas épocas y de ambas especies. Un AD determinó que estos grupos pueden ser discriminados entre si usando las concentraciones de Sb, As, Hg y Fe (Tabla 17).

Tabla 17. Resumen del AD realizado usando los grupos obtenidos del análisis de clúster.

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (2,11)	p-level	Toler.	1-Toler. - (R-Sqr.)
Al	0.001313	0.762001	1.71784	0.224262	0.735783	0.264217
Sb	0.002098	0.476971	6.0311	0.017049	0.632386	0.367614
As	0.003597	0.278183	14.27112	0.000879	0.314163	0.685837
Hg	0.003018	0.33156	11.08825	0.002307	0.450021	0.549979
Mn	0.001087	0.920593	0.47441	0.634412	0.628104	0.371896
Fe	0.002275	0.439793	7.00589	0.010911	0.038342	0.961658
Co	0.001514	0.66077	2.82362	0.102395	0.10353	0.89647
Cr	0.001574	0.635836	3.15003	0.08287	0.106882	0.893118
Pb	0.001403	0.7133	2.21065	0.155954	0.344201	0.655799
Zn	0.001193	0.838956	1.05577	0.380684	0.624374	0.375626

Pasos 10, Número de variables en el modelo: 10; Wilks' Lambda: .00100 approx. $F_{(20,22)} = 33.673$ $p < .0001$ En negritas se resaltan las variables con una contribución significativa a la discriminación entre grupos.

En la figura 12 se muestran las concentraciones de metales cuyas concentraciones presentan diferencias significativas entre grupos, las plantas del grupo A presentan una concentración significativamente mayor de As y Hg así como una concentración distinta de Fe que se encuentra en un intermedio entre las muestras de los grupos B y C. Las muestras del grupo B presentan cantidades significativamente menores de As y Fe comparadas con otros grupos. Finalmente, las muestras del grupo C presentan una concentración significativamente mayor de Fe, y una concentración de As significativamente distinta e intermedia comparada contra los demás grupos.

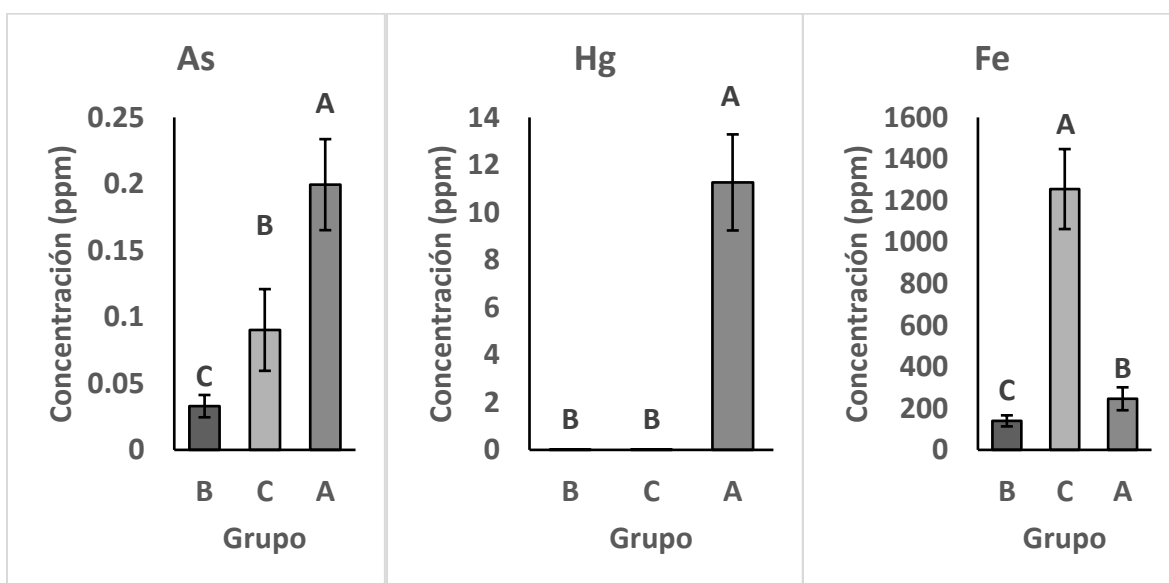


Figura 12. Concentraciones promedio (N=24) de As, Hg y Fe observadas en las muestras vegetales agrupadas de acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de clúster. Las líneas representan el error estándar.

Muestras de suelos

Se realizaron una serie de análisis de ANOVA de dos vías para examinar el efecto que tuvieron los diversos sitios y épocas de colecta, así como la interacción entre estos factores, sobre las concentraciones de metales observadas en las muestras de suelo.

En el caso del Zn, Cd, Sb y As no existieron interacciones ni diferencias significativas asociadas a uno de los factores, se pueden encontrar los resultados del ANOVA asociados a estos y a los demás resultados carentes de significatividad estadística en el Anexo 1, los resultados de las pruebas de TUKEY realizados como post hoc pueden consultarse en el Anexo 2.

En el caso del Al presente en las muestras de suelo, existió una interacción significativa entre los efectos de sitio y época de colecta sobre la concentración de este metal en suelos colectados [$F_{(1,8)} = 99.98$, $p < 0.0001$]. Se realizaron pruebas de Tukey. En MEDIX, durante la época de lluvia, la concentración de Al en suelos fue significativamente diferente ($p < 0.0001$). Como podemos observar en la figura 13, la concentración de Al en esta muestra fue significativamente mayor.

En el caso del V, existió una interacción significativa entre los efectos de sitio y época de colecta sobre la concentración de este metal en suelos colectados [$F_{(1,8)} = 14.889$, $p < 0.05$]. Se realizaron pruebas de Tukey. Para MEDIX, la concentración de V presente en las muestras colectadas en las distintas épocas fue significativamente diferente ($p < 0.0001$). La concentración observada fue menor en la muestra de MEDIX de la época seca en comparación a la del Invernadero en época de lluvia ($p < 0.05$) y La concentración observada en la muestra de

Invernadero de la época seca fue menor que la de MEDIX en época de lluvia ($p < 0.05$) (Figura 13).

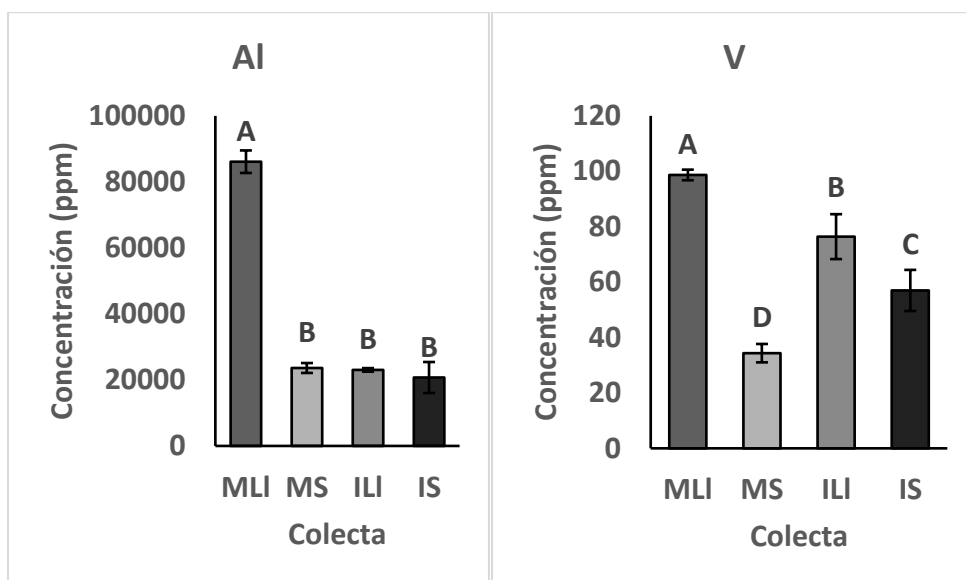


Figura 13. Concentraciones promedio ($N=18$) de Al y V en las muestras de suelo. En la nomenclatura de las muestras, la primera letra señala el sitio de colecta (M e I), la segunda la época (LI y S). Las líneas representan el error estándar.

En el caso del Co, no existió una interacción significativa entre los efectos de sitio y época de colecta sobre la concentración de este metal en suelos colectados. Existieron diferencias significativas entre sitios de colecta [$F(1,8) = 8.327$, $p < 0.05$] y épocas de colecta [$F(1,8) = 28.785$, $p < 0.05$]. Se realizaron pruebas de Tukey. La concentración observada en las muestras de MEDIX fue menor que en las provenientes del Invernadero ($p < 0.05$) y la concentración de las muestras colectadas en época de lluvia, fue, en promedio, mayor a la concentración presente en muestras de época seca ($p < 0.05$) (Figura 14).

En el caso del Ni, existió una interacción significativa entre los efectos de sitio y época de colecta sobre la concentración de este metal en suelos colectados [$F(1,8) = 9.608$, $p < 0.05$]. Se realizaron pruebas de Tukey. Para las muestras colectadas en MEDIX, la concentración de Ni fue significativamente mayor en época

de lluvia ($p < 0.05$). La concentración observada de Ni presentó el siguiente orden descendente MLI > ILI > IS > MS ($p < 0.05$) (Figura 14).

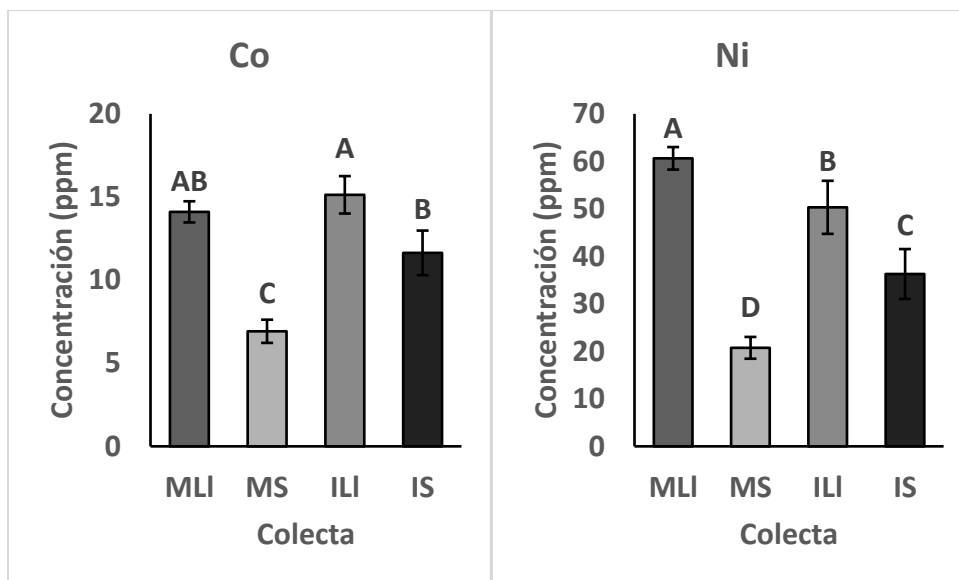


Figura 14. Concentraciones promedio (N=18) de Co y Ni en las muestras de suelo. En la nomenclatura de las muestras, la primera letra señala el sitio de colecta (M e I), la segunda la época (LI y S). Las líneas representan el error estándar.

En el caso del Hg, existió una interacción significativa entre los efectos de sitio y época de colecta sobre la concentración de este metal en suelos colectados [$F_{(1,8)}=39.75$, $p < 0.05$]. Se realizaron pruebas de Tukey. La concentración de Hg presente en las muestras colectadas en MEDIX durante la época de lluvia fue en promedio superior a la hallada en las colectadas en el resto de las condiciones ($p_{MLI-ILI} < 0.0001$, $p_{MLI-IS} < 0.0001$, $p_{MLI-MS} < 0.0001$) (Figura 15).

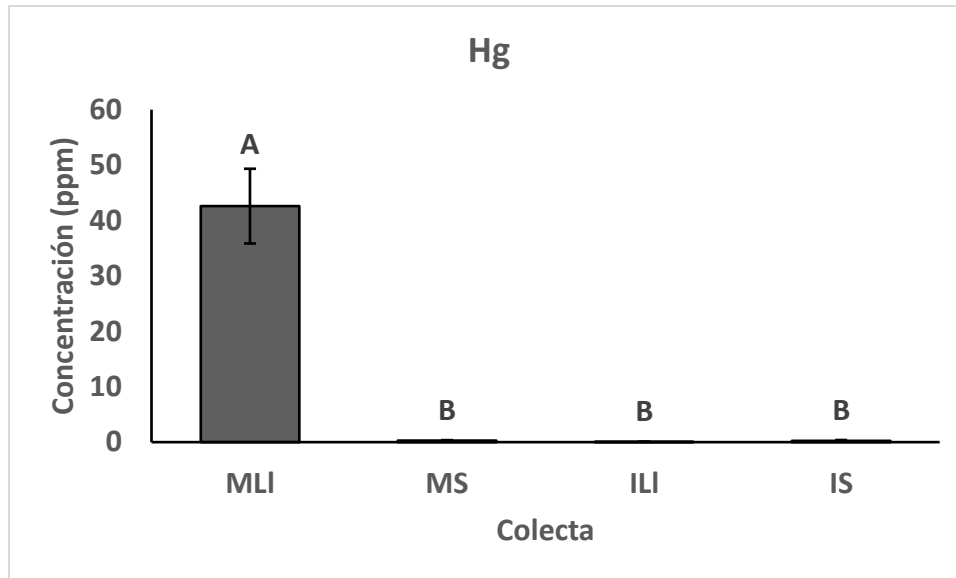


Figura 15. Concentraciones promedio (N=18) de Hg en las muestras de suelo. En la nomenclatura de las muestras, la primera letra señala el sitio de colecta (M e I), la segunda la época (LI y S). Las líneas representan el error estándar.

En el caso del Ba, Cr y Fe, no existió una interacción significativa entre los efectos de sitio y época de colecta sobre la concentración de estos metales en suelos colectados. Existieron diferencias significativas entre épocas de colecta para el Ba [$F_{(1,8)} = 42.78$, $p < 0.0001$], para el Cr [$F_{(1,8)} = 23.062$, $p < 0.05$] y para el Fe [$F_{(1,8)} = 8.096$, $p < 0.05$]. Se realizaron pruebas de Tukey. La concentración de Ba de las muestras colectadas en época seca fue en promedio mayor a la concentración presente en muestras de época de lluvia ($p < 0.0001$), por otro lado, la concentración de Cr y Fe observada en muestras colectadas en época de lluvia fue en promedio mayor a la observada en las pertenecientes a la colecta de época seca ($p < 0.05$ y $p < 0.05$, respectivamente) (Figura 16).

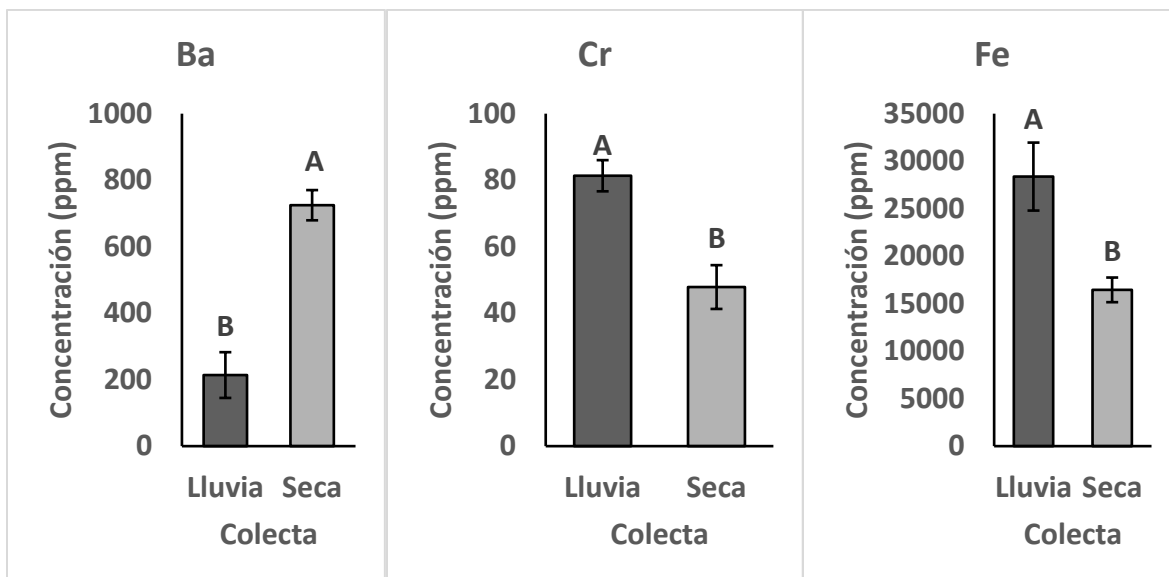
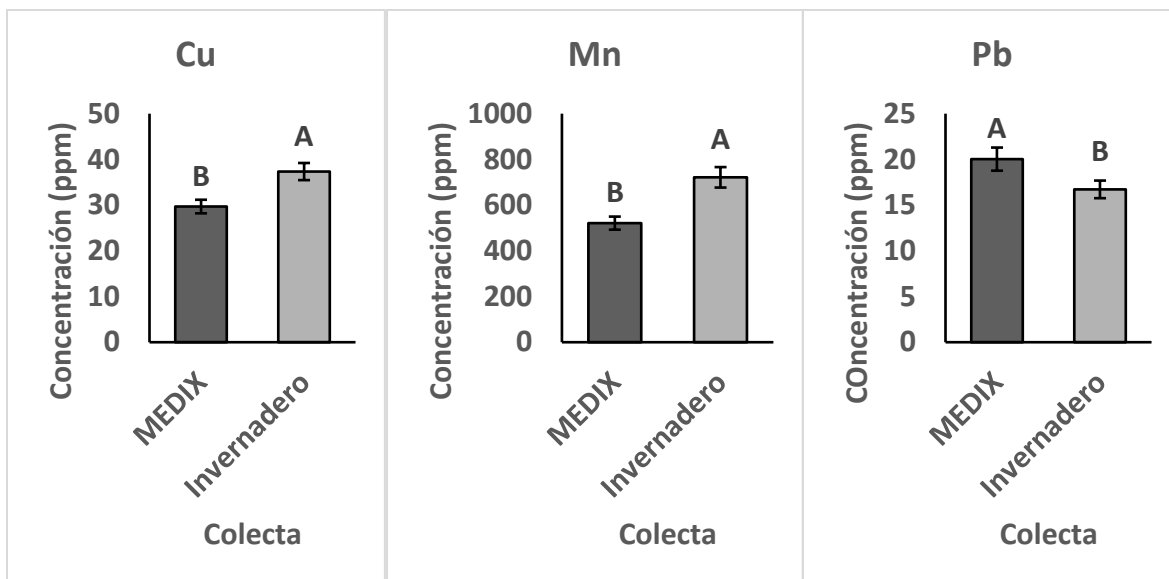


Figura 16. Concentraciones promedio (N=3) de Ba, Cr y Fe en las muestras de suelo. Las líneas representan el error estándar.

En el caso del Cu, Mn y Pb, no existió una interacción significativa entre los efectos de sitio y época de colecta sobre la concentración de estos metales en suelos colectados. Existieron diferencias significativas entre los sitios de colecta para el Cu [$F_{(1,8)}=12.299$, $p<0.05$], para el Mn [$F_{(1,8)}=18.766$, $p<0.05$] y para el Pb [$F_{(1,8)}=5.319$, $p=0.05$]. Se realizaron pruebas de Tukey. La concentración de Pb de las muestras colectadas en MEDIX fue en promedio mayor a la concentración presente en muestras provenientes del Invernadero ($p<0.05$), por otro lado, la concentración de Cu y Mn presente en muestras colectadas en el Invernadero fue en promedio mayor a la observada en las muestras pertenecientes a la colecta de MEDIX ($p<0.05$ y $p<0.05$, respectivamente) (Figura 17).

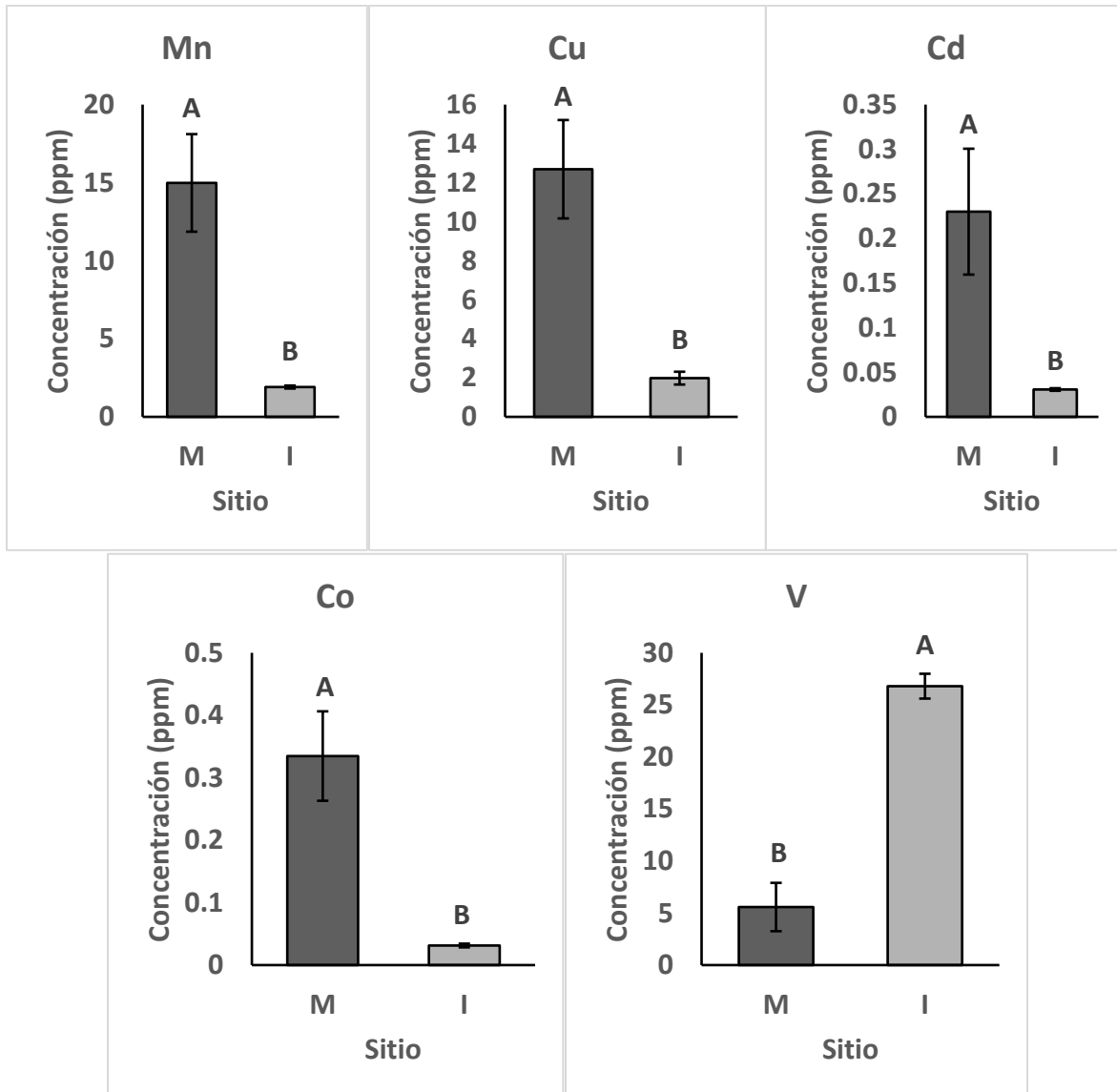


Figuras 17. Concentraciones promedio (N=3) de Cu, Mn y Pb en las muestras de suelo. Las líneas representan el error estándar.

Muestras de agua

En el caso del Al, Fe, Pb, Sb y Cr no se observan diferencias significativas asociadas entre las concentraciones promedio de las muestras colectadas, los resultados de estas pruebas de ANOVA se pueden encontrar en el Anexo 3.

La presencia de As, Ba, Ni y Zn en las muestras del sitio Invernadero fue tan baja que quedó por debajo del límite de detección del ICP-MS. En las muestras colectadas en MEDIX fueron observadas concentraciones significativamente superiores en comparación a las muestras colectadas en el Invernadero para Cd [$F_{(1,4)} = 7.98$, $p < 0.05$], Co [$F_{(1,4)} = 17.92$, $p < 0.05$], Cu [$F_{(1,4)} = 17.73$, $p < 0.05$] y Mn [$F_{(1,4)} = 17.49$, $p < 0.05$], por otro lado, la concentración de V fue significativamente menor en las muestras del sitio MEDIX comparada a las del sitio Invernadero [$F_{(1,4)}=66.09$, $p < 0.05$] (Figura 18).



Figuras 18. Concentraciones promedio (N=3) de Cd, Co, Mn, Cu y V en las muestras de suelo (Medix M, Invernadero I). Las líneas representan el error estándar.

Factor de bioconcentración

El FBC fue calculado para analizar la capacidad de las plantas para capturar metales pesados. En el caso de *E. elegans* los FBC fueron relativamente elevados para todos los metales menos el As, entre ellos se observan valores notoriamente elevados como los de V (0.66), Ni (1.030), Cu (0.778), Zn (0.660), Mo (1.295), Ba

(0.658) y Hg (0.718) (Tabla 18). Los FBC mayores a 1 significan que la planta acumula el metal, todos los valores calculados se pueden observar en la tabla 18.

Tabla 18. Factor de Bioconcentración en *E. elegans* y *E. gigantea* colectadas en las áreas de estudio de la CDMX.

Muestra	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Pb	Hg
MLIEg	0.009	0.024	0.035	0.058	0.009	0.016	0.022	0.23	0.185	0.093	1.17	0.214	0.365	0.056	0.061
MsEg	0.057	0.138	0.243	0.094	0.063	0.124	0.421	0.2	0.28	0.033	0.901	0.019	0.064	0.072	0.046
ILIEg	0.011	0.011	0.07	0.045	0.009	0.025	0.084	0.095	0.191	-	0.363	-	0.654	0.07	0.426
IsEg	0.051	0.441	0.378	0.097	0.088	0.115	0.262	0.379	0.31	0.036	0.888	0.08	0.087	0.182	0.04
MLIEe	0.015	0.027	0.084	0.043	0.016	0.033	0.074	0.181	0.437	0.068	1.295	0.471	0.658	0.143	0.195
MsEe	0.051	0.195	0.589	0.113	0.104	0.273	1.03	0.476	0.258	0.045	0.48	0.031	0.038	0.148	0.052
ILIEe	0.053	0.039	0.154	0.028	0.036	0.039	0.187	0.252	0.35	-	0.411	0.014	0.231	0.061	0.718
IsEe	0.141	0.66	0.401	0.22	0.178	0.247	0.278	0.778	0.66	0.044	0.891	0.082	0.171	0.227	0.098

En la nomenclatura de las muestras, la primera letra señala el sitio de colecta (Medix M e Invernadero I), la segunda la época (Lluvia LI y Seca S) y las últimas dos letras el género y la especie de la planta a la que pertenece la muestra, Eg: *Echeveria gigantea*, Ee: *Echeveria elegans*. En negritas se resaltan los FBC mayores a 1.

Factor de translocación

Se calculó el FT para analizar la capacidad de la planta de translocar los metales de la raíz a partes aéreas (Tabla 19). La gran mayoría de los valores elevados se observaron en las muestras provenientes del sitio MEDIX, época seca, pertenecientes a *E. gigantea*, estas muestras presentaron en su mayoría valores superiores a 1: Al (1.634), Cr (2.350), Mn (1.804), Fe (1.581), Co (1.941), Ni (2.558), Cu (1.165), Cd (1.333), Pb (1.593) y Hg (2.852). En el mismo sitio y época, el FT de Mn (1.808), As (2.229) y Mo (1.872), observado en *E. elegans* fue elevado. El valor más alto observado para el Zn fue de 5.351 en las muestras del sitio Medix en época seca, en *E. elegans*. El valor más alto observado para el Ba fue de 3.329 en las muestras de *E. elegans* colectadas en el Invernadero en época de lluvia.

Los FT más altos observados para *E. gigantea* fueron los de Cr, Ni y Hg, mientras que los valores más altos observados para *E. elegans* fueron los de Zn y Ba. Un valor cercano a 1 significa que los metales están siendo translocados casi completamente desde la raíz hacia partes aéreas, un valor mayor a 1 significa que la planta está translocando y acumulando activamente estos metales pesados en partes aéreas. Todos los FT calculados se pueden observar en la tabla 19.

Tabla 19. Factor de Translocación en *E. elegans* y *E. gigantea* colectadas en las áreas de estudio de la CDMX.

Muestra	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Pb	Hg
MLIEg	1.634	0.85	2.35	1.023	1.581	1.941	2.558	1.165	1.915	0.803	0.915	1.333	2.304	1.593	2.852
MsEg	0.041	0.019	0.157	0.773	0.041	0.09	0.116	0.558	3.145	0.394	0.696	0.846	1.265	1.009	0.863
ILIEg	0.223	0.225	0.199	0.563	0.218	0.256	0.552	0.809	1.93	-	0.976	-	2.705	0.566	0.544
IsEg	0.066	0.005	0.093	0.249	0.027	0.032	0.069	0.3	0.818	0.295	0.264	0.57	0.771	0.21	0.362
MLIEe	0.342	0.389	1.789	1.804	0.375	0.716	1.399	0.682	3.497	2.229	1.872	0.606	0.909	0.625	1.229
MsEe	0.306	0.125	0.349	1.271	0.165	0.179	0.263	0.305	5.351	0.331	0.824	0.865	1.732	0.445	0.467
ILIEe	0.107	0.135	0.295	1.224	0.136	0.562	0.381	0.591	5.291	-	0.734	0.915	3.329	0.682	0.863
IsEe	0.113	0.02	0.263	0.145	0.078	0.125	0.456	0.108	1.307	0.386	0.285	0.674	0.14	0.33	0.465

En la nomenclatura de las muestras, la primera letra señala el sitio de colecta (Medix M e Invernadero I), la segunda la época (Lluvia Ll y Seca s) y las últimas dos letras el género y la especie de la planta a la que pertenece la muestra, Eg: *Echeveria gigantea*, Ee: *Echeveria elegans*. En negritas se resaltan los FT mayores a 1.

Discusión.

Transporte y acumulación en órganos

Las muestras de tallo presentaron concentraciones superiores de Zn (83.62 ppm) que las muestras de hoja (17.8 ppm) y raíz (31.19 ppm). De forma similar Hernández (2017) concentraciones de Zn mayores en tallo de *E. gigantea* (98.69 ppm) que en hoja (26.36 ppm) y raíz (27.85 ppm). En contraste Leal (2014), teniendo como zona de estudio un techo verde, reporta una mayor concentración de Zn en hojas que en otros órganos de *E. elegans*.

En condiciones de suelo ácido ($\text{pH} < 3$) y oxidante (bien aireado) o en condiciones altamente oxidantes (aun con $\text{pH} > 5$), el Zn presenta alta disponibilidad y movilidad. Debido al carácter esencial del Zn, las plantas presentan vías de absorción activa y movilización, lo cual explica las concentraciones relativamente altas de Zn que pueden ser observadas frecuentemente en organismos vegetales y su presencia en órganos aéreos (Kabata-Pendias, 2011).

La acumulación de metales pesados en plantas se atribuye a una rápida entrada por las raíces, una translocación eficiente a órganos aéreos y un secuestro o detoxificación eficiente. Poco se sabe, sin embargo, de los procesos subsecuentes, como acumulación a largo plazo, movilización hacia o fuera de órganos senescentes, etc.) por los que atraviesan los excesos de metales pesados en plantas acumuladoras. Los nutrientes como el Zn son móviles y frecuentemente son relocalizados desde tejidos viejos hacia tejidos nuevos para promover el crecimiento. Usualmente, los tejidos más viejos muestran mayores concentraciones de metales que tejidos en desarrollo (Hu, *et al.*, 2018), este es frecuentemente el caso del Zn. Diversos estudios en otras familias y subfamilias vegetales señalan acumulación de Zn en epidermis y córtex del tallo, apoplasto de raíces, vacuolas a nivel foliar y compartimentos simplásticos (citosol y cloroplastos) (Gómez-Bernal *et al.*, 2014, Hu *et al.*, 2018). El entendimiento de los procesos que median la acumulación de Zn en una determinada región de la planta es aún escaso.

Existe la posibilidad de que el Zn este siendo absorbido vía caulinar y acumulado tanto en tallo como en las hojas, siendo menor la concentración en hojas observada en estudio, debido al recambio de hojas senescentes. Así como la posibilidad de que exista una movilización y acumulación en el tallo.

En el caso del Al, se encontró una concentración significativamente mayor en la raíz (1108.72 ppm) que en el tallo (205.22 ppm) y la hoja (154.29 ppm), esto sugiere una baja movilidad del Al de las raíces hacia la parte aérea y una baja movilización de este metal desde las raíces. De forma similar, Hernández (2017) encontró concentraciones significativamente mayores de Al en las raíces (311.72 ppm) de *E. gigantea* colectadas en condiciones de muro verde, comparadas con los demás órganos (228.45 ppm en tallo y 58.69 ppm en hoja). Leal (2014) no analizó concentraciones de Al en sus muestras vegetales, sin embargo, observa numerosas partículas de menor brillo que, señala, pueden ser partículas metálicas de Al, Ca, Mg y Fe en el córtex de cortes de raíz de *E. elegans*. Este autor sugiere que, en su paso hacia los haces vasculares y la región medular, los metales se acumulan en la zona cortical, ya sea en el interior de las células o en el espacio intercelular.

El factor de translocación elevado de este metal obtenido para las muestras de *E. gigantea* colectadas en época de lluvia puede deberse a estresores propios de esta colecta.

El Al es un componente abundante del suelo, su disponibilidad depende del pH del mismo, su forma química y la concentración disponible para las plantas determina su toxicidad; aun sin ser un elemento esencial es común hallarlo en muestras vegetales en suelos ácidos (pH menor o igual a 5.5) (Kabata-Pendias, 2004, Quintal *et al.*, 2017), su presencia en las muestras colectadas en este estudio puede deberse a las frecuentes lluvias ácidas en el Valle de México. La acumulación de aluminio indica que la sensibilidad al elemento ocurre en el ápice radicular; los mecanismos de resistencia al aluminio están confinados principalmente en esta zona (Casierra y Aguilar, 2007).

Tanto el Al como el Zn presentaron concentraciones significativamente superiores en un órgano particular (En raíz y tallo, respectivamente). Esto sugiere que existen procesos activos de retención, absorción y traslocación (Alloway, 1990), aún en bajas concentraciones, que *E. elegans* y *E. gigantea* realizan comúnmente para estos metales.

Transporte y acumulación especie específico

Se observó una acumulación mayor de Zn en las muestras de *E. elegans* (64.41 ppm) que en las de *E. gigantea* (23.99 ppm). Los estudios de Hernández (2017) y Leal (2014) muestran un fenómeno similar al observado. Hernández reporta una concentración de 22 ppm en muestras de *E. gigantea* mientras que Leal reporta 100 ppm de Zn en muestras de *E. elegans*.

De acuerdo con Kabata-Pendias (2011), la absorción de Zn por parte de las plantas tiende a seguir una relación lineal con respecto a su concentración en el sustrato, sin embargo, existen diversos factores a los que se puede atribuir la acumulación diferencial observada para este elemento entre ambas especies.

Primero es necesario tomar en cuenta que, aun siendo dos organismos de la misma especie, *E. elegans* y *E. gigantea* presentan hábitos distintos. Como es señalado por Aerts y Chapin (2000), la variación en patrones de captación de nutrientes es determinada frecuentemente por patrones de distribución de biomasa. Estos patrones de captación distintos y posibles requerimientos nutrimentales diferentes se pueden reflejar directamente en la absorción de Zn.

Otra posibilidad es que un déficit nutrimental provoque una mayor absorción de Zn. Lu (2013), observó en *Sedum alfredii* que una deficiencia de calcio (Ca) puede provocar una mayor movilización de Zn a través de la planta. Finalmente cabe

señalar que en la absorción y acumulación de Zn participan una gran cantidad de factores, desde genéticos, como la presencia de genes que codifican para proteínas de tolerancia a metales, hasta la acumulación de diversos compuestos, y complejas respuestas morfofisiológicas (Li *et al.*, 2018) por lo que es difícil aseverar qué provoca esta captación diferencial.

Se observó una acumulación mayor de Ba en las muestras de *E. gigantea* (118.82 ppm) que en las de *E. elegans* (82.79 ppm). De forma similar, Hernández (2017) obtuvo concentraciones promedio de Ba para *E. gigantea* de 51.02 ppm, mayores a aquellas observadas por Leal (2014) quien encontró concentraciones de alrededor de 20 ppm para *E. elegans*. Además, Hernández (2017) reportó una alta concentración de Ba en hojas de *E. gigantea*, lo cual el autor interpreta como un signo de una posible absorción foliar de este metal.

Ha sido señalado que la tendencia general con respecto a la acumulación de Ba en tejidos vegetales es una relación lineal entre la concentración del metal en suelos y en los tejidos de la planta (Ribeiro *et al.*, 2018). Ribeiro y sus colaboradores (2018) reportan resultados similares a los del presente trabajo. Los autores reportan una concentración menor de Ba en tejidos de *Eleocharis acutangula* que en los tejidos de *Typha dominguensis*. Señalan que no es posible determinar si este resultado contrastante se debe a la diferencia en las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo los estudios o a la edad de las plantas y su tiempo de exposición a suelos contaminados. Ya que en este estudio se observó un efecto fenómeno similar en diversas condiciones, se sugiere que este efecto puede deberse a la edad de las plantas utilizadas ya que *E. elegans* y *E. gigantea* presentan tasas de crecimiento

distintas, en consecuencia, al usarlas como plantas de ornato, a menudo se utilizan individuos de edades distintas.

Acumulación diferencial entre sitios

Las muestras colectadas en MEDIX presentaron mayor concentración de As que las colectadas en el Invernadero. En el estudio de Ruíz y Armienta (2012) se reportan concentraciones de As en plantas de maíz colectadas en distintos sitios, en este estudio reportan concentraciones que tienden a aumentar de forma proporcional a la concentración del metal en suelos, lo cual sugiere que la concentración en tejidos vegetales puede tener una relación cercana a la concentración en suelo. Sin embargo, esta tendencia presenta sus excepciones, pues la muestra vegetal con la concentración más elevada de As no corresponde al sitio con la concentración más elevada de As en suelos (Ruíz y Armienta, 2012). No se encontraron concentraciones significativamente distintas de As en las muestras de suelo colectadas para este estudio, sin embargo, la concentración de As fue mayor en las muestras de agua de MEDIX, lo cual puede ser un indicativo de que el As hallado en plantas de esta localidad está llegando al sitio a través del agua de riego y siendo incorporado por las plantas.

En MEDIX también se observó una concentración superior de Mn. Gómez Bernal y sus colaboradores (2014) reportan que la concentración distinta de Mn en plantas de la misma especie colectadas en diversos sitios puede deberse a mayores niveles de contaminación por Mn en los mismos. En contraste los resultados del mismo estudio no presentan una relación clara entre las concentraciones de Mn en muestras vegetales y en muestras de suelo de los sitios en que fueron colectados. Caso similar se encontró en el presente trabajo, las concentraciones mayores de

Mn en muestras de suelo fueron las del Invernadero, por otro lado, en muestras de agua la mayor concentración de Mn se encontró en las muestras colectadas en MEDIX.

Los factores de translocación para el As y Mn fueron superiores en las muestras vegetales de MEDIX que en las del Invernadero, existiendo la posibilidad de que, debido a diversas condiciones de suelo, estos metales presentaran mayor biodisponibilidad, un efecto similar a este fue observado previamente por Hernández (2014) quien describe una mayor concentración de As y Mn en plantas de *E. elegans* en condiciones de muro verde, en contraste con plantas creciendo en una azotea verde.

Las muestras colectadas en el Invernadero presentaron una mayor concentración de Cd. Hernández (2014) también reporta una concentración de Cd diferente entre sitios de estudio, sin embargo, sugiere que las concentraciones distintas de metales pueden deberse a los contaminantes que provienen de los materiales con que se construyen los sitios de naturación. Presentándose el caso contrario en este estudio, ya que fue la condición de Invernadero la que presentó concentraciones mayores de este metal en las muestras. La situación se vuelve más compleja al considerar que las concentraciones de Cd fueron similares en muestras de suelo de ambos sitios y superiores en las muestras de agua de MEDIX.

Se conoce que algunas plantas tienden a absorber mayores cantidades de Cd cuando crecen en macetas en invernaderos que en el mismo sustrato en campo abierto, probablemente debido a diferencias en el microclima y la humedad (De Vries y Tiller, 1978). El entendimiento de los mecanismos y factores externos que controlan la absorción de Cd y Zn en las plantas es uno de los más avanzados en

el campo de estudio, sin embargo, los modelos están fuertemente limitados a ciertas condiciones y especies vegetales (Kabata-Pendias, 2004). Se sugiere que la mayor acumulación de Cd observada en condiciones de invernadero puede deberse a que las plantas fueron cultivadas en macetas, es importante señalar que el Cd es un metal pesado altamente tóxico, cuya presencia es particularmente elevada en zonas industrializadas (Hu *et al.*, 2018), por lo cual es importante investigar más acerca de los factores que llevan a su acumulación preferencial en ciertos sitios.

En el Invernadero se colectaron las muestras con mayor concentración de V. En este caso tomaremos como punto de comparación las concentraciones observadas en tejidos de diversas plantas por Teng y colaboradores (2011), al estudiar plantas creciendo en una zona industrial en China encontraron concentraciones de entre 2.6 y 42.8 ppm. El haber encontrado concentraciones de 8 ppm en promedio en las muestras analizadas en este sitio que es considerado una zona rural se vuelve un fenómeno remarcable, sobre todo considerando que la mayor aportación de V al ambiente está dada por la quema de combustibles fósiles (Qian *et al.*, 2014).

El enriquecimiento natural de suelos con V es un evento extraño, generalmente los suelos presentan altas concentraciones de V debido a actividades humanas. El papel de las propiedades del suelo y la especie vegetal en la asimilación de V ha sido estudiado y es altamente variable, tanto el pH como el carbono orgánico total en el suelo tienen un impacto importante en la biodisponibilidad de este metal. La acumulación en tejidos vegetales también depende de la especie y la concentración en el suelo (Qian, 2014), se sugiere que la mayor concentración observada en las muestras del Invernadero puede deberse a la mayor concentración de V observada en las muestras de agua colectadas en este sitio. Se requieren más estudios sobre

los sitios para determinar las variables que llevaron a la diferencia de concentraciones observadas en este estudio.

Finalmente, cabe señalar que las diferencias previamente discutidas pueden deberse a las condiciones fisicoquímicas del suelo. Kabata-Pendias (2004) señala que el Cd y el V presentan mayor biodisponibilidad en condiciones de suelo oxidante con un pH bajo (<3 hasta poco >5), mientras que el Mn presenta mayor biodisponibilidad cuando los suelos presentan un pH mayor a 5 y condiciones reductoras.

Diferencias entre épocas de colecta

Las muestras colectadas en la época de lluvia presentaron una concentración significativamente mayor de As, Ba y Hg. Un efecto similar a esta variación estacional de la concentración de As en tejidos vegetales ha sido reportado previamente. En diversas especies de pastura norteamericanas, creciendo en espacios anteriormente utilizados para cultivo o cercanos a minas, se observó un incremento en las concentraciones de As hacia el inicio del invierno tanto en plantas anuales como perenes (Merry *et al.*, 1986).

La alta concentración de Hg en las muestras urbanas (MEDIX) en época de lluvia puede ser atribuida a un fenómeno similar al observado por Huang *et al.* (2013), quienes analizan concentraciones de Hg en diversos sitios de Estados Unidos, al hacerlo encuentran que la deposición húmeda anual en diversos sitios es mayor a la deposición seca esperada para las mismas regiones. Esto, aunado a que el Hg es de fácil acumulación en condiciones de alta humedad (Kabata-Pendias, 2004), puede explicar las altas concentraciones de Hg observadas en las muestras de esta época.

Muchas de las fluctuaciones observadas en las concentraciones de metales pesados a través de las estaciones pueden ser explicadas por dilución mediante crecimiento y cambios relacionados a la senescencia. Cambios en la temperatura del suelo, del aire o cambios en la intensidad lumínica que también afectan los procesos de absorción y movilización (Merry *et al.*, 1986). El tener más información acerca del movimiento de metales pesados hacia órganos senescentes y del recambio de hojas estacional para estas plantas, podrá servir para esclarecer los factores que están involucrados en la captación estacionalmente diferencial.

Diferencias globales

Todas las muestras colectadas en MEDIX en la época de lluvia, sin importar la especie u órgano de la planta de la cual fueron colectadas, presentaron una concentración significativamente mayor de As, Sb y Hg.

Como se mencionó previamente, la concentración de As fue mayor en las muestras de agua de MEDIX, lo cual puede ser un indicativo de que el As hallado en plantas de esta localidad está llegando al sitio a través de la lluvia y siendo incorporado por las plantas. Esto, en conjunto con los elevados factores de translocación para el As observados en las muestras vegetales de MEDIX, puede explicar la alta concentración de As observada en este grupo de muestras.

La alta deposición húmeda anual de Hg en ciertos sitios urbanos aunada a la fácil acumulación en condiciones de alta humedad (Kabata-Pendias, 2004), puede explicar las altas concentraciones de Hg observadas en estas muestras.

Previamente había sido reportado que algunas plantas tienden a acumular Sb en las raíces, señal de que este metal pesado estaba siendo inmovilizado en ellas (Medina y Montaña, 2014), sin embargo, en este estudio no se observó una

captación preferencial en ningún órgano. Más allá de eso, la concentración observada en los tejidos vegetales, categorizados en este grupo, aun siendo significativamente mayor a la observada en otros grupos, presenta valores de alrededor de 0.2 ppm, lo cual, en comparación con las concentraciones consideradas fitotóxicas (de 150 ppm) (Kabata-Pendias, 2011), puede considerarse inocuo.

Las muestras de raíz colectadas en ambos sitios, principalmente en época de secas y de ambas especies, presentaron una concentración significativamente mayor de Fe.

Anteriormente se han reportado altas concentraciones de Fe en muestras de raíz de *E. gigantea* colectadas en diversos sistemas de naturación (Hernández, 2014). Es importante recordar que la raíz funciona, en la mayoría de los casos, como el punto principal de entrada a la planta para los metales pesados. Diversos estudios muestran altas concentraciones de Fe en raíces tanto de plantas crasuláceas como de plantas pertenecientes a otras familias, así mismo en la mayoría se observan bajos factores de translocación, indicativo de que el transporte de Fe desde la raíz hacia las partes aéreas de la planta es bajo (Gómez-Bernal *et al.*, 2014; Hernández, 2014; Medina y Montaña, 2014; Ruíz y Armienta, 2012).

Debido al importante papel fisiológico que presenta el Fe en los organismos vegetales, la absorción excesiva de Fe y la baja tolerancia ante este metal en los tejidos son fenómenos inusuales. El Fe es un metal de fácil absorción y la tolerancia ante él está frecuentemente asociada con la oxidación e inmovilización o la exclusión de Fe soluble por las raíces (Kabata-Pendias, 2011), una mayor concentración de Fe en raíces puede considerarse normal e inocua.

Las muestras principalmente de hoja y tallo, provenientes de ambos sitios y colectadas en ambas épocas, presentaron concentraciones menores de As, Fe y Hg comparadas con otros grupos.

La concentración baja de metales pesados en el brote, en comparación a la observada en tejidos de raíz, es un fenómeno observado comúnmente y puede ser indicativo de un secuestro de ciertos compuestos en raíces (Qian *et al.*, 2014). Por lo general, solo se observan factores de translocación altos cuando la planta está activamente movilizando los metales hacia las partes aéreas, tal es el caso de metales pesados en ciertas especies hiperacumuladoras, como *Sedum alfredii*, *S. plumbizicola* y *Ptytolacca americana*, entre otras, (Li *et al.*, 2018) y de algunos metales que son nutrimentos importantes.

Muestras ambientales

En MEDIX, durante la época de lluvia la concentración de Al fue superior. El Al en muestras de suelo y sustrato se considera natural, pues es un componente estructural de la matriz mineral del suelo o sustrato (Kabata-Pendias, 2004). En condiciones de lluvia, especialmente cuando ésta presenta alta acidez, las fracciones sólidas de Al liberan más moléculas al sustrato, esto y una solubilidad aumentada lleva a una mayor presencia del metal en suelos (Brautigan *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2018). La lluvia ácida es un fenómeno frecuente en la CDMX, esto podría explicar la mayor presencia de Al en estas muestras.

En el caso del Ni se encontró el siguiente orden de concentración MLL>ILI>IS>MS. El Ni es un metal pesado comúnmente asociado a actividades que requieren quema de derivados del petróleo (Sobhanardakani *et al.*, 2016), como diversos metales

pesados, este puede llegar a los suelos con más facilidad gracias a fenómenos de deposición húmeda.

La concentración de Hg presente en las muestras colectadas en MEDIX durante la época de lluvia fue en promedio superior. El Hg es un componente del suelo tanto de origen natural como antropogénico, sin embargo, la presencia de cantidades elevadas de Hg en zonas industriales a menudo se debe a la gran cantidad de este metal que es liberada al ambiente por actividades como la quema de combustibles fósiles, de basura y el manejo inadecuado de desechos industriales (Husejnovic *et al.*, 2018).

La concentración de Ba en las muestras colectadas en época seca fue en promedio mayor a la concentración presente en muestras de época de lluvia. El Ba se utiliza comúnmente para la fabricación de vidrios, pinturas e impermeabilizantes, se encuentra comúnmente en las plantas y ha sido reportado con anterioridad en sistemas de naturación (Hernández, 2014). Su presencia es común en suelos, sin embargo, como ha sido reportado para otros metales (Husejnovic *et al.*, 2018), tiende a disminuir en época de lluvia cuando se disuelve y lixivia fuera del sustrato.

La concentración de Co, Cr, Fe y V observada en muestras colectadas en época de lluvia fue, en promedio, mayor a la observada en las pertenecientes a la colecta de época seca. Cd, Mn, Zn, Fe, Al, Pb, Cr, Cu, Co y V son metales que han sido observados en estudios de agua de escorrentía alrededor del mundo (Islam-Shajib *et al.*, 2019), esto es indicativo de que estos metales pueden ser objeto de procesos de deposición húmeda o estar siendo incorporados a la matriz el suelo al encontrarse en disolución en el agua de lluvia.

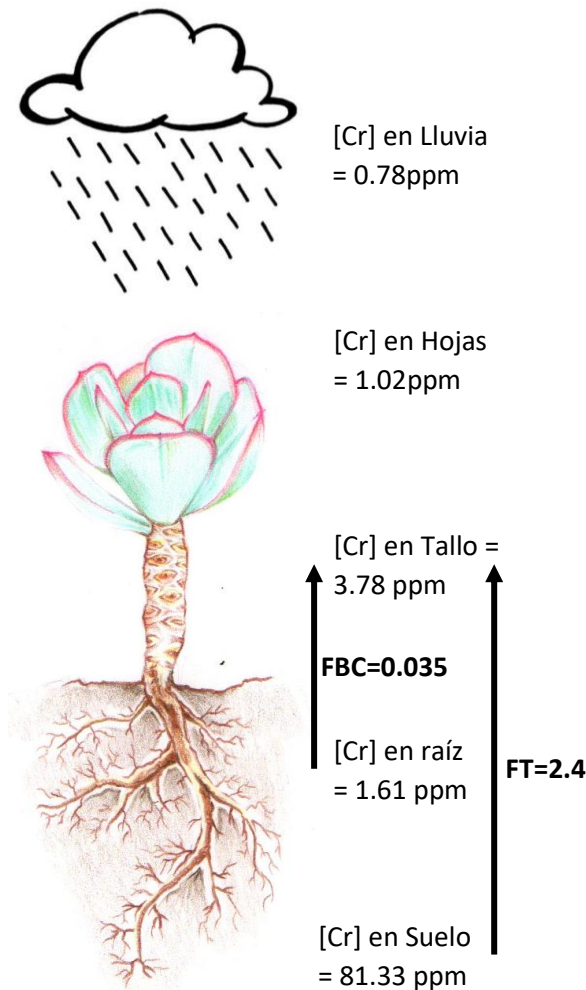
La concentración de Pb en las muestras colectadas en MEDIX fue, en promedio, mayor a la concentración presente en muestras provenientes del Invernadero. La presencia de Pb en suelos está fuertemente relacionada con las actividades antropogénicas, fuentes comunes de este metal son pesticidas basados en plomo, humos vehiculares e industriales, y mal manejo de tuberías (Husejnovic *et al.*, 2018). Encontrándose MEDIX a un costado de una avenida principal, se espera observar concentraciones altas de Pb en estas muestras.

La concentración de Co, Cu y Mn presente en muestras colectadas en el Invernadero fue en promedio significativamente mayor a la observada en las muestras pertenecientes a la colecta de MEDIX. Los tres son elementos presentes en el sustrato cuya concentración puede variar de un sitio a otro por diversos factores (Arellano, 2012), por otro lado, el Cu y Mn son micronutrientes que, en ocasiones, llegan a ser incorporados con los fertilizantes.

La concentración de Cd, Co, Cu y Mn fue significativamente superior en las muestras de agua pluvial colectadas en MEDIX, concentraciones altas de metales pesados en la atmósfera cerca de regiones industriales o fuertemente urbanizadas son un fenómeno común, Zhang y colaboradores (2019) señalan que existe una fuerte correlación entre la presencia de altas cantidades de Cd, Co y Cu en la atmósfera y la cercanía con áreas industrializadas.

La concentración de V fue significativamente mayor en las muestras de agua colectadas en el Invernadero, esto puede deberse a la existencia de una zona minera en las cercanías de este sitio pues se ha observado que esta es una de las fuentes más comunes de enriquecimiento atmosférico con V (Doria-Argumendo, 2017).

Factor de translocación y de bioconcentración



Figuras 19. Ejemplo de la dinámica del Cr en el sistema atmósfera-suelo-planta en *E.gigantea*. Sitio MEDIX en época de lluvias.

Para evaluar la capacidad de las plantas para translocar los metales desde la raíz hacia la parte aérea fue calculado el FT. Para las plantas de *E.gigantea* se observó que los FT más elevados corresponden a la colecta de MEDIX en época de lluvia (Tabla 19). El FT más alto fue para el Hg con un valor de hasta 2.852 seguido por el del Ni de 2.56 y el del Cr de 2.35, así como por valores para el Al, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Cd, Ba y Pb que se mantuvieron mayores a uno. Las plantas acumuladoras de metales se caracterizan por presentar $FT > 1$ (McGrath y Zhao, 2003, Tu *et al.*, 2003). Los valores elevados en una situación de muestreo particular, en este caso la zona urbana en época de lluvia, son una situación peculiar y, aunque está más allá del alcance de este estudio, se considera de importancia investigar los procesos

que llevaron a la alta translocación de metales en estas circunstancias. Los valores de FT superiores a 1 para la mayoría de los sitios en el caso del Zn y el Ba indican que son elementos altamente transferibles en *E. gigantea*.

Los FBC para plantas de *E. gigantea* fueron bajos (Tabla 18), esto es indicativo de que la especie no presenta hiperacumulación. Se observaron valores altos para el Mo, entre 0.363 y 1.17, esto aunado a los valores de FT relativamente altos para este metal, hace importante analizar a la especie como un candidato importante para la extracción de Mo en suelos. En el caso de los demás metales se encontraron bajos FBC, por lo tanto, como es señalado en Ruíz y Armienta (2012), aun y cuando se observaron FT altos existe bajo riesgo de que metales pesados se transfieran de forma significativa a la planta. Para aclarar la dinámica de los metales pesados entre la planta y el ambiente, así como su relación con el FT y FBC la figura 19 resume la dinámica del cromo en una condición de estudio en *E. gigantea*.

En el caso de las plantas de *E. elegans* se observó que el FT más elevado correspondió al Zn con valores en los distintos sitios que van desde 1.3 hasta 5.35 seguido por el Ba con valor de hasta 3.33 y el As con valor de hasta 2.23. También fueron superiores a 1 los FT de Cr, Mn, Ni, Mo y Hg. Al igual que en *E. gigantea*, los valores más elevados fueron generalmente observados en la colecta de MEDIX durante la época de lluvia. Los valores elevados para la mayoría de las condiciones de muestreo en el caso del Mn, Zn y Ba indican que estos metales son altamente transferibles en *E. elegans*.

Para *E. elegans* los FBC fueron mayores que para la otra especie, sin embargo, la mayoría aún pueden considerarse bajos, esto es indicativo de que la especie no presenta hiperacumulación. Se observaron valores altos para el Ni (1.03), Mo

(1.295) y Hg (0.718), sin embargo, estos valores solo se observaron en una condición de muestreo, los FBC para otras condiciones fueron mucho menores. Aun y cuando se observaron FT altos para Mn, Zn y Ba en la mayoría de las condiciones, los bajos FBC indican que hay bajo riesgo de que los metales analizados se estén transfiriendo de forma significativa a la planta. Los resultados obtenidos indican que ambas especies toleran las concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y translocación (Baker y Walter 1990).

El FBC es utilizado ampliamente para, en conjunto con el FT, evaluar la capacidad de una planta para procesos de fitorremediación o evaluar el riesgo que hay de que metales pesados estén entrando a la cadena alimenticia a través de ciertas plantas, entre otros usos. Se han reportado valores tan bajos como 0.0001 (Individuos de *Zea mays* analizados por Ruíz y Armienta, 2012) hasta valores tan altos como 59 (Individuos de *Cortaderia rudiusscula* analizados por Medina y Montaña en 2014). Estos valores varían fuertemente entre especies vegetales y entre diversas condiciones de muestreo, y son un indicativo de la relación entre un genotipo específico y el ambiente (van der Ent y Baker, 2013).

Concentraciones de metales pesados observadas en las muestras

Las altas concentraciones de metales pesados en plantas pueden tener como consecuencia diversos desordenes metabólicos. Señalar qué tan tóxico puede ser determinado metal para una planta y en qué concentraciones es complejo debido a que la respuesta de las plantas a la presencia de estos depende de diversos factores. Más allá de los diversos niveles de toxicidad reportados, el Cu, Ni, Pb y Hg presentaron altas concentraciones en algunas muestras vegetales de este estudio

(tablas 5 a 12), y han sido señalados como algunos de los metales más tóxicos para plantas superiores (Kabata-Pendias, 2011).

El Cr en altas concentraciones produce clorosis de hojas jóvenes, necrosis localizada y daño en raíces; el Ni causa clorosis e inhibe el crecimiento; el Cu causa malformación de hojas y ocasiona cambios metabólicos; el Zn causa clorosis y necrosis en las puntas de las hojas, un crecimiento retardado de toda la planta y heridas en las raíces; el Pb causa oscurecimiento de hojas, crecimiento anormal de tallos y desarrollo atrofiado de follaje; el Hg causa atrofia severa de las raíces y en las plántulas así como clorosis y daño foliar (Kabata-Pendias, 2011). Las plantas fueron observadas sanas al momento de la colecta, se recomienda llevar a cabo un análisis para determinar la tolerancia de plantas crasas de la subfamilia Echeverioideae a altas concentraciones de metales pesados.

Conclusiones

Tanto *E. elegans* como *E. gigantea* presentaron concentraciones de V, Cr, Ni, Cu, Pb y Hg consideradas excesivas o por encima del límite permitido para variedades comestibles, *E. elegans* presentó una concentración tóxica de Zn.

Existe una movilización y acumulación de Zn en tallos. Por otro lado, la concentración de Al fue mayor a nivel de raíz. Las concentraciones de los demás metales pesados fueron homogéneas entre órganos

E. elegans presentó una mayor concentración de Zn, *E. gigantea* presentó una mayor concentración de Ba.

Las condiciones ambientales tuvieron un efecto significativo sobre las concentraciones de metales pesados observadas en las muestras, las

concentraciones de Cd y V fueron superiores las muestras vegetales provenientes del Invernadero mientras que las de As y Mn fueron mayores en MEDIX; la acumulación de Ba, Hg y As se da en mayor grado en las muestras de la época de lluvia.

Se observó una tendencia marcada a la acumulación de metales pesados en zonas urbanas en la época de lluvia y a la concentración elevada de metales pesados en la raíz de ambas especies.

Los valores de FBC y FT sugieren que existe bajo riesgo de que metales pesados se transfieran en cantidades significativas a la planta, esto, aunado al buen estado de salud observado en las plantas, hace de *E. elegans* y *E. gigantea* una opción potencial para ser utilizada en techos verdes y otros espacios destinados a mitigar los efectos negativos de la urbanización.

Literatura citada

- Aerts, R., y Chapin, F. S. (1999). The Mineral Nutrition of Wild Plants Revisited: A Re-evaluation of Processes and Patterns. In A. H. Fitter & D. G. B. T.-A. in E. R. Raffaelli (Eds.) (Vol. 30, pp. 1–67). Academic Press.
- Alloway, B. J. (1990). Heavy Metals in Soils. Blackie. 339 pp.
- Alloway B. J. (2013). Heavy metals in soils. Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. *Environmental Pollution* 22: 98-128.
- Arellano L. E. (2012). Capacidad de retención de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados en una azotea verde extensiva. Tesis de licenciatura (Biología). Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Baker, A. J. M. y Walter, P. L. (1990). Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. En: Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects (A. J. Shaw, Ed.). CRC Press Inc., B, FL, pp. 155-157.
- Baker, A. J. M., Whiting, S. N. (2002). In search of the Holy Grail - a further step in understanding metal hyperaccumulation. *New Phytologist*. 155, 1–7
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. H. y GhaffarianHosein, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115: 411-428.
- Bidwell, R. (1979). Fisiología Vegetal. A.G.T Editor, S.A. México.
- Brautigam, D., Rengasamy, P., y Chittleborough, D. (2012). Aluminium speciation and phytotoxicity in alkaline soils. *Plant and Soil*, 360. Pp. 187-196.
- Bridgman Howard A. (1990). Global Air Pollution: Problems for the 1990s, Belhaven Press.
- Briz J. (1999). Naturación urbana: Cubiertas ecológicas y mejora medioambiental *España: Mundi-Prensa*. pp. 65–80.
- Briz, J., y De Felipe, I. (2005). Incorporación de la naturaleza en cada rincón de la ciudad: Naturación urbana. *Arquitectura del Paisaje: Construcción y medio ambiente*, 120, 12–19.
- Brooks R. (2000). Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. 1ra Edición. Michigan. CAB INTERNATIONAL.
- Callahan, D. L., Baker, A. J. M., Kolev, S. D., y Wedd, A. G. (2006). Metal ion ligands in hyperaccumulating plants. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 11(1), 2–12.

- Camacho, V., Ruíz, L. (2011). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista bio Ciencias* 1(4): 3-15.
- Casierra-Posada, F., y Aguilar-Avenidaño, O. (2018). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246-257.
- CEPAL. (2012). Notas de población. Naciones Unidas, Santiago de Chile. 122 p.
- Cervantes, C. y Moreno, R. (1999). Contaminación ambiental por metales pesados – Impacto en los seres vivos. A.G.T. Editor, S.A.
- Chandra, R. y V. Kumar. (2017). Phytoextraction of heavy metals by potential native plants and their microscopic observation of root growing on stabilized distillery sludge as a prospective tool for *in situ* phytoremediation of industrial waste. *Environmental Science & Pollution Research* 24 (3): 2605-2619.
- Chen, F., Ai, H., Wei, M., Qin, C., Feng, Y., Ran, S., Ye, H. (2018). Distribution and phytotoxicity of soil labile aluminum fractions and aluminum species in soil water extracts and their effects on tall fescue. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163, 180–187.
- Dasgupta-Schubert, N., Sánchez Yáñez, J.M., Méndez López, M.E., Madrigal Sánchez, X., Farías Rodríguez, R., Carrillo Amercua, J.C., Guzmán Sedano, J.A. (2008). Fitorremediación e hiperacumuladores de metales: El uso de plantas para limpiar el ambiente. Capítulo en el libro “Biorremediación” Redactor: Juan Manuel Sánchez Yáñez Editorial: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

- De Vries, M. y Tiller, K. (1978). Sewage sludge as a soil amendment, with special reference to Cd, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn— comparison of results from experiments conducted inside and outside a glasshouse. *Environmental Pollution*, 16 (3):231-240
- Díaz-Herrera, M. (2008). Cálculo del cambio de temperatura atmosférica debido al cambio de albedo: aplicación para la Ciudad de México mediante la implementación de techos verdes. Tesis que para obtener el título de Físico. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Doria-Argumedo, C. (2017). Metales pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombia / Heavy metals (Cd, Cu, V, Pb) in rainwater in the most influence area of the coal mine in La Guajira, Colombia / Metais pesados Cd. *Revista Colombiana de Química*, 46(2), 37–44.
- Duffus, J. H. (2002), " 'Heavy metals'—A meaningless term?", *Pure and Applied Chemistry*. 74(5): 793–807.
- Dunnett, N. y Nolan, A. (2004). The effect of substrate depth and supplementary watering on the growth of nine herbaceous perennials in a semi-extensive green roof. *Acta Horticulturae* 643:305-309.
- Frimpong-Manso, S., Asiedu-Gyekye, I., Naadu, J., Magnus-Aryitey, G., Nyarko, A., Boamah, D y Awan, M. (2015). Micro and Macro Element Composition of *Kalanchoe integra* Leaves: An Adjuvant Treatment for Hypertension in Ghana. *International Journal of Hypertension*. 2015:1-5.

- Galán, E. y Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. Conferencia invitada: Galán y Romero, Macla 10 Universidad de Sevilla. Sevilla 41071. Pp. 48.
- García, M. R. (2007). Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una zona rural (Rancho Viejo, Edo. De México). Tesis de doctorado (Física de la Atmósfera). Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Gobierno de Coyoacan. (2015). Geomorfología. Página en red: <http://coyoacan.df.gob.mx/gobierno-delegacional/coyoacan/geomorfologia/>
- Gómez-Bernal, J., Morton-Bermea, O, Ruíz-Huerta, E., Armienta, M., Dávila, O., (2014). “Microscopic evidences of heavy metals distribution and anatomic alterations in breaching-leaves of Cupressus lindleyi growing around mining wastes”. *Microscopy Research And Technique*, 77(9), 714–726.
- Gómez-Bernal, J., Ruíz-Huerta, E., Armienta, M., Luna-Pabello, V. (2018), Heavy metals and arsenic phytoavailability index in pioneer plants from a semipermanent natural wetland. *Environmental Progress in Sustainable Energy*, 37: 980-988.
- Gupta, S. (1991). Assessment of ecotoxicological risks of accumulated metals in soils with the help of chemical methods standardized through biological tests. En: Vernet J. Heavy metals in the environment. Elsevier. Netherlands. 55 pp
- Hall, G. (1990). The determination of Au, Pd and Pt in ashed vegetation by ICP-Mass spectrometry and graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Journal of Geochemical Exploration* 41: 291-307.

- Hall, J.L. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany* (53):1-11.
- Hernández, D. (2017). Captación de metales pesados por *Echeveria gigantea* (Rose & Purpus) Tesis de licenciatura (Biología) Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Hoffman, M.T., Carrick, P.J., Gillson, L., & West, A.G. (2009). Drought, climate change and vegetation response in the succulent karoo, South Africa. *South African Journal of Science*, 105(1-2), 54-60. Retrieved August 01, 2019, from http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0038-23532009000100021&lng=en&tlng=en.
- Hopkins, W. (1995). Introduction to Plant Physiology. John Wiley & Sons Inc. Canada.
- Hu, Y., Tian, S., Foyer, C. H., Hou, D., Wang, H., Zhou, W., Liu, T., Ge, J., Lu, L., Lin, X. (2018) Efficient phloem transport significantly remobilizes cadmium from old to young organs in a hyperaccumulator *Sedum alfredii*, *Journal of Hazardous Materials*, 365, 421-429.
- Huang, J., Chang, F.C., Wang, S., Han, Y.J., Castro, M., Miller, E., & Holsen, T. M. (2013). Mercury wet deposition in the eastern United States: characteristics and scavenging ratios. *Environmental Science. Processes & Impacts*, 15(12), 2321–2328.
- Islam-Shajib, M.T., Bruun, H.C., Liang, T., Holm, P.E. (2019) Metals in surface specific urban runoff in Beijing, *Environmental Pollution*. 248:584-598

- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., Beeregowda, K.N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 7(2): 60–72.
- Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission. (2019). Codex alimentarius : General standard for contaminants and toxins in food and feed CXS 193-1995. Rome: World Health Organization: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Juárez, A. (1999). Acolman. Monografía municipal, Gobierno del Estado de México/Asociación Mexiquense de Cronistas Municipales, A.C., Toluca, México.
- Kabata-Pendias, A. (1995). Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils. En: Salomons W, U. Förstner, P. Mader. *Heavy metals problems and solutions*. Springer. Alemania. P 3-18.
- Kabata-Pendias, A. (2004). Soil- plant transfer of trace elements- an environmental issue. *Geoderma*. 122:143-149
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants. 4ed. Edit. CRC Press. Estados Unidos
- Klak, C., Reeves, G., & Hedderson, T. (2004). Unmatched tempo of evolution in Southern African semi-desert ice plants. *Nature*, 427(6969), 63–65.
- Laterra, E., Paruelo, J. (2011). Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Buenos Aires: INTA. 740p

- Leal, R. (2014). Capacidad de captación de metales pesados por plantas utilizadas en azoteas verdes. Reporte de investigación. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stresses. Academic Press. University of Michigan. Michigan.
- Li, J., Gurajala, H. K., Wu, L., van der Ent, A., Qiu, R., Baker, A. J. M., Shu, W. (2018). Hyperaccumulator Plants from China: A Synthesis of the Current State of Knowledge. *Environmental Science & Technology*, 52(21), 11980–11994.
- Long, X., Yang, X., Ye, Z., Ni, W., Shi, W. (2002). Differences of uptake and accumulation of zinc in four species of *Sedum*. *Acta Botanica Sinica* 44:152–157.
- López, C. 2003. Ecología. En: Las crasuláceas de México. *Sociedad Mexicana de Cactología*. México. Pp. 217-220.
- Lu, L. L., Tian, S. K., Zhang, J., Yang, X., Labavitch, J. M., Webb, S. M., Latimer, M., Brown, P. H. (2013) Efficient xylem transport and phloem remobilization of Zn in the hyperaccumulator plant species *Sedum alfredii*, *New Phytology*. 198, 721-731
- Mahler, R. (2003). General Overview of Nutrition for Field and Container Crops. EN: Riley, L.; Dumrose, R; Landis, T. *Proceedings RMRS*. 33, 26-29.
- McGrath, S. P., & Zhao, F.J. (2003). Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(3), 277–282.
- Medina, K. D. y Montano Y. N. (2014). Determinación del factor de bioconcentración y translocación de metales pesados en el *Juncus articus* Wild. y *Cortadeira rudiuscula* Stapf. de áreas contaminadas con el pasivo ambiental

minero alianza-ANCASH 2013. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniera Ambiental. Facultad de Ciencias del Ambiente. Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”. Perú.

- Merry, R., Tiller, K., & Alston, A. (1986). The effects of contamination of soil with copper, lead and arsenic on the growth and composition of plants. I. Effect of season, genotype, soil temperature and fertilizers. *Plant and Soil*, 91, 115–128.
- Meyran G. y López, L. (2003). Las crasuláceas de México. Sociedad Mexicana de Cactología. México.
- Nobel, P. (1988). Environmental biology of agaves and cacti. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oberndorfer, E., Lunhdholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. Y. y Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological, structures, functions and services. *BioScience* 57: 823-833.
- Qian, Y., Gallagher, F. J., Feng, H., Wu, M., & Zhu, Q. (2014). Vanadium uptake and translocation in dominant plant species on an urban coastal brownfield site. *Science of The Total Environment*, 476–477, 696–704.
- Quiróz, F., Collazo, M., Ortega, E. (2013). La nutrición. En: Márquez, G., M. Collazo, Martínez, M., Orozco, A., Vázquez, S. (Eds.). Biología de Angiospermas. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 622 pp
- Raja, S. (2003). Adsorption of aromatic hydrocarbons at gas – water interface, Tesis de maestría en Ciencias en Ingeniería Química, Universidad Estatal de Louisiana, EUA.

- Rascio, N. y Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science* 180 (2): 169-181.
- Ribeiro, P., Viana, D., Pires, F., Egreja Filho, F., Bonomo, R., Cargnelutti Filho, A., Nascimento, M. (2018). Selection of Plants For Phytoremediation of Barium-Polluted Flooded Soils. *Chemosphere*, 206, 522-530
- Rowe, D.B. (2010). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental pollution xxx*: 1-11.
- Ruiz, E., y Armienta, M. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(2), 103-117. Recuperado de <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/31629>.
- Rulkens, W., Grotenhuis, J., Tichý, R. (1995). Methods for cleaning contaminated soils and sediments. En: Salomons W, U. Förstner, P. Mader. *Heavy metals problems and solutions*. Springer. Alemania. P 3-18.
- SDA. (2011). Guía de techos verdes en Bogotá. Página en red: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=f807042d-064e-4a7a-adf1-75e1e4b7aaaa&groupId=10157
- Selas. R., Causapé, C., y Martínez, A. (1995). Contaminantes en las plantas de terrazas verdes. *Agricultura revista agropecuaria*. España.
- Schmidt, A.-C., Mattusch, J., Reisser, W., & Wennrich, R. (2004). Uptake and accumulation behaviour of angiosperms irrigated with solutions of different arsenic species. *Chemosphere*, 56(3), 305–313.

- Slijivic Husejnovic, M., Bergant, M., Janković, S., Žižek, S., Smajlović, A., Musić, O., Antonijevic, B. (2018). Assessment of Pb, Cd and Hg soil contamination and its potential to cause cytotoxic and genotoxic effects in human cell lines (CaCo-2 and HaCaT). *Environmental Geochemistry and Health*, 40 (4) 1557-1572.
- Smith, K. (1971). The comparative uptake and translocation by plants of calcium, strontium, barium and radium. *Plant and Soil*. 34: 369-379.
- Sobhanardakani, S. I, Roozbahani, M. M., Karimi, H., & Sorooshnia, R. (2016). Heavy Metals (Mg, Mn, Ni and Sn) contamination in Soil Samples of Ahvaz II Industrial Estate of Iran in 2013. *Archives of Hygiene Sciences VO - 5*, (2), 123
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R. A., Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances* (22):93-117.
- Sun, Y., Zhou, Q., & Diao, C. (2008). Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Bioresource Technology*, 99(5), 1103–1110.
- Taiz. L., Zeiger, E. (2014). *Plant Physiology*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. Canadá.
- Teng, Y., Yang, J., Wang, J., & Song, L. (2011). Bioavailability of Vanadium Extracted by EDTA, HCl, HOAC, and NaNO₃ in Topsoil in the Panzhihua Urban Park, Located in Southwest China. *Biological Trace Element Research*, 144, 1394–1404.

- Tu, C., Ma, I.Q. y Bondada, B. (2003). Arsenic accumulation in the hyperaccumulator Chinese brake and its utilization potential for phytoremediation. *Journal of Environmental Quality*. 31, 1671-1675.
- Urbano-López M. B. (2013). Naturación urbana, un desafío a la urbanización. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2): 225-235.
- van der Ent, A., Baker, A. J. M., Reeves, R. D., Pollard, A. J., & Schat, H. (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. *Plant and Soil*, 362(1), 319–334.
- Von Willert. D.J., Eller, B., Werger, M., Brinckmann, E. Ihlenfeldt, H. (1992). Life strategies of succulents in deserts: with special reference to the Namib desert . Cambridge: Cambridge University Press.
- Wang, J., Nielsen, M.T., Evangelou, B. P. (1994). A solution culture study of manganese-tolerant and sensitive tobacco genotypes. *Journal of Plant Nutrition* 17(7), 1079-1093.
- Wang, L. K., Chen, J., Hung, Y., Shamma Z. (2009). Heavy Metals in the Environment. CRC Press. Boca Raton.
- Wuana, R. A., Okieimen F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. International Scholarly Research Network *ISRN Ecology* Volume 2011, Article ID 402647. Pp. 20
- Ye, H., X. Yang, B. He, X. Long, W. Shi. (2003). Growth response and metal accumulation of *Sedum alfredii* to Cd/Zn complex-polluted ion levels. *Acta Botanica Sinica* 9:1030–1036

- Yi-Hao W. (2009). Phytoremediation of Heavy Metal by Six Plants. Tesis de maestría (Ingeniería Ambiental). Universidad de Ciencia y Tecnología de ChaoYang. Taiwan. Pp. 95.
- Zhang, X., Zhang, K., Lv, W., Liu, B., Aikawa, M., & Wang, J. (2019). Characteristics and risk assessments of heavy metals in fine and coarse particles in an industrial area of central China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 179, 1–8.

Anexo 1. Análisis de varianza (ANOVA) de las concentraciones de metales pesados presentes en las muestras de suelo (p=0.05).

	<i>G.l.</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad (>F)</i>	<i>Código de significatividad.</i>
Al						
<i>Sitio</i>	1	3.26E+09	3.26E+09	120.03	4.28E-06	***
<i>Época</i>	1	3.15E+09	3.15E+09	115.86	4.89E-06	***
<i>Sitio:Época</i>	1	2.72E+09	2.72E+09	99.98	8.49E-06	***
<i>Residuales</i>	8	2.18E+08	2.72E+07			
As						
<i>Sitio</i>	1	0.225	0.2254	0.209	0.659	
<i>Época</i>	1	0.861	0.8614	0.8	0.397	
<i>Sitio:Época</i>	1	0.081	0.081	0.075	0.791	
<i>Residuales</i>	8	8.615	1.0768			
Ba						
<i>Sitio</i>	1	204	204	0.011	0.91845	
<i>Época</i>	1	783112	783112	42.78	0.00018	***
<i>Sitio:Época</i>	1	57262	57262	3.128	0.11492	
<i>Residuales</i>	8	146444	18306			
Cd						
<i>Sitio</i>	1	0.000482	0.0004815	0.232	0.643	
<i>Época</i>	1	0.002935	0.0029347	1.416	0.268	
<i>Sitio:Época</i>	1	0.000377	0.000377	0.182	0.681	
<i>Residuales</i>	8	0.016582	0.0020727			
Co						
<i>Sitio</i>	1	24.73	24.73	8.327	0.020337	*
<i>Época</i>	1	85.49	85.49	28.785	0.000673	***
<i>Sitio:Época</i>	1	10.22	10.22	3.443	0.100629	
<i>Residuales</i>	8	23.76	2.97			
Cr						
<i>Sitio</i>	1	512	512	3.514	0.09772	.
<i>Época</i>	1	3363	3363	23.062	0.00135	**
<i>Sitio:Época</i>	1	282	282	1.932	0.20203	
<i>Residuales</i>	8	1167	146			
Cu						
<i>Sitio</i>	1	175.49	175.49	12.299	0.008	**
<i>Época</i>	1	55.98	55.98	3.923	0.083	.
<i>Sitio:Época</i>	1	1.22	1.22	0.085	0.778	
<i>Residuales</i>	8	114.15	14.27			
Fe						
<i>Sitio</i>	1	2745558	2745558	0.052	0.8252	
<i>Época</i>	1	426574294	426574294	8.096	0.0216	*
<i>Sitio:Época</i>	1	10552240	10552240	0.2	0.6664	

<i>Residuales</i>	8	421490850	52686356			
Hg						
<i>Sitio</i>	1	1361.5	1361.5	39.92	0.000228	***
<i>Época</i>	1	1330.4	1330.4	39.01	0.000247	***
<i>Sitio:Época</i>	1	1355.5	1355.5	39.75	0.000232	***
<i>Residuales</i>	8	272.8	34.1			
Mn						
<i>Sitio</i>	1	120569	120569	18.766	0.00251	**
<i>Época</i>	1	33173	33173	5.163	0.0527	.
<i>Sitio:Época</i>	1	21	21	0.003	0.95593	
<i>Residuals</i>	8	51398	6425			
Ni						
<i>Sitio</i>	1	20.5	20.5	0.392	0.54861	
<i>Época</i>	1	2181.1	2181.1	41.774	0.000196	***
<i>Sitio:Época</i>	1	501.7	501.7	9.608	0.014673	*
<i>Residuales</i>	8	417.7	52.2			
Pb						
<i>Sitio</i>	1	32.89	32.89	5.319	0.05	*
<i>Época</i>	1	3.96	3.96	0.64	0.4468	
<i>Sitio:Época</i>	1	22.42	22.42	3.627	0.0933	.
<i>Residuales</i>	8	49.46	6.18			
Sb						
<i>Sitio</i>	1	0.0011	0.0011	0.003	0.959	
<i>Época</i>	1	0.001	0.001	0.003	0.96	
<i>Sitio:Época</i>	1	1.3789	1.3789	3.716	0.102	
<i>Residuales</i>	6	2.2265	0.3711			
V						
<i>Sitio</i>	1	0	0	0.001	0.97515	
<i>Época</i>	1	5259	5259	51.776	9.29E-05	***
<i>Sitio:Época</i>	1	1512	1512	14.889	0.00482	**
<i>Residuales</i>	8	813	102			
Zn						
<i>Sitio</i>	1	1522	1521.7	3.582	0.0951	.
<i>Época</i>	1	168	168.4	0.396	0.5465	
<i>Sitio:Época</i>	1	106	106.3	0.25	0.6303	
<i>Residuales</i>	8	3399	424.9			
Código de significatividad:		0'***'	0.001'***'	0.01'**'	0.05'.'	

Anexo 2. Tukey aplicado a las concentraciones de metales pesados en muestras de suelos, con diferencias significativas señalados por el ANOVA (p=0.5).

	<i>Al</i>	<i>Diferencia de medias</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>	<i>p</i>
<i>Sitio</i>					
<i>M-I</i>		32977.64	26036.33	39918.95	4.30E-06
<i>Época</i>					
<i>S-LI</i>		-32399.94	-39341.25	-25458.63	4.90E-06
<i>‘Sitio:Época’</i>					
<i>M:LI-I:LI</i>		63075.8881	49443.7	76708.07	0.000002
<i>I:S-I:LI</i>		-2301.6969	-15933.88	11330.49	0.946497
<i>M:S-I:LI</i>		577.6971	-13054.49	14209.88	0.9990303
<i>I:S-M:LI</i>		-65377.585	-79009.77	-51745.4	0.0000016
<i>M:S-M:LI</i>		-62498.191	-76130.37	-48866.01	0.0000022
<i>M:S-I:S</i>		2879.394	-10752.79	16511.58	0.9031622
<i>Ba</i>					
<i>Sitio</i>					
<i>M-I</i>		8.253824	-171.878	188.3856	0.9184507
<i>Época</i>					
<i>S-LI</i>		510.9181	330.7863	691.0499	0.0001802
<i>‘Sitio:Época’</i>					
	<i>diff</i>	<i>lwr</i>	<i>upr</i>	<i>p</i>	
<i>M:LI-I:LI</i>		-129.9029	-483.66749	223.8617	0.6571374
<i>I:S-I:LI</i>		372.7614	18.99679	726.526	0.0392842
<i>M:S-I:LI</i>		519.1719	165.40734	872.9365	0.0067073
<i>I:S-M:LI</i>		502.6643	148.89969	856.4289	0.0081046
<i>M:S-M:LI</i>		649.0748	295.31024	1002.8394	0.0016684
<i>M:S-I:S</i>		146.4106	-207.35404	500.1751	0.5736961
<i>Co</i>					
<i>Sitio</i>					
<i>M-I</i>		-2.871103	-5.165542	-0.5766651	0.0203367
<i>Época</i>					
<i>S-LI</i>		-5.338291	-7.632729	-3.043853	0.0006735
<i>‘Sitio:Época’</i>					
<i>M:LI-I:LI</i>		-1.024948	-5.531043	3.4811473	0.8830943
<i>I:S-I:LI</i>		-3.492136	-7.998231	1.0139595	0.1378693
<i>M:S-I:LI</i>		-8.209394	-12.71549	-3.7032992	0.001747
<i>I:S-M:LI</i>		-2.467188	-6.973283	2.0389075	0.3594545
<i>M:S-M:LI</i>		-7.184446	-11.690542	-2.6783512	0.0040679
<i>M:S-I:S</i>		-4.717259	-9.223354	-0.2111635	0.0405056
<i>Cr</i>					
<i>Sitio</i>					
<i>M-I</i>		-13.06876	-29.1455	3.007982	0.0977215

<i>Época</i>				
<i>S-LI</i>	-33.47996	-49.5567	-17.40322	0.0013516
<i>`Sitio:Época`</i>				
<i>M:LI-I:LI</i>	-3.379191	-34.95264	28.194256	0.9851462
<i>I:S-I:LI</i>	-23.79039	-55.36384	7.783056	0.1516596
<i>M:S-I:LI</i>	-46.548717	-78.12216	-14.97527	0.0065281
<i>I:S-M:LI</i>	-20.411199	-51.98465	11.162247	0.2409631
<i>M:S-M:LI</i>	-43.169526	-74.74297	-11.596079	0.010108
<i>M:S-I:S</i>	-22.758326	-54.33177	8.81512	0.1751084
<i>Cu</i>				
<i>Sitio</i>				
<i>M-I</i>	-7.648375	-12.67757	-2.619178	0.0079971
<i>Época</i>				
<i>S-LI</i>	-4.319544	-9.34874	0.7096531	0.0829701
<i>`Sitio:Época`</i>				
<i>M:LI-I:LI</i>	-7.011384	-16.888328	2.865561	0.1836603
<i>I:S-I:LI</i>	-3.682552	-13.559496	6.194392	0.6470133
<i>M:S-I:LI</i>	-11.967919	-21.844863	-2.090974	0.0195682
<i>I:S-M:LI</i>	3.328831	-6.548113	13.205776	0.7108741
<i>M:S-M:LI</i>	-4.956535	-14.833479	4.920409	0.4265253
<i>M:S-I:S</i>	-8.285366	-18.162311	1.591578	0.1035564
<i>Fe</i>				
<i>Sitio</i>				
<i>M-I</i>	956.6535	-8707.16	10620.47	0.8251561
<i>Época</i>				
<i>S-LI</i>	-11924.4	-21588.22	-2260.591	0.0216305
<i>`Sitio:Época`</i>				
<i>M:LI-I:LI</i>	2832.1303	-16146.83	21811.095	0.9618947
<i>I:S-I:LI</i>	-10048.928	-29027.89	8930.037	0.3850438
<i>M:S-I:LI</i>	-10967.751	-29946.72	8011.213	0.3191487
<i>I:S-M:LI</i>	-12881.058	-31860.02	6097.906	0.2101352
<i>M:S-M:LI</i>	-13799.882	-32778.85	5179.083	0.1703393
<i>M:S-I:S</i>	-918.8233	-19897.79	18060.142	0.9985584
<i>Hg</i>				
<i>Sitio</i>				
<i>M-I</i>	21.30356	13.52876	29.07836	0.0002282
<i>Época</i>				
<i>S-LI</i>	-21.05885	-28.83365	-13.28405	0.0002468
<i>`Sitio:Época`</i>				
<i>M:LI-I:LI</i>	42.5600907	27.291	57.82918	0.0000913
<i>I:S-I:LI</i>	0.19767871	-15.07141	15.46677	0.9999721
<i>M:S-I:LI</i>	0.2447148	-15.02438	15.51381	0.9999471
<i>I:S-M:LI</i>	-42.362412	-57.6315	-27.09332	0.0000944
<i>M:S-M:LI</i>	-42.315376	-57.58447	-27.04628	0.0000952

M:S-I:S	0.04703609	-15.22206	15.31613	0.9999996
Mn				
Sitio				
M-I	-200.4738	-307.1894	-93.75827	0.0025052
Época				
S-LI	-105.1555	-211.871	1.560054	0.0527015
`Sitio:Época`				
M:LI-I:LI	-203.11215	-412.693	6.46875	0.057471
I:S-I:LI	-107.79383	-317.3747	101.78707	0.4074371
M:S-I:LI	-305.62931	-515.2102	-96.04842	0.0069629
I:S-M:LI	95.31832	-114.2626	304.89921	0.50277
M:S-M:LI	-102.51717	-312.0981	107.06373	0.4464139
M:S-I:S	-197.83549	-407.4164	11.74541	0.0643984
Ni				
Sitio				
M-I	-2.612531	-12.23278	7.007722	0.5486101
Época				
S-LI	-26.96374	-36.58399	-17.34348	0.0001955
`Sitio:Época`				
M:LI-I:LI	10.31879	-8.574624	29.212204	0.3613469
I:S-I:LI	-14.03241	-32.925829	4.860999	0.1590517
M:S-I:LI	-29.57627	-48.46968	-10.682852	0.0045516
I:S-M:LI	-24.3512	-43.244619	-5.457791	0.0140507
M:S-M:LI	-39.89506	-58.78847	-21.001642	0.0006519
M:S-I:S	-15.54385	-34.437265	3.349563	0.1113595
Pb				
Sitio				
M-I	3.310843	0.00052912	6.621157	0.0499712
Época				
S-LI	-1.14844	-4.458754	2.161874	0.446804
`Sitio:Época`				
M:LI-I:LI	0.5769698	-5.9242244	7.078164	0.9913725
I:S-I:LI	-3.882313	-10.383507	2.618881	0.2953803
M:S-I:LI	2.162403	-4.3387913	8.663597	0.7186331
I:S-M:LI	-4.4592828	-10.960477	2.041911	0.2037235
M:S-M:LI	1.5854332	-4.9157611	8.086627	0.8610446
M:S-I:S	6.044716	-0.4564783	12.54591	0.0686624
V				
Sitio				
M-I	-0.1870248	-13.60487	13.23082	0.9751461
Época				
S-LI	-41.86865	-55.2865	-28.45081	9.29E-05
`Sitio:Época`				
M:LI-I:LI	22.26476	-4.086834	48.616345	0.1007707

<i>I:S-I:LI</i>	-19.41687	-45.768463	6.934716	0.16322
<i>M:S-I:LI</i>	-42.05568	-68.407268	-15.704089	0.0040435
<i>I:S-M:LI</i>	-41.68163	-68.033218	-15.330039	0.0042717
<i>M:S-M:LI</i>	-64.32043	-90.672023	-37.968845	0.0002373
<i>M:S-I:S</i>	-22.63881	-48.990395	3.712784	0.0945207

Anexo 3. Análisis de varianza (ANOVA) a las concentraciones de metales pesados presentes en las muestras de agua.

	<i>G.l.</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de cuadrados</i>	<i>F value</i>	<i>Probabilidad (>F)</i>	<i>Código de significatividad.</i>
Al						
<i>Sitio</i>	1	102401	102401	5.968	0.071	.
<i>Residuals</i>	4	68628	17157			
As						
<i>Sitio</i>	1	1.0218	1.0218	11.69	0.0268	*
<i>Residuals</i>	4	0.3495	0.0874			
Ba						
<i>Sitio</i>	1	215.58	215.58	21.48	0.00977	**
<i>Residuals</i>	4	40.15	10.04			
Cd						
<i>Sitio</i>	1	0.0596	0.0596	7.98	0.0476	*
<i>Residuals</i>	4	0.02988	0.00747			
Co						
<i>Sitio</i>	1	0.13802	0.138	17.92	0.0133	*
<i>Residuals</i>	4	0.03081	0.0077			
Cr						
<i>Sitio</i>	1	0.07063	0.07063	1.64	0.27	
<i>Residuals</i>	4	0.17233	0.04308			
Cu						
<i>Sitio</i>	1	171.85	171.85	17.73	0.0136	*
<i>Residuals</i>	4	38.78	9.69			
Fe						
<i>Sitio</i>	1	24468	24468	6.666	0.0612	.
<i>Residuals</i>	4	14683	3671			
Mn						
<i>Sitio</i>	1	256.39	256.39	17.49	0.0139	*
<i>Residuals</i>	4	58.63	14.66			
Ni						
<i>Sitio</i>	1	10.101	10.101	12.5	0.0241	*
<i>Residuals</i>	4	3.233	0.808			
Pb						
<i>Sitio</i>	1	0.0382	0.03824	0.285	0.622	
<i>Residuals</i>	4	0.5368	0.1342			
Sb						
<i>Sitio</i>	1	1.5372	1.5372	7.387	0.0531	.
<i>Residuals</i>	4	0.8323	0.2081			
V						
<i>Sitio</i>	1	675.3	675.3	66.09	0.00125	**
<i>Residuals</i>	4	40.9	10.2			
Zn						

Sitio	1	4850	4850	11.12	0.029	*
Residuals	4	1745	436			
Código de significatividad:		0'****'	0.001'***'	0.01'*'	0.05'.'	

Anexo 4. Peso seco y fresco de las muestras vegetales colectadas en época de lluvia, organizados por órgano y sitio de colecta (En gramos) La primer letra de la clave de muestra señala la especie colectada (E para *Echeveria elegans* o G para *Echeveria gigantea*), el número siguiente indica el número de muestra, la siguiente letra el sitio de colecta (M para medix o i para invernadero) y la última letra indica la época de colecta (LL para lluvias o S para seca).

	PESO	ÓRGANO	PESO (g)	ÓRGANO	PESO (g)	ÓRGANO	PESO (g)
FRESCO							
G1MLL	HOJA		3994.8	TALLO	1349.5	RAÍZ	192.7
G2MLL	HOJA		4065.3	TALLO	2358	RAÍZ	223.5
G3MLL	HOJA		3244.3	TALLO	903	RAÍZ	138.7
E1MLL	HOJA		554.5	TALLO	27	RAÍZ	8
E2MLL	HOJA		451.6	TALLO	27.8	RAÍZ	4.5
E3MLL	HOJA		943.1	TALLO	43.5	RAÍZ	6.4
PESO SECO							
G1MLL	HOJA		239.688	TALLO	190.2795	RAÍZ	18.6919
G2MLL	HOJA		235.7874	TALLO	297.108	RAÍZ	24.585
G3MLL	HOJA		191.4137	TALLO	126.42	RAÍZ	15.5344
E1MLL	HOJA		36.597	TALLO	3.915	RAÍZ	0.776
E2MLL	HOJA		24.3864	TALLO	3.4194	RAÍZ	0.531
E3MLL	HOJA		62.2446	TALLO	6.003	RAÍZ	0.672
PESO FRESCO							
E1ILL	HOJA		220.2	TALLO	14.8	RAÍZ	22.1
E2ILL	HOJA		406.2	TALLO	10.1	RAÍZ	13.3
E3ILL	HOJA		303.3	TALLO	11.6	RAÍZ	2.5
G1ILL	HOJA		1059.9	TALLO	285	RAÍZ	392.4
G2ILL	HOJA		1035.7	TALLO	162.4	RAÍZ	87.1
G3ILL	HOJA		1205.4	TALLO	196	RAÍZ	121.6
PESO SECO							
E1ILL	HOJA		13.212	TALLO	2.0868	RAÍZ	2.1437
E2ILL	HOJA		23.5596	TALLO	1.2726	RAÍZ	1.463
E3ILL	HOJA		17.8947	TALLO	1.624	RAÍZ	0.56
G1ILL	HOJA		69.9534	TALLO	41.325	RAÍZ	38.0628
G2ILL	HOJA		55.9278	TALLO	19.9752	RAÍZ	9.4068
G3ILL	HOJA		79.5564	TALLO	27.048	RAÍZ	12.768

Anexo 5. Peso seco y fresco de las muestras vegetales colectadas en época seca, organizados por órgano y sitio de colecta (En gramos) La primer letra de la clave de muestra señala la especie colectada (E para *Echeveria elegans* o G para *Echeveria gigantea*), el número siguiente indica el número de muestra, la siguiente letra el sitio de colecta (M para medix o i para invernadero) y la última letra indica la época de colecta (LL para lluvias o S para seca).

	PESO	ÓRGANO	PESO (g)	ÓRGANO	PESO (g)	ÓRGANO	PESO (g)
FRESCO							
G1MS	HOJA		407.2	TALLO	192.7	RAÍZ	111.9
G2MS	HOJA		846.9	TALLO	131.2	RAÍZ	92.3
G3MS	HOJA		828.3	TALLO	127.8	RAÍZ	157.1
E1MS	HOJA		199.7	TALLO	9.1	RAÍZ	12.1
E2MS	HOJA		134.4	TALLO	7.9	RAÍZ	6.6
E3MS	HOJA		178.1	TALLO	10.5	RAÍZ	8.5
PESO SECO							
G1MS	HOJA		46.4	TALLO	33	RAÍZ	30.6
G2MS	HOJA		76.5	TALLO	31.5	RAÍZ	28.3
G3MS	HOJA		60	TALLO	25.9	RAÍZ	36.4
E1MS	HOJA		8.2	TALLO	1.1	RAÍZ	2.5
E2MS	HOJA		11.3	TALLO	1	RAÍZ	1.7
E3MS	HOJA		6.3	TALLO	1.1	RAÍZ	1.8
PESO FRESCO							
E1IS	HOJA		114.9	TALLO	3.5	RAÍZ	4.9
E2IS	HOJA		107.8	TALLO	2.8	RAÍZ	4.5
E3IS	HOJA		100.5	TALLO	3.4	RAÍZ	3.9
G1IS	HOJA		221.5	TALLO	66.1	RAÍZ	34.2
G2IS	HOJA		287.9	TALLO	79.9	RAÍZ	24
G3IS	HOJA		346.2	TALLO	70	RAÍZ	64.3
PESO SECO							
E1IS	HOJA		10.8	TALLO	0.4	RAÍZ	0.9
E2IS	HOJA		8.2	TALLO	0.5	RAÍZ	0.8
E3IS	HOJA		11.3	TALLO	0.5	RAÍZ	0.7
G1IS	HOJA		19.8	TALLO	15.2	RAÍZ	13.2
G2IS	HOJA		22.1	TALLO	17.7	RAÍZ	9.8
G3IS	HOJA		26.5	TALLO	7	RAÍZ	20.8