



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“METALES PESADOS EN HORTALIZAS
CULTIVADAS EN AZOTEAS DE LA CIUDAD DE
MÉXICO, MÉXICO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

IVONNE ALONSO DURAN



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA**

Ciudad Universitaria, Ciudad de México 2021



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.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

Ivonne
Alonso
Duran
Facultad de Ciencias, UNAM

2. Datos del tutor

Dra. Margarita
Collazo
Ortega

3. Datos de la presidente

Dra. Silke
Cram
Heydrich

4. Datos de la vocal

Dra. María Guadalupe
Barajas
Guzmán

5. Datos de la suplente 1

Dra. Helia Reyna
Osuna
Fernández

6. Datos de la suplente 2

M. en C. Eréndira Alejandra
Arellano
Leyva

7. Datos del trabajo escrito

Metales pesados en hortalizas cultivadas en la Ciudad de México, México
Pag. 91
2021

Agradecimientos institucionales

A la Dra. Margarita Collazo Ortega, muchas gracias por toda tu confianza, empeño y tesón durante este trabajo.

A la Dra. Silke Cram Heydrich, la Dra. María Guadalupe Barajas Guzmán; Dra. Helia Reyna Osuna Fernández y la M. en C. Eréndira Alejandra Arellano Leyva por la revisión de este trabajo.

Al laboratorio de Biología de la reproducción, propagación y fisiología de angiospermas que viven en ambientes contrastantes, por el espacio y los materiales.

Al Biol. Panuncio Jerónimo Reyes Santiago, por permitirme un espacio en los invernaderos de propagación Jardín botánico, UNAM, y por facilitar el material necesario para el cultivo de las especies de este estudio.

A la M. en C. Laura Patricia Olgún Santos, Técnico Académico Asociado "C", por su apoyo en el préstamo de espacio en el Invernadero Templado de la Facultad de Ciencias.

A la Dra. Lucy Mora Palomino, Técnica Académica Titular "C", del Instituto de Geología, por el uso del molino.

A la M. en C. Elizabeth Hernández Álvarez por su apoyo analítico en la determinación de elementos traza por ICP-MS, Instituto de Geofísica, UNAM.

A la Dra. María Eugenia Muñiz Díaz de León por el préstamo de equipo y espacio en el Laboratorio de Plantas.

Agradecimientos personales

A mi tutora, Margarita Collazo, por la guía y el acompañamiento durante la realización de este trabajo. Gracias por aceptar la propuesta y ayudarme a concluirla, aún contra todo pronóstico. Muchas gracias por la convivencia y la paciencia.

A todas las personas que me brindaron un espacio en sus lugares de trabajo o sus hogares. A Raquel y muy especialmente a su abue Ofelia y tía Goya, quienes además, me hicieron sentir muy cómoda y bien recibida; a ATEA y Siembra Merced, por darme la confianza de experimentar y modificar su azotea por más de un año; a Jasi y su familia, que confiaron en mí y me abrieron las puertas de su casa, especialmente gracias a María Alicia Bedolla, por esas pláticas que hicieron más llevadero el trabajo y cansancio; a Paty Olguín, porque más que brindarme espacio y asesoramiento, me dio sus consejos y agradables momentos de charla, a Jerónimo Reyes y su equipo, por recibirme y asesorarme en el Jardín Botánico cada vez que lo necesité; y finalmente a Eli, que sin su asesoramiento esto no hubiera sido posible.

A quienes conocí a lo largo de la carrera y que, de una u otra manera, aportaron algo valioso a mi vida. Particularmente a Jonathan, Maximiliano, Sandra, Cinthia, Chore, Mar Mariana, Lili, Toñazo, Fercho, Inari, Ale, Eran, Ianka, Julyo y Gabriela. Los llevo en el corazón siempre.

Gracias a mi enorme familia: Mariana, Irma, Raquel, Silvino, Hilario, Gemes, Marty, Mary, Ale, Fab, Nicolás y Nicolasa. Me hacen sentir muy feliz. Les quiero mucho.

Gracias a Daniel y Lili, por su apoyo en el acarreo de material, toma de muestras y las tantas actividades que se realizaron para poder llevar a cabo esta tesis.

Dedicatoria

A mis abuelas por tantos cuidados y enseñanzas. Muchas gracias Jose, por los cuidados y amor incondicional; gracias, Eugenia, por tus historias y cariño.

A Filiberto y Elena. Gracias por el tiempo que me dedican, por el esfuerzo que pusieron para tener un espacio propio y por la educación que me han procurado. Papá, muchísimas gracias por todas las anécdotas a través de las cuales he aprendido; gracias por creer en este trabajo que también es tuyo y por todo el tiempo dedicado a él. Mamá, muchas gracias por los cuidados y las charlas que tanto disfruto y en las que juntas nos vamos descubriendo y aprendiendo; gracias por escucharme y dejarme ser.

A Montserrat, mi hermana. Te doy gracias y te dedico este trabajo porque siempre me haces ver las cosas como son, despejas mis acostumbradas fantasías, me corriges tiernamente cuando en algo he errado y amplias mi visión y criterio. Muchas gracias por tantísimos momentos; por ser la más bella de las personas.

A Pao, la mejor hermana de otra madre que en la vida he conocido. Gracias por tantas risas, y charlas rebuscadas que me adentraban en otro plano y me distraían de las presiones cotidianas. Gracias por tu confianza y abrirme las puertas de tu casa y tu familia.

A Pingu, por siempre estar a pesar de cualquier circunstancia. Gracias por las tardes de películas y las charlas.

A Meche, Lau y Gini, por tantas risas y paseos, por enseñarme lo que es serenidad, fortaleza y resiliencia en un solo paquete.

A Rodrigo SB. Gracias por tantos aprendizajes; por mostrarme tantos panoramas y circunstancias que me han llevado a disfrutar y aprender muchísimo; gracias por la confianza, la ternura y el amor.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	11
Introducción	12
Antecedentes	15
Metales pesados	15
Plantas y metales pesados	16
Acumulación de metales pesados en especies vegetales	18
Metales pesados y huertos urbanos	20
Justificación	23
Hipótesis	24
Objetivos	25
General	25
Particulares	25
Materiales y método	26
Especies de estudio	26
Descripción y requerimientos de cada especie cultivada	26
Sitios de estudio	29
Siembra de las semillas	36
Trasplante	37
Riego y nutrición	39
Toma y procesamiento de muestras de vegetales	39
Procesamiento del agua con la que se regaron las plantas	41
Procesamiento de sustrato de cultivo	41
Análisis de metales	43
Análisis por ICP-MS	45
Factor de bioconcentración (FBC)	48
Procesamiento de datos. Análisis estadísticos	48
Resultados	49
Temporada de lluvia 2018	49
Temporada de sequía (noviembre 2018- junio 2019)	63
Discusión	76
Conclusiones	85
Referencias	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mecanismos de resistencia de las plantas ante metales pesados	16
Tabla 2. Muestras recolectadas de hortalizas	37
Tabla 3. Programa del digestor de muestras de vegetales	40
Tabla 4. Programa del digestor de muestras de suelo	41
Tabla 5. Control de calidad para muestras vegetales	44
Tabla 6. Control de calidad para suelo	44
Tabla 7. Control de calidad para agua	44
Tabla 8. Muestras de suelo en temporada de lluvias	47
Tabla 9. Muestras de agua en temporada de lluvias	49
Tabla 10. Muestras de cebolla en temporada de lluvias	51
Tabla 11. Muestras de chile en temporada de lluvias	53
Tabla 12. Muestras de lechuga en temporada de lluvias	54
Tabla 13. Muestras de jitomate en temporada de lluvias	56
Tabla 14. Factor de bioconcentración en cebolla	58
Tabla 15. Factor de bioconcentración en chile	58
Tabla 16. Factor de bioconcentración en lechuga	58
Tabla 17. Factor de bioconcentración en jitomate	59
Tabla 18. Muestras de suelo en temporada seca	60
Tabla 19. Muestras de agua corriente	62
Tabla 20. Muestras de cebolla en temporada seca	64
Tabla 21. Muestras de chile en temporada seca	66
Tabla 22. Muestras de lechuga en temporada seca	67
Tabla 23. Muestras de jitomate en temporada seca	69
Tabla 24. Factor de bioconcentración de cebolla	71
Tabla 25. Factor de bioconcentración de chile	71
Tabla 26. Factor de bioconcentración de lechuga	72

Tabla 27. Factor de bioconcentración de jitomate	72
Tabla 28. Concentraciones de Cd y Pb en muestras de hortalizas y en diferentes legislaciones .	74
Tabla 29. Metales con cantidades altas por sitio y temporada	75
Tabla 30. Normas reguladoras de metales pesados en suelo agrícola	80
Tabla 31. Metales por sitio y temporada en suelo	81

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Partículas PM ₁₀ en la Ciudad de México	28
Gráfica 2. Vegetación de la Ciudad de México	29
Gráfica 3. Muestras de suelo en temporada de lluvias	48
Gráfica 4 y 5. Muestras de agua en temporada de lluvias	49
Gráfica 6. Muestras de cebolla en temporada de lluvias	52
Gráfica 7. Muestras de chile en temporada de lluvias	53
Gráfica 8 y 9. Muestras de lechuga en temporada de lluvias	55
Gráfica 10. Muestras de jitomate en temporada de lluvias	57
Gráfica 11. Muestras de suelo en temporada seca	61
Gráfica 12. Muestras de agua corriente	63
Gráfica 13. Muestras de cebolla en temporada seca	65
Gráfica 14. Muestras de chile en temporada seca	66
Gráfica 15. Muestras de lechuga en temporada seca	68
Gráfica 16. Muestras de jitomate en temporada seca	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Allium cepa</i> en hidromaceta	24
Figura 2. <i>Capsicum annuum</i> Chile en hidromaceta	25
Figura 3. Lechuga en hidromaceta	26
Figura 4. Jitomate en hidromaceta	27
Figura 5. Mapa de la Ciudad de México indicando los sitios de estudio	30
Figura 6. Hidromacetas en Invernadero de la Facultad de Ciencias	31
Figura 7. Hidromacetas en Coyoacán	32
Figura 8. Hidromacetas en Venustiano Carranza	32
Figura 9. Hidromacetas en Azcapotzalco	33
Figura 10. Semilleros con plántulas	34
Figura 11. Esquema de distribución de las plantas	35

Resumen

Los metales pesados (MP) tienen dos fuentes principales de origen: natural -por medio de la roca madre- y antropogénico -debido a actividades realizadas por los humanos-. La concentración de MP en las ciudades llega a alcanzar niveles alarmantes para la salud. La agricultura urbana es un conjunto de prácticas cuyos objetivos son el cultivo y la cosecha de hortalizas, así como la producción de otros alimentos al interior de las ciudades. Ya que todas las plantas absorben cierta cantidad de MP de la atmósfera y del suelo, es importante identificar y cuantificar los MP que las plantas son capaces de absorber en un huerto urbano. En este trabajo se consideraron cuatro hortalizas: *Allium cepa* L., *Capsicum annuum* L., *Lactuca sativa* L. y *Solanum lycopersicum* P. Mill. Estas hortalizas se cultivaron en distintas zonas de la Ciudad de México en dos temporadas diferentes: lluvias y secas. La determinación de los MP se llevó a cabo por la técnica de Espectrometría de Masas con plasma acoplado (ICP-MS). Los MP se cuantificaron en las partes comestibles de cada hortaliza, en el agua de riego y en el sustrato de cultivo. Los resultados indicaron que todos los metales analizados (Mn, Ni, Cu, Zn, Mo, Fe, Al, V, Ba, As, Cr, Co, Cd, Sb, Pb y Hg) estuvieron presentes en las muestras de las diferentes hortalizas. Los metales que se encontraron en mayor concentración fueron Al, Ba, Fe, Mn y Zn. No se encontraron diferencias en las concentraciones de metales presentes en las hortalizas de acuerdo a la temporada de muestreo -lluvias o secas. La lechuga fue la hortaliza con mayor capacidad de absorción. La concentración de MP encontrados en suelo, agua -tanto de lluvias como corriente- y hortalizas, no rebasaron los límites permisibles establecidos en las normas consultadas (CODEX, 2019).

Introducción

Las urbes de la gran mayoría de los países se ven afectadas por altas concentraciones de partículas contaminantes -provenientes de diversas fuentes- que se depositan en diferentes lugares de estas metrópolis (Johansson *et al.*, 2009; Zafra-Mejía *et al.*, 2015). La liberación de partículas tóxicas, así como de otros compuestos contaminantes, se origina principalmente de las fábricas industriales y los medios de transporte, por el uso de combustibles fósiles (Morton-Bermea, 2006; Escobar *et al.*, 2009; INEGI, 2016; Instituto de Geografía, 2016). Particularmente, la contaminación aérea es de gran preocupación, pues en esta se ve reflejado el estado de otros recursos naturales tales como el agua y el suelo. En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) la contaminación atmosférica se ha mantenido moderadamente alta a pesar de las normas jurídicas que se han desarrollado en materia ambiental (SMACM, 2017). Por ejemplo, el programa “Hoy no circula” tiene la finalidad de reducir los contaminantes emanados de los automóviles a través del control de la circulación de aquellos autos en mal estado -que son los que emiten mayor cantidad de partículas contaminantes-, sin embargo, esta medida tuvo el efecto contrario, ya que la población de la Ciudad de México comenzó a adquirir autos nuevos para poder circular diariamente (Garza, 1996; GODF, 2019). Entre las partículas contaminantes más abundantes en las ciudades están los MP, los cuales se caracterizan por tener una densidad entre los 5 y 6 gcm³ y tener una masa y peso atómico por encima de 20. Proviene de manera natural de los minerales, y en general, se encuentran en la superficie terrestre en concentraciones bajas. Sin embargo, diversas actividades antropogénicas que involucran el uso de combustibles fósiles dan como resultado, la dispersión de estos elementos. Los MP

pueden causar afectaciones graves a la salud humana debido a su potencial tóxico (Reyes *et al.*, 2016; Delgado *et al.*, 2019).

Por otro lado, diversas actividades urbanas referentes a la producción de alimentos vegetales han cobrado importancia en los últimos años. La agricultura urbana consiste en el cultivo, producción y consumo de alimentos dentro de una ciudad, siendo en algunos casos, un elemento importante para el sistema de producción de alimentos, ya que a partir de ello los ciudadanos que la practican satisfacen sus necesidades alimenticias y obtienen ganancias económicas de su venta. Los espacios destinados a la producción de estos alimentos son llamados huertos urbanos (Brown y Jameton, 2000; Basurto *et al.*, 2008; Miranda *et al.*, 2008; Prieto-Méndez *et al.*, 2009; García-Céspedes *et al.*, 2016). En los últimos años estas prácticas han ido en aumento en las ciudades de muchos países debido a diversas razones, entre ellas, el creciente deseo de llevar una vida más sana, obteniendo productos locales y libres de agroquímicos (Malagón, 2015).

Al producir y consumir alimentos a través de la agricultura urbana, uno de los problemas que pueden surgir es que muchas plantas tienen la capacidad de absorber los MP que circundan en el aire de la ciudad (Báez *et al.*, 2006). Al respecto, se ha observado un incremento en la cantidad de MP depositados tanto en la superficie del pavimento de avenidas como en hortalizas. Estas concentraciones altas están relacionadas con zonas donde, además de presentar una alta afluencia vehicular, las condiciones de las calles y avenidas hacen necesario el uso constante de freno y acelerador (12,300 vehículos por día o más). Lo anterior aunado a la presencia de fábricas (Johansson *et al.*, 2009; Zafra-Mejía *et al.*, 2015).

Durante la temporada de lluvia los MP se precipitan sobre la ciudad, mientras en temporada seca la acumulación de estos contaminantes se concentra en el aire (Johansson *et al.*, 2009). La deposición de contaminantes desde la atmósfera hacia los cultivos disminuye cuando existen barreras físicas de por medio -naturales, como árboles o montañas, o antropogénicas, como edificios- que lo evitan (Säumel *et al.*, 2012; Zafra- Mejía *et al.*, 2015; García-Céspedes *et al.*, 2016).

En la Ciudad de México el impulso de los huertos urbanos comenzó en 2016 por parte de la entonces Secretaría de Desarrollo Rural del Distrito Federal. Hoy en día esta práctica se sigue fomentando, haciendo mínima o nula mención sobre las consideraciones que deben tenerse para evitar que los cultivos se contaminen (Contreras, 2014; ALDF, 2016; Gobierno de la Ciudad de México, 2016; SEDEMA, 2016; SEDEMA, 2017). La falta de atención a este aspecto quizá es debido a un planteamiento erróneo de dicha política o los pocos estudios que hay, enfocados a la Ciudad de México, en torno a la contaminación de cultivos urbanos con MP.

Por lo anterior, en el presente trabajo se determinó la presencia de MP en hortalizas cultivadas en cuatro huertos urbanos ubicados en distintos puntos de la Ciudad de México; esto con el fin de tener un mayor conocimiento y comprensión de su acumulación en las hortalizas, y así poder brindar información científica para el conocimiento general.

Antecedentes

Metales pesados

Los MP son todos aquellos elementos que tienen una densidad igual o mayor a $5-6 \text{ g cm}^{-3}$ o aquellos con números atómicos mayores a 20. Los metales platino (Pt), uranio (U) wolframio (W) y oro (Au) son de los metales más pesados, pero no se consideran contaminantes ni esenciales para los procesos metabólicos de ningún ser vivo. Por otro lado, están los MP más comunes y esenciales, pues participan en el metabolismo de ciertos organismos: níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo), hierro (Fe), aluminio (Al), manganeso (Mn), zirconio (Zr) y vanadio (V). Finalmente, existen los MP poco comunes en condiciones naturales en un ecosistema, pero altamente tóxicos, estos son el cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) (Tabla 1) (Tiller, 1989; Zúñiga, 1999; Navarro-Aviñó, 2007).

Los MP se encuentran de manera natural en los ecosistemas, de manera particular en los minerales que constituyen las rocas, sin embargo, su presencia llega a aumentar en las capas más superficiales del suelo, el aire y agua debido a múltiples actividades antropogénicas, las cuales se llevan a cabo para satisfacer necesidades alimenticias y económicas, según el modelo económico impuesto en la dinámica mundial. De esta manera, el excesivo uso de combustibles fósiles, así como de fertilizantes y pesticidas dispersan, entre otros residuos, este tipo de metales (Giuffré *et al.*, 2005).

Las características del suelo (arcilla, materia orgánica, estado REDOX, profundidad, pH, poder quelante y su proximidad a la fuente de contaminación) son determinantes en la disponibilidad y concentración de los MP. Además, al ser el suelo el microhábitat de muchos

organismos, estos están propensos a absorber los MP (Barceló y Poschenrieder, 1992; Murray *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2011).

El tamaño y comportamiento de los MP permite su fácil ingreso a los organismos, tanto vegetales como animales, acumulándose y causando diversas enfermedades y padecimientos. La interacción constante entre seres vivos y MP tóxicos o MP esenciales (en cantidades exuberantes), puede ser perjudicial para los primeros, ya que estos elementos tienen distintas propiedades que les permiten ingresar a las células, asociarse a proteínas fundamentales en diversos procesos metabólicos e impedir que la célula funcione de manera correcta (Gallego *et al.*, 1996). Entre los MP más tóxicos para los organismos están el plomo (Pb), el mercurio (Hg) y el arsénico (As) (Ferrer, 2003).

Plantas y metales pesados

Si están en el suelo no importa la fuente de contaminación, pues al estar expuestas, las plantas juegan un papel importante en los procesos de absorción y almacenamiento de MP. Dichos procesos se llevan a cabo a través del riego con aguas residuales o contaminadas y la exposición a ambientes atmosféricamente contaminados, ya que el aire también representa un medio de transporte de MP, facilitando la deposición en las hojas y la absorción por los estomas (Olivares-Rieumont *et al.*, 2013).

Las plantas responden de diferentes maneras a la presencia de MP en cantidades tóxicas. Existen plantas sensibles, indicadoras, acumuladoras e hiperacumuladoras de MP, produciendo así un gran número de reacciones. En las plantas sensibles se observan efectos negativos a nivel celular y metabólico (alteraciones en membranas, pared celular, citosol y procesos metabólicos), conduciendo finalmente a la inhibición del crecimiento y el

desarrollo. Algunos síntomas visibles en las plantas sensibles, provenientes de un entorno con alta concentración de MP son: poco crecimiento radicular -de la raíz principal-, clorosis y necrosis en las hojas, senescencia, y abscisión temprana; sin embargo, algunas especies de plantas tienen ciertos mecanismos para eliminar, evitar, transformar y/o almacenar los MP.

Por otro lado, las plantas indicadoras, acumuladoras e hiperacumuladoras tienen diferentes mecanismos de resistencia o tolerancia: interacción con micorrizas por medio de la excreción de compuestos por la raíz para evitar la disponibilidad del metal, transporte hacia el citosol, quelación, metaloproteínas y fitoquelatinas, inmovilización y encapsulamiento, y excreción del metal por biotransformación (Tabla 2) (Barceló y Poschenrieder, 1992; Colangelo y Guerinot, 2006; Navarro *et al.*, 2007; Prieto Méndez *et al.*, 2009; Madera-Parra *et al.*, 2014). Otras plantas distribuyen los metales pesados entre las raíces y hojas como una forma de excreción (Alcoba-Gómez *et al.*, 2014; Anwar *et al.*, 2016).

La cantidad y tipo de MP que las plantas acumulen dependerá de la especie vegetal, las propiedades del suelo y las reacciones que se llevan a cabo en él, las interacciones entre metales, así como las formas químicas en que se encuentren (Khurana y Singh, 2012; Anwar *et al.*, 2016).

Tabla 1. Mecanismos de resistencia de las plantas a los metales pesados. Creada a partir de información obtenida en Barceló y Poschenrieder, 1992; Navarro *et al.*, 2007; Prieto Méndez *et al.*, 2009; Alcoba-Gómez *et al.*, 2014; Madera-Parra *et al.*, 2014 y Anwar *et al.*, 2016

Mecanismos de tolerancia en plantas ante los metales pesados	
Micorrizas	La interacción de las hifas de los hongos con las raíces de las plantas da como resultado la absorción/adsorción de metales pesados por parte del hongo y la quelación de los metales pesados con exudados del hongo.
Transporte hacia el citosol	La membrana plasmática de las células vegetales tiene la capacidad de transportar hacia el citosol diferentes grupos de moléculas, entre ellos metales pesados, los cuales pueden ser almacenados en vacuolas o ser quelados.
Metaloproteínas y fitoquelatinas	Péptidos de hasta 75 aminoácidos. Tienen la capacidad de quelación con metales pesados en el citoplasma de las células. Las primeras abundan en animales y bacterias mientras las segundas actúan en plantas.
Inmovilización y encapsulamiento	Captura de metales en las vacuolas de las células vegetales a través de movilizadores moleculares.
Excreción del metal por biotransformación	Por medio de transformaciones metabólicas se cambia la polaridad de un elemento o metal pesado, lo cual aumenta su difusibilidad a través de las células y, a su vez, su excreción del organismo.

Acumulación de metales pesados en especies vegetales

Algunas de las especies vegetales que tienen la capacidad de absorber, almacenar y tolerar altas concentraciones de metales pesados han sido estudiadas para emplearlas como biorremediadores en sitios con alto grado de contaminación. Tal es el caso de *Quercus cerris* (roble), *Ailanthus glandulosa* (árbol ornamental) (Kolarov y Tzvetkova, 1996); *Cupressus arizonica* (árbol ciprés) (Alcalá *et al.*, 2008); *Hordeum vulgare* (cebada) (Alonso *et al.*, 2004); *Oryza sativa* (arroz) (Delince *et al.*, 2015). Por otro lado, hay especies que no asimilan altas concentraciones de esta clase de metales y, por lo tanto, su función así como su desarrollo se ven afectados negativamente con la presencia de éstos, como *Helianthus annus* (girasol), *Glycine max* (soja) (Benavides *et al.*, 1996) y *Phaseolus vulgaris* (frijol) (Hardiman y Jacoby, 1984), plantas en las que los MP provocan estrés oxidativo, clorosis e inhibición del

crecimiento, entre otros síntomas de fitotoxicidad. También se han utilizado hortalizas para realizar estudios sobre captación de MP. Tal es el caso de *Brassica oleracea italica* (brócoli) y *Lactuca sativa* (lechuga), plantas que hoy día se consideran hiperacumuladoras principalmente de Pb (Casierra-Posada y Ulrich, 2010; Shugulí-Coronel, 2018; Ortiz González, 2013; Carranza-Bautista, 2016); lo cual debe tomarse en cuenta para evitar su cultivo en suelos contaminados. En otro estudio se probaron disoluciones de Cr, Hg y Pb en concentraciones de 0.625, 1.25, 2.5, 5 y 10 mg L⁻¹, para los dos primeros, y en concentraciones de 12.5, 25, 50, 100 y 200 mg L⁻¹ para el Pb. Para todos los casos se empleó un factor de dilución de 0,5. Con estas concentraciones de metales se regaron e hicieron crecer semillas de cuatro especies vegetales. Se observó que *Allium cepa* (cebolla) mostraba alta tolerancia a todos los MP analizados, ya que su crecimiento radicular se veía mínimamente afectado, respecto a los individuos control, por las concentraciones de metales (Iannacone y Alvaríño, 2005); sin embargo, no se analizó en qué parte de la planta se concentraban los metales absorbidos. En México y Colombia se han llevado a cabo estudios con *Capsicum annum* (chile serrano) creciendo en suelos con diferentes concentraciones de Cd y Hg. Los resultados encontrados muestran que hay una relación inversa y proporcional entre la cantidad de metal absorbido y diferentes atributos de la planta como: el crecimiento (altura), acumulación de micronutrientes, el área foliar y la extensión radicular (Hernández-Bautista *et al.*, 2015; Pérez-Vargas *et al.*, 2014). Por otro lado, Castro Gómez (2013) encontró que *C. annum* tolera altas concentraciones de MP y puede acumular Zn y Pb en sus frutos cuando las plantas se encuentran en un ambiente altamente contaminado. En Ecuador se evaluó la cantidad de Cd y Zn en muestras de *C.*

annum provenientes de dos localidades productoras de Chile; se encontró que la concentración de estos metales en las muestras no rebasó los límites permisibles expuestos en CODEX 1995 (Mantilla Villacís, 2018). En la Ciudad de México, en *Solanum lycopersicum* (jitomate) se ha monitoreado la presencia de metales pesados (M. Collazo, com. pers.). Además, se han realizado estudios de su cultivo en jardines/huertos urbanos en Italia (Vittori *et al.*, 2015), en los que se encontró que el jitomate es capaz de acumular altas cantidades de Cd, Cr, Ni, y Zn.

Cultivo de alimentos en ciudades: huertos urbanos

La producción de alimentos vegetales alrededor del mundo se lleva cabo de distintas maneras, una de ellas es la agricultura urbana (AU) (FAO, 2007). Se refiere un conjunto de prácticas que tienen como objetivo la producción de alimentos dentro de las ciudades, ocupando los recursos disponibles en ellas (Figueroa, 2002). Los espacios destinados a la producción de alimentos en las ciudades son llamados de diferentes formas, una de ellas es huertos urbanos. En los 20 últimos años, el concepto y la práctica de AU se ha popularizado entre los habitantes de diversas ciudades del mundo, y de manera más específica en América Latina. En lugares como Managua, Lima y la Ciudad de México el gobierno ha destinado presupuesto para impulsar proyectos de AU debido al interés de la población. Por otro lado, en La Habana, Cuba, la AU comenzó a practicarse hace poco más de 30 años. El caso de esta ciudad es por demás particular, pues las condiciones sociales y políticas en las que estas prácticas comenzaron a surgir dieron paso a un gran desarrollo y exploración de métodos agroecológicos (Hernández, 2006; FAO, 2014).

Metales pesados y huertos urbanos

Al producir y consumir alimentos en espacios urbanos, uno de los problemas que pueden surgir, es que muchas plantas tienen la capacidad de absorber los MP que circundan en las ciudades (Báez *et al.*, 2006), ya sea por deposición seca (temporada de secas y gracias al viento) o por deposición húmeda (temporada de lluvias y gracias a la precipitación del agua o por metales provenientes del sustrato) lo que podría ser perjudicial para la salud humana (Johansson *et al.*, 2009; Meharg, 2016).

Se han realizado estudios acerca de las partículas contaminantes presentes en el aire, como el de García *et al.* (2009) donde se evaluó la cantidad de partículas traza e iones inorgánicos que pasaron a través de filtros de membrana de isoporos (Millipore 0.4 μm) en tres diferentes zonas de la Ciudad de México durante cuatro períodos a lo largo de dos años. Se encontró que en las zonas altamente transitadas por vehículos y con abundante actividad industrial, así como en aquellas de uso mayormente residencial, los metales Al, Cr, Cd y Pb se encuentran circulando en el aire en altas concentraciones durante invierno (enero-febrero) y primavera (marzo-abril). En el estudio se señala que es posible obtener alimentos cultivados en zonas urbanas que no contengan concentraciones altas de MP -que no rebasen el límite permisible para el consumidor- y que, por lo tanto, no causen un daño a los consumidores de estos alimentos.

En la Ciudad de México, la mayor cantidad de alimentos que se producen corresponden a las zonas conurbadas (Dieleman, 2017). Sin embargo, cada vez más habitantes de las zonas centrales buscan obtener alimentos por medio del cultivo propio,

conduciendo así a que aumenten los espacios “verdes” en casas, edificios habitacionales, oficinas y en prácticamente cualquier espacio disponible (Malagón, 2015; Dieleman, 2017).

Los huertos urbanos tienen ventajas variadas, que van desde el ahorro económico hasta el contar con un espacio recreativo y de convivencia. Estos sitios propician la integración de grupos interdisciplinarios que comparten conocimientos para lograr un objetivo común (ya sea sustento económico o cuidado ambiental). Además, generan una conciencia sobre el esfuerzo que se invierte en la labor de obtener alimentos, lo cual puede conducir a una reflexión sobre el consumo y aprovechamiento de estos (Merçon *et al.*, 2012). Sin embargo, si no se tiene una instalación y cuidado adecuado de las plantas cultivadas en los huertos urbanos es posible que puedan llegar a perjudicar la salud de quien lo ingiere. De esta manera, los huertos urbanos, que en cierta temporada son regados con agua de lluvia, podrían representar más un peligro latente que una fuente saludable de obtención de alimentos. La acumulación de MP en plantas comestibles implica un potencial peligro para la salud humana, así como para la conservación de ecosistemas agrícolas (Meharg, 2016).

En este trabajo se llevó a cabo el análisis de metales pesados en hortalizas de consumo general: *Solanum lycopersicum* (jitomate), *Allium cepa* (cebolla blanca), *Lactuca sativa* (lechuga) y *Capsicum annuum* var. *annuum* (chile serrano), cultivadas en cuatro azoteas ubicadas en distintos sitios de la Ciudad de México en dos épocas del año (lluvias y secas).

Justificación

La contaminación del aire y el agua de lluvia en la Ciudad de México es frecuentemente alta, lo cual repercute no sólo de manera directa en la salud de los humanos y demás seres vivos que la habitan, sino también por medio del consumo de alimentos contaminados a través del agua, el suelo y el aire. Entre los alimentos más susceptibles a contaminación están los vegetales que son cultivados en huertos urbanos, de los cuales existe poco conocimiento respecto a la concentración de MP. Por esta razón es necesario saber si hay presencia de metales pesados en las plantas hortícolas de la Ciudad de México, y si su concentración está dentro de los límites permisibles para el consumo humano.

Hipótesis

Al ser la Ciudad de México una zona con altos niveles de contaminación del aire, se espera que estos influyan en la cantidad de metales pesados absorbidos por plantas cultivadas en huertos urbanos ubicados en zonas con diferente nivel de contaminación.

Objetivos

➤ General

Detectar la presencia de metales pesados (Mn, Ni, Cu, Zn, Mo, Fe, Al, V, Ba, Cr, Co, Cd, Sb, Pb y Hg) y arsénico, en las partes comestibles de cuatro especies de hortalizas cultivadas en azoteas ubicadas en diferentes sitios de la Ciudad de México.

➤ Particulares

- Determinar la concentración de metales pesados en las partes comestibles de cada hortaliza, así como en el sustrato en que encuentran y en el agua que se le suministra.
- Determinar las diferencias en la concentración de metales pesados en las hortalizas en dos temporadas: secas y lluvias; para saber si existe mayor concentración en una u otra época.
- Determinar la concentración de metales pesados en hortalizas cultivadas en las alcaldías Coyoacán, Venustiano Carranza y Azcapotzalco; sitios contrastantes en términos de contaminación de aire.

Materiales y método

☐ Especies de estudio

Las especies seleccionadas para este trabajo fueron: *Allium cepa* (cebolla), *Capsicum annuum* (chile serrano), *Lactuca sativa* (lechuga romana) y *Solanum lycopersicum* (jitomate). La selección se llevó a cabo de acuerdo a la observación de aquellas hortalizas que son cultivadas con mayor frecuencia -para consumo humano- en diferentes huertos de la Ciudad de México (com. pers.). Las semillas, a partir de las cuales se obtuvieron las plántulas, fueron compradas en tiendas de autoservicio.

☐ Descripción y requerimientos de cada especie cultivada

◆ *Allium cepa* L.



Figura 1. *Allium cepa* (cebolla) en hidromaceta

Esta hortaliza pertenece a la familia Amaryllidaceae. Son plantas con raíces que pueden alcanzar 30 cm de longitud. Sus hojas son verdes, huecas y largas, y están dispuestas en

forma opuesta. El tallo se desarrolla en forma de bulbo, el cual es de color blanco, cobrizo, púrpura o marrón y está cubierto por delgadas hojas protectoras (catáfilas) (Fig.1). El crecimiento del bulbo está relacionado directamente con la exposición a la luz (fotoperiodo) que se le proporcione. La temperatura para su óptimo crecimiento debe ser de 14 a 30°C sin humedad. Así mismo, para obtener bulbos grandes, el suelo debe tener una profundidad de 30- 50 cm y su calidad debe ser buena (alta cantidad de materia orgánica y de textura suelta). El pH ideal del suelo debe oscilar entre 6 y 7 (disminuye la producción en los suelos ácidos) (INIFAP, 2011; Rothman y Dondo 2017).

◆ *Capsicum annuum* var. *annuum* L.



Figura 2. Plantas de *Capsicum annuum* var. *annuum* (chile) en hidromaceta (izquierda) y frutos (derecha)

Es una planta que pertenece a la familia Solanaceae. Es arbustiva de hasta 4 m de altura de tallo erecto y trepador. Las hojas, así como el tallo, tienen diminutos tricomas no

glandulares. El fruto adquiere colores que van del rojo al verde, su forma es alargada y delgada, su sabor es picante (Fig.2). Las semillas en cada fruto son numerosas, de forma circular y aplanadas, de color amarillo. Para que los frutos se desarrollen adecuadamente el suelo debe tener una textura franco-arenosa, limosa o arcillosa y con alto contenido de materia orgánica, con una profundidad de 30-60 cm para dar espacio a las raíces. El pH recomendable debe ser igual o mayor a 5.5. La temperatura ideal para el cultivo de chile debe ser mayor a los 10°C y menor a los 35°C (SIAP, 2010; CONABIO, 2012b).

◆ *Lactuca sativa* L.



Figura 3. *Lactuca sativa* (lechuga) recién cosechada (izquierda). Lechugas en hidromaceta (derecha)

Corresponde a la familia Asteraceae. Su crecimiento es de tipo roseta: las hojas se disponen alrededor del tallo central, que es corto y cilíndrico (Fig.3). Durante el cultivo, para obtener lechugas frondosas y sanas se requiere un suelo de textura suelta y con buen drenaje; la temperatura media óptima para la lechuga oscila entre 18 a 22° C; el pH óptimo está entre 5.5 y 6.5 (Japón Quintero s/f).

◆ *Solanum lycopersicum* P. Mill



Figura 4. *Solanum lycopersicum* (jitomate) con frutos en hidromaceta

Esta hortaliza pertenece a la familia Solanaceae. Las hojas y los tallos tienen tricomas glandulares. Sus frutos, al madurar, son rojos, globosos y carnosos (Fig.4). Tienen abundantes semillas circulares, aplanadas y amarillas, que miden en promedio 6 mm². Para su cultivo el suelo debe tener una textura ligera y buen drenaje, con un pH de 6-7; la temperatura óptima es de 20-24°C y la humedad relativa debe ser menor a 75% (CONABIO, 2012a; Pérez *et al.*, 2015, SAGARPA, 2017).

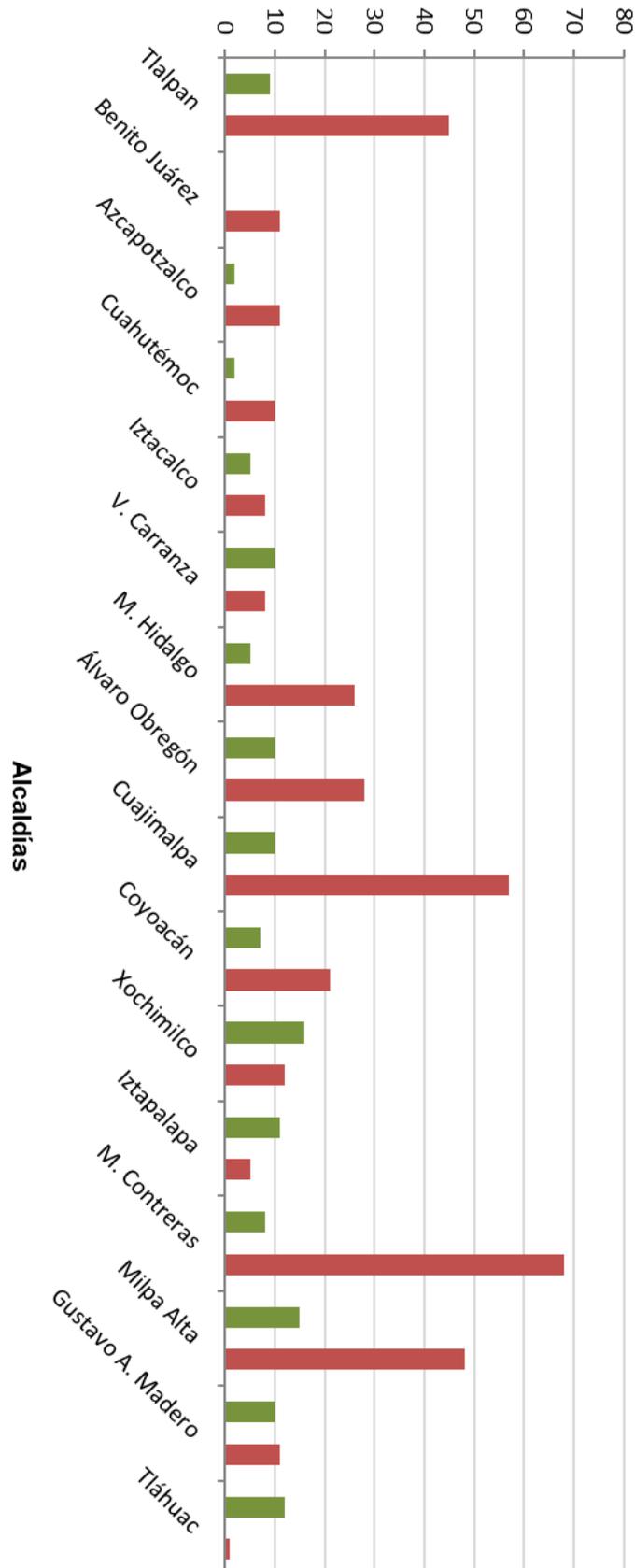
□ **Sitios de estudio**

▪ **Criterios para la selección de los sitios**

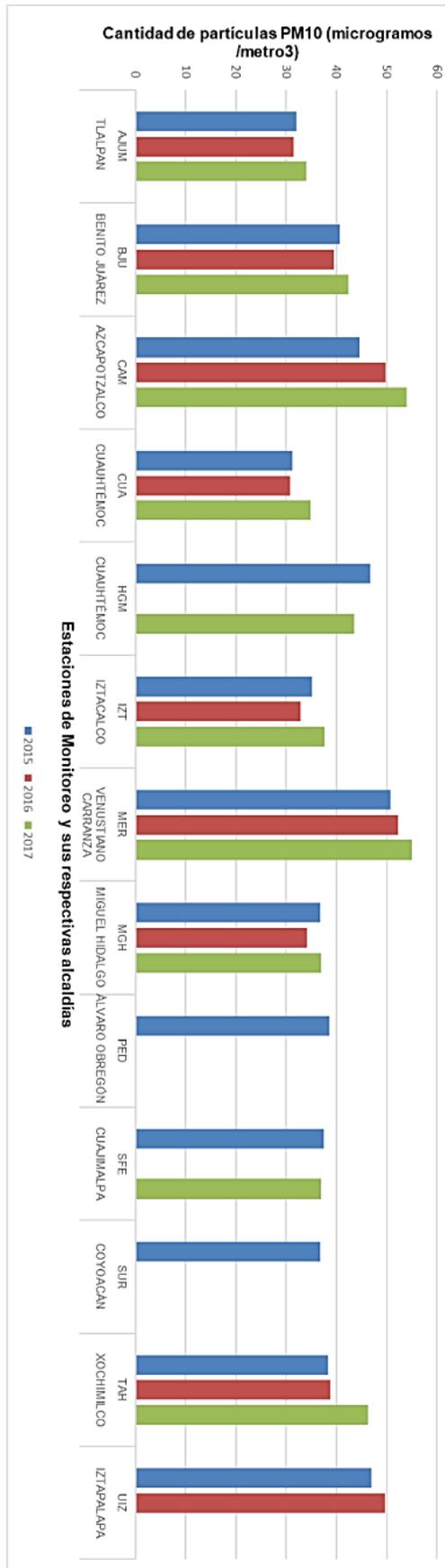
Los criterios que se tomaron en cuenta para la elección de los sitios de estudio fueron la cantidad de partículas PM₁₀ registradas en el aire por alcaldía (Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México 2015a; SMACM, 2016b y SMACM, 2017c) (Gráfica 1), y el porcentaje de vegetación existente respecto al territorio total de cada alcaldía entre los

años 2015-2017 (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, 2016) (Gráfica 2). Por lo tanto, considerando las condiciones de acceso y seguridad de cada alcaldía, los lugares elegidos se caracterizaron por encontrarse en las alcaldías con mayor cantidad de partículas PM_{10} y por poseer una baja cantidad de áreas verdes entre los años 2015 a 2017, (excepto el huerto ubicado en Coyoacán, que se encuentra en el Jardín Botánico, UNAM y que funge como sitio de contraste al estar rodeado de gran cantidad de vegetación y reportar moderada cantidad de elementos traza y PM_{10}) (Dirección General de Comunicación Social. 2019).

Porcentaje de arbolado, pastos y arbustos



Gráfica 1. Cantidad de partículas PM₁₀ por estación de monitoreo en distintas alcaldías de la Ciudad de México. Obtenida a partir de información consultada en SMACM 2015-2017



Gráfica 2. Vegetación de la Ciudad de México por alcaldía durante 2016. Datos tomados de PAOT, 2016. Las barras de color verde indican el porcentaje de arbustos y pastos, y las barras rojas el porcentaje de arbolado respecto a superficie total de cada alcaldía.

Los sitios de estudio se distribuyeron en tres alcaldías de la Ciudad de México, las cuales se señalan con un punto azul en la Fig. 5:

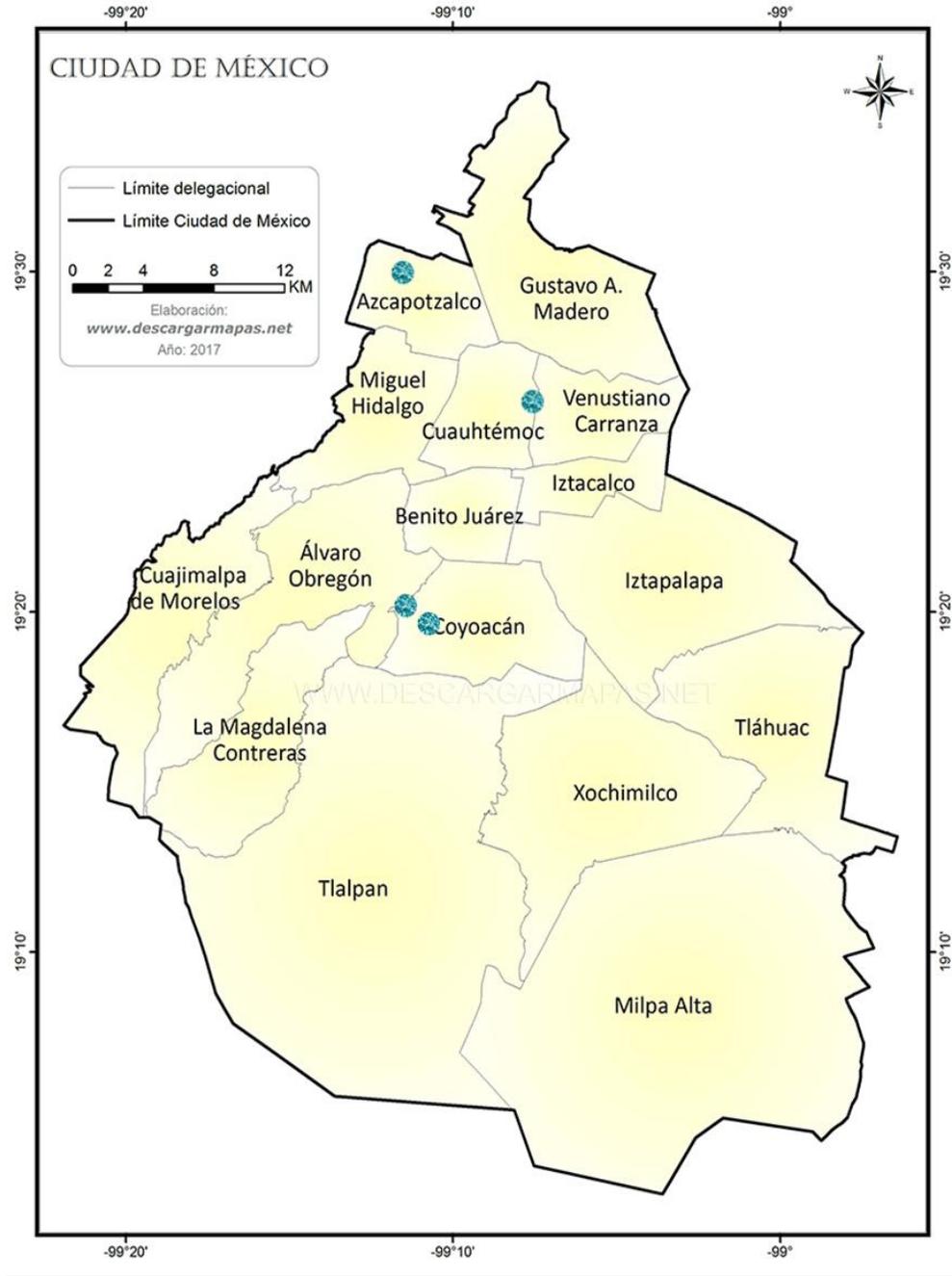


Figura. 5. Puntos de la Ciudad de México en los que se ubican los sitios de cultivo (se marcan con puntos azules).

Coyoacán

- ⊙ Sitio control: Invernadero templado de la Facultad de Ciencias. El invernadero está sellado con techo y ventanas de cristal (Fig. 6). La temperatura oscila entre los 18 y 28°C (Av. Universidad 3000, Copilco el Bajo).



Figura 6. Hidromacetas con hortalizas en Invernadero Templado de la Facultad de Ciencias, UNAM

- ⊙ Sitio 1 (Fig. 7): Se ubica dentro del Jardín Botánico de la UNAM, el cual se encuentra en la Alcaldía Coyoacán. Este espacio está cubierto por malla sombra negra en techo y paredes, sin embargo, hay espacios no protegidos por lo que aves, roedores y algunos reptiles (lagartijas) pueden acceder. Está rodeado por la Zona Núcleo Poniente de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. (Cto. Zona Deportiva 53, Ciudad Universitaria, 04510). Jardín Botánico, UNAM.



Figura 7. Hidromacetas con hortalizas en el Jardín Botánico, UNAM

Venustiano Carranza

- ⊙ Sitio 2 (Fig. 8): Se encuentra en la azotea del edificio que alberga el proyecto multidisciplinario ATEA, muy cerca del mercado La Merced. Las plantas fueron cultivadas en invernadero de madera, cubierto del techo por malla sombra blanca y en las paredes por plástico traslúcido. (Topacio #25, Col. La Merced. 06000).



Figura 8. Invernadero con techo de malla en la alcaldía Venustiano Carranza

Azcapotzalco

- ⊙ Sitio 3 (Fig. 9): Se ubica en la azotea de una casa habitación, donde se colocó una casa de malla sombra de 2.5m de altura, y 4m² de ancho y largo. Cuenta con una entrada removible (Axolahua 94, col. La Preciosa, Azcapotzalco).



Figura 9. Casa sombra en alcaldía Azcapotzalco

☐ Siembra de las semillas

Esta primera etapa del trabajo consistió en la siembra de 50 semillas de cada especie en almácigos (semilleros), con 50 cavidades de 6.5 cm de profundidad y 5 cm de diámetro. Se colocó una semilla por cavidad utilizando tierra negra mezclada con tepojal, tezontle y vermicomposta en proporciones iguales. El tepojal y tezontle se obtuvo de Perote, Veracruz, mientras la tierra negra y la vermicomposta se produjeron en Xochimilco, CDMX. Los semilleros fueron colocados en el Invernadero de la Facultad de Ciencias, UNAM (Fig. 10).



Figura 10. Semilleros con plántulas en Invernadero Facultad de Ciencias, UNAM.

Cuando las plántulas se trasplantaron a las macetas, en la temporada de lluvias, en 2018, y de secas en 2019, fue necesario sembrar 10 lotes de 50 semillas de cada especie vegetal para reemplazar aquellas plantas que no llegaron a crecer debido a factores ambientales como exceso de lluvia, temperaturas bajas, depredadores, etc.

☐ **Trasplante**

Al alcanzar una altura de entre 10 y 12 cm se trasladaron hasta 15 plántulas de cada especie a los sitios de estudio, incluyendo el Invernadero de la Facultad de Ciencias. Las plántulas fueron colocadas en hidromacetas con tierra negra mezclada con tepojal, tezontle y vermicomposta en proporciones iguales. En cada sitio se destinaron dos macetas para las

hortalizas jitomate, chile y cebolla, en cada una se colocaron cuatro plántulas de cada especie; para la lechuga se utilizaron tres macetas en cada sitio de estudio y en cada maceta se colocaron dos plántulas (Fig. 11).

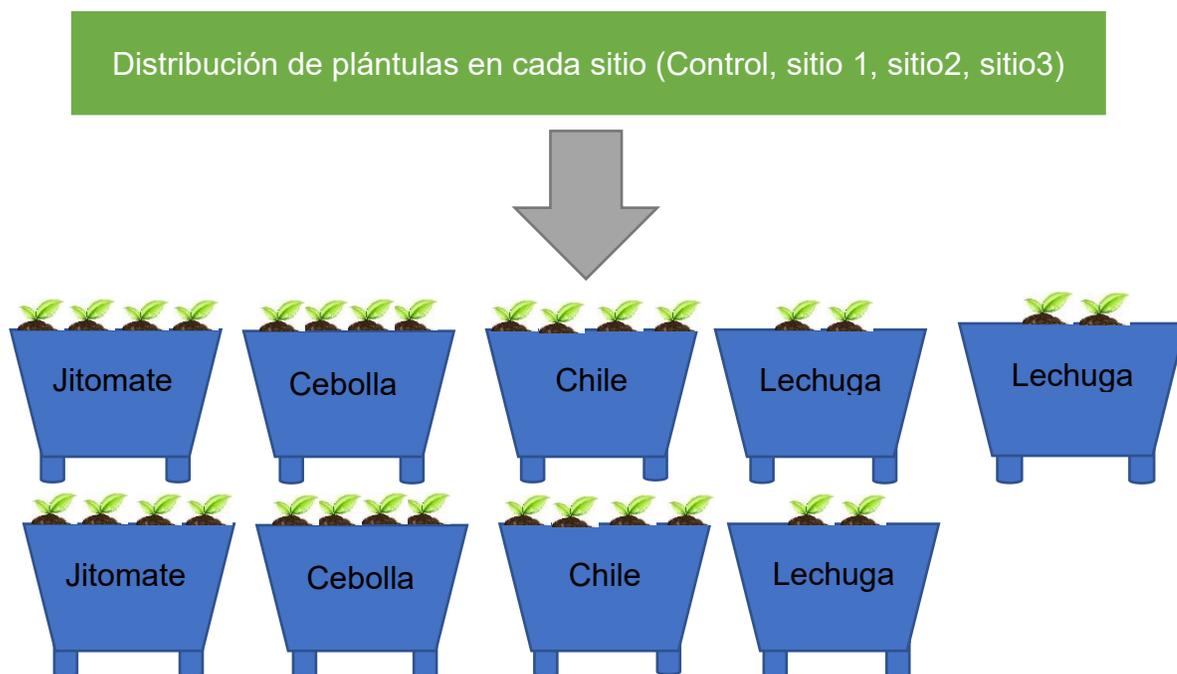


Figura 11. Esquema de distribución de plantas en hidromacetas de cada sitio de estudio.

Las plántulas correspondientes a la temporada de lluvias fueron trasladadas a los diferentes huertos a lo largo de mayo y agosto de 2018. En el Invernadero, Coyoacán y Venustiano Carranza, las plántulas fueron trasplantadas durante mayo y julio; por otro lado, la casa sombra en Azcapotzalco estuvo lista durante agosto. Antes de ser usado, el suelo del Invernadero y de Coyoacán estuvo expuesto, en hidromacetas, a la lluvias y la atmósfera del Jardín Botánico durante varios meses. Para la temporada de secas, las plántulas fueron trasladadas durante diciembre (2018) y enero de 2019.

☐ Riego y nutrición

Las plantas fueron monitoreadas semanalmente durante las dos temporadas de estudio (lluvias y secas). Durante la temporada de lluvia (mayo-noviembre) el riego se realizó sólo con agua de lluvia, mientras en la temporada seca (diciembre-abril) las plantas fueron regadas con agua de la llave. Las plantas del Invernadero fueron regadas con agua de la llave durante las dos temporadas. Tras permanecer seis meses en las macetas, se encontró que las plantas no se encontraban en buen estado de salud, por lo que se adicionaron nutrientes a todas las plantas. Los nutrientes fueron adquiridos en el Taller de Hidroponía de la Facultad de Ciencias, UNAM; el contenido de esta solución nutritiva fue (ppm): nitrógeno 203, fósforo 50, potasio 236; calcio 200; magnesio 48; además de todos los micronutrientes (Fe, Cu, B, Mn, Zn, Cl, Mo, Ni) dado que la tierra tenía bajos niveles de éstos lo que se veía reflejado en la calidad de las plantas y los frutos. Los nutrientes se adicionaron una vez cada dos semanas, un gramo de solución nutritiva por litro de agua.

☐ Toma y procesamiento de muestras de vegetales

Cuando los frutos de los jitomates y chiles, así como los bulbos de las cebollas y las hojas de las lechugas, alcanzaron tamaño y madurez para ser comestibles, se colectaron cinco muestras de cada especie, y cada muestra se obtuvo de un individuo distinto. Las muestras fueron guardadas en bolsas de papel estraza y llevadas al laboratorio de Desarrollo en Plantas de la Facultad de Ciencias, UNAM, donde fueron lavadas con agua destilada,

pesadas en fresco y posteriormente secadas en estufa a $\pm 50^{\circ}$ C (el tiempo de secado dependió del tipo y tamaño de muestra).

Una vez secas las muestras, se pesaron de nuevo. El material seco se molió, primero en mortero y después en el molino del Laboratorio de Edafología Experimental, del Instituto de Geología de la UNAM. De esta forma las muestras estuvieron listas para proceder al análisis de metales pesados. En la tabla 2 se señala la cantidad de muestras recolectadas por especie, sitio de estudio y temporada.

Tabla 2. Número de muestras colectadas por cada sitio de estudio, así como por temporada y especie

Hortaliza/Alcadía	Lluvias (LI) y secas (s)	Control	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
<i>Allium cepa</i> (cebolla blanca)	LI	5	5	5	0
	S	0	0	3	5
<i>Capsicum annuum</i> (chile serrano)	LI	5	0	5	0
	S	0	2	4	5
<i>Lactuca sativa</i> (lechuga)	LI	5	2	5	2
	S	0	3	5	3
<i>Solanum lycopersicum</i> (jitomate)	LI	5	3	5	0
	S	0	4	5	5

☐ **Procesamiento del agua con la que se regaron las plantas**

- Temporada de lluvia: Para coleccionar el agua de lluvia se colocó un embudo en la boquilla de un bote (ambos de plástico). Estos se situaron en un espacio abierto, cerca de las casas de sombra o invernaderos, según correspondiera, en cada sitio. El bote se retiró al cuarto día de ser colocado y se extrajeron de él, con una pipeta Pasteur, tres muestras de agua, de 30 mL cada una, las cuales se depositaron en envases limpios de polietileno. Dichas muestras fueron acidificadas de manera inmediata con HNO₃ concentrado grado ultrapuro al 2% (v/v) y se almacenaron en refrigeración hasta su posterior análisis. Este procedimiento se llevó a cabo en cada sitio de estudio. La fecha de colecta para todos los sitios de estudio fue el 12 de septiembre de 2018.
- Temporada de secas: Se coleccionaron tres muestras de agua de la llave (agua corriente) en una primera toma. Cada muestra, de 30 mL, se dispuso en botes limpios de polietileno. Las muestras se acidificaron al 2% (v/v) con HNO₃ concentrado grado ultrapuro y se almacenaron en refrigeración hasta su posterior análisis. Este procedimiento se llevó a cabo en cada sitio de estudio.
- Invernadero: De la misma manera se tomaron las muestras de agua de la llave del Invernadero.

☐ **Procesamiento de sustrato de cultivo**

Por cada sitio de estudio se tomaron 20g de sustrato de cada hidromaceta, se mezclaron y de los 180 g resultantes se tomaron sólo 100g. Las muestras de sustrato se obtuvieron

durante la temporada de lluvias (mayo 2018) y secas (enero 2019). Se hicieron tres repeticiones de cada colecta. El procedimiento se llevó a cabo en cada sitio de estudio, incluyendo el Invernadero.

Cada muestra se puso a secar en estufa a 40° C durante 24 o 48 horas, según fue necesario, en el Laboratorio de Taller de Plantas 1 y 2 de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Transcurrido este tiempo se tamizó la muestra con una malla 200 mm (Standard Sieve) y se almacenó en un lugar fresco, para posteriormente triturarla en el molino de Edafología Experimental del Instituto de Geología, y finalmente analizar la cantidad de metales pesados.

El suelo recolectado durante la época de lluvias tenía una apariencia uniforme en cuanto a color (café oscuro-negro). Las muestras de suelo fueron tomadas en diciembre de 2017 (para el Invernadero de la Facultad de Ciencias y Coyoacán), y en mayo de 2018 para Venustiano Carranza y Azcapotzalco.

☐ Medición de pH del suelo

Se tomaron 10g de muestra de suelo de cada sitio en cada temporada y se mezclaron con 20mL de agua destilada. La mezcla se agitó durante 10 minutos y después se dejaron reposar durante 30 min. Transcurrido ese tiempo, se tomó la medida del pH de cada muestra en el sobrenadante, con un potenciómetro proporcionado por el Taller de Plantas II de la Facultad de Ciencias, UNAM.

☐ **Análisis de metales**

- **Metales analizados por espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente ICP-MS**

Se analizaron 16 elementos metálicos: Mn, Ni, Cu, Zn, Mo, Fe, Al, V, Ba, As, Cr, Co, Cd, Sb, Pb y Hg.

- **Procedimientos de preparación de muestra**
 - Muestras vegetales

Las muestras se digirieron en un digestor modelo UltraWAVE de la marca Milestone. Se pesaron 0.5 g de muestra, en viales de teflón y se adicionó 5 ml de HNO₃ grado ultrapuro. Posteriormente se llevó a cabo la digestión asistida por horno de microondas, con el siguiente programa (Tabla 3):

Tabla 3. Programa de digestión de muestras realizado en digestor UltraWAVE Milestone

Etapa	Tiempo (min)	Potencia (W)	Temperatura (°C)	Presión (bar)
1	20	1500	230	110
2	15	1500	230	110

Una vez terminado el programa, las muestras se enfriaron y aforaron a 25 mL con agua desionizada. Se filtraron, etiquetaron y almacenaron a 4°C. Todo el procedimiento se realizó en el laboratorio espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente ICP-MS de Instituto de Geofísica, UNAM.

- Muestras de agua de lluvia y agua corriente

Los análisis para el agua se llevaron a cabo también por medio de ICP-MS, para lo cual el primer paso fue la digestión ácida de las muestras. En el caso del agua, las muestras se acidificaron al momento de la colecta, por lo que no fue necesario agregar más ácido.

- Muestras de sustrato de cultivo

Al igual que las muestras vegetales, se realizó una digestión de los suelos previo al análisis por ICP-MS. La digestión se llevó a cabo en un digestor modelo UltraWAVE de la marca Milestone. Se pesó 0.2g de muestra y se adicionaron 4ml de agua regia invertida (3ml HNO₃:1ml HCL) y 1ml HF. Posteriormente se llevó a cabo la digestión asistida por horno de microondas con el siguiente programa (Tabla 4).

Tabla 4. Programa de digestión de muestras realizado en digestor UltraWAVE Milestone

Etapa	Tiempo (min)	Potencia (W)	Temperatura (°C)	Presión (bar)
1	20	1500	260	110
2	15	1500	260	110

Una vez terminado el programa, las muestras se colocaron en vasos de teflón para llevar a cabo la evaporación en parrilla de calentamiento. Se adicionó dos veces 1 ml de HCL con sus respectivas evaporaciones.

Una vez terminado el programa, las muestras se enfriaron y aforaron a 50 mL con una solución de 2%HNO₃. Se filtraron, etiquetaron y almacenaron a 4°C.

Control de calidad

Por cada 10 muestras de plantas se digirió un Material de Referencia Certificado (MRC-1573a) Tomato Leaves del National Institute of Standards and Technology (NIST), dos duplicados de muestras elegidas al azar y un blanco reactivo para monitorear una posible aportación de contaminantes. Para las muestras de suelo se digirió un MRC 2709a San Joaquin Soil también del NIST.

☐ Análisis por ICP-MS

La espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) es una técnica altamente especializada. Combina dos fundamentos principales: 1) ionización de la muestra (plasma) y 2) espectrómetro de masas (cuadrupolo), cuya su función es separar los iones con base a su relación masa-carga. Las muestras a analizar ingresan al equipo en forma líquida, esta es transportada por medio de la bomba peristáltica hasta el nebulizador, donde es transformada en aerosol gracias al gas argón. El aerosol resultante es ionizado a través del plasma obtenido del gas argón, el cual puede alcanzar temperaturas de hasta 8000 °K. Dichos iones pasan a través de un filtro que los separa según su relación carga/masa y al final, se cuantifican estos iones. Una gran ventaja de esta técnica sobre otras -espectrometría de absorción atómica, por ejemplo- es que se pueden identificar varios elementos a la vez. Además, su sensibilidad es muy alta (ppt-ppq), lo que conlleva a una mayor precisión en la separación, identificación y cuantificación de los elementos traza (Amminn, 2007; ININ, 2020).

Todas las mediciones se realizaron en un instrumento óptimo para esta técnica, modelo iCAP Qc de la marca Thermo Scientific, en el Laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM. El instrumento se optimizó, previamente al análisis de las muestras, con una solución certificada acuosa de la marca High Purity Standards, la cual contiene un amplio intervalo de masas (Li, Co, In, Ba, Bi, Ce y U de $1\mu\text{g L}^{-1}$). Se realizaron las curvas de calibración. Se utilizaron materiales de referencia certificados “1547 Peach Leaves” y “1573a Tomato Leaves”.

Las concentraciones obtenidas de metales pesados se trabajaron a partir del porcentaje de recuperación para cada metal (de acuerdo con control de calidad MRC- 1573a Tomate Leaves y 1547 Peach Leaves para hortalizas y MRC 2709a Soil San Joaquín para suelos) con la finalidad de obtener la concentración total de cada elemento en las muestras (Tablas 5 a 7).

Tabla 5. Control de calidad para el MRC-1573a Tomato Leaves. (L.D.= Limite de detección).

Metal	L.D. $\mu\text{g L}^{-1}$	%Recuperación
Al	0.5986	128.150
V	0.0133	114.928
Cr	0.0055	107.249
Mn	0.1262	109.755
Fe	0.3937	120.479
Co	0.0012	118.549
Ni	0.0569	108.584
Cu	0.0272	102.602
Zn	0.2037	67.879
As	0.0433	123.810
Mo	0.0989	113.141
Cd	0.0090	80.913
Sb	0.0246	108.191
Ba	0.0344	91.057
Tl	0.0012	N.R.
Pb	0.0220	N.R.
Hg	0.011	108.194

Tabla 6. Control de calidad para el MRC 2709a Soil San Joaquín. (L.D.= Limite de detección).

Metal	L.D. $\mu\text{g L}^{-1}$	%Recuperación
Al	0.5986	
V	0.0133	100.987
Cr	0.0055	107.953
Mn	0.1262	84.515
Fe	0.3937	89.173
Co	0.0012	97.734
Ni	0.0569	101.456
Cu	0.0272	105.975
Zn	0.2037	96.640
As	0.0433	71.230
Mo	0.0989	N.R.
Cd	0.0090	94.221
Sb	0.0246	86.863
Ba	0.0344	34.155
Tl	0.0012	102.387
Pb	0.0220	87.539
Hg	0.011	122.205

Tabla 7. Control de calidad para el Estándar Drinking Water ($\mu\text{g L}^{-1}$) (L.D.= Limite de

Metal	L.D. ($\mu\text{g L}^{-1}$)	%recuperación
Al	0.5986	99.12
V	0.0133	104.71
Cr	0.0055	102.46
Mn	0.1262	95.29
Fe	0.3937	111.02
Co	0.0012	97.36
Ni	0.0569	96.39
Cu	0.0272	90.62
Zn	0.2037	77.45

As	0.0433	96.34
Mo	0.0989	114.90
Cd	0.0090	93.15
Sb	0.0246	45.09
Ba	0.0344	90.97
Tl	0.0012	84.12
Pb	0.0220	84.33

❑ Factor de bioconcentración (FBC)

El FBC se define como (la medida de) la eficiencia de acumulación de metales en biomasa (Gómez-Bernal, 2014). Este factor es utilizado para medir la capacidad de absorción por la raíz y traslocación -en este caso a las partes comestibles- de un metal por una planta, ya sea en la raíz o en la parte aérea, con relación a su concentración en el suelo. Cuando los valores son >1 se considera que esa especie vegetal es potencialmente hiperacumuladora (Audet y Charest, 2007). En el caso, contrario, cuando el FBC tiene valores bajos significa que la especie tiene alta capacidad de exclusión, aunque para concluir esto se debe analizar toda la planta y no sólo una parte.

Para este trabajo se calculó el FBC de acuerdo con Gómez-Bernal (2014) considerando el promedio de todas las muestras de un solo sitio:

concentración del metal pesado en el tejido
vegetal (parte comestible en este caso/

concentración de metal
pesado en el sustrato

❑ Procesamiento de datos. Análisis estadísticos

Los datos obtenidos fueron procesados en los programas Statistica y GraphPad Prism6. Las pruebas aplicadas fueron ANOVA de dos vías y Kruskal-Wallis. Como pruebas post hoc se utilizaron las pruebas de Tukey y Mann-Whitney.

Resultados

❖ Temporada de lluvia 2018

Se presentan resultados del análisis de MP realizado en sustrato, agua y muestras vegetales correspondientes a la temporada de lluvias 2018. En cada sección se mencionan algunas observaciones de los datos analizados, así como una tabla y una gráfica. En las tablas se muestran los promedios y la desviación estándar de las muestras analizadas, y se marcan en rojo aquellos metales que presentaron diferencias significativas entre sitios. En las gráficas se presentan sólo los metales en concentraciones diferentes entre sitios. Debido a cuestiones climáticas y de depredación no se obtuvieron todas las muestras esperadas de hortalizas:

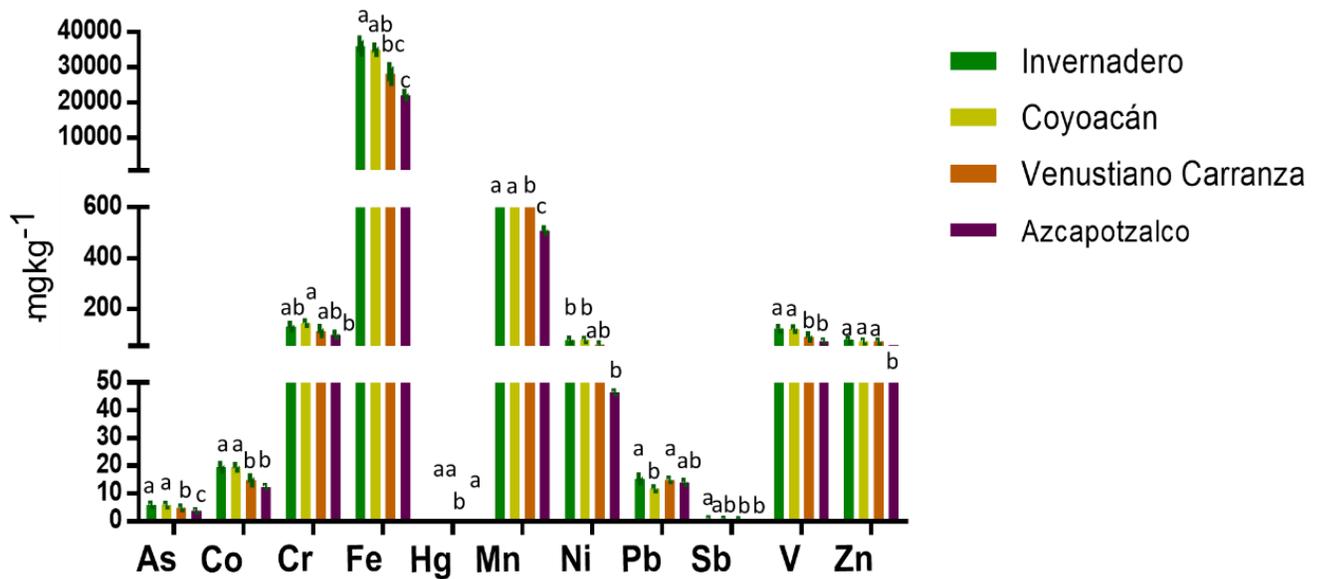
○ Sustrato

En este primer muestreo se encontraron de todos los metales analizados. Del total de elementos, 11 resultaron estar en concentraciones significativamente diferentes entre sitios. Ciertos metales destacan por encontrarse en mayor concentración en el **Invernadero** que en el resto de los sitios, estos son: As, Co, Fe, Pb, Sb, V y Zn. En los cuatro sitios, los metales que en promedio estuvieron en mayor concentración fueron Al>Fe>Mn>Ba>Cr, presentando los siguientes mínimos-máximos (entre todas las muestras) de 65- 300 mg Kg⁻¹; 20- 40 mg Kg⁻¹; 500-900 mg Kg⁻¹; 221-500 mg Kg⁻¹; y 85-151 mg Kg⁻¹, respectivamente. Los sitios con cantidad promedio de elementos más alta fueron Venustiano Carranza e Invernadero (Tabla 8). Los elementos que estuvieron en cantidades más bajas fueron Hg>Cd>Sb, con rangos (mínimo-máximo) de 0.005-0.089 mg Kg⁻¹; 0.2-0.3 mg Kg⁻¹; y 0.5-1

mg Kg⁻¹, respectivamente. En la Gráfica 3 se presentan los valores de los metales que se encontraron en cantidades diferentes entre sitios.

Tabla 8. Concentración de metales pesado (promedio y desviación estándar) en las muestras de suelo durante la temporada de lluvia. En rojo se marcan aquellos que presentaron diferencias significativas entre sitios.

Concentración (mg Kg ⁻¹)				
	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^a 152370 ± 62340	^a 129209 ± 48362	^a 163523 ± 121147	^a 164824 ± 13550
As	^a 5.989 ± 0.334	^a 5.917 ± 0.412	^b 4.942 ± 0.437	^c 3.869 ± 0.162
Ba	^a 293.210 ± 67.538	^a 349.712 ± 68.383	^a 412.306 ± 71.545	^a 284.408 ± 60.870
Cd	^a 0.264 ± 0.045	^a 0.223 ± 0.007	^a 0.248 ± 0.026	^a 0.232 ± 0.028
Co	^a 19.562 ± 1.5634	^a 19.567 ± 1.060	^b 14.904 ± 2.162	^b 12.431 ± 0.125
Cr	^{ab} 129.418 ± 15.125	^a 143.451 ± 8.969	^{ab} 111.121 ± 23.283	^b 96.863 ± 11.021
Cu	^a 23.437 ± 1.665	^a 23.205 ± 0.743	^a 21.008 ± 1.594	^b 16.692 ± 0.362
Fe	^a 36054 ± 3399	^{ab} 34931 ± 1763	^{bc} 28078 ± 4158	^c 22004 ± 1282
Hg	^a 0.008 ± 0.001	^a 0.013 ± 0.004	^b 0.009 ± 0.004	^a 0.071 ± 0.012
Mn	^a 812.439 ± 57.880	^a 822.74 ± 47.052	^a 707.668 ± 47.726	^b 508.331 ± 12.754
Mo	^a 2.830 ± 1.187	^a 2.23 ± 0.099	^a 1.661 ± 0.280	^a 2.547 ± 1.067
Ni	^a 75.408 ± 7.595	^a 76.201 ± 3.224	^{ab} 57.061 ± 7.677	^b 46.509 ± 0.204
Pb	^a 15.341 ± 1.807	^b 11.780 ± 0.705	^a 14.969 ± 0.450	^{ab} 14.061 ± 0.616
Sb	^a 0.921 ± 0.079	^{ab} 0.743 ± 0.124	^b 0.611 ± 0.142	^b 0.554 ± 0.039
V	^a 119.765 ± 8.380	^a 118.453 ± 8.232	^b 88.327 ± 14.222	^b 71.048 ± 1.225
Zn	^a 76.808 ± 8.250	^a 70.382 ± 2.858	^a 69.996 ± 3.516	^b 55.813 ± 0.889



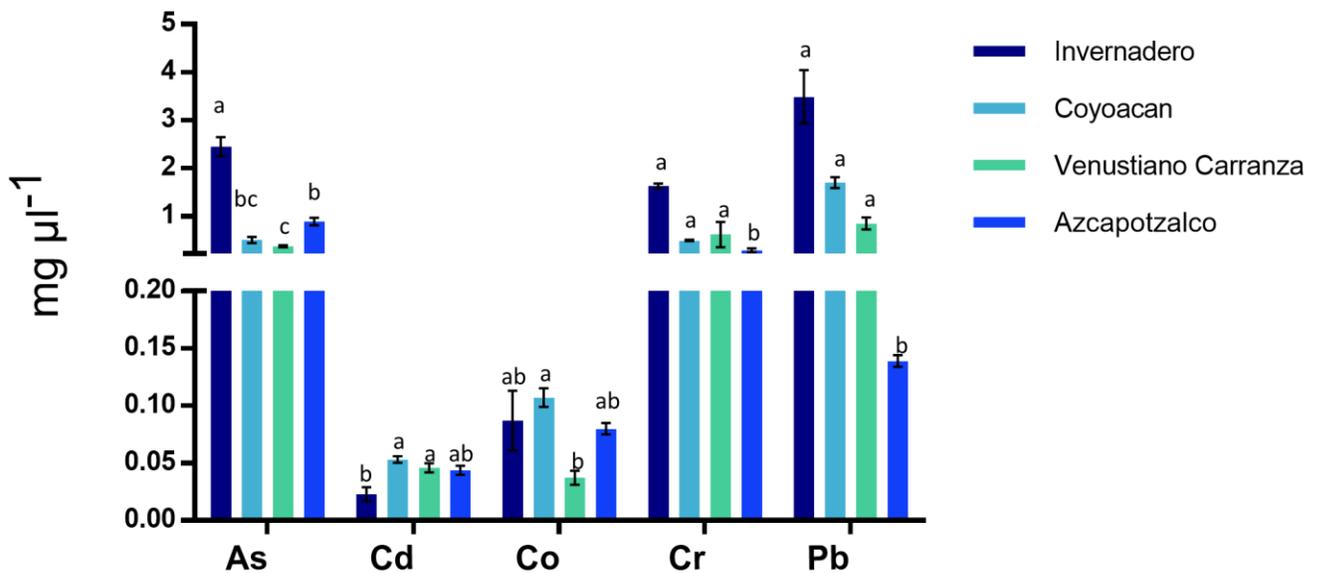
Gráfica 3. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en las muestras de suelo durante la temporada de lluvias. Las letras sobre las barras determinan el grupo al que pertenecen las muestras: a-muestras con concentraciones más altas, c-muestras con concentraciones más bajas.

○ Agua de lluvia

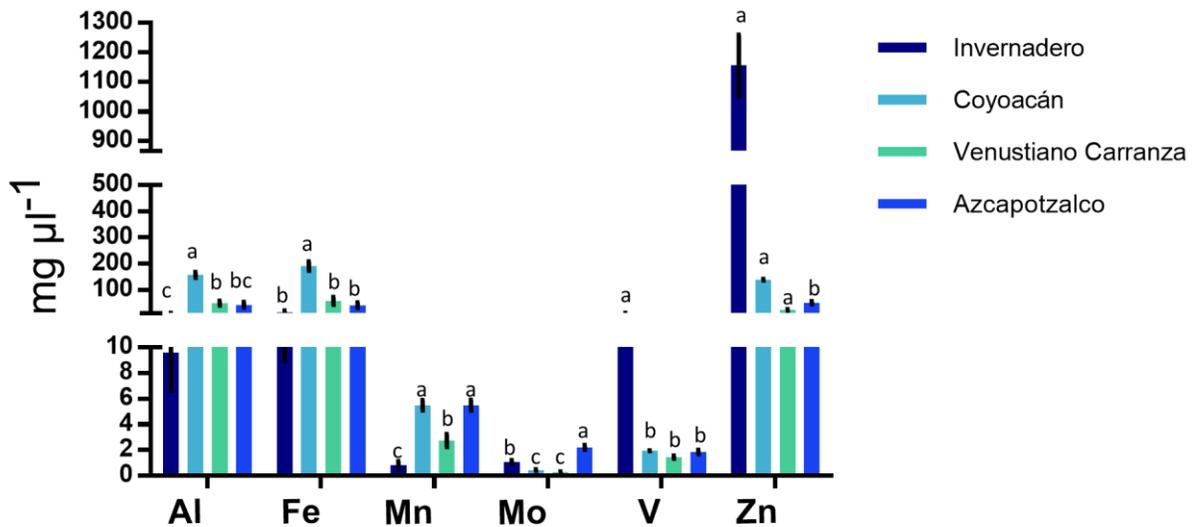
Las muestras de agua correspondientes a la época de lluvias se tomaron durante Julio de 2018. En ellas, se encontró que 12 de 16 elementos analizados estuvieron presentes en cantidades significativamente diferentes entre sitios. Las cantidades de metales pesados oscilaron entre los 0.01 a los 1350 $\mu\text{g L}^{-1}$. Los metales con cantidades más bajas para los cuatro sitios fueron el Cd y el Co, mientras aquellos que se encontraron en mayor cantidad fueron, en orden ascendente $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Fe} > \text{Al}$ (Tabla 9). Las concentraciones de Hg estuvieron debajo del límite de detección (L.D.) Los promedios de cada metal y su desviación estándar se presentan en las Gráficas 4 y 5.

Tabla 9. Concentración de metales pesados (promedio y d.e.) en las muestras de agua de lluvia. En rojo se marcan aquellos metales que presentaron diferencias significativas entre sitios. LD: límite de detección. NOTA: El límite de detección del Hg es de 0.011, muy bajo respecto al resto de los metales.

Agua lluvia y llave (para el control) ($\mu\text{g L}^{-1}$)				
	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^c 9.615 \pm 5.153	^a 157.186 \pm 18.040	^b 49.675 \pm 14.578	^{bc} 42.625 \pm 18.578
As	^a 2.449 \pm 0.343	^{bc} 0.505 \pm 0.109	^c 0.375 \pm 0.044	^b 0.888 \pm 0.140
Ba	^a 34.276 \pm 2.680	^a 7.472 \pm 0.886	^a 8.520 \pm 1.272	^a 12.372 \pm 10.806
Cd	^b 0.023 \pm 0.010	^a 0.0531 \pm 0.005	^a 0.046 \pm 0.008	^{ab} 0.0439 \pm 0.007
Co	^{ab} 0.087 \pm 0.045	^a 0.107 \pm 0.015	^b 0.0373 \pm 0.011	^{ab} 0.080 \pm 0.010
Cr	^a 1.626 \pm 0.091	^a 0.493 \pm 0.025	^a 0.620 \pm 0.456	^b 0.286 \pm 0.069
Cu	^a 228.071 \pm 23.717	^a 7.107 \pm 7.009	^a 4.636 \pm 1.045	^a 7.695 \pm 4.173
Fe	^b 14.623 \pm 9.889	^a 190.468 \pm 29.624	^b 58.3475 \pm 24.623	^b 41.528 \pm 18.405
Hg	< L. D.	<L. D.	< L. D.	< L. D.
Mn	^c 0.842 \pm 0.529	^a 5.487 \pm 0.690	^b 2.751 \pm 0.852	^a 5.489 \pm 0.743
Mo	^b 1.083 \pm 0.264	^c 0.450 \pm 0.104	^c 0.316 \pm 0.029	^a 2.218 \pm 0.312
Ni	^a 137.504 \pm 120.386	^a 0.558 \pm 0.104	^a 0.912 \pm 0.760	^a 1.443 \pm 0.941
Pb	^a 3.484 \pm 0.965	^a 1.698 \pm 0.196	^a 0.847 \pm 0.221	^b 0.139 \pm 0.009
Sb	^a 0.887 \pm 0.111	^a 1.017 \pm 0.071	^a 1.242 \pm 0.170	^a 1.152 \pm 0.179
V	^a 11.560 \pm 1.217	^b 1.962 \pm 0.059	^b 1.460 \pm 0.216	^b 1.855 \pm 0.279
Zn	^a 1156.108 \pm 179.116	^a 138.529 \pm 5.253	^a 23.515 \pm 4.186	^b 51.677 \pm 9.982



Gráfica 4. Metales pesados en lo que hubo diferencias significativas entre sitios en las muestras de agua de temporada de lluvias



Gráfica 5. Cantidad de metales pesados diferencias significativas entre sitios en las muestras de agua de temporada de lluvias

○ Hortalizas

Todos los elementos analizados estuvieron presentes en la mayoría de las muestras vegetales analizadas. Los metales se encontraron en cantidades diferentes, dependiendo de la especie vegetal, el metal analizado y el sitio de estudio. Los elementos que se encuentran con mayor presencia en las muestras de hortalizas recolectadas durante la época de lluvias fueron, en orden ascendente: Fe>Al>Zn>Mn>Ba. Estos metales se concentraron en cantidades diferentes en cada especie vegetal, siendo *Lactuca sativa* la hortaliza que más concentración reportó, seguida de *Allium cepa* (Lechuga>cebolla>chile>jitomate).

A continuación, se especifica, por especie vegetal, la cantidad promedio que se obtuvo -en las partes comestibles- de cada metal, así como el valor de la desviación estándar de cada metal. En las gráficas se muestran los metales con cantidades significativamente diferentes entre sitios.

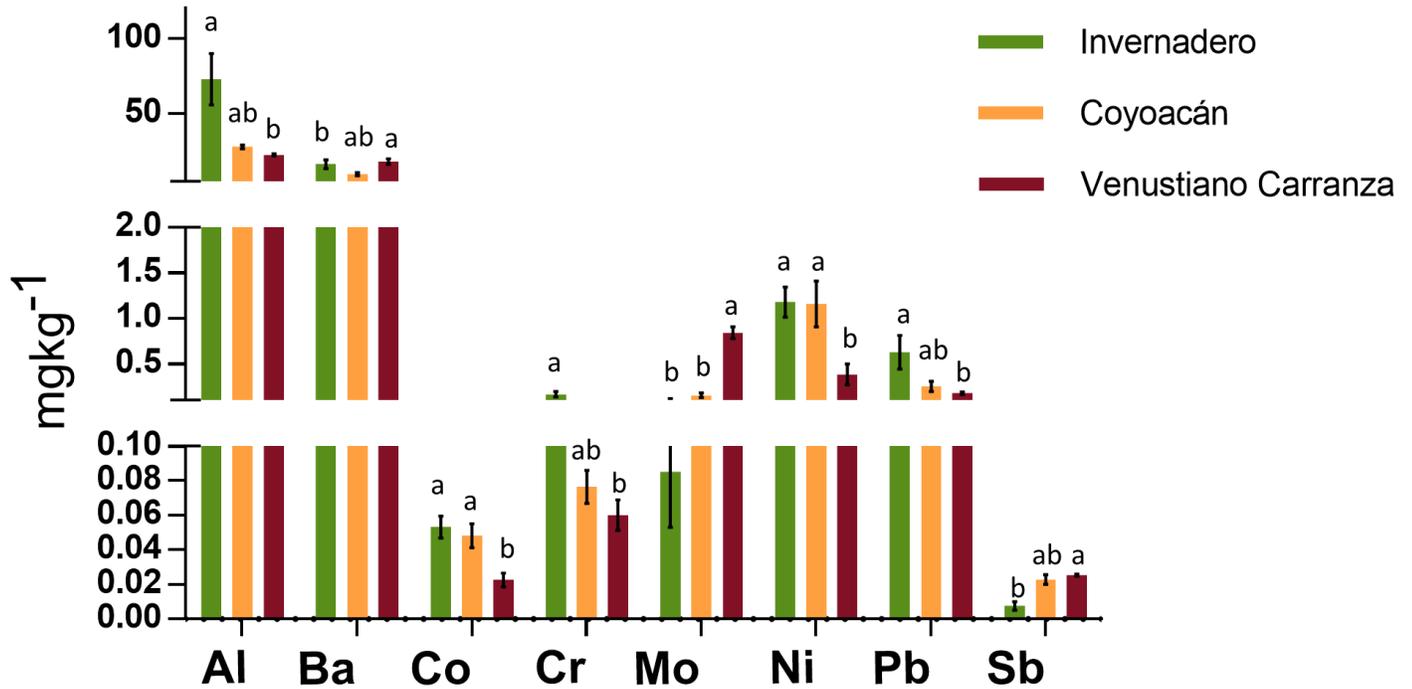
➤ **Allium cepa (Cebolla)**

En los bulbos obtenidos se registraron todos los metales analizados (16), de los cuales, ocho presentaron diferencias significativas entre sitios, donde seis de ellos estuvieron en mayor cantidad en el Sitio Control ($p < 0.05$).

Los valores de los MP por sitio se presentan en la Tabla 11. Los valores oscilan entre los 0.004 mg kg⁻¹ -para el Hg- hasta los 54.85 mg kg⁻¹-para el Fe-. Los metales con concentraciones más altas fueron Fe>Al>Zn>Ba>Mn. En Venustiano Carranza y el Invernadero de la Facultad de Ciencias se encuentran las cantidades más altas de elementos. Para el As los valores estuvieron por debajo del límite de detección en los sitios Control y Coyoacán (Gráfica 6).

Tabla 10. Concentración de metales pesados (promedio y d.e.) en las muestras de cebolla (lluvias). En rojo se marcan aquellos metales que presentaron diferencias significativas entre sitios. LD: límite de detección

Cebolla (mg kg⁻¹)			
	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza
Al	^a 73.001 ± 38.388	^{ab} 28.098 ± 2.501	^b 22.881 ± 1.441
As	<L. D.	<L. D.	<L. D.
Ba	^b 16.517 ± 6.13	^{ab} 9.881 ± 2.035	^a 18.194 ± 4.181
Cd	^a 0.082 ± 0.134	^a 0.130 ± 0.030	^a 0.122 ± 0.140
Co	^a 0.053 ± 0.014	^a 0.048 ± 0.015	^b 0.022 ± 0.009
Cr	^a 0.165 ± 0.070	^{ab} 0.076 ± 0.021	^b 0.060 ± 0.020
Cu	^a 4.818 ± 2.052	^a 3.342 ± 1.150	^a 3.603 ± 0.734
Fe	^a 71.701 ± 31.733	^a 48.3796 ± 14.832	^a 44.471 ± 12.53
Hg	^a 0.006 ± 0.005	^a 0.0007 ± 0	^a 0.005 ± 0.008
Mn	^a 11.696 ± 3.097	^a 12.4014 ± 2.855	^a 9.182 ± 1.369
Mo	^b 0.085 ± 0.072	^b 0.155 ± 0.055	^a 0.840 ± 0.143
Ni	^a 1.179 ± 0.370	^a 1.158 ± 0.561	^b 0.383 ± 0.257
Pb	^a 0.627 ± 0.410	^{ab} 0.253 ± 0.130	^b 0.178 ± 0.027
Sb	^b 0.007 ± 0.006	^{ab} 0.022 ± 0.006	^a 0.025 ± 0.002
V	^a 0.100 ± 0.077	^a 0.021 ± 0.007	^a 0.014 ± 0.005
Zn	^a 26.657 ± 12.24	^a 25.640 ± 3.154	^a 26.310 ± 3.216



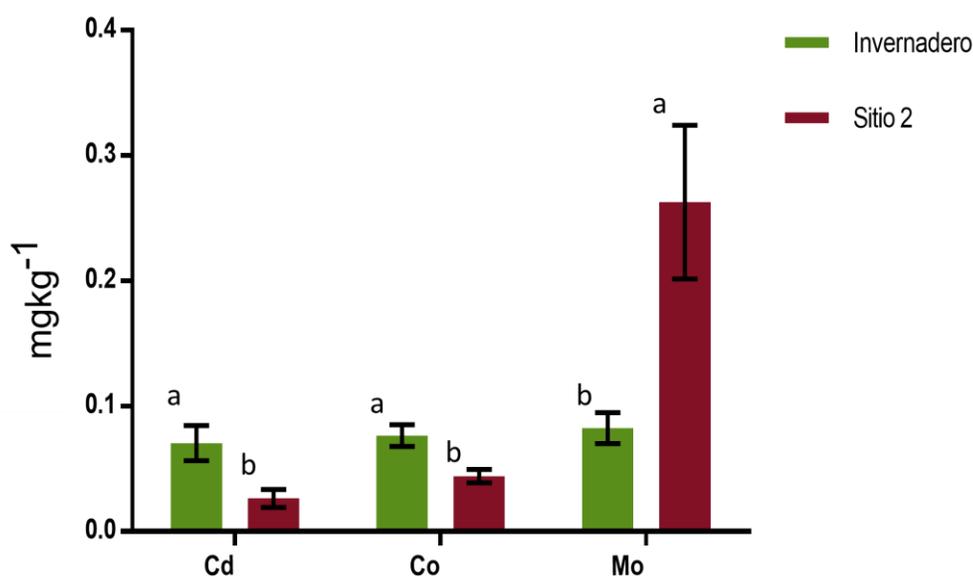
Gráfica 6. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en muestras de cebolla durante temporada de luvias.

➤ *Capsicum annuum* var. *annuum* (Chile)

En las 10 muestras obtenidas (cinco por cada sitio) se encontró la presencia de todos los metales considerados en este trabajo, sin embargo, sólo tres de ellos presentaron diferencias en su concentración entre sitios (Tabla 11). De los tres elementos con diferencias significativas, Cd y Co se encontraron en mayor concentración en el Sitio Control (Gráfica 7). Las concentraciones de metales oscilan entre los 0.004 mg Kg⁻¹ para el As y 53.68 mg Kg⁻¹ para el Fe. El As estuvo por debajo del límite de detección (L.D.) en las muestras del sitio Control. Los metales que se encontraron en mayor concentración fueron en orden ascendente: Fe>Al>Zn>Mn>Cu.

Tabla 11. Concentración de metales pesados (promedio y d.e.) en las muestras de Chile (lluvias). En rojo se marcan aquellos metales que presentaron diferencias significativas entre sitios. LD: límite de detección

Chile (mg kg ⁻¹)		
	Invernadero	Venustiano Carranza
Al	^a 31.134 ± 8.189	^a 27.284 ± 3.587
As	<L. D.	0.009 ± 0.0009
Ba	^a 3.633 ± 0.661	^a 4.520 ± 2.824
Cd	^a 0.070 ± 0.031	^b 0.026 ± 0.016
Co	^a 0.076 ± 0.020	^b 0.044 ± 0.012
Cr	^a 0.164 ± 0.060	^a 0.101 ± 0.037
Cu	^a 5.075 ± 2.0003	^a 5.708 ± 1.765
Fe	^a 60.128 ± 12.537	^a 47.232 ± 9.202
Hg	^a 0.006 ± 0.009	^a 0.003 ± 0.004
Mn	^a 11.132 ± 2.317	^a 11.926 ± 1.685
Mo	^b 0.082 ± 0.028	^a 0.262 ± 0.137
Ni	^a 0.766 ± 0.069	^a 0.488 ± 0.345
Pb	^a 0.420 ± 0.096	^a 0.252 ± 0.168
Sb	^a 0.006 ± 0.003	^a 0.005 ± 0.0007
V	^a 0.025 ± 0.011	^a 0.020 ± 0.003
Zn	^a 20.750 ± 3.615	^a 20.900 ± 3.419



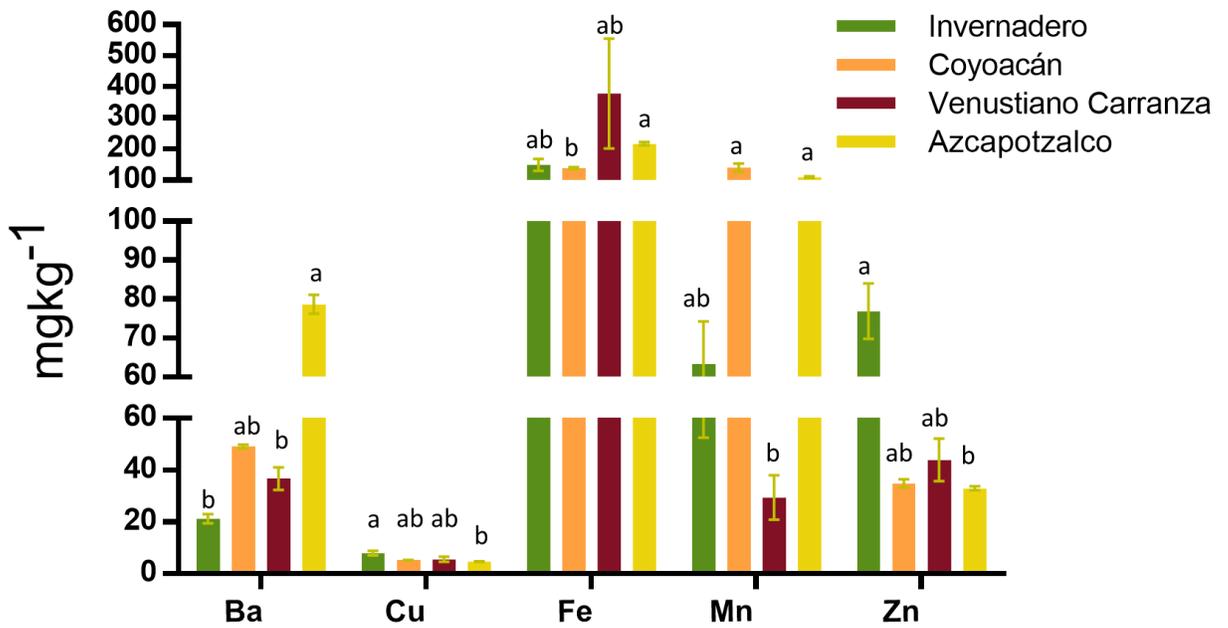
Gráfica 7. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en las muestras de Chile pertenecientes a la temporada de lluvias.

➤ **Lactuca sativa (Lechuga)**

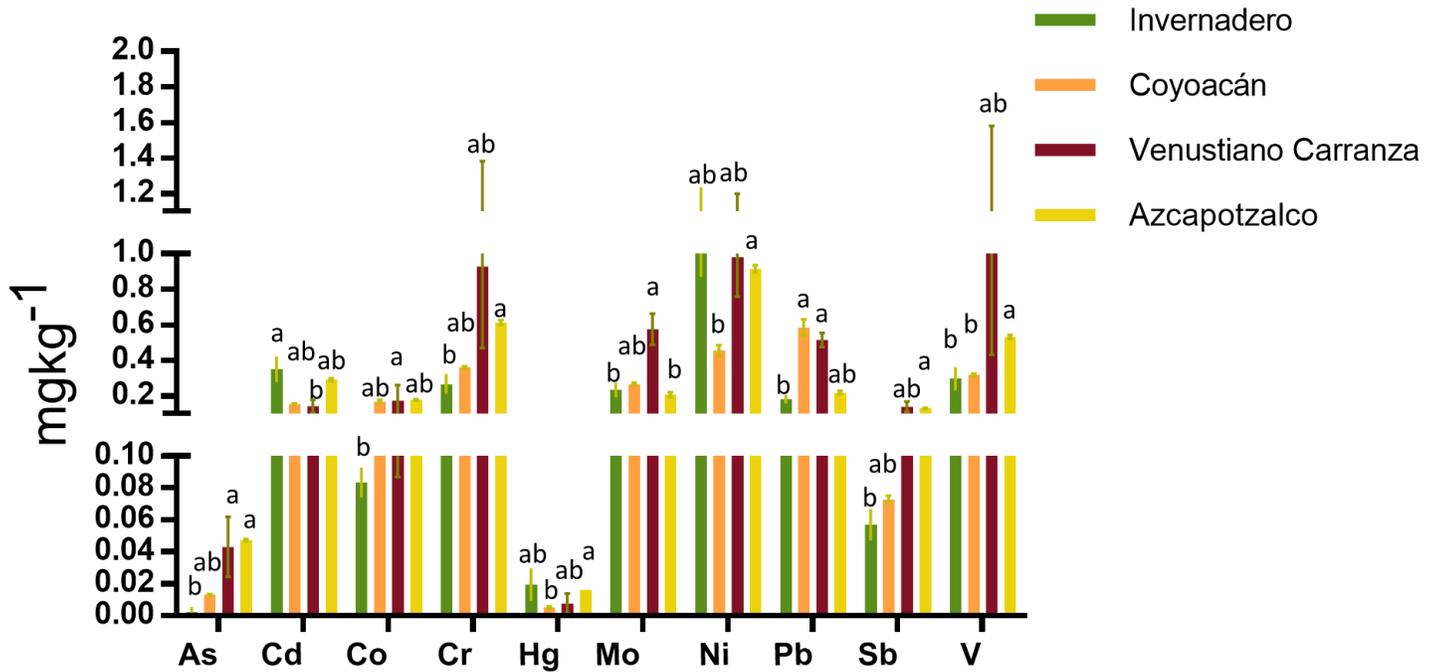
Las lechugas de cada sitio capturaron todos los metales analizados, de los cuales, 14 se encontraron en concentraciones significativamente diferentes entre sitios ($p < 0.05$), concentración mucho mayor en comparación con la cebolla, chile y jitomate. A excepción del Cd, Co y Zn, aquellos elementos con diferencias significativas se encontraron en mayor concentración en Azcapotzalco (Gráficas 8 y 9). La concentración de metales varió entre 0.012 mg Kg^{-1} para el Hg- y 221.18 mgKg^{-1} para el Fe. Los metales que, en promedio por los cuatro sitios, se encontraron en mayor concentración fueron $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Ba}$. Los metales que se encontraron en menor concentración fueron $\text{Mo} > \text{Cd} > \text{Sb} > \text{As} > \text{Hg}$.

Tabla 12. Concentración de metales pesados (promedios y d.e.) en las muestras de lechuga (lluvias). En rojo se marcan aquellos metales que presentaron diferencias significativas entre sitios.

Lechuga (mg kg^{-1})				
	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^a 151.287 ± 64.54	^a 137.159 ± 15.764	^a 329.420 ± 352.493	^a 208.132 ± 14.653
As	^b 0.012 ± 0	^{ab} 0.013 ± 0.002	^a 0.043 ± 0.042	^a 0.047 ± 0.003
Ba	^b 21.219 ± 3.954	^{ab} 49.140 ± 3.443	^b 36.743 ± 9.658	^a 78.702 ± 10.660
Cd	^a 0.349 ± 0.142	^{ab} 0.154 ± 0.009	^b 0.141 ± 0.082	^a 0.291 ± 0.043
Co	^b 0.083 ± 0.019	^{ab} 0.168 ± 0.039	^{ab} 0.173 ± 0.193	^a 0.177 ± 0.016
Cr	^b 0.266 ± 0.110	^{ab} 0.360 ± 0.026	^{ab} 0.926 ± 1.018	^a 0.613 ± 0.053
Cu	^a 8.005 ± 1.847	^{ab} 5.320 ± 0.656	^{ab} 5.635 ± 2.078	^b 4.711 ± 0.497
Fe	^{ab} 149.314 ± 43.587	^b 138.991 ± 14.44	^{ab} 378.816 ± 393.83	^a 217.626 ± 20.54
Hg	^{ab} 0.019 ± 0.021	^b 0.005 ± 0.003	^{ab} 0.01 ± 0.015	^a 0.016 ± 0
Mn	^{ab} 63.369 ± 24.453	^a 140.245 ± 61.534	^b 29.455 ± 19.155	^a 110.109 ± 9.487
Mo	^b 0.233 ± 0.075	^{ab} 0.266 ± 0.027	^a 0.575 ± 0.194	^b 0.208 ± 0.057
Ni	^{ab} 1.053 ± 0.391	^b 0.455 ± 0.138	^{ab} 0.979 ± 0.494	^a 0.915 ± 0.088
Pb	^b 0.180 ± 0.036	^a 0.583 ± 0.104	^a 0.514 ± 0.089	^{ab} 0.218 ± 0.020
Sb	^b 0.057 ± 0.020	^{ab} 0.073 ± 0.010	^{ab} 0.138 ± 0.064	^a 0.129 ± 0.014
V	^b 0.296 ± 0.127	^b 0.318 ± 0.024	^{ab} 1.006 ± 1.282	^a 0.532 ± 0.050
Zn	^a 76.903 ± 15.936	^{ab} 34.867 ± 6.786	^{ab} 43.914 ± 18.385	^b 32.950 ± 3.574



Gráfica 8. Metales con diferencias significativas entre sitios en las muestras de lechuga de temporada de lluvias.



Gráfica 9. Metales con diferencias significativas entre sitios en las muestras de lechuga de temporada de lluvias.

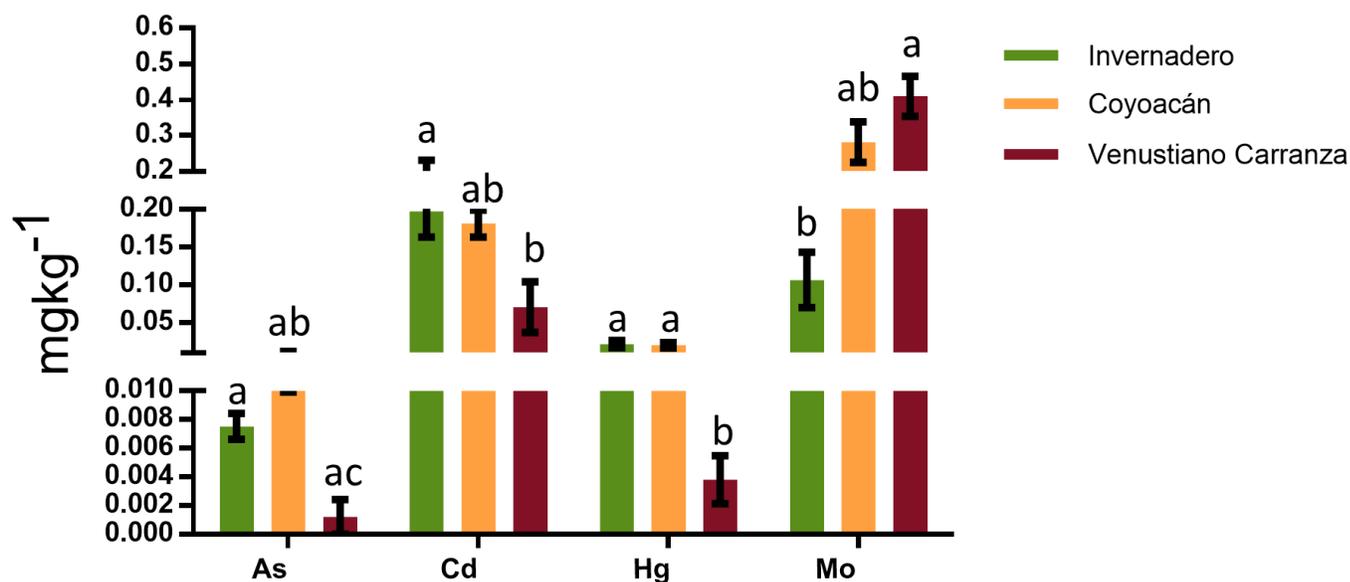
➤ ***Solanum lycopersicum* (Jitomate)**

En las muestras recolectadas se detectó la presencia de todos los elementos analizados, siendo sólo cuatro de ellos los que se encontraron en concentraciones diferentes entre sitios (Tabla 13).

Los metales Cd y Mo se encontraron en concentraciones mayores en el Control (invernadero Facultad de Ciencias) en comparación con el Sitio 2 (Venustiano Carranza). Por otro lado, el Hg es significativamente más alto en el Invernadero y en Coyoacán, en comparación con Venustiano Carranza (Gráfica 10). Los metales que se encontraron en mayor concentración fueron, en orden ascendente: Fe>Zn>Al>Mn>Ba.

Tabla 13. Concentración de metales pesados (promedio y desviación estándar) en las muestras de jitomate (lluvias). En rojo se marcan aquellos metales que presentaron diferencias significativas entre sitios.

Jitomate (mg kg⁻¹)			
	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza
Al	^a 20.186 ± 3.53	^a 21.641 ± 2.695	^a 15.207 ± 7.066
As	^a 0.015 ± 0.002	^{ab} 0.010 ± 0.003	^{ac} 0.006 ± 0.0
Ba	^a 5.33 ± 0.871	^a 4.937 ± 0.755	^a 3.170 ± 2.339
Cd	^a 0.197 ± 0.076	^{ab} 0.181 ± 0.056	^b 0.070 ± 0.075
Co	^a 0.111 ± 0.046	^a 0.075 ± 0.011	^a 0.048 ± 0.034
Cr	^a 0.099 ± 0.028	^a 0.102 ± 0.032	^a 0.058 ± 0.029
Cu	^a 4.132 ± 1.547	^a 3.131 ± 0.483	^a 3.782 ± 2.055
Fe	^a 39.941 ± 7.121	^a 44.226 ± 1.856	^a 32.546 ± 25.042
Hg	^a 0.021 ± 0.010	^a 0.020 ± 0.012	^b 0.003 ± 0.004
Mn	^{ab} 9.337 ± 1.373	^a 12.153 ± 2.528	^b 6.864 ± 3.031
Mo	^b 0.106 ± 0.082	^{ab} 0.281 ± 0.177	^a 0.409 ± 0.125
Ni	^a 0.788 ± 1.142	^a 0.304 ± 0.040	^a 0.541 ± 0.643
Pb	^a 1.43 ± 0.885	^a 1.06 ± 0.525	^a 0.686 ± 0.885
Sb	^a 0.007 ± 0.001	^{ab} 0.018 ± 0.002	^{ac} 0.010 ± 0.004
V	^a 0.022 ± 0.005	^a 0.023 ± 0.001	^a 0.0112 ± 0.006
Zn	^a 20.696 ± 2.75	^a 21.3 ± 0.744	^a 17.026 ± 10.317



Gráfica 10. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en las muestras de jitomate de la temporada de lluvias 2018

☐ Factor de bioconcentración

Sólo el Hg, el Cd y el Zn reportaron un factor de bioconcentración $\geq 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$. El Hg rebasó dicho índice en las muestras de cebolla y el chile del Invernadero de la Facultad de Ciencias; el Cd excedió el límite en los cuatro sitios; finalmente, el Zn para la lechuga en los sitios Venustiano Carranza y Azcapotzalco. Sólo una hortaliza, la lechuga, reportó un índice ≥ 1 para cuatro metales: Cd (Invernadero y Azcapotzalco), Hg (Venustiano Carranza) y Zn (Invernadero) (Tablas 14-17).

Tabla 14. Factor de bioconcentración en muestras de cebolla temporada de lluvias.
L.D.: límite de detección

Cebolla			
Metal	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza
Al	0.0005	0.0002	0.0001
As	<L.D.	<L.D.	0.004
Ba	0.0563	0.0282	0.0441
Cd	0.311	0.593	0.504
Co	0.003	0.002	0.001
Cr	0.001	0.0005	0.0005
Cu	0.206	0.144	0.171
Fe	0.002	0.001	0.001
Hg	0.716	0.0664	0.565
Mn	0.014	0.015	0.013
Mo	0.03	0.069	0.504
Ni	0.016	0.015	0.007
Pb	0.041	0.021	0.012
Sb	0.008	0.031	0.042
V	0.001	0.0002	0.0001
Zn	0.348	0.364	0.376

Tabla 15. Factor de bioconcentración en muestras de chile temporada de lluvias. L.D.: límite de detección

Chile		
Metal	Invernadero	Venustiano Carranza
Al	0.0002	0.0002
As	<L.D.	0.002
Ba	0.012	0.011
Cd	0.267	0.109
Co	0.004	0.003
Cr	0.001	0.001
Cu	0.216	0.272
Fe	0.002	0.002
Hg	0.705	0.381
Mn	0.014	0.017
Mo	0.029	0.157
Ni	0.010	0.008
Pb	0.027	0.017
Sb	0.007	0.009
V	0.0002	0.0002
Zn	0.270	0.298

Tabla 16. Factor de bioconcentración en muestras de lechuga en temporada de lluvias.

Lechuga				
Metales	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azacapotzalco
Al	0.001	0.001	0.002	0.001
As	0.002	0.002	0.009	0.012
Ba	0.072	0.140	0.089	0.277
Cd	1.324	0.7	0.584	1.255
Co	0.004	0.009	0.012	0.014
Cr	0.002	0.002	0.008	0.006
Cu	0.341	0.229	0.268	0.282
Fe	0.004	0.004	0.013	0.01
Hg	2.196	0.478	1.035	0.205
Mn	0.078	0.170	0.042	0.217

Mo	0.082	0.119	0.345	0.082
Ni	0.014	0.006	0.017	0.02
Pb	0.012	0.049	0.034	0.015
Sb	0.062	0.097	0.227	0.232
V	0.002	0.003	0.011	0.007
Zn	1.001	0.495	0.627	0.590

Tabla 17. Factor de bioconcentración en muestras de jitomate en temporada de lluvias.

Jitomate			
Metales	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza
Al	0.0001	0.0001	9.29998E-05
As	0.001	0.002	0.001
Ba	0.018	0.014	0.008
Cd	0.747	0.824	0.291
Co	0.006	0.004	0.003
Cr	0.0008	0.0007	0.0005
Cu	0.176	0.135	0.18
Fe	0.001	0.001	0.001
Hg	2.439	1.808	0.4
Mn	0.011	0.015	0.01
Mo	0.037	0.126	0.245
Ni	0.01	0.004	0.009
Pb	0.093	0.091	0.046
Sb	0.016	0.024	0.017
V	0.0001	0.0002	0.0001
Zn	0.269	0.303	0.243

Medida del potencial de hidrógeno (pH) del suelo

La medida de pH en las muestras de suelo de los cuatro sitios (Control, Coyoacán, Venustiano Carranza y Azcapotzalco) oscilaron entre 5-7.

❖ Temporada de sequía (noviembre 2018- junio 2019)

La temporada de sequía considerada para tomar muestras fue de noviembre de 2018 a junio de 2019. Se tomaron muestras de Coyoacán (Sitio 1), Venustiano Carranza (Sitio 2) y Azcapotzalco (Sitio 3).

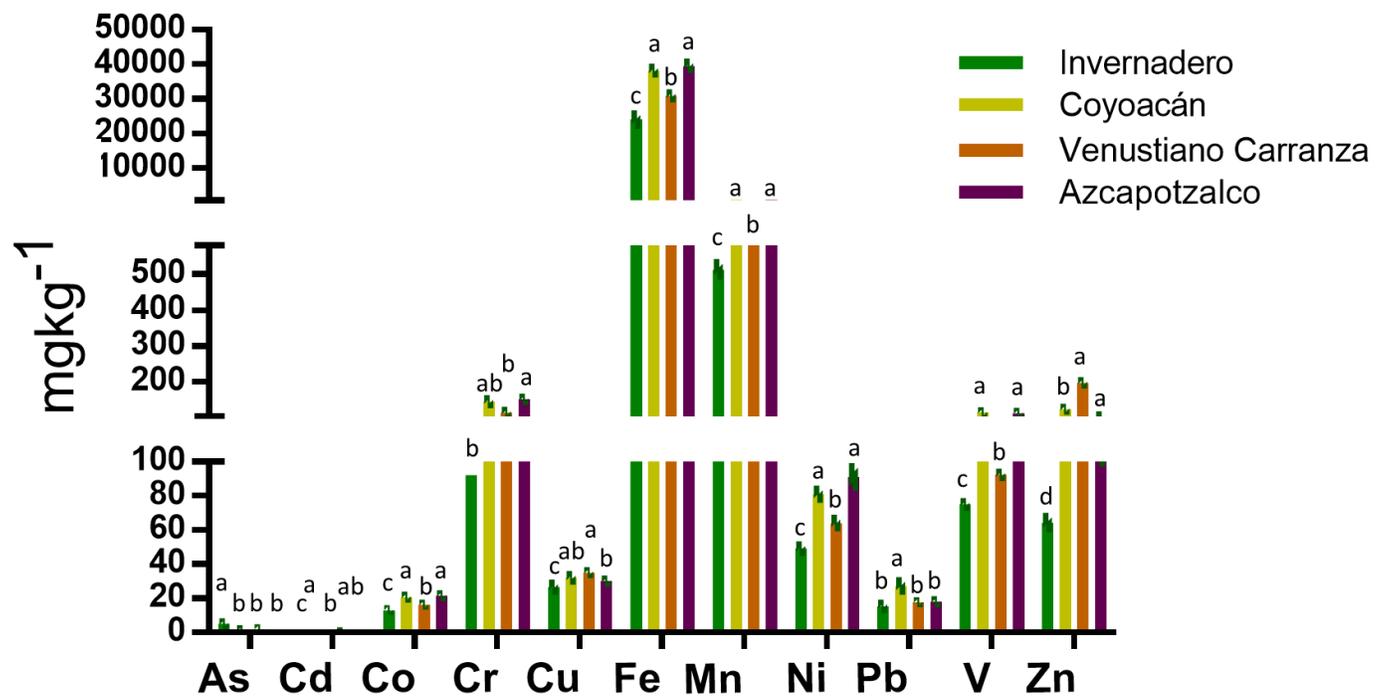
○ Suelo en temporada de sequía

En las muestras de suelo se detectó la presencia de todos los metales pesados, presentándose 11 de ellos en concentraciones diferentes entre sitios (Tabla 18). La concentración de metales osciló entre los 0.3103 hasta los 8,800 mg kg⁻¹, siendo el Cd el elemento menos presente, y el Al el más abundante. Los cinco elementos que, en promedio por sitios, se encontraron en concentraciones más altas fueron en orden ascendente: Al>Fe>Ba>Mn>Cr. Los sitios con mayores concentraciones de metales pesados fueron Coyoacán y Azcapotzalco (Gráfica 11).

Tabla 18. Concentración de metales pesados (promedio y desviación estándar) en las muestras de suelo en temporada seca.

Suelo temporada seca (mg kg ⁻¹)				
	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^a 77670 ± 58240	^a 112296 ± 16141	^a 75631 ± 28262	^a 88015 ± 4729
As	^a 5.19 ± 1.10	^b 1.13 ± 0.59	^b 2.06 ± 0.42	^b 1.57 ± 0.18
Ba	^a 662.99 ± 318.08	^a 869.04 ± 92.90	^a 638.09 ± 209.69	^a 810.27 ± 32.32
Cd	^c 0.21 ± 0.03	^a 0.39 ± 0.042	^b 0.30 ± 0.022	^{ab} 0.33 ± 0.04
Co	^c 13.22 ± 0.32	^a 20.76 ± 0.96	^b 16.24 ± 0.43	^a 21.58 ± 0.88
Cr	^b 92.27 ± 0.11	^{ab} 143.04 ± 9.84	^b 112.53 ± 8.46	^a 149.94 ± 6.78
Cu	^c 26.73 ± 3.07	^{ab} 32.07 ± 2.11	^a 35.21 ± 1.14	^b 30.03 ± 1.38
Fe	^c 24045 ± 2414	^a 38170 ± 1335	^b 30873 ± 1002	^a 39529 ± 1404
Hg (µg kg⁻¹)	^a 31.47 ± 28.02	^a 52.54 ± 20.32	^a 26.95 ± 23.27	^a 54.84 ± 6.60

Mn	^c 513.32 ± 27.94	^a 846.35 ± 35.98	^b 682.67 ± 85.17	^a 838.13 ± 16.43
Mo	^a 3.78 ± 2.16	^a 2.07 ± 0.17	^a 2.01 ± 0.25	^a 1.71 ± 0.17
Ni	^c 49.15 ± 2.76	^a 81.07 ± 4.15	^b 63.99 ± 3.84	^a 91.16 ± 9.28
Pb	^b 15.31 ± 2.07	^a 27.34 ± 4.36	^b 17.89 ± 0.44	^b 18.04 ± 1.12
Sb	^a 0.30 ± 0.04	^a 0.35 ± 0.03	^a 0.37 ± 0.009	^a 0.34 ± 0.006
V	^c 75.005 ± 1.66	^a 113.61 ± 3.76	^b 92.38 ± 1.74	^a 111.38 ± 3.34
Zn	^d 64.39 ± 5.14	^b 122.28 ± 3.84	^a 195.82 ± 6.65	^c 102.07 ± 3.77



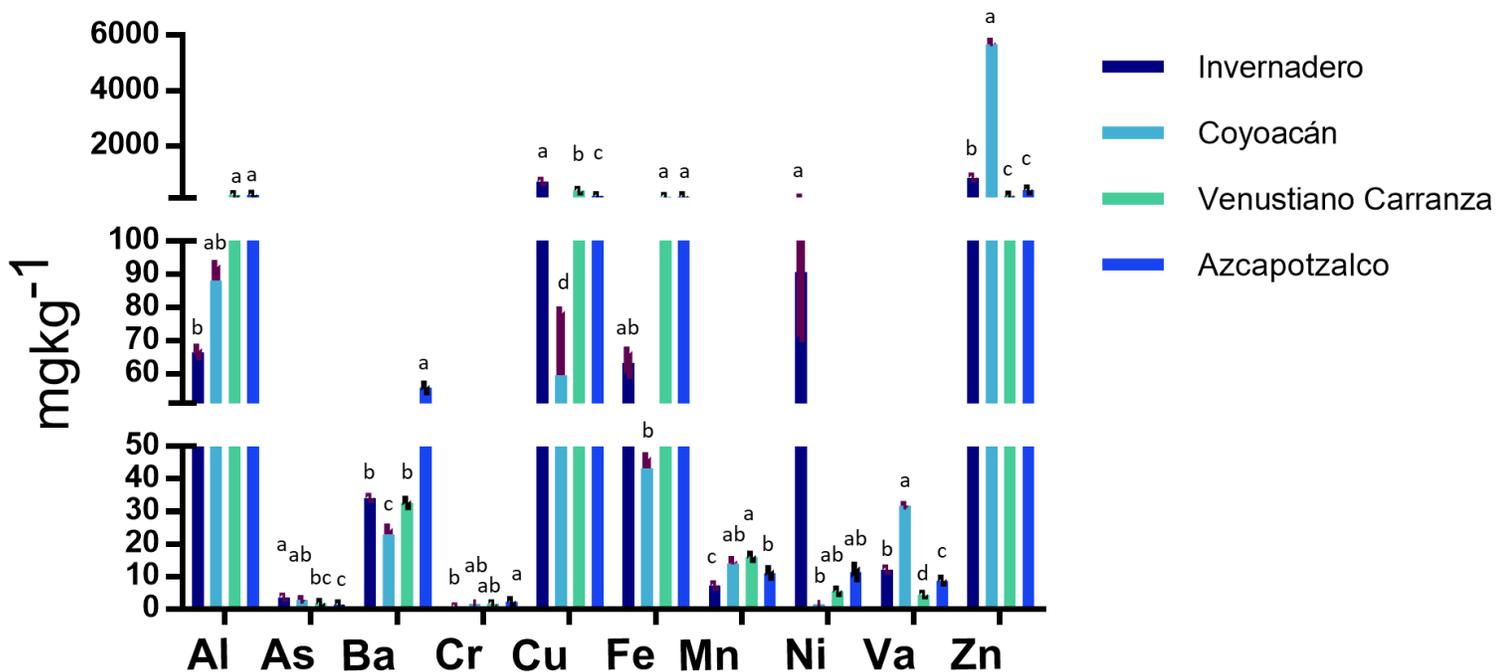
Gráfica 11. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en muestras de suelo en temporada

○ **Agua corriente**

En las muestras de *agua corriente* se encontraron diferencias significativas en la concentración de 10 de los 16 metales pesados entre sitios (Tabla 19, Gráfica 12). Por sitio, al calcular el promedio de las concentraciones de todos los metales analizados en este trabajo, se observó que a Coyoacán y el Invernadero (Sitio 1 y Sitio Control, respectivamente) corresponden los promedios más altos. Así mismo, los metales con concentraciones más altas por los tres sitios fueron, en orden ascendente: Zn>Cu>Al>Fe>Ba. Para el Hg y Mo, las concentraciones encontradas estuvieron debajo del límite de detección.

Tabla 19. Concentración de metales pesados (promedio y desviación estándar) en las muestras de agua corriente. En rojo se marcan aquellos metales que presentaron diferencias significativas entre sitios. L.D.: límite de detección

Agua corriente ($\mu\text{g L}^{-1}$)				
	Invernadero	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^b 66.540 ± 2.161	^{ab} 88.048 ± 8.715	^a 212.577 ± 40.351	^a 218.844 ± 63.067
As	^a 3.667 ± 0.078	^{ab} 2.892 ± 0.308	^{bc} 1.796 ± 0.689	^c 1.391 ± 0.475
Ba	^b 34.233 ± 0.368	^c 23.039 ± 3.526	^b 32.690 ± 1.555	^a 55.821 ± 1.614
Cd	^a 0.117 ± 0.075	^a 0.111 ± 0.006	^a 0.081 ± 0.022	^a 0.57 ± 0.476
Co	^a 0.359 ± 0.215	^a 0.128 ± 0.006	^a 0.250 ± 0.131	^a 0.948 ± 1.311
Cr	^b 0.738 ± 0.118	^{ab} 1.646 ± 0.195	^{ab} 1.639 ± 0.130	^a 2.258 ± 0.721
Cu	^a 694.416 ± 34.200	^d 59.636 ± 33.700	^b 365.965 ± 25.036	^c 173.921 ± 38.169
Fe	^{ab} 63.295 ± 6.177	^b 43.322 ± 6.450	^a 151.013 ± 22.375	^a 163.263 ± 65.657
Hg ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	<L. D.	<L. D.	<L. D.	<L. D.
Mn	^c 7.289 ± 0.532	^{ab} 14.042 ± 1.688	^a 16.065 ± 0.962	^b 11.155 ± 1.931
Mo	<L. D.	<L. D.	<L. D.	<L. D.
Ni	^a 90.708 ± 34.522	^b 1.509 ± 0.175	^{ab} 5.502 ± 0.734	^{ab} 11.468 ± 3.060
Pb	^a 10.569 ± 1.793	^a 26.318 ± 16.782	^a 23.237 ± 0.384	^a 20.482 ± 9.670
Sb	^a 1.171 ± 0.096	^a 0.660 ± 0.129	^a 0.848 ± 0.104	^a 1.04 ± 0.339
V	^b 12.182 ± 0.348	^a 31.807 ± 0.227	^d 4.5 ± 0.340	^c 8.798 ± 0.813
Zn	^b 843.534 ± 41.897	^a 5672.467 ± 166.983	^c 174.295 ± 68.141	^c 392.866 ± 68.261



Gráfica 12. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en las muestras de agua corriente en temporada seca.

○ **Hortalizas**

En las hortalizas recolectadas durante la temporada seca se encontraron todos los metales pesados analizados en este estudio. Aquellos que se encontraron en mayor concentración entre todas las especies fueron Al>Fe>Zn>Mn>Ba. Estos cinco metales se encontraron en concentraciones diferentes en las especies vegetales: Lechuga>chile>jitomate>cebolla.

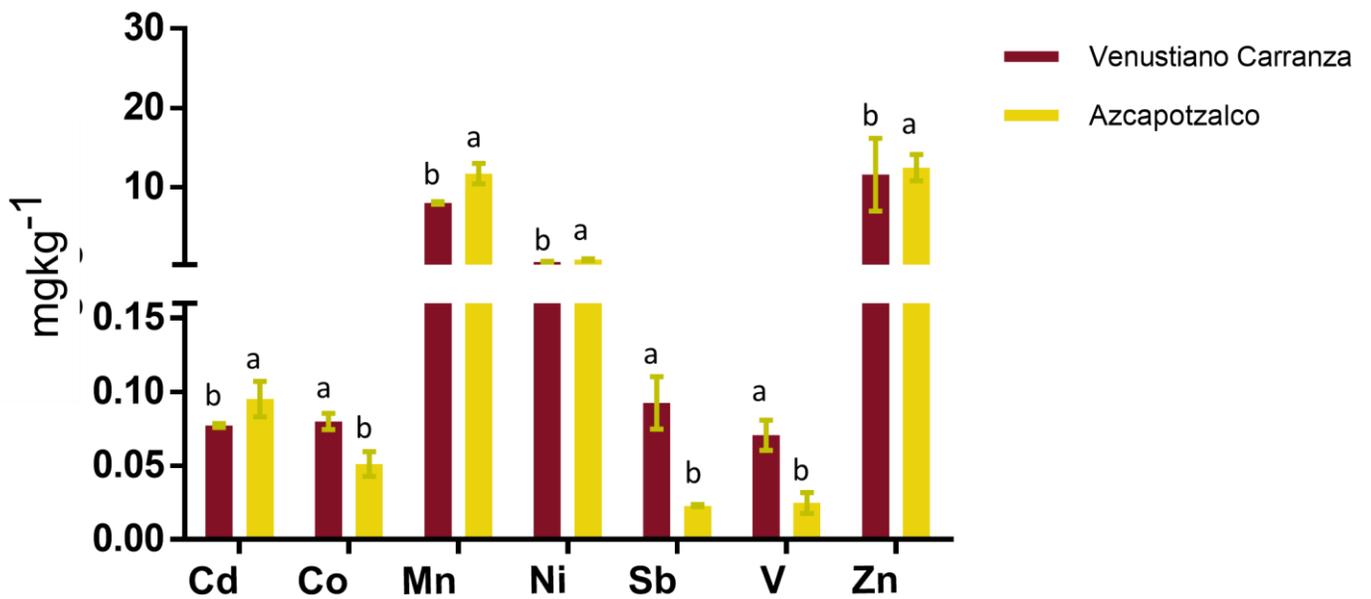
➤ **Allium cepa (Cebolla)**

En la mayoría de las muestras obtenidas se detectaron los metales analizados (Tabla 20), y aquellos que se encontraron en concentraciones diferentes entre sitios fueron Cd, Co, Mn,

Ni, Sb, V, y Zn ($p < 0.05$), encontrándose cuatro de ellos en mayor concentración en Azcapotzalco (Gráfica 13). Los valores del As, Hg y Mo no se pudieron comparar entre sitios ya que estuvieron debajo del límite de detección (0.0433 , 0.011 y $0.0989 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente). Las concentraciones de As, Hg y Mo estuvieron por debajo del L.D. en algunas muestras. Los metales que se encontraron en mayor concentración en las muestras de cebolla de los dos sitios son $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Ba} > \text{Zn} > \text{Mn}$.

Tabla 20. Concentración de metales pesados (promedio y desviación estándar) en las muestras de cebolla en temporada de secas agua corriente. En rojo se marcan aquellos metales que presentaron diferencias significativas entre sitios. L.D.: límite de detección.

Cebolla (mg kg^{-1})		
	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^a 45.673 ± 18.546	^a 26.206 ± 10.293
As	0.017 ± 0.012	<L.D.
Ba	^a 21.1332 ± 4.442	^a 17.487 ± 3.943
Cd	^b 0.077 ± 0.003	^a 0.095 ± 0.027
Co	^a 0.08 ± 0.012	^b 0.051 ± 0.018
Cr	^a 0.121 ± 0.038	^a 0.137 ± 0.161
Cu	^a 4.131 ± 0.379	^a 4.912 ± 0.810
Fe	^a 43.466 ± 5.554	^a 35.728 ± 8.755
Hg ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	<L. D.	<L. D.
Mn	^b 7.997 ± 0.303	^a 11.712 ± 2.903
Mo	0.315 ± 0.277	<L. D.
Ni	^b 0.576 ± 0.107	^a 0.852 ± 0.184
Pb	^a 0.114 ± 0.031	^a 0.087 ± 0.027
Sb	^a 0.092 ± 0.039	^b 0.023 ± 0.0016
V	^a 0.070 ± 0.022	^b 0.024 ± 0.016
Zn	^b 11.571 ± -1.251	^a 12.437 ± 2.140



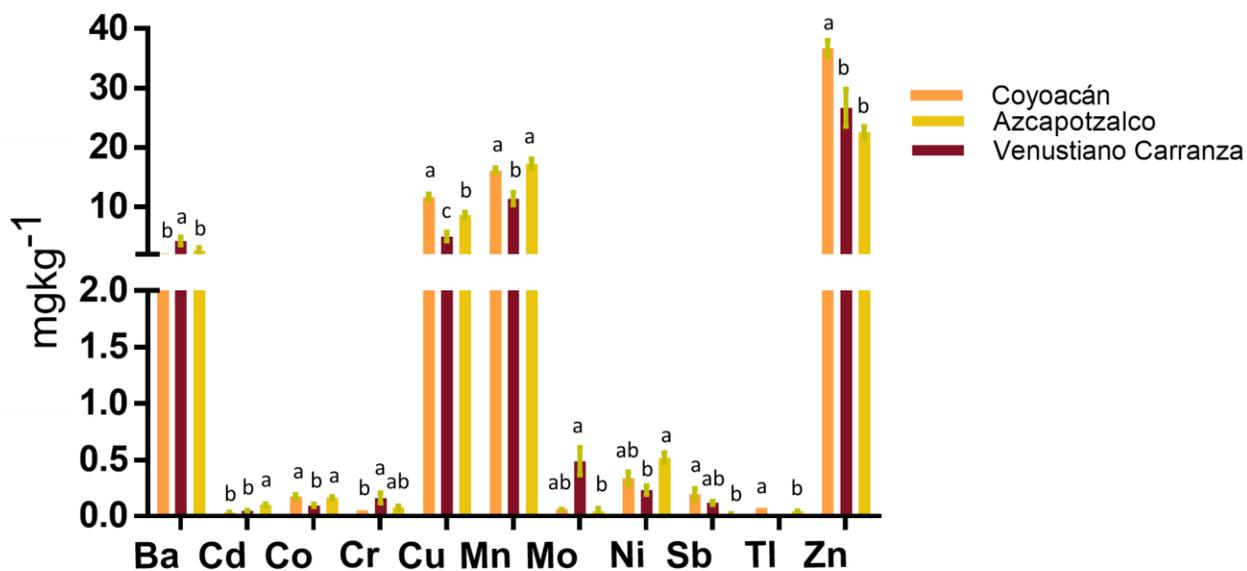
Gráfica 13. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en las muestras de cebolla temporada

➤ ***Capsicum annum var. annum* (Chile)**

De los metales detectados (14) (Tabla 21, Gráfica 14), 11 se encontraron en concentraciones significativamente diferentes entre sitios. La lectura de las muestras de As y Hg estuvieron debajo del límite de detección. El sitio con las concentraciones promedio más altas de metales es Coyoacán; y los metales que se presentaron en concentraciones más elevadas son Fe>Al>Zn>Mn>Cu.

Tabla 21. Concentración de metales pesados (promedio y desviación estándar) en las muestras de Chile en temporada de secas. L.D.: límite de detección

Chile (mg/kg)			
	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^a 70.995 ± 32.538	^a 65.607 ± 24.392	^a 30.122 ± 20.889
As	< L. D.	<L. D.	<L. D.
Ba	^b 2.085 ± 0.027	^a 4.223 ± 1.475	^b 2.584 ± 1.157
Cd	^b 0.035 ± 0.008	^b 0.048 ± 0.006	^a 0.102 ± 0.019
Co	^a 0.173 ± 0.045	^b 0.096 ± 0.027	^a 0.162 ± 0.027
Cr	^b 0.052 ± 0.003	^a 0.161 ± 0.101	^{ab} 0.076 ± 0.035
Cu	^a 11.623 ± 1.273	^c 5 ± 1.675	^b 8.6242 ± 1.023
Fe	^a 84.430 ± 4.482	^a 81.332 ± 30.789	^a 68.159 ± 13.126
Hg (µg kg⁻¹)	<L. D.	<L. D.	<L. D.
Mn	^a 16.090 ± 0.967	^b 11.376 ± 2.333	^a 17.258 ± 1.752
Mo	^{ab} 0.062 ± 0.004	^a 0.488 ± 0.272	^b 0.046 ± 0.044
Ni	^{ab} 0.337 ± 0.130	^b 0.234 ± 0.088	^a 0.518 ± 0.099
Pb	^a 0.087 ± 0.011	^a 0.141 ± 0.052	^a 0.101 ± 0.059
Sb	^a 0.196 ± 0.111	^{ab} 0.12 ± 0.037	^b 0.019 ± 0.006
V	^a 0.031 ± 0.001	^a 0.097 ± 0.071	^a 0.044 ± 0.023
Zn	^a 36.73 ± 2.989	^b 26.673 ± 7.072	^b 22.571 ± 2.144



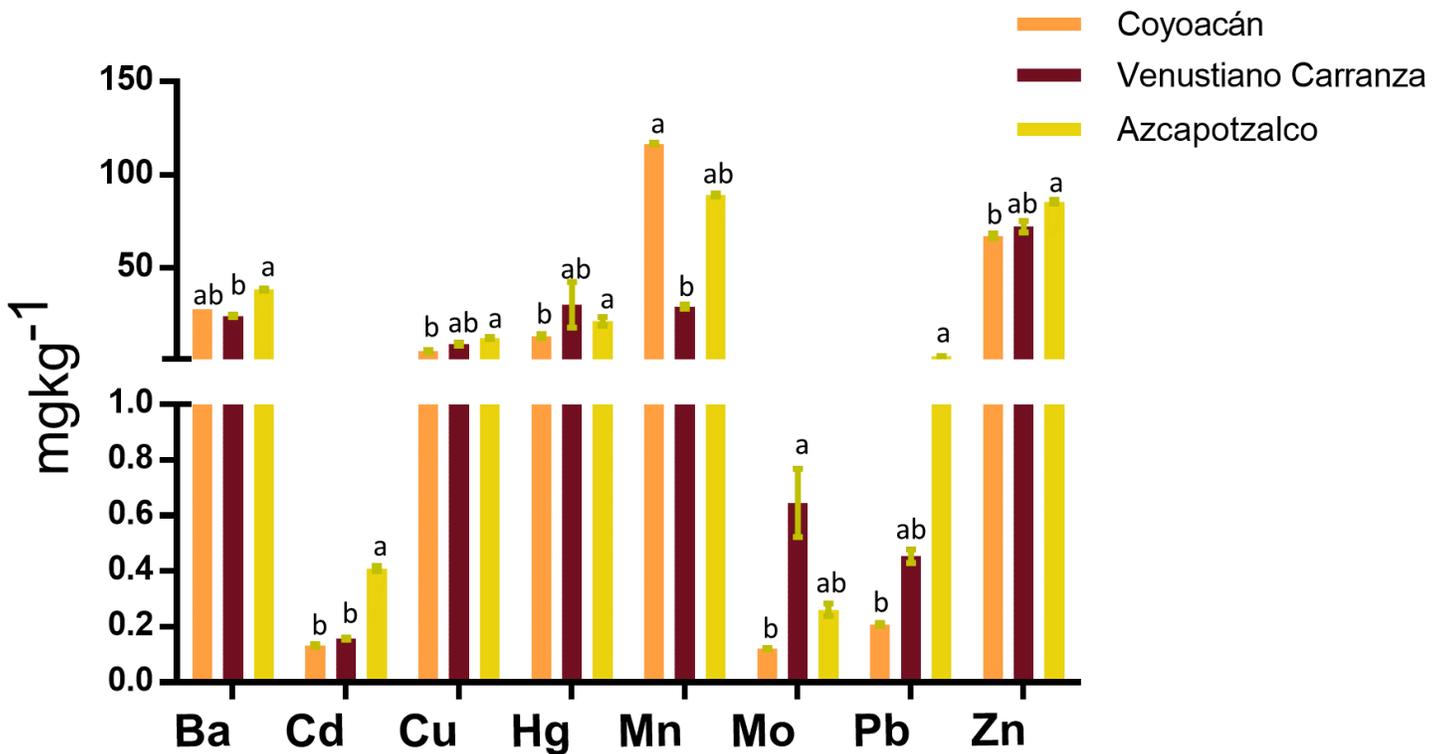
Gráfica 14. Metales pesados en los que hubo diferencias significativas entre sitios en las muestras de Chile en temporada seca.

➤ **Lactuca sativa (Lechuga)**

En todas las muestras analizadas se detectaron todos los metales considerados para este estudio, donde ocho de ellos se presentaron en concentraciones diferentes entre sitios (Tabla 22, Gráfica 15). Contrario a las hortalizas anteriores, el comportamiento de las concentraciones de metales en la lechuga tiene una tendencia clara; encontrándose las mayores concentraciones en Azcapotzalco. Los metales que, en promedio por los tres sitios, se encontraron en cantidades mayores (30-400 g Kg⁻¹) fueron Al, Ba, Fe, Mn y Zn.

Tabla 22. Concentración de metales pesados (promedio y desviación estándar) en las muestras de lechuga en temporada de secas agua corriente.

Lechuga (mg/kg)			
	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^a 370.214 ± 9.68	^a 408.325 ± 188.205	^a 527.158 ± 341.381
As	^a 0.032 ± 0.003	^a 0.065 ± 0.039	^a 0.023 ± 0.015
Ba	^{ab} 27.897 ± 0.461	^b 24.292 ± 4.992	^a 38.399 ± 2.128
Cd	^b 0.133 ± 0.005	^b 0.157 ± 0.037	^a 0.410 ± 0.137
Co	^a 0.203 ± 0.003	^a 0.1736 ± 0.084	^a 0.228 ± 0.091
Cr	^a 0.526 ± 0.085	^a 0.9176 ± 0.398	^a 0.780 ± 0.564
Cu	^b 5.434 ± 0.291	^{ab} 9.150 ± 2.193	^a 12.436 ± 1.806
Fe	^a 296.085 ± 22.070	^a 334.608 ± 147.973	^a 371.812 ± 214.437
Hg (µg kg⁻¹)	^b 13.408 ± 2.530	^{ab} 30.288 ± 27.094	^a 21.483 ± 5.135
Mn	^a 116.645 ± 10.116	^b 29.243 ± 7.980	^{ab} 89.245 ± 33.617
Mo	^b 0.122 ± 0.011	^a 0.646 ± 0.393	^{ab} 0.261 ± 0.2000
Ni	^a 0.849 ± 0.018	^a 0.8394 ± 0.455	^a 0.951 ± 0.286
Pb	^b 0.209 ± 0.032	^{ab} 0.454 ± 0.232	^a 2.613 ± 2.802
Sb	^a 0.039 ± 0.024	^a 0.080 ± 0.021	^a 0.199 ± 0.142
V	^a 0.844 ± 0.025	^a 0.899 ± 0.550	^a 1.020 ± 0.707
Zn	^b 67.206 ± 1.944	^{ab} 72.146 ± 15.758	^a 85.561 ± 11.591



Gráfica 15. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en las muestras de lechuga en temporada seca.

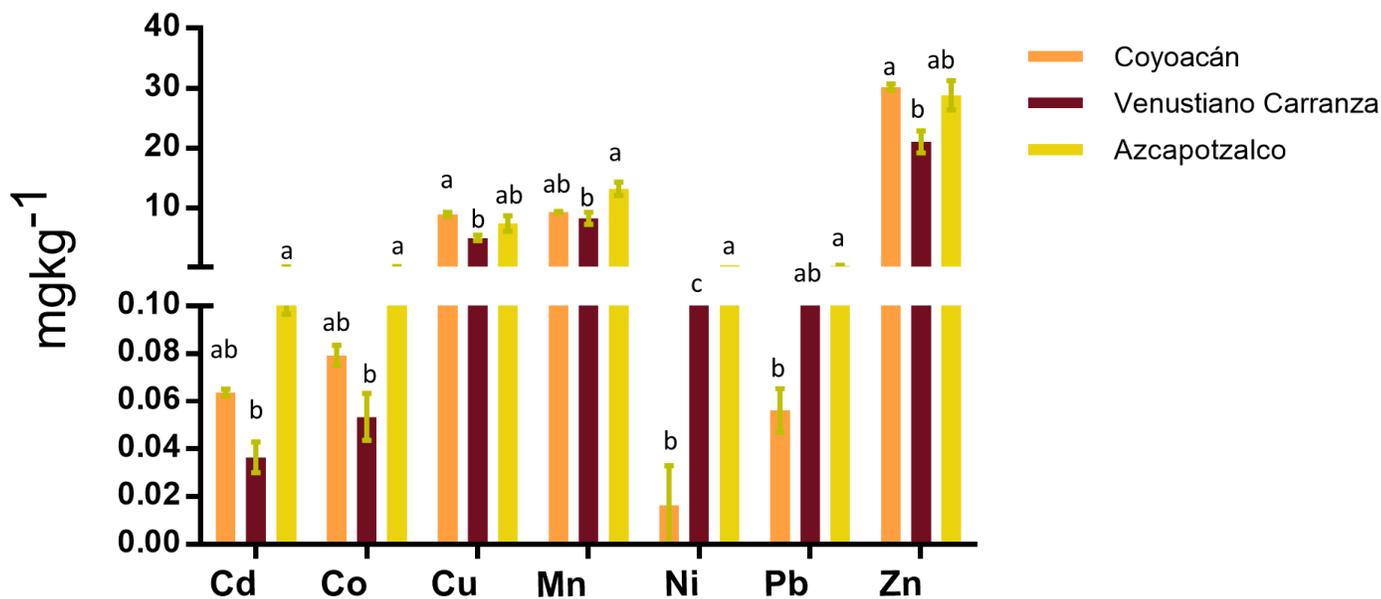
➤ ***Solanum lycopersicum* (Jitomate)**

Al realizar las pruebas estadísticas se encontró que ocho de los 16 metales estudiados están presentes en cantidades diferentes entre sitios ($p < 0.05$) (Tabla 23); para el Mo y Sb, los valores de las muestras de Coyoacán estuvieron por debajo del límite de detección, por lo que, al haber sólo dos muestras, se realizó prueba de T-student y Man-Whitney. De estos metales destaca el Ni por estar en cantidades significativamente diferentes en cada sitio. Los metales con cantidades promedio -por los tres sitios- más altas son $Fe > Al > V > Zn > Mn$ (Gráfica 16). Las concentraciones de As, Hg y Mo estuvieron por debajo del L.D. El sitio con

la cantidad promedio de metales más alta es Azcapotzalco (Sitio 3), seguido de Coyoacán (Sitio 1).

Tabla 23. Concentración de metales pesados (promedio y desviación estándar) en las muestras de jitomate en temporada de seca. L.D.: límite de detección

Jitomate (mg kg⁻¹)			
	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	^a 37.314 ± 11.61	^a 37.768 ± 6.81	^a 83.451 ± 53.10
As	<L. D.	0.010 ± 0.002	<L. D.
Ba	^a 10.862 ± 17.252	^a 3.495 ± 0.726	^a 6.143 ± 4.601
Cd	^{ab} 0.063 ± 0.003	^b 0.036 ± 0.017	^a 0.119 ± 0.051
Co	^{ab} 0.079 ± 0.009	^b 0.053 ± 0.024	^a 0.163 ± 0.045
Cr	^a 0.053 ± 0.048	^a 0.074 ± 0.014	^a 0.158 ± 0.070
Cu	^a 8.918 ± 0.769	^b 4.983 ± 1.200	^{ab} 7.406 ± 2.876
Fe	^a 76.171 ± 0.624	^a 61.105 ± 21.044	^a 100.693 ± 41.271
Hg (µg kg⁻¹)	<L.D.	2.931 ± 3.744	11.940 ± 8.644
Mn	^{ab} 9.317 ± 0.223	^b 8.274 ± 2.479	^a 13.192 ± 2.485
Mo	<L.D.	^a 0.522 ± 0.166	^a 0.465 ± 0.179
Ni	^b 0.179 ± 0.037	^c 0.111 ± 0.020	^a 0.409 ± 0.047
Pb	^b 0.056 ± 0.020	^{ab} 0.130 ± 0.050	^a 0.343 ± 0.224
Sb	<L. D.	0.041 ± 0.014	0.031 ± 0.004
V	^a 0.051 ± 0.011	^a 0.035 ± 0.0083	^a 0.110 ± 0.085
Zn	^a 30.178 ± 1.124	^b 21.0396 ± 4.522	^{ab} 28.853 ± 5.457



Gráfica 16. Metales pesados con diferencias significativas entre sitios en las muestras de jitomate en temporada de secas.

☐ Factor de bioconcentración

El factor de bioconcentración en las hortalizas respecto al sustrato de temporada seca fue bajo (Tablas 24 a 27). Para el chile (Coyoacán) y el jitomate (Azcapotzalco) sólo el Sb y Hg, respectivamente, estuvieron a una concentración $\geq 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$. La lechuga, por otro lado, reportó mayor cantidad de Zn y Cd con concentraciones ≥ 0.5 para el sitio 1 (Coyoacán) y sitio 2 (Venustiano Carranza); mientras que para el sitio 3 (Azcapotzalco) el Cu presentó una concentración > 1 . De igual manera, sólo muestras de *Lactuca sativa* tuvieron un índice de bioconcentración ≥ 1 , y los metales que se encontraron en estas concentraciones fueron Hg (Sitios 1, 2 y 3), Cd y Zn (ambos en el sitio 3).

Tabla 24. Factor de bioconcentración en muestras de cebolla con relación a suelo de temporada seca.

Cebolla		
Metales	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	0.0005	0.0004
As	0.003	<L.D.
Ba	0.022	0.019
Cd	0.287	0.397
Co	0.005	0.004
Cr	0.001	0.002
Cu	0.135	0.264
Fe	0.001	0.001
Hg	<L.D.	<L.D.
Mn	0.010	0.020
Mo	0.128	<L.D.
Ni	0.009	0.019
Pb	0.007	0.006
Sb	0.197	0.047
V	0.0007	0.0003
Zn	0.107	0.181

Tabla 25. Factor de bioconcentración en muestras de chile con relación a suelo de temporada seca.

Chile			
Metales	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	0.0008	0.0007	0.0004
As	<L.D.	<L.D.	<L.D.
Ba	0.005	0.004	0.003
Cd	0.159	0.180	0.426
Co	0.010	0.006	0.013
Cr	0.0004	0.001	0.0009
Cu	0.475	0.164	0.464
Fe	0.002	0.002	0.003
Hg	<L.D.	<L.D.	<L.D.
Mn	0.024	0.014	0.030
Mo	0.031	0.198	0.009
Ni	0.005	0.004	0.012
Pb	0.007	0.009	0.007
Sb	0.591	0.255	0.039
V	0.0003	0.001	0.0006
Zn	0.492	0.246	0.328

Tabla 26. Factor de bioconcentración en muestras de lechuga con relación a suelo de temporada seca.

Lechuga			
Metales	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	0.004	0.004	0.007
As	0.005	0.01	0.004
Ba	0.07	0.026	0.042
Cd	0.596	0.584	1.7083
Co	0.012	0.011	0.018
Cr	0.004	0.008	0.009
Cu	0.2222	0.3	0.669
Fe	0.009	0.011	0.015
Hg	1.25	1.244	1.263
Mn	0.178	0.037	0.158
Mo	0.061	0.262	0.053
Ni	0.013	0.014	0.021
Pb	0.016	0.028	0.173
Sb	0.118	0.17	0.406
V	0.009	0.009	0.013
Zn	0.9	0.665	1.245

Tabla 27. Factor de bioconcentración en muestras de jitomate con relación a suelo de temporada seca.

Jitomate			
Metales	Coyoacán	Venustiano Carranza	Azcapotzalco
Al	0.0004	0.0004	0.001
As	<L.D.	0.001	<L.D.
Ba	0.027	0.004	0.007
Cd	0.285	0.135	0.499
Co	0.005	0.003	0.013
Cr	0.0004	0.0006	0.002
Cu	0.365	0.163	0.399
Fe	0.002	0.002	0.004
Hg	<L.D.	0.120	0.702
Mn	0.014	0.010	0.023
Mo	<L.D.	0.212	0.095
Ni	0.003	0.002	0.009
Pb	0.004	0.008	0.023
Sb	<L.D.	0.088	0.065
V	0.0005	0.0004	0.001
Zn	0.404	0.194	0.420

☐ Medida del potencial de hidrógeno (pH) del suelo

La medida de pH en las muestras de suelo de los cuatro sitios (Control, Coyoacán, Venustiano Carranza y Azcapotzalco) osciló entre 5-7.

Discusión

Hortalizas

En todas las hortalizas correspondientes a la **temporada de lluvia** se registró la presencia de metales pesados. Existe una tendencia a que en el sitio Control y Coyoacán se encuentren las cantidades más altas de cada metal, a excepción de la lechuga, donde el sitio con cantidades mayores de metales fue Azcapotzalco (Sitio 3). Esta situación se encuentra relacionada a los resultados obtenidos de los análisis de **suelo temporada de lluvias y agua de lluvia** del Invernadero (Control) y Coyoacán (Sitio 1), en los cuales la cantidad de metales pesados fue mayor que en el resto de los sitios. Al ser el suelo y el agua la principal fuente de nutrientes y contaminantes durante el crecimiento y desarrollo de una planta, las altas cantidades de metales pesados detectadas en las muestras de suelo y agua en el Control y Sitio 1 explican las altas cantidades en estos mismos es las muestras de hortalizas.

A pesar de la diferencia de ciertos metales entre sitios en las muestras de hortalizas, estos no sobrepasaron el límite permisible, excepto el Cd y Pb, que sí lo superaron en la muestras de jitomate; y de todas las hortalizas, respectivamente (Codex Alimentarius, 1995; Legislación de la Unión Europea, 2014) (Tabla 28). Para las muestras de suelo y agua las cantidades de Cd, Pb y Cr no sobrepasaron las cantidades promedio expresadas en las legislaciones consultadas (US EPA, 2002; EEA, 2007; SEMARNAT, 2007; TMS, 2007; CME, 2009; NZME, 2012; EPMC, 2015), lo que estaría indicando la existencia de otra fuente de contaminación (deposición seca, por ejemplo) (Prieto-Méndez *et. Al.*,2009) (Tablas 30 y 31).

Tabla 28. Cantidades de cadmio y plomo (mg kg^{-1}) en muestras de hortalizas estudiadas, así como el dos diferentes legislaciones de alimentos. Las cantidades de cada metal, para el caso de las muestras de este estudio, son el promedio de las muestras de todos los sitios.

Normas/metales pesados	Cd				Pb			
	C	Ch	L	J	C	Ch	L	J
Cantidades observadas	0.11	0.04	0.23	0.14	0.35	0.33	0.37	1.06
CODEX Alimentarius, 1995	0.05	0.05	0.2	0.05	0.1	0.05	0.3	0.05
Legislación de la Unión Europea, 2019	0.05	0.05	0.2	0.05	0.1			

En las muestras de hortalizas de la **temporada seca** no se observó una tendencia clara en cuanto a cantidades mayores de metales entre sitios, ya que en los tres sitios de estudio se encontraron cantidades similares de concentración de metales. A pesar de que las cantidades de Cr y Hg en las muestras de lechuga y jitomate de todos los sitios de todos los sitios fueron altas, no se puede decir que rebasaron los límites permisibles, pues estas no están especificadas en las legislaciones consultadas (Codex Alimentarius, 1995; Legislación de la Unión Europea, 2019). La presencia de altas cantidades de Cr en los frutos de jitomate coincide con lo reportado por Amin *et.al.*, 2013.

Ahora, al hacer la comparación entre temporadas, se reporta que hay más metales con cantidades altas en la época de secas para todas las hortalizas, excepto para las muestras del jitomate en Coyoacán, donde la mayor cantidad estuvo en la temporada de lluvias (Tabla 29).

Tabla 29. Para cada metal -en cada especie de hortaliza- se hicieron análisis estadísticos para comparar sus concentraciones entre sitios. Los metales con concentraciones más altas se separan de acuerdo con la temporada, sitio y hortaliza en que fueron encontradas. Los metales que no se encuentran en esta tabla no tuvieron cantidades diferentes entre sitios.

Metales con cantidades altas por sitio y temporada						
Hortalizas/ sitios	Coyoacán		Venustiano Carranza		Azcapotzalco	
	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
Cebolla	-	-	Mo, Pb, Zn	Al, Co, Cr, Sb, V	-	-
Chile	-	-	Hg	Al, Cd, Co, Fe, Sb, V	-	-
Jitomate	As, Cd, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb	Al, Cu, Fe, V, Zn	Pb	Al, As, Sb, V		
Lechuga	Ba, Cd, Mo, Pb, Sb	Al, As, Co, Cr, Fe, Hg, Ni, V, Zn	Cd	Cu, Hg, Zn	As, Ba	Cu, Hg, Zn

Para el análisis de ambas temporadas, es importante tomar en cuenta que la parte comestible de las hortalizas no es siempre la que más almacena metales. Por ejemplo, *Allium cepa* y *Solanum lycopersicum*, acumulan mayores cantidades de Fe, Zn, Mn, Cu y Pb en hojas y raíces, mientras que para metales como el Cr y Ni, se ha reportado que se encuentran en mayor cantidad en las partes comestibles (Amin *et al.*, 2013). Por otro lado, en estudios realizados con *Capsicum annum* se reportó que el Cd y el Hg se acumulan en mayor cantidad en raíces>hojas>tallos (Hernández-Bautista *et al.*, 2015; Pérez-Vargas *et al.*, 2014). En cambio, *L. sativa* se ha registrado como una planta hiperacumuladora de metales pesados, los cuales se depositan en las hojas, situación que se comprobó en este trabajo,

pues en las muestras de lechuga fue donde hubo mayor cantidad de metales pesados (Khan *et al.*, 2016).

Es importante considerar que la toma de los micronutrientes del suelo por parte de las plantas se ve condicionada por factores fisiológicos y químicos, uno de estos factores es el pH. El suelo con que se cultivaron las hortalizas de este trabajo tuvo un pH entre 5-7 para la temporada de lluvias y secas, el cual es el adecuado para el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, este afecta de forma diferente el comportamiento de cada metal respecto a otros metales (Vázquez-García *et al.*, 2002; Rivera *et al.*, 2018).

También es relevante enfatizar que la movilidad y disponibilidad biológica de los elementos químicos depende de varios factores más que de la concentración total de estos: las diferentes especies que los elementos pueden adoptar; el origen de los metales (natural, artificial, pedogénico); la forma química en que se encuentren los elementos; la capacidad de transferencia entre las fases del suelo; la cantidad de materia orgánica y salinidad del suelo; la presencia de macrofauna edáfica y de microorganismos; el pH, que limita o permite la entrada y transporte de metales pesados; entre otros. Estos factores interactúan y dan como resultado las diferentes cantidades de metales en las diferentes partes de las plantas (Kabata-Pendias, 1995; Colombo *et al.*, 1998; Carusso *et al.*, 2003; Khurana y Singh, 2012, Zhang *et al.*, 2017; Muñoz *et al.*, 2019).

Es así que la concentración de metales pesados en las plantas es multifactorial. Por un lado, están las fuentes de contaminación (suelo, agua y aire, este último para todos los sitios, excepto el control) y la disponibilidad de estos, y por otro la capacidad de

acumulación o exclusión de los elementos y los órganos de las plantas que absorben los contaminantes.

En cuanto a las **muestras de agua** tanto de lluvia como corriente/llave se encontraron cantidades de metales pesados muy similares entre temporadas. En las muestras recolectadas de **agua de lluvia** se detectó la presencia de los 16 metales, siendo de interés aquellos metales que se encontraron en cantidades diferentes (estadísticamente significativa) y reportaron cantidades más elevadas en el sitio en Coyoacán. Dicho sitio (Jardín Botánico) se encuentra rodeado de vegetación, como ya se ha mencionado antes, por lo cual resulta contradictorio que el agua de lluvia recolectada en ese sitio tenga mayor cantidad de metales pesados, que en los sitios ubicados en las zonas Norte y Centro de la ciudad. Sin embargo, al tomar en cuenta la dirección de los vientos durante la temporada de lluvias en la Cuenca del Valle de México, podría deducirse que el aire cargado de partículas contaminantes, al circular por una zona con una cantidad alta de vegetación provoca que estos metales sean capturados por las moléculas de agua y más tarde se precipiten (Jáuregui, 2000). Estos resultados coinciden con los presentados por Quiñones (2008), en un estudio donde se analizó la presencia de metales pesados en el agua de lluvia de Ciudad Universitaria, UNAM, durante la temporada de 2007, quién cantidades similares de As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn a las registradas en este estudio en cuanto al sitio 1 (Coyoacán).

Por otro lado, en las muestras de agua recolectadas durante la **época de secas (agua corriente)** se encontraron 14 de los 16 metales analizados. Los sitios que presentaron cantidades más altas fueron Coyoacán (Sitio 1) e Invernadero de la Facultad de Ciencias

(Control). Las fuentes de contaminación por metales pesados en el agua corriente son diversas. Pueden ir desde falta de saneamiento y/o corrosión en el sistema de plomería; uso de materiales químicos para el tratamiento de aguas; los materiales con que están contruidos los sistemas de distribución de agua (antiguamente fabricados de plomo y otras aleaciones); mala filtración, etc. (Wong *et al.*, 2006; Alidadi *et al.*, 2019).

Al comparar las cantidades medidas de metales del agua de lluvia y el agua corriente se encontró que las muestras de agua corriente tuvieron una cantidad mayor de metales, elevándose hasta 10 veces en comparación con el agua de lluvia. A pesar de lo anterior, las muestras de agua corriente no sobrepasaron los límites permisibles. De igual manera, la cantidad de metales pesados en las muestras de agua de lluvia está por debajo del límite permitido (NOM-127, 2000; Quiñones, 2008).

Finalmente, el otro factor que juega un papel crucial en el acceso de metales pesados a las hortalizas es el suelo. En las muestras de **suelo temporada de lluvias** se detectaron diferencias significativas entre sitios en 11 de los 16 metales analizados. De estos 11 metales, entre 70 y 80% se encuentran en mayor concentración en el Invernadero de la Facultad de Ciencias (Control) y el Jardín Botánico (Coyoacán, sitio 1). Si se toma en cuenta que estas primeras muestras se tomaron antes de sembrar las hortalizas, sería de esperar que en todos los sitios la concentración de elementos fuera similar en todos los sitios. Sin embargo, el suelo que se utilizó para el Jardín Botánico e Invernadero estuvo expuesto a la intemperie durante un tiempo de por lo menos un mes antes de ser utilizado. Además, otro factor que pudo haber influido en la concentración de elementos traza encontrados en él es que fue utilizado para cultivar crasuláceas como *Echeveria gibbiflora*;

caso contrario al suelo utilizado en el resto de los sitios, que fue “nuevo” pues no había sido utilizado para cultivo. Otro punto importante a considerar es la ubicación del Jardín -al sur de la ciudad- y el papel de la dirección de los vientos durante la temporada de lluvias – en la cuenca del Valle de México los vientos corren en dirección de norte a sur-; aunque para obtener alguna conclusión a partir de estos elementos acerca del por qué en este sitio hay elevada cantidad de metales pesados se requiere otro tipo de estudios (Jauregui, 2000; Morton-Bermea, 2006). Así, esta diferencia de temporalidad en la obtención y uso de los suelos puede deberse que las cantidades de metales y micronutrientes sean significativamente distintas entre los Sitios Control y Sitio 1, y los Sitios 2 y 3.

Por otro lado, las muestras de **suelo** recolectadas durante la **temporada seca** presentaron cambios en la concentración de metales pesados en comparación con las muestras de temporada de lluvias.

Para el Sitio Control, las muestras presentan una disminución significativamente diferente en la cantidad de metales pesados respecto a las muestras de lluvia. En este caso la única fuente de ingreso de MP fue el agua; en el Jardín Botánico, Venustiano Carranza y Azcapotzalco las concentraciones de metales pesados se mantuvieron constantes en algunos casos, pero en la mayoría aumentaron significativamente. Esta situación quizá se deba la temporada invernal, la cual trae consigo el fenómeno meteorológico “inversión térmica” (Ezcurra, 1991).

A lo largo del tiempo en que se desarrolló este trabajo, hubo fluctuaciones en la concentración de MP en los sustratos de los diferentes sitios de estudio.

En cuanto a si la contaminación de los suelos es excesiva en cada uno de los dos tiempos de muestreo, es difícil determinarlo, ya que, de acuerdo con diferentes estándares regulatorios, los suelos rebasan los límites permisibles en algunos, y en otros quedan muy por debajo del límite permisible (Tabla 30 y 31).

Tabla 30. Normas reguladoras de metales pesados en suelo agrícola (mg kg⁻¹) (US EPA, 2002; EEA, 2007; TMS, 2007; CME, 2009; NZME, 2012; EPMC, 2015); Obtenido de He *et al.*, 2015; SEMARNAT, 2002 y SEMARNAT, 2007.

País	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Alemania	50	5	500	200	5	200	1000	600
Australia	20	3	50	100	1	60	300	200
Canadá	20	3	250	150	0.8	100	200	500
China	20-40	0.3-0.6	150-300	50-200	0.3-1	40-60	80	200-300
Estados Unidos	0.11	0.48	11	270	1	72	200	1100
Holanda	76	13	180	190	36	100	530	720
México	22	3-5	280	-	23	100	100-300	-
Nueva Zelanda	17	3	290	>10 ⁴	200	N/A	160	N/A
Reino Unido	43	1.8	N/A	N/A	26	230	N/A	N/A
Tanzania	1	1	100	200	2	100	200	150

Tabla 31. Concentraciones de metales pesados en muestras de suelo correspondientes a este trabajo en época de lluvia y secas

Temporada y sitios/ Metal		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Lluvias	Control	5.99	0.26	129.42	23.44	0.008	75.41	15.34	76.81
	Coyoacán	5.92	0.22	143.46	23.20	0.011	76.20	11.79	70.38
	Venustiano Carranza	4.94	0.24	111.12	21.01	0.01	57.06	14.97	70
	Azcapotzalco	3.86	0.23	96.87	16.69	0.08	46.51	14.07	55.81
Secas	Control	5.2	0.21	92.27	26.72	31.47	49.1504	15.31	64.39
	Coyoacán	6.14	0.22	118.71	24.45	10.72	63.32	12.84	74.60
	Venustiano Carranza	6.79	0.27	117.11	30.46	24.34	61.48	15.95	108.34
	Azcapotzalco	5.61	0.24	85.19	18.57	17.005	44.7	15.10	68.69

Factor de bioconcentración (FBC)

El FBC en la mayoría de los casos fue menor a 0.05 mg Kg^{-1} . Sólo *Lactuca sativa* tuvo un FBC >1 , lo que significa que sus mecanismos de exclusión para algunos metales (Cd, Hg y Zn) son ineficientes. Esto coincide con lo encontrado en diferentes trabajos donde concluyen que es una planta hiperacumuladora (Torres- Saavedra, 2018; Castro *et al.*, 2018). En un estudio previo se encontró que la concentración de los metales en diferentes especies de hortalizas fue $\text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Fe} > \text{Mn}$, entre las especies vegetales consideradas estuvieron

Solanum lycopersicum (Amin *et al.*, 2013), sin embargo, en este trabajo, ninguno de los metales superó 1mg Kg de concentración en dicha hortaliza.

Conclusiones

- Se detectó la presencia de los metales pesados considerados para este trabajo en las partes comestibles de *Allium cepa*, *Capsicum annuum* var. *Annuum*, *Lactuca sativa* y *Solanum lycopersicum*.
- Los metales que se encontraron en mayor cantidad en las muestras comestibles de hortalizas fueron Al, Ba, Fe, Mn y Zn. Excepto el Ba, estos metales son micronutrientes de las plantas.
- En este trabajo se encontró una ligera tendencia a que en temporada seca las hortalizas capten mayor cantidad de metales pesados.
- No se encontraron diferencias en la captación de metales pesados por hortalizas dependiendo de la zona de cultivo.
- Las cantidades de los metales Cd, Cr, Cu, Hg y Pb rebasaron los límites permisibles en muestras de hortalizas para ambas temporadas, los cuales son potencialmente tóxicos.
- Las muestras de agua corriente tienen mayor cantidad de metales pesados que aquellas de agua de lluvia.
- La cantidad de metales presentes en las muestras de agua, tanto de corriente como de lluvia, no rebasan los límites permisibles.
- La especie *Lactuca sativa* es una especie hiperacumuladora.

Referencias

1. Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), 2007. Progreso en la gestión de sitios contaminados. Página en red: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators>
2. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). 2002. Orientación suplementaria para desarrollar niveles de detección de suelos para sitios de superfondo. Oficina de Residuos Sólidos y Respuesta a Emergencias, Washington, D.C. Página en red: <http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/index.htm>
3. Alcalá J., Miranda S., M. Moreno, C. Quintana, G. Quintana, A. Rubio y M. Sosa. 2008. Metales pesados en vegetación arbórea como indicador de la calidad ambiental urbana: Ciudad de Chihuahua, México. *Latin American Journal of Nature Resources*, Multequina 17: 39-54.
4. Alcoba Gómez P., E. González Ciudad, S. Martínez López, L. B. Martínez Martínez, V. Pérez Espinoza, M. J. Martínez Sánchez y C. Pérez Sirvent. 2014. Transferencia de elementos traza suelo-planta en suelos con influencia salina.
5. ALDF (Asamblea Legislativa del Distrito Federal). Noticias. 2016. Ley de Huertos Urbanos de la CDMX, clave para la seguridad alimentaria y cuidado del medio ambiente. Página en red: <http://www.aldf.gob.mx/comsoc-ley-huertos-urbanos-cdmx-clave-seguridad-alimentaria-y-cuidado-medio-ambiente--28587.html>. Consultada 26 agosto 2017
6. Alidadi H., S. B. Tavakoly Sany, B. Z. Garaati Oftadeh, T. Mohamad, H. Shamszade & M. Fakhari. 2019. Health risk assessments of arsenic and toxic heavy metal exposure in drinking water in northeast Iran. *Environmental Health and Preventive Medicine* 24:59
7. Alonso J., J. G. Cabezas, M. C. Lobo, J. Pastor e I. Sastre-Conde. 2004. Absorción y acumulación de metales pesados en tres especies vegetales en suelos enmendados con lodos de depuradora. *Environmental Biotechnology and Engineering*. 1-13
8. Amin N., A. Hussain, S. Alamzeb y S. Begum. 2013. Accumulation of heavy metals in edible parts of vegetables irrigated with wastewater and their intake to adults and children, District Mardan, Pakistan. *Food Chemistry* 136(2013) 1515-1523.

9. Amminn A. A. 2007. Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP MS): a versatile tool, *Journal of Mass Spectrometry* 42: 419-427
10. Anwar S., M. F. Nawaz, S. Gul, M. Rizwan, S. Ali y A. Kareem. 2016. Uptake and distribution of minerals and heavy metals in commonly grown leafy vegetable species irrigated with sewage water. *Environmental Monitoring and Assessment* (188: 541)
11. Audet P. & Charest C. 2007. Heavy metal phytoremediation from a metal-analytical perspective. *Environmental Pollution* (147) 231-237
12. Báez A. P., R. D. Belmont, R. M. García, M.C. B. Torres, H. G. Padilla. 2006. Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico. *Atmospheric Research* 80: 67-85.
13. Barceló J. y Poschenrieder Ch. 1992. Respuesta de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Suelo y Planta* 2:345:361
14. Basurto M., A. Núñez Barrios, R. Pérez Leal y O. Hernández Rodríguez. 2008. Fisiología del estrés ambiental en plantas. *Synthesis. Universidad Autónoma de Chihuahua* 1-5.
15. Benavides María P., S. M. Gallego, M. L. Tomaro. 1996. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress. *Plant Science* 121: 151-159.
16. Brown Kate H. y A. L. Jameton. 2000. Public Health Implications of Urban Agriculture. *Journal of Public Health Policy* 21: 20-39.
17. Carranza-Bautista H. D. 2016. Absorción de metales por lechuga (*Lactuca sativa*) cultivada en chinampas de San Gregorio Atlapulco Xochimilco. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias Biológicas. Instituto de Geología, UNAM.
18. Carusso J. A., B. Klaue, B. Michalke & D. Rocke. 2003. Group Assessment: Elemental Speciation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56
19. Casierra Posada F. y C. Ulrich. 2010. Growth of broccoli plants (*Brassica oleracea* L. var. *Itálica*) affected by excess zinc. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. Vol. 4 No. 2 pp 163-174
20. Castro Gómez J. R. 2013. *Capsicum annuum* L. como fitorremediador de suelos contaminados por metales pesados. Tesis para obtener el título de Biólogo. Facultad de Estudios Superiores, UNAM.

21. Castro-González N. P., R. Moreno-Rojas; F. Calderón-Sánchez; A. Moreno-Ortega & J. V. Tamariz-Flores. 2018. Metales pesados en leche de vacas alimentadas con alfalfa producida en suelos irrigados con aguas residuales en Puebla y Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* Vol. 9 No. 3 pp 466-485
22. CODEX Stan. 2009. Norma general del CODEX para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos.
23. Colangelo E. P. & M. L. Guerinot. 2006. Put the metal to the petal: metal uptake and transport throughout plants. *Current Opinion in Plant Biology* 2006, 9:322–330
24. Colombo, L., D. Mangione, S. Bellicioni and A. Figlioglia. 1998. Soil profile distribution of heavy metals in a soil amended with sewage sludge for eight years. *Agr. Med. International Journal of Agricultural Science*. 128(4): 273-283.
25. Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO). 2012a. Malezas de México. Página en red: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/solanaceae/lycopersicon-esculentum/fichas/ficha.htm>. Consultada 17 septiembre 2017
26. Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO). 2012b. Malezas de México. Página en red: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/solanaceae/lycopersicon-esculentum/fichas/ficha.htm>. Consultada 17 septiembre 2017
27. Contreras C. 2014. Impulsan Huertos Urbanos en la Ciudad de México. *Excelsior*. Página en red: <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/03/01/946324#view-1>. Consultada 30 agosto 2017
28. Delgado C., F. Bautista, A. Gogichaishvili, J. L. Cortés, P. Quintana, D. Aguilar y R. Cejudo. 2019. Identificación de las zonas contaminadas con metales pesados en el polvo urbano de la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 35 (1) 81-100
29. Delince W., R. Valdés Carmenate, O. López Morgado, F. Guridi Izquierdo y M. I. Balbín Arias. 2015. Riesgo agroambiental por metales pesados en suelos con Cultivares de *Oryza sativa* L. y *Solanum tuberosum* L. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 24: 44-50.
30. Dieleman H. 2017. Urban Agriculture in Mexico City, balancing between ecological, economic, social and symbolical value. *Journal of Cleaner Production* 156-163

31. Dirección General de Comunicación Social. 2019. Azoteas verdes para refrescar las grandes ciudades. Boletín UNAM-DGCS-726. Universidad Nacional Autónoma de México
32. Escobar Delgadillo, J. L. y J. Salvador J. Rivera. 2009. Urbanismo y sustentabilidad: Estado actual del desarrollo urbano de la ZMVM. Revista Digital Universitaria. Universidad Nacional Autónoma de México. Página en red: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num7/art40/int40-5.htm>. Consultada 22 abril 2017
33. Ezcurra E. 1991. Inversiones térmicas. Revista Ciencias No. 22 pp 51-53. Página en red: <https://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/22/CNS02208.pdf>
34. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. Agricultura Urbana y Periurbana en América Latina y El Caribe.
35. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2014. Diez ciudades latinoamericanas que se destacan por la agricultura urbana.
36. Ferrer, A. 2003. Intoxicación por metales. Anales del Sistema Sanitario de Navarra, pp. 141-153.
37. Figueroa Vera J. F. 2002. Agricultura Urbana en la Región Metropolitana de Santiago de Chile: Situación de las empresas familiares hidropónicas, estudios de caso. FAO, Santiago de Chile
38. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. 2019. Programa de verificación vehicular primer semestre 2019. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno de la Ciudad de México
39. Gallego S. M., M. P. Benavides y M. L. Tomaro. 1996. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress. Plant Science 121 151:159
40. García-Céspedes C. D., L. A. Lima-Cazorla, L. Ruiz-Gutiérrez; J. L. Santana-Romero y P. A. Calderón-Peñalver. 2016. Agroecosistemas con probables riesgos a la salud por contaminación con metales pesados. Revista Cubana de Química, 378-393.
41. García R., R. Belmont, H. Padilla, M. del C. Torres, A. P. Baez. 2009. Determination of inorganic ions and trace elements in total suspended particles at three urban zones in the Mexico City Metropolitan Area and one rural site. Atmospheric Research 94: 313:319.
42. Garza G. 1996. Uncontrolled air pollution in Mexico City. Cities Vol. 13 No. 5 315-328

43. Giuffré, L., S. Ratto, L. Marbán, J. Schonwald y R. Romaniuk. 2005. Riesgo por metales pesados en horticultura urbana. *Ciencia del suelo* 23, 101-106.
44. Gobierno de la Ciudad de México. 2019. Huertos Urbanos en la Ciudad de México. Página en red: <http://www.cdmx.gob.mx/vive-cdmx/post/huertos-urbanos-en-la-cdmx>. Consultada 5 septiembre 2017
45. 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.
46. Hardiman R. T., B. Jacoby. 1984. Absorption and translocation of Cd in bush beans (*Phaseolus vulgaris*). *Physiologia Plantarum* 61: 670-674.
47. He Z., J. Shentu, X. Yang, V. C. Baligar, T. Zhang y P. J. Stoffella. 2015. Heavy metal contamination of soils: sources, indicators and Assessment. *Journal of environmental indicators* 9:17-18
48. Hernández L. 2006. La agricultura urbana y caracterización de sus sistemas productivos y sociales, como vía para la seguridad alimentaria en nuestras ciudades. *Cultivos Tropicales* Vol. 27 No. 2 pp 13-25
49. Hernández-Bautista L., L. I. Trejo-Téllez, F. C. Gómez-Merino, S. García-Morales & O. Tejeda-Sartorius. 2015. Physiological and nutrient changes in sweet pepper (*Capsicum annum* L.) seedlings caused by cadmium. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 31 (4) 389-396
50. Iannacone O. J., L. Alvaríño F. 2005. Efecto Ecotoxicológico de tres Metales Pesados Sobre el Crecimiento Radicular de Cuatro Plantas Vasculares. *Agricultura Técnica (Chile)*. 65(2):198-203.
51. Instituto de Geografía. 2016. Consideraciones sobre la situación actual de contaminación atmosférica en el centro de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Página en red: <http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/eventos/ContaminacionAtmosferica.pdf>. Consultada 27 abril 2017
52. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) 2016. Estadística. Medio Ambiente. Página en red: <http://www.inegi.org.mx/>. Consultada 10 mayo 2017.

53. INIFAP. (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) 2011 Página en red: <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/901.pdf>. Consultada 30/ mayo 2018
54. ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares). 2020. Laboratorio de espectrometría de masas (ICP-MS), Laboratorio Nacional de Investigaciones en Forense Nuclear. Página en red: http://www.inin.gob.mx/mini_sitios/tercer_plano.cfm?cve_area=LIFN&codigo_opc=170006001
55. Japón Quintero J. Sin fecha. Cultivo Extensivo de Cebolla Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, España Núm. 18/82 Página en red: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1982_18.pdf. Consultada 21 junio 2018
56. Jáuregui Ostos E. 2000. El Clima de la Ciudad. México: Plaza y Valdés. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
57. Johansson C., M. Norman, L. Burman. 2009. Road traffic emission factors for heavy metals. *Atmospheric Environment* 43: 4681-4688.
58. 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*. Alemania: Springer
59. Khan A., S. Khan, M. Alam, M. Amjad Khan, M. Aamir, Z. Qamar, Z. U. Rehman, S. Perveen. 2016. Toxic metal interactions affect the bioaccumulation and dietary intake of macro- and micro-nutrients. *Chemosphere* 146 (2016) 121-128
60. Khurana M. P. S. & P. Singh. 2012. WasteWater Use in Crop Production: A Review. *Resources and Environment* 2012, 2(4): 116-131
61. Kolarov D. y Tzvetkova N. 1996. Effect of air pollution on carbohydrate and nutrients concentrations in some deciduous tree species. *Bulgarian Journal of Plant Physiology* 22: 53-63.
62. Legislación de la Unión Europea. 2019. Contenidos máximos de metales pesados en productos alimenticios.
63. Madera-Parra C.A., E. J. Peña-Salamanca, J.A. Solarte-Soto. 2014. Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies

vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. *Ingeniería y Competitividad*, Vol. 16, No.2 pp179 - 188

64. Malagón Aranda, K. 2015. Implementación de huertos urbanos como un modelo para generar la cultura de la reutilización y el reciclaje. Tesis de Licenciatura (Ingeniera agrícola). Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. Pp 87-95.
65. Mantilla Villacís R. G. 2018. Determinación de metales pesados y pérdidas postcosecha en dos hortalizas de consumo directo: pimiento (*Capsicum annuum*) y cebolla (*Allium cepa*). Trabajo para obtener el título de Ingeniera Agrónoma. Universidad Central de Ecuador.
66. Meharg A. A. 2016. Perspective: City farming needs monitoring. *Nature* 531
67. Merçon, J., M. Á. Escalona Aguilar, M. I. Noriega Armella, I. I. Figueroa Núñez, A. Atenco Sánchez, E. D. González Méndez. 2012. Cultivando la educación agroecológica: el huerto colectivo urbano como espacio educativo. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 1201-1224.
68. Ministerio de Medio Ambiente de Canadá (CME). 2009. Estándares de suelo, agua subterránea y sedimentos para uso bajo la Parte XV.1 de la Ley de Protección Ambiental.
69. Ministerio de Nueva Zelanda para el Medio Ambiente (NZME). 2012. Guía del usuario: Norma ambiental nacional para la evaluación y gestión de contaminantes en el suelo para proteger la salud humana. Wellington: Ministerio de Medio Ambiente. Página en red: www.esdat.net.
70. Ministerio de Protección Ambiental de China (EPMC). 2015. Estándares de calidad ambiental del suelo de tierras agrícolas. Huangbanhang. Oficina del Ministerio de Protección Ambiental de China, Beijing, China.
71. Ministro de Estado de Tanzania (TMS). 2007. Las regulaciones de gestión ambiental (estándares de calidad del suelo). Vicepresidencia de la Oficina de Medio Ambiente
72. Miranda, D., C. Carranza, C. A. Rojas, C. M. Jerez, G. Fischer y J. Zurita. 2008. Acumulación de metales pesado en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 180-191.

73. Morton-Bermea, O. 2006. Contenido de metales pesados en suelos superficiales de la Ciudad de México. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 9(1): 45-57
74. Muñoz-Silva L., P. Olivera-Gonzales, M. SantillánT-orres & C. Tamariz-Angeles. 2019. Microorganismos tolerantes a metales pesados del pasivo minero Santa Rosa, Jangas (Perú). *Revista peruana de biología* 26(1): 109 - 118
75. Murray K.S., D. T. Rogers, M. M. Kaufman. 2004. Heavy Metals in an-Urban Watershed in Southeastern Michigan. *Journal of Environmental Quality* 33: 163-172.
76. Navarro- Aviñó J.P., I. Aguilar Alonso y J. R. López-Moya. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas* 16(2) pp 10-25
77. NOM-127-SSA1-1994. 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud. México
78. Olivares-Rieumont, S., D. García Céspedes, L. Lima Cazorla, I. Saborit Sánchez, A. Llizo Casals y P. Pérez Álvares. 2013. Niveles de cadmio, plomo, cobre y zinc en hortalizas cultivadas en una zona altamente urbanizada de la Ciudad de La Habana, Cuba. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 285-294.
79. Ortiz González M.T., J.V. Tamariz Flores, M.E. Lazcano Herrero y R. del C. Castelán Vega. 2013. Evaluación del efecto de los biosólidos sobre el cultivo de la lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*. Vol. 6 No.1 pp 100-109
80. Pérez J., G. Hurtado, V. Aparicio, Q. Argueta, M. A. Larín. 2015. Guía Técnica: Cultivo de Jitomate. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y forestal (CENTA). Página en red: <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/hortalizas/Guia%20Tomate.pdf>. Consultado 5 septiembre 2017.
81. Pérez-Vargas H. M., J. V. Vidal-Durango & J. L. Marrugo-Negrete. 2014. Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio del ají (*Capsicum annum*). *Revista de Salud Pública* 16 (6): 897-909

82. Prieto Méndez, J. P., C. González Ramírez, A. D. Román Gutiérrez y F. Prieto García. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 29-44.
83. Quiñones Rizo G. S. 2008. Determinación de metales pesados por ICP-MS en agua de lluvia colectada en Ciudad Universitaria, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM
84. Reyes Y. C., I. Vergara, O. E. Torres, M. Díaz y E. E. González. 2016. Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo* Vol. 16 No. 2 pp 66-77
85. Rivera E., M. Sánchez & H. Domínguez. 2018. pH como factor de crecimiento en plantas. *Universidad Tecnológica de Panamá: Revista de Iniciación Científica* Vol. 2
86. Rothman S. y G. Dondo. 2017. Cebolla (*Allium cepa* L.) Material de apoyo didáctico. Cátedra de horticultura, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Página en red: <http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/horticultura/cebolla.pdf>.
Consultado 17 septiembre 2017
87. Ruiz J. 2011. Evaluación de tratamientos para disminuir cadmio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) regada con agua del río de Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* (5) No. 2 pp 233-243
88. SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) 2017. Planeación Nacional Agrícola 2017-2030, Jitomate mexicano. Página en red: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>.
Consultada 18 abril 2018
89. Säumel, I.; I. Kotsyuk, M. Hölscher, C. Lenkerei, F. Weber e I. Kowarik. 2012. How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from planting within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany. *Environmental Pollution*, 124-132.
90. SEDEMA (Secretaría de Medio Ambiente). Gobierno de la Ciudad de México. 2016. Guía de Huertos Urbanos en la Ciudad de México. Página en red:

<http://data.sedema.cdmx.gob.mx/flippingbook/guia-huertos-urbanos/#p=52>.

Consultado 12 septiembre 2017

91. SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente). Gobierno de la Ciudad de México. 2017. Taller de Huertos Urbanos. Página en red: <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/eventos/evento/taller-de-huertos-urbanos>. Consultado 5 septiembre 2017
92. SMACM a (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). 2015. Calidad del aire de la Ciudad de México, informe 2016. Dirección General de Gestión del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico: Ciudad de México
93. SMACM b (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). 2016. Calidad del aire de la Ciudad de México, informe 2016. Dirección General de Gestión del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico: Ciudad de México
94. SMACM c (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). 2017. Calidad del aire de la Ciudad de México, informe 2016. Dirección General de Gestión del Aire. Dirección de Monitoreo Atmosférico: Ciudad de México
95. SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de México.
96. SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2007. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de México
97. Shugulí Coronel O. M. 2018. Determinación de metales pesados y pérdidas postcosecha en dos hortalizas de consumo directo de brócoli (*Brassica oleracea italica*) y cebolla blanca (*Allium fistulosum*). Trabajo de titulación para Ingeniero Agrónomo. Universidad Central de Ecuador. Ecuador.

98. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2010. Un panorama del cultivo de Chile. México. Página en red: <http://infosiap.siap.gob.mx/images/stories/infogramas/100705-monografia-chile.pdf>. Consultada 16 marzo 2018
99. Tiller, K. G. 1989. Heavy Metals in Soils and Their Environmental Significance. *Advances in Soil Science*, 113–142.
100. Torres-Saavedra A. M. 2018. Factor de bioconcentración y traslocación de especies altoandinas para suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora en Mesapata, en condiciones de invierno durante 2015-2016. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”, Perú
101. Vázquez-García A., G. Santiago-Martínez y A. Estrada-Torres. 2002. Influencia del pH en el crecimiento de quince cepas de hongos ectomicorrizógenos. *Anales del Instituto de Biología, UNAM. Serie Botánica* 73(1): 1-15
102. Vittori L. A., F. Orsini, L. Marchetti, G. Vianello & Giorgio Gianquin. 2015. Heavy metal accumulation in vegetables grown in urban gardens. *Agronomy for Sustainable Development* 35:1139–1147
103. Wong C. S. B., X. Li & I. Thornton. 2006. Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environmental Pollution* (142) 1-16
104. Yang Z., W. Lu, Y. Long, X. y Bao, Q. Yang. 2011. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China. *Journal of Geochemical Exploration* 108: 27-38.
105. Zafra-Mejía, C.; D. M. Santamaría-Galindo y C. Torres-Galindo. 2015. Análisis climático de la concentración de metales pesados asociados al sedimento depositado sobre vías urbanas. *Revista de Salud Pública*, 351-354.
106. Zhanga C., X. Wanga, U. Ashrafb, B. Qiu, & S. Alia. 2017. Transfer of lead (Pb) in the soil-plant-mealybug-ladybird beetle food chain, a comparison between two host plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety* (143) 289-295
107. Zúñiga, F. B. 1999. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.