

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Efecto de las Nanopartículas de Silicio en la Acumulación y Translocación de
Arsénico en Tejidos de Plantas de Tomate

Por:

VICTORIA VÁSQUEZ GARCÍA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2022.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Efecto de las Nanopartículas de Silicio en la Acumulación y Translocación de
Arsénico en Tejidos de Plantas de Tomate

Por:

VICTORIA VÁSQUEZ GARCÍA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal Interno



Dr. Magín González Moscoso
Asesor Principal Externo



Dr. Alonso Méndez López
Coasesor



Dr. Jesús Valdés Reyna
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2022

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos.

Reproducción de fragmentos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondiente.

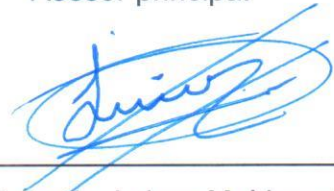
Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo es original.

Pasante

Victoria Vásquez García

Victoria Vásquez García

Asesor principal



Dr. Antonio Juárez Maldonado

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro mi “alma terra mater”, por todas las ofertas brindadas, para desarrollarme profesionalmente dentro y fuera de las instalaciones.

Al departamento de Botánica a todo el personal y a sus profesores por compartir de sus conocimientos para mi desarrollo académico, que a pesar de todo siempre están apoyando de manera incondicional, tanto académico como moral. Y así concluir mi carrera como Ingeniero en Agrobiología.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado, por darme la oportunidad de trabajar en su proyecto, agradezco por su paciencia y el tiempo en esta tesis, gracias por compartir sus conocimientos conmigo.

Al Dr. Magín Gonzalez Moscoso, Agradecida por compartir su conocimiento en este proyecto de investigación tanto teórico como práctico, gracias por guiarme profesionalmente y trabajar con mucha paciencia.

Al Dr. Alonso Méndez López

Al Dr. Jesús Valdés Reyna

DEDICATORIA

A mi madre: por ser la mejor persona y por haberme permitido seguir con mis sueños, apoyarme emocional y psicológicamente, por recibirme siempre con los brazos abiertos y sus despedidas de bondad y valentía.

A mis hermanos: definitivamente se llevan el crédito a mi hermana maría luisa, por apoyarme durante todo el tiempo de mi estancia en la universidad, a mi hermana Imelda por ser mi guía mi sustento, mi hombro y apoyo durante toda mi vida, mi hermana Jovita por apoyarme incondicionalmente durante todo el tiempo que estuve en la universidad. A mi hermana Adela y mi hermano Andrés por estar en mis momentos difíciles con sus ocurrencias.

A mi círculo de amigos, Everardo Agüero, Raúl Morales, Wilver Mendoza, Amisadaí Vásquez y Xochitl Gaspar, por su amistad que me brindaron en esta institución UAAAN.

A mi mejor amiga maría del Carmen: por ser siempre mi amiga y familia al apoyarme con porras mis sueños.

A la familia Portillo Rodríguez por apoyarme desde el primer día desde que entre a esta hermosa universidad.

A la familia Chimal Martínez por ser las personas más increíbles que me han hecho sentir parte de su familia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Tomate.....	4
2.1.1. Importancia mundial	4
2.1.2. Importancia Nacional	5
2.1.3. Condiciones del cultivo	5
2.2. Metales pesados	5
2.2.1. Toxicología de los metales pesados	6
2.2.2. Arsénico	7
2.2.3. Efectos del arsénico en las plantas.....	8
2.2.4. Arsénico en cultivos de tomate	8
2.3. Nanotecnología	9
2.3.1. Nanotecnología en la agricultura	9
2.3.2. Nanopartículas	10
2.4. Silicio	10
2.4.1. Aplicación de nanopartículas de silicio en la agricultura	11
2.4.2. Nanopartículas de silicio para reducir la acumulación de arsénico o metales pesado.....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS	13
3.1. Establecimiento del experimento	13

3.2. Diseño experimental y nutrición vegetal.....	13
1.1 3.3. Labores culturales.....	14
3.4. Muestreo de plantas.....	15
3.5. Determinación de arsénico.....	16
3.6. Determinación de pigmentos fotosintéticos.....	16
3.7. Análisis estadístico.....	17
4. RESULTADO Y DISCUSIÓN.....	18
4.1. Acumulación de As en el sustrato de crecimiento.....	18
2.1 4.2. Concentración de As en tejidos vegetales y por estratos.....	19
4.3. Translocación de arsénico en plantas de tomate.....	21
3.1 4.4. Efecto del arsénico y las NPs Si en los pigmentos fotosintéticos.....	24
5. CONCLUSIONES.....	26
6.LITERATURA CITADA.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos experimentales.....	14
Tabla 2. Concentración de arsénico en plantas de tomate.....	20
Tabla 3. Factor de translocación en tallo de tomate.....	22
Tabla 4. Factor de translocación de hojas de tomate.....	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tutorado de plantas de tomate.....	15
Figura 2. Muestras de material vegetal molidas en mortero y guardadas en bolsas para su análisis de As.....	16
Figura 3. Concentración de As en sustrato y efecto de las NPs Si en la acumulación de As.....	19
Figura 4. Contenido de clorofilas en plantas de tomate expuestas a As y NPs Si.....	25

RESUMEN

La aplicación de nanopartículas de silicio (NPs Si) en concentraciones apropiadas genera una mejora en el crecimiento y desarrollo de la plantas, le da refuerzo en la pared celular, y ayuda a mejorar la tolerancia al estrés por metales pesados, además la aplicación de NPs Si puede disminuir los efectos negativos ocasionados por el arsénico (As). El propósito de este trabajo fue evaluar la capacidad de las NPs Si para disminuir la translocación de As en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), además de determinar la concentración de arsénico en el sustrato de crecimiento, en tejidos vegetales (raíz, tallo y hoja) y los pigmentos fotosintéticos en hojas. El cultivo se estableció en un experimento factorial con diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar. El factor grande fueron las dosis de As (0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 y 3.2 mg L⁻¹) y el factor pequeño fueron las dosis de NPs Si (0, 250 y 1000 mg L⁻¹). En este estudio se aplicaron un total de 18 tratamientos diferentes, cada tratamiento se replicó doce veces. Para determinar la concentración de As a través de la planta, se dividió en 3 estratos: estrato 1 (tercer racimo), estrato 2 (quinto racimo) y estrato 3 (séptimo racimo). Los resultados mostraron que las concentraciones de As en el sustrato aumentaron conforme se aumentó el As en el agua de riego y a partir de la dosis de 1.6 mg L⁻¹ de As en el agua, el sustrato se contamina. Se observó una mayor acumulación de As en raíces en comparación hojas y tallo. Tanto en hojas como en tallo el As fue disminuyendo en los estratos y solo la dosis 3.2 mg L⁻¹ de As logró moverse en todos los estratos. La translocación de As de la raíz a la parte del tallo en el estrato 1 mostró que la aplicación de 250 y 1000 mg L⁻¹ de NPs Si disminuyó la translocación 385.9 y 136.53 % respectivamente. En hoja en el estrato 2 la aplicación de 1000 mg L⁻¹ de NPs Si redujo la concentración de As en un 320.7 % cuando estuvieron expuestas a 1.6 mg L⁻¹ de As en el agua de riego. Las clorofilas fueron más altas que el control en todas las dosis de As, sin embargo las NPs Si no tuvieron efecto.

Palabras clave: translocación de arsénico; nanopartículas; pigmentos fotosintéticos

1. INTRODUCCIÓN

El término de metal pesado (MP) refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de MP o algunos metaloides, incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb), los MP son peligrosos porque tienden a bioacumularse en diferentes cultivos (Prieto-Méndez *et al.*, 2009).

El As es un metaloide que aparece de manera natural en el medio ambiente. En general, está presente en el ambiente como As (V) y como As (III) (Rangel *et al.*, 2015). El As reduce la fijación del CO₂ y desorganiza los procesos integrales fotosintéticos de la plantas (Zhao *et al.*, 2009). Las membranas son muy vulnerables al estrés por As, el daño en las membranas produce un desbalance en la absorción de nutrientes y agua en las células vegetales (Ali *et al.*, 2009).

El tomate es el segundo cultivo más importante del mundo económicamente (García-Martí *et al.*, 2019), debido a su extensión de sus siembra y alto nivel de consumo (Nicola *et al.*, 2009). La fruta de tomate es una fuente importante de dieta saludable para el ser humano que puede proporcionar vitaminas y una amplia gama de moléculas bioactivas (Salehi *et al.*, 2019). El licopeno es uno de los antioxidantes naturales más fuertes conocidos, y es el caroteno principal en el tomate maduro (Xie *et al.*, 2019)

El silicio (Si) es considerado el segundo mineral más abundante en el suelo y es clasificado como nutriente no esencial para la planta (Moghanloo *et al.*, 2019). El Si beneficia a ciertas plantas cuando están bajo estrés, ayuda a incrementar la resistencia del tallo, mejora la tolerancia a las sequías y retrasa la defoliación prematura de algunos cultivos que no se riegan y puede mejorar la capacidad de resistencia de las plantas (Sahebi *et al.*, 2016).

La nanotecnología es actualmente un importante campo de estudio, debido a que proporciona control sobre la materia a escala nanométrica (Juárez-Maldonado *et al.*, 2013). La nanotecnología en la agricultura incluye fertilizantes para aumentar el crecimiento y el rendimiento de las plantas, pesticidas para el manejo de plagas y enfermedades, y sensores para monitorear la calidad del suelo y la salud de las plantas (Servin *et al.*, 2015). Además, las nanopartículas (NPs) pueden considerarse bioestimulantes ya que, en rangos específicos de concentración, generalmente en niveles pequeños, aumentan el crecimiento de las plantas (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019)

En cuanto a las NPs Si, se ha reportado que su aplicación puede mejorar el contenido de clorofila y disminuir el daño de la pared celular en plantas bajo estrés abiótico (Mahmoud *et al.*, 2020). Además, aumenta el crecimiento de plantas bajo toxicidad por plomo (Emamverdian *et al.*, 2020), y puede reducir la acumulación de cromo en plántulas de guisante (Tripathi *et al.*, 2015). Por otro lado, cuando las plantas de maíz se encuentran bajo condiciones de As, las NPs Si pueden reducir el efecto tóxico (Tripathi *et al.*, 2016). Incluso se ha reportado que tienen la capacidad de aumentar y regular el sistema antioxidante de las plantas en condiciones de suelo contaminado con As (Tripathi *et al.*, 2017).

1.1. Objetivo general

Determinar si la aplicación de nanopartículas de silicio reduce la translocación de arsénico y modifica los pigmentos fotosintéticos de las plantas de tomate.

1.2. Objetivos específicos

1. Determinar la concentración de arsénico en el sustrato de crecimiento
2. Determinar la concentración de arsénico en los tejidos vegetales.
3. Determinar la concentración de clorofila a, b y total en hojas de plantas de tomate.

1.3 Hipótesis

La aplicación de nanopartículas de silicio reducen la acumulación de arsénico, y modifican positivamente los pigmentos fotosintéticos en las plantas de tomate.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es originario de América del Sur, de la región andina, particularmente de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile (SAGARPA, 2010). El tomate, actualmente es una de las hortalizas de mayor importancia en muchos países del mundo, por el gran número de subproductos que se obtienen de él y las divisas que aporta a su economía (Ramírez *et al.*, 2018).

El tomate es una fruta, sin embargo, para efectos culinarios se le considera como una hortaliza, y su nombre botánico es "*Solanum lycopersicum*" (Bonilla-Barrientos *et al.*, 2014), es una planta herbácea de la familia de las Solanaceae, que incluye más de 3,000 especies, con una amplia variedad de hábitats (Knapp y Peralta, 2006), Los tomates son también fuente muy importante en la dieta de un pigmento rojo llamado licopeno, que tiene propiedades antioxidantes y puede ser anticancerígeno (Eufic, 2001).

2.1.1. Importancia mundial

El tomate se usa aproximadamente el 75 % a nivel mundial para el consumo fresco, mientras que el 25 % es para propósitos industriales (Holwerda, 2006). México es el principal exportador de tomate fresco a nivel mundial, con cerca del 20 % del volumen y 25 % del valor comerciados, que se destinan principalmente a EEUU. (SAGARPA, 2017). El país exporta alrededor de 1.5 millones de toneladas anuales, que representan entre el 50 y 70 % del volumen de producción. Entre 2015 y 2016 se reportó un crecimiento en la producción de tomate cercano a las 200 mil toneladas, lo que significa un aumento a tasa anual de 7.8 por ciento al pasar de dos millones 570 mil toneladas a dos millones 769 mil toneladas (FIRA, 2016).

2.1.2. Importancia Nacional

En los últimos años se ha incrementado la producción tomatera en un 50 por ciento, esto debido a que se han desarrollado nuevas tecnologías y mejorado los métodos para su obtención; inclusive en la actualidad existe una mayor superficie destinada para su siembra, tan sólo en 2010 se ocuparon poco más de 54 mil hectáreas para su cultivo. Asimismo, de acuerdo con datos arrojados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), a lo largo del 2020, México produjo cerca de 3.3 millones de toneladas de tomate, razón por la cual su producción ocupa el segundo lugar después del cultivo de chile (Statista, 2020).

2.1.3. Condiciones del cultivo

El óptimo térmico para el desarrollo del tomate durante el día es de 23-25 °C y de 15-17 °C durante la noche; mientras que la humedad relativa apropiada es del orden de 70 %. Las temperaturas por debajo de 8 °C y por encima de 30 °C, alteran el desarrollo del tomate y suelen provocar una deficiente fructificación. A 0 °C por varios minutos se hiela la planta. Altas temperaturas, por encima de los 30 °C durante largos periodos, agobian las plantas y ocasionan desórdenes fisiológicos en el fruto (Castellanos, 2009).

2.2. Metales pesados

La contaminación por metales y metaloides en recursos hídricos, suelos y aire plantea una de las más severas problemáticas que comprometen la seguridad alimentaria y salud pública a nivel global y local (Reyes, 2016). Además, la contaminación ha ido en aumento debido principalmente a actividades antropogénicas (Covarrubias y Cabriales, 2017). Los metales sufren escasa degradación y por tanto son considerados como toxinas bioacumulativas persistentes, representa un riesgo marcado para la salud humana y los ecosistemas (Quero-Jiménez *et al.*, 2017). El término de metal pesado (MP) refiere a cualquier

elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas, incluye al mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), zinc (Zn) y estaño (Sn) (Prieto-Méndez *et al.*, 2009). La denominación de “MP” se debe a que su densidad es de por lo menos cinco veces mayor a la del agua. Los MP son peligrosos porque tienden a bioacumularse en diferentes cultivos (Ruiz-Huerta *et al.*, 2017). La movilidad de elementos como As y MP en el suelo da la posibilidad de ser biodisponibles, afectando el crecimiento los cultivos de la región (Ramos-Villegas y Hernández-Viveros, 2014).

En raíces, todos los aniones son fuertemente adsorbidos a la superficie de la membrana, posteriormente sigue una conducción metabólica, una transferencia selectiva al simplasto y por último son transportados a la parte superior de la planta (Sandoval-Pinto, 2011).

2.2.1. Toxicología de los metales pesados

La exposición a MP puede suponer un riesgo para la salud de los seres humanos. Por ejemplo, la exposición aguda y crónica al As daría lugar a trastornos del sistema cardiovascular y de otros sistemas (Yang *et al.*, 2018). A diferencia de los contaminantes orgánicos, los MP, una vez introducidos en el medio ambiente, no pueden biodegradarse, persisten indefinidamente y causan la contaminación del aire, el agua y los suelos (Mohamed *et al.*, 2011). La solubilidad de trazas de metales en las aguas superficiales está controlada predominantemente por el pH, por el tipo de concentración de los ligandos en los cuales el metal puede absorberse, y por el estado de oxidación de los componentes minerales el ambiente rédox del sistema (Cuizano *et al.*, 2010). También tienen efectos tóxicos sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas, se les ha dado prioridad como los contaminantes inorgánicos más importantes en el ambiente (Cañas-Navarro *et al.*, 2012).

2.2.2. Arsénico

El As es un metaloide que se produce naturalmente, aunque también se puede acumular en el medio ambiente debido a las acciones humanas (McClintock *et al.*, 2012). Una mayor concentración de As en el suelo puede ser el resultado de actividades humanas, entre las que se encuentran el uso de pesticidas, la minería y operaciones de procesamiento de minerales (Yoshida, 2013). Los suelos naturales generalmente pueden contener un nivel de 0.1–10 mg kg⁻¹ de As (Zhao y Meharg, 2010). La presencia de As en los sedimentos también se ve fuertemente afectada por el pH, lo que resulta en reacciones de desorción y disolución, que moviliza el As de la fase sólida (sedimento) a la fase líquida (agua) (Prakash *et al.*, 2019). El As es un elemento omnipresente y ocupa el puesto 20 en abundancia dentro de la corteza terrestre y el puesto 14 en agua de mar (Flora, 2015).

El As se utiliza en venenos, insecticidas, herbicidas, pinturas, papel tapiz, cerámica y vidrio. La acción de los ácidos sobre los metales en presencia de As forma el gas arsina. Las aleaciones como el ferro silicón pueden desprender arsina al contacto con agua, ya que el primero puede estar contaminado con As (Luna-Encinas *et al.*, 2009).

El As, es un elemento no esencial, que interfiere con el metabolismo de la planta e inhibe el crecimiento, porque el arseniato desacopla la fosforilación en mitocondrias y el arsenito inactiva muchas enzimas al reaccionar con grupos sulfhidrilo de proteínas (Cao *et al.*, 2004). El agua subterránea con As, no solo se emplea como fuente de consumo humano, sino que también es utilizada para el riego de vegetales comestibles y como bebida para el ganado (Mandal, 2017). De esta forma la población podría estar expuesta a la contaminación a través de la ingesta de alimentos de origen animal y vegetal.

2.2.3. Efectos del arsénico en las plantas

El uso de agua subterránea contaminada con As para el riego de cultivos ha resultado en concentraciones elevadas de As en suelos agrícolas. Los cultivos agrícolas aledaños a zonas afectadas por As pueden acumular este metaloide en sus tejidos (Ruiz-Huerta *et al.*, 2017). Las altas concentraciones de As pueden tener el potencial de efectos adversos para la salud en el ganado y un aumento de la exposición al As en humanos a través de la vía vegetal-animal-humano (Londoño-Franco *et al.*, 2016)

El As reduce la fijación del CO₂ y desorganiza los procesos integrales fotosintéticos de la plantas (Zhao *et al.*, 2009). Las membranas son muy vulnerables al estrés por As, el daño en las membranas produce un desbalance en la absorción de nutrientes y agua en las células vegetales (Ali *et al.*, 2009). De hecho, estudios previos encontraron que el As(V) afecta principalmente a la pared celular, al metabolismo primario y secundario, al metabolismo del ácido abscísico y a la germinación, mientras que el As(III) afecta principalmente a las hormonas y el proceso de señalización (Sharma, 2012).

2.2.4. Arsénico en cultivos de tomate

Altas concentraciones de As en el suelo provocan algunos cambios en la concentración de pigmento en el tomate (Miteva, 2002). De acuerdo a un estudio realizado por Miteva *et al.*, (2005), el As modifica la actividad peroxidasa, clorofila y pigmentos del cloroplasto ocasionando un efecto tóxico pero no letal. Se ha reportado que el As puede llegar al fruto y acumular 13 µg g⁻¹ en peso seco (Marmioli *et al.*, 2014), < 3 µg kg⁻¹ (Beesley *et al.*, 2013). Aunque las plantas de tomate pueden desarrollar estrategias para tolerar este elemento, limitando el transporte a brotes y aumentando la acumulación de As en el sistema raíz, el As en el tejido de raíz de tomate parece estar tan compartimentado que su impacto en el crecimiento y metabolismo de la planta puede ser mínimo (Carbonell-Barrachina *et al.*, 1997).

2.3. Nanotecnología

La nanotecnología (NT) es un campo prometedor de investigación interdisciplinaria (Raí e Ingle, 2012). La palabra “Nano” viene del término en latín “enano” o “pequeño”. La NT es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación, manejo, operación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas a nanoescala (Torres *et al.*, 2016). La NT tiene un gran potencial ya que puede mejorar calidad de vida humana a través de sus aplicaciones en diversos campos como la agricultura y la tecnología de los alimentos (Buzea *et al.*, 2007). También tiene el potencial de revolucionar la industria agrícola (Joseph y Morrison, 2006), y a través de la utilización eficiente del agua, la protección contra insectos y enfermedades (Torres *et al.*, 2016).

2.3.1. Nanotecnología en la agricultura

La NT y la introducción en el mercado de productos nanotecnológicos con beneficios claros probablemente impulsarán la aceptación del consumidor de aplicaciones más sensibles. El rápido progreso de la NT en otras industrias clave también puede transferirse con el tiempo a aplicaciones agrícolas y facilitar su desarrollo (Parisi *et al.*, 2015). Los agricultores utilizan la tecnología para orientar el uso de agua, fertilizantes y otros insumos (Castro-Castrepo, 2017). Con la finalidad de mejorar el uso eficiente de nutrientes para una mayor productividad y una mejor seguridad ambiental (Mukhopadhyay, 2014).

La NT también es útil como una tecnología ambiental y se maneja bajo el nombre de nanorremediación, esta se usa para proteger al ambiente, ya sea a través de la prevención, el tratamiento o la limpieza de sitios con desechos peligrosos (Karn *et al.*, 2009).

2.3.2. Nanopartículas

Las nanopartículas (NPs) se definen como partículas que tienen al menos una de las dimensiones en el rango comprendido entre 1 y 100 nm (Llinas y Sánchez-García, 2014). Las NPs pueden servir como "balas mágicas", que contienen herbicidas, productos químicos o genes, que se dirigen partes de plantas particulares para liberar su contenido (ISAAA, 2018). Además, detectan patógenos de las plantas, regulan las hormonas vegetales y muchas otras aplicaciones (Cheng *et al.*, 2016). Las NPs presentan propiedades físicas y químicas (mecánicas, ópticas, reactivas, de conductividad eléctrica, etc.) (Foladori y Invernizzi, 2008).

Las NPs se puede combinar con métodos convencionales y constituir alternativas promisorias para la remediación de suelos contaminados con metales pesados (Carrillo-González y González-Chávez, 2009). Los posibles usos y beneficios de las NPs en la agricultura son importantes, incluida la producción de cantidades de alimentos con menor costo, energía y desperdicio (Servin y White, 2016). Las NPs pueden ser utilizadas en la preparación de nuevas formulaciones como insecticidas, fungicidas, repelentes de insectos (Castro-Restrepo, 2017).

2.4. Silicio

El silicio (Si), es un elemento químico metaloide, elemento más abundante en la corteza terrestre (Quero-Gutiérrez, 2009). En las plantas juega un papel protector contra estrés biótico y abiótico (Raya-Pérez y Aguirre-Mancilla, 2012). El Si es una herramienta muy tecnológica para la lucha contra la desertificación y la sostenibilidad de la agricultura intensiva en zonas áridas y semiáridas, así como en cultivos hidropónicos sin suelo (SEPHU, 2009). Además, pueden contribuir significativamente en la obtención de cultivos sanos, ya que existe una relación directa entre la acumulación del Si en la pared celular y la absorción de potasio (Gómez-Camacho *et al.*, 2006). El Si tiene múltiples funciones en la respuesta de la planta a los factores ambientales, los efectos sobre el rendimiento de la planta y los efectos sobre las comunidades y los ecosistemas (Katz, 2019). Además, el Si

disminuye las concentraciones de cadmio al modular el desarrollo de la suberina endodérmica de la raíz en las plantas de trigo y regular la expresión del genes (Wu *et al.*, 2019). Es muy importante señalar que el Si es constituyente de la pared celular. El efecto positivo que tienen las aplicaciones de Si, principalmente al suelo, en el retardo en la velocidad de desarrollo. El rol de Si en las paredes celulares parece ser análogo a la lignina como un elemento de resistencia y mayor rigidez para la sustitución del agua entre las microfibrillas y otros componentes de carbohidratos en las paredes de las células no lignificadas (Castellanos-González *et al.*, 2015).

2.4.1. Aplicación de nanopartículas de silicio en la agricultura

Las aplicaciones de Si en la agricultura, reporta sus beneficios a nivel edáfico y vegetal. En las plantas, los efectos benéficos del Si han sido reportados en una amplia gama de cultivos bajo estrés biótico y abiótico (Katz, 2019). En presencia de Si, las hojas, frutos y tallos, muestran un crecimiento erecto promoviendo una mejor distribución de luz. La senescencia de las hojas se retarda, haciendo que las hojas luzcan más verdes y con mayor área foliar. (Gómez-Camacho, 2006). El Si es asimilable, tanto en forma sólida como líquida, se presentan como una herramienta muy tecnológica para la lucha contra la desertificación y la sostenibilidad de la agricultura intensiva en zonas áridas y semiáridas (SEPHU, 2009).

2.4.2. Nanopartículas de silicio para reducir la acumulación de arsénico o metales pesado

Las NPs de silicio (NPs Si) tienen un efecto similar al silicato sobre los parámetros de crecimiento y estructura celular en plantas de avena y en muchos casos incluso más fuerte (Asgari *et al.*, 2018). Además, pueden usarse como nano pesticidas, nano herbicidas y nano fertilizantes (Rastogi *et al.*, 2019). Sin embargo, las concentraciones altas de NPs Si causan efecto negativos en la fisiología de las plantas (Karimi y Mohsenzadeh, 2016; Le *et al.* 2014). También se ha reportado que

el tamaño de las NPs Si influye y manifiesta diferentes respuestas tanto fisiológicas como genéticas en plantas de *Oryza sativa* (Cui *et al.*, 2017).

Las NPs Si mejoran el crecimiento de las plantas, al aumentar el contenido de clorofila y carotenoides y aumentar la actividad enzimática antioxidante, incluso bajo la toxicidad por plomo (Emamverdian *et al.*, 2020). Por otro lado, las NPs Si tienen un efecto protector contra la fitotoxicidad por cromo (VI) en plántulas de guisantes, reduciendo la acumulación de Cr tanto en raíces como en brotes y el estrés oxidativo (Tripathi *et al.*, 2015). Igualmente reducen el efecto tóxico del As al mejorar los componentes del ciclo ascorbato-glutatión en plantas de maíz (Tripathi *et al.*, 2016). Tanto el ascorbato como el glutatión, se reconocen como el corazón del metabolismo redox, son antioxidantes abundantes y estables con potenciales redox adecuados que actúan juntos en varias vías y se mantienen en una condición comúnmente reducida (Foyer y Noctor, 2011). Los altos niveles de ascorbato que se acumulan en las vacuolas en condiciones de estrés, podría ayudar a reducir los radicales libres (Zechmann, 2020).

Además, las NPs Si tienen la capacidad de aumentar el sistema antioxidante tanto enzimático como no enzimático en plantas de trigo (Tripathi *et al.*, 2017). La reducción de la translocación de arsénico y otros metales pesados, además de que las NPs Si aumentan el sistema de defensa como medida de protección, también se debe a que aumentan la acumulación de ácidos orgánicos en raíces como mecanismo de desintoxicación de metales a través del proceso de quelación (de Sousa *et al.*, 2019).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Establecimiento del experimento

El experimento se estableció en un invernadero de policarbonato con control automático de temperatura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Coahuila, México. Las semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) del híbrido var. "Sun 7705", tipo saladete e indeterminado, planta de buen vigor y amplia adaptación. Buena adaptabilidad en distintas áreas geográficas y medioambientales. Buenos rendimientos de frutos grandes y extra grandes (120 - 140 g).

Se sembraron para germinar en una charola de polietileno con sustrato Peat moss y perlita, después de 30 días, las plántulas fueron trasplantadas. Las plántulas se colocaron en bolsas de polietileno negro de 12 L de capacidad que contenían una mezcla de Peat moss y perlita (1:1, v/v) como sustrato de crecimiento.

3.2. Diseño experimental y nutrición vegetal

Se añadió arseniato As(V) como $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y se mezcló con agua de riego para obtener dosis finales de 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 y 3.2 mg L⁻¹ de As(V) en tambos de 200 L. El cultivo se estableció un experimento factorial en un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar. El factor grande fueron las dosis de As (0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 y 3.2 mg L⁻¹) y el factor pequeño fueron las dosis de NPs Si (0, 250 y 1000 mg L⁻¹). En este estudio se aplicaron un total de 18 tratamientos diferentes, cada tratamiento se replicó doce veces (Tabla 1). La morfología de las NPs Si fueron esféricas, de 10-20 nm de tamaño, área superficial de 160 m² g⁻¹, y una densidad de 0.08-0.1 g cm⁻³ (SkySpring Nanomaterials Inc., USA). Las NPs Si fueron aplicadas vía drench cada tres semanas haciendo un total de seis aplicaciones (10 mL a cada unidad experimental).

La nutrición fue administrada a través de un sistema de riego dirigido usando la solución Steiner (Steiner, 1961), la cual fue aplicada a distintas concentraciones: 25

% en etapa vegetativa, 50 % en floración, 75 % en amarre de frutos, y 100 % en llenado y cosecha de fruto. El pH de la solución nutritiva utilizada fue mantenido entre 6.0 y 6.5.

Tabla 1. Tratamientos experimentales

Tratamientos	As	NPs Si	Planta	Unidad experimental
	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹		
1	0	0	<i>Solanum lycopersicum</i>	1-12
2	0	250	<i>Solanum lycopersicum</i>	13-24
3	0	1000	<i>Solanum lycopersicum</i>	25-36
4	0.2	0	<i>Solanum lycopersicum</i>	37-48
5	0.2	250	<i>Solanum lycopersicum</i>	49-60
6	0.2	1000	<i>Solanum lycopersicum</i>	61-72
7	0.4	0	<i>Solanum lycopersicum</i>	73-84
8	0.4	250	<i>Solanum lycopersicum</i>	85-96
9	0.4	1000	<i>Solanum lycopersicum</i>	97-108
10	0.8	0	<i>Solanum lycopersicum</i>	109-120
11	0.8	250	<i>Solanum lycopersicum</i>	121-132
12	0.8	1000	<i>Solanum lycopersicum</i>	133-144
13	1.6	0	<i>Solanum lycopersicum</i>	145-156
14	1.6	250	<i>Solanum lycopersicum</i>	157-168
15	1.6	1000	<i>Solanum lycopersicum</i>	169-180
16	3.2	0	<i>Solanum lycopersicum</i>	181-192
17	3.2	250	<i>Solanum lycopersicum</i>	193-204
18	3.2	1000	<i>Solanum lycopersicum</i>	205-216

3.3. Labores culturales

Las plantas se condujeron a un solo tallo. Se eliminaron los brotes axilares del tallo principal durante todo el ciclo de cultivo, esta práctica se hizo manualmente y se inició a los 18 días después del trasplante con el objetivo de guiar a la planta de tomate a un solo tallo. Para mantener el tallo de la planta de tomate en una posición erguida y lograr un mejor manejo sanitario se realizó el tutorado a partir de los 12 días después del trasplante (**Figura 1**), el cual consistió en colocar en la parte

superior de la nave hileras de alambres sujetadas sobre la base de un marco metálico existente, los que sirvió de soporte para afianzar los cordones de rafia que se amarraron sobre el tallo de la planta (debajo de la primera hoja), dándole dos a tres vueltas en espiral hacia arriba para fijarlo al alambre señalado a una altura aproximada de 3 metros.



Figura 1. Tutorado de plantas de tomate.

3.4. Muestreo de plantas

A los 150 días después del trasplante las plantas se cosecharon y se tomaron muestras de hoja y raíz, las raíces se separaron y se lavaron con agua de grifo, las muestras que fueron secados en un horno de secado modelo DHG9240A a 80 °C el material seco se molió con mortero Agata hasta obtener un polvo para los análisis de minerales (Ohaus, AdventurePro, Parsippany, NJ, USA), fueron guardadas en bolsas, tal y como se muestra en la **figura 2**.



Figura 2. Muestras de material vegetal molidas en mortero y guardadas en bolsas para su análisis de As.

3.5. Determinación de arsénico

Para determinar el flujo de arsénico a través de la planta, dividimos la planta en tres estratos: estrato 1 (tercer racimo), estrato 2 (quinto racimo) y estrato 3 (séptimo racimo), de cada estrato se tomó muestras de hoja, tallo y frutos.

La concentración de arsénico en raíces, tallos, hojas y frutos se determinó por Fluorescencia de rayos X con tubos miniaturizados en el equipo ThermoScientific Niton XLt3.

El factor de translocación de As en plantas de tomate se calculó dividiendo la concentración de As en brotes (tallo y hojas) sobre la concentración de As de raíces por 100 (Ecuación 1) (Vakulic *et al.*, 2013).

$$FT (\%) = \frac{\text{Concentración de As en brotes}}{\text{Concentración de As en raíz}} \times 100 \quad (1)$$

3.6. Determinación de pigmentos fotosintéticos

Licopeno (Lyc), clorofila a, b, total (Clor) se determinó según el método de Nagata y Yamashita, (1992): Se empleará 0.1 g se adicionará 20 mL de una solución de hexano: acetona (3:2), se centrifugo y del sobrenadante se tomó una alícuota y se

midio en espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific, G10S) a 453, 505, 645 y 663 nm. El contenido se estimará con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Clorofila } a = 0.999 A_{663} - 0.0989 A_{645} \quad (2)$$

$$\text{Clorofila } b = -0.328 A_{663} + 1.777 A_{645} \quad (3)$$

$$\text{Clorofila total} = \text{Clorofila } a + \text{clorofila } b \quad (4)$$

Los resultados se expresaron en mg 100 g⁻¹ de peso fresco.

3.7. Análisis estadístico

Los resultados se analizaron utilizando el paquete estadístico InfoStat. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias entre los tratamientos y la prueba de LSD Fisher para comparar las medias ($p \leq 0.05$).

4. RESULTADO Y DISCUSIÓN

4.1. Acumulación de As en el sustrato de crecimiento

Los resultados de la evaluación de la acumulación de As en el sustrato y del efecto de las NPs Si se muestran en la **figura 3**. Las concentraciones de As en el sustrato aumentaron conforme se aumentó la concentración del arsénico en el agua de riego de la siguiente manera: 15.16 mg kg⁻¹ (0.2 mg L⁻¹), 15.04 mg kg⁻¹ (0.4 mg L⁻¹), 21.42 mg kg⁻¹ (0.8 mg L⁻¹), 36.14 mg kg⁻¹ (1.6 mg L⁻¹) y 70.82 mg kg⁻¹ (3.2 mg L⁻¹). La concentración de As en el agua de riego de 0.8 mg L⁻¹ en adelante provocó concentraciones de As mayores a 22 mg kg⁻¹ en el sustrato, lo que contaminó el sustrato de acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Se puede observar una tendencia de disminución en la acumulación de As cuando se aplican NPs Si, aunque no hubo diferencias estadísticas significativas.

Los altos niveles de concentración de arsénico en agua utilizada para riego representan un problema importante para la agricultura y la salud humana (Mancilla-Villa *et al.*, 2012). El riego de suelos agrícolas con agua contaminada con As provoca el enriquecimiento del suelo con As así como la bioacumulación y toxicidad del As (Ruíz-Huerta *et al.*, 2017).

El efecto positivo de las NPs Si se puede atribuir a que el Si puede inducir la quelación y compartimentación de iones metálicos, los metales tóxicos se coprecipitan junto con la regulación positiva de los antioxidantes (Bhat *et al.*, 2019).

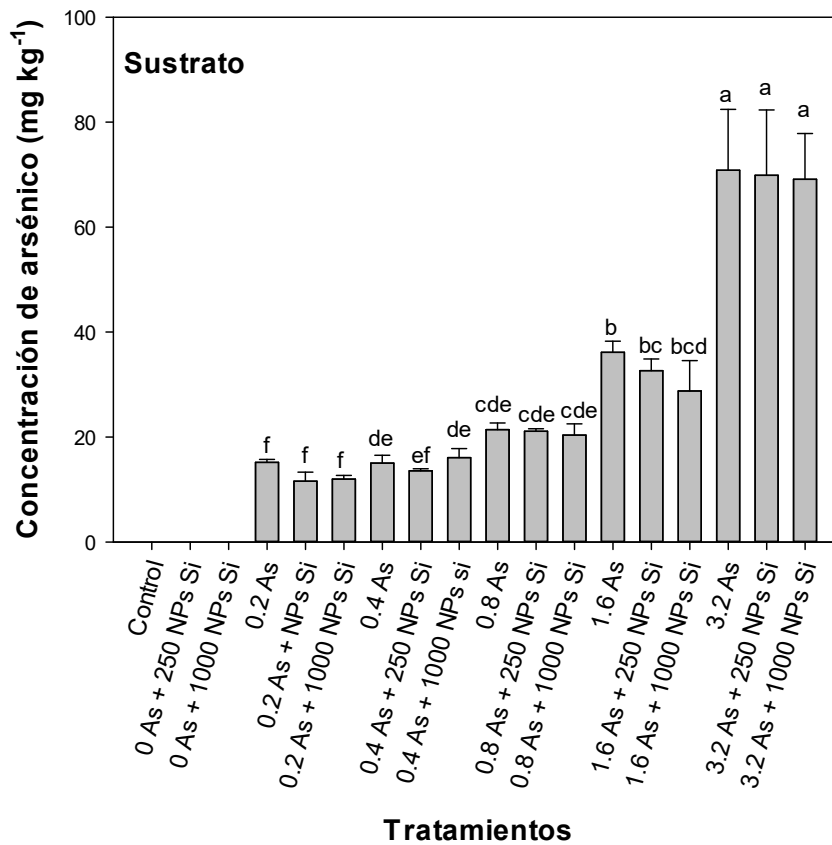


Figura 3. Concentración de As en sustrato y efecto de las NPs Si en la acumulación de As.

4.2. Concentración de As en tejidos vegetales y por estratos

En la **tabla 2** se observa la acumulación de As en las raíces mostrando que cuando se aplican las NPs Si se aumenta la concentración en la raíz. Aunque, solo la dosis de 1.6 mg L⁻¹ de As con aplicación de 250 y 1000 mg L⁻¹ de NPs Si aumentaron significativamente 94.61 % y 175 % respectivamente.

La concentración de As en el estrato 1 de hojas mostro una mayor acumulación por la aplicación de dosis altas de As en el agua de riego que las dosis bajas. Mientras que la concentración de As en el estrato 2, las dosis bajas de As en el agua ya no se acumulaban en ese estrato, solo las dosis más altas 1.6 y 3.2 mg L⁻¹ de As mostraron acumulación. Además, en el estrato 3 se muestra que solo la dosis con

mayor cantidad As en el agua de riego puede llegar hasta este estrato, y también se observó que la aplicación de 250 y 1000 NPs Si mg L⁻¹ disminuyeron 65 y 79.6 % la concentración de As respectivamente.

En cuanto al tallo en el estrato 1 se observó una acumulación a partir de la concentración de As de 0.4 mg L⁻¹, mientras que en el estrato 2 el As solo se acumula por la dosis más alta y en el estrato 3 solo el tratamiento con 3.2 mg L⁻¹ de As y 1000 mg L⁻¹ de NPs Si mostro acumulación de As.

Tabla 2. Concentración de arsénico en plantas de tomate

As	NPs Si	As Raíz	As Hoja E1	As Hoja E2	As Hoja E3	As Tallo E1	As Tallo E2	As Tallo E3
mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg Kg ⁻¹						
0	0	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
0	250	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
0	1000	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
0.2	0	7.39±0.34f	2.73±0.64c-g	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
0.2	250	12.37±3.28c-e	2.75±0.21c-g	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
0.2	1000	14.65±1.72ef	2.77±0.16c-g	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
0.4	0	6.54±0.18f	2.11±1.06efg	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
0.4	250	10.68±3.07ef	2.01±1.01fg	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
0.4	1000	12.01±0.53ef	1.65±0.03g	Nd	Nd	1.06±0.53c	Nd	Nd
0.8	0	14.22±4.61ef	3.83±0.22bc	Nd	Nd	2.70±0.80bc	Nd	Nd
0.8	250	33.67±10.18cde	3.50±0.16b-e	Nd	Nd	1.96±0.17bc	Nd	Nd
0.8	1000	21.31±5.55def	2.38±0.40d-g	Nd	Nd	2.54±0.37bc	Nd	Nd
1.6	0	21.54±4.97def	2.70±0.10c-g	1.95±0.08bc	Nd	2.29±0.15bc	Nd	Nd
1.6	250	41.92±17.68bcd	2.96±0.50c-g	2.29±0.13b	Nd	1.80±0.15bc	Nd	Nd
1.6	1000	59.25±16.63abc	3.09±0.76c-f	1.13±0.57c	Nd	2.63±0.44bc	Nd	Nd
3.2	0	56.19±16.65abc	4.68±0.48ab	3.37±0.38a	3.54±1.02a	3.34±0.70b	1.4±0.7b	Nd
3.2	250	60.02±15.59ab	5.35±0.23a	1.91±1.01bc	2.31±0.44b	4.02±0.24b	1.47±0.6b	Nd
3.2	1000	79.99±13.30a	3.58±0.61bcd	2.44±0.56ab	2.82±0.13b	7.75±2.30a	5.02±1.08a	1.6±0.8
	C.V. (%)	62.80	33.25	75.52	89.62	110.23	216.54	367.54

Nd: No detectado. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas según la prueba de Diferencia Mínima Significativa de Fisher (p≤ 0.05, n=3).

El aumento de As en el agua de riego resulta en un aumento de la concentración de As en la raíz y parte aérea de las plantas (Sandil *et al.*, 2021). Además, las raíces son el órgano de la planta que tiende a acumular los mayores niveles de As (Ruíz-Huerta *et al.*, 2017).

La estrategia desarrollada por las plantas de tomate para tolerar el As es la evitación, limitando el transporte de As a los brotes y aumentando la acumulación de As en el sistema radicular (Carbonell-Barrachina *et al.*, 1997). Los procesos que ocurren en la rizosfera influyen en las concentraciones de As y en su biodisponibilidad porque implican cambios locales en el potencial redox, el pH y el contenido de materia orgánica causando una menor movilidad del As (Punshon *et al.*, 2017).

4.3. Translocación de arsénico en plantas de tomate

La translocación de As de la raíz a la parte del tallo en el estrato 1 mostro que la aplicación de 250 y 1000 mg L⁻¹ de NPs Si disminuyó la translocación 385.9 y 136.53% respectivamente. En el estrato 2, solo la concentración de 3.2 mg L⁻¹ de As logró translocarse y no hubo diferencias estadísticas con las aplicaciones de NPs Si. Mientras que solo la dosis de 3.2 mg L⁻¹ de As y 1000 mg L⁻¹ logro translocarse en el estrato 3 (**Tabla 3**).

El ingreso del As dentro de las plantas de tomate se da por la similitud con el fosforo (P), el As podría ingresar a las células a través de sistemas de absorción de nutrientes como las permeasas de fosfato y las acuagliceroporinas (Garbinski *et al.*, 2019). Se ha demostrado que las plantas de tomate acumulan la mayor parte del As en las raíces y solo una pequeña porción se transloca a las partes aéreas, lo que hace que el riesgo para el consumo humano sea menor (Ghorbani *et al.*, 2021). Incluso con independencia de los mecanismos de acumulación y desintoxicación del As, la mayor parte del As en los tejidos es probablemente fisiológicamente inerte (Santos *et al.*, 2010).

Tabla 3. Factor de translocación en tallo de tomate

Tratamientos	As mg L ⁻¹	NPs Si mg L ⁻¹	Factor de translocación (%)		
			E1	E2	E3
1	0	0	Nd	Nd	Nd
2	0	250	Nd	Nd	Nd
3	0	1000	Nd	Nd	Nd
4	0.2	0	Nd	Nd	Nd
5	0.2	250	Nd	Nd	Nd
6	0.2	1000	Nd	Nd	Nd
7	0.4	0	Nd	Nd	Nd
8	0.4	250	Nd	Nd	Nd
9	0.4	1000	8.46±4.23bc	Nd	Nd
10	0.8	0	26.86±11.75a	Nd	Nd
11	0.8	250	6.96±1.94bc	Nd	Nd
12	0.8	1000	12.89±2.05b	Nd	Nd
13	1.6	0	11.4±1.64bc	Nd	Nd
14	1.6	250	8.49±5.45bc	Nd	Nd
15	1.6	1000	5±1.05c	Nd	Nd
16	3.2	0	6.83±1.96bc	3.01±1.04b	Nd
17	3.2	250	8.12±2.75bc	3.69±1.39ab	Nd
18	3.2	1000	10.75±5.75bc	6.69±2.31a	2.04±1.09

Nd: No detectado. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas según la prueba de Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$, $n=3$).

A diferencia de la acumulación de As en tallo, en hojas se puede observar una mayor acumulación de As (**Tabla 4**). En el estrato 1 se puede observar una tendencia de disminución en la translocación de As cuando se aplicó NPs Si; sin embargo, solo la aplicación de 250 mg L⁻¹ de NPs Si con 0.8 mg L⁻¹ de As logro reducir la traslocación en 269.34 %. Mientras que en el estrato 2, la aplicación de 1000 mg L⁻¹ de NPs Si redujo la concentración de As en un 320.7 % cuando estuvieron expuestas a 1.6 mg L⁻¹ de As en el agua de riego. Por otro lado, solo la concentración de 3.2 mg L⁻¹ de As, se translocó en el estrato 3, y la aplicación de 250 y 1000 mg L⁻¹ de NPs Si lograron reducir 41 y 46.55 % respectivamente. La translocación de As dentro de las plantas de tomate parece estar potenciada a altos niveles de As, un proceso que parece ocurrir a medida que la absorción de P disminuye como resultado de la contaminación (Gomes *et al.*, 2014). Además, se

ha demostrado que la absorción de As por parte de las plantas de tomate a través del sistema radicular resulta en el siguiente orden de acumulación: Asraíz > Ashoja > Astallo > Asfruto (Stazi *et al.*, 2018).

Tabla 4. Factor de translocación de hojas de tomate.

Tratamientos	As mg L ⁻¹	NPs Si mg L ⁻¹	Factor de traslocación (%)		
			E1	E2	E3
1	0	0	Nd	Nd	Nd
2	0	250	Nd	Nd	Nd
3	0	1000	Nd	Nd	Nd
4	0.2	0	36.3±6.83a	Nd	Nd
5	0.2	250	28.34±11.62abc	Nd	Nd
6	0.2	1000	19.32±1.74a-d	Nd	Nd
7	0.4	0	31.56±15.81abc	Nd	Nd
8	0.4	250	26.56±13.49a-d	Nd	Nd
9	0.4	1000	13.83±0.80bcd	Nd	Nd
10	0.8	0	31.89±7.98ab	Nd	Nd
11	0.8	250	11.84±2.38bcd	Nd	Nd
12	0.8	1000	12.21±2.50bcd	Nd	Nd
13	1.6	0	13.58±2.28bcd	9.85±1.85a	Nd
14	1.6	250	16.16±8.67b-d	10.39±6.34a	Nd
15	1.6	1000	6.31±2.13cd	2.96±2.03bc	Nd
16	3.2	0	9.87±3.12de	7.08±2.23ab	7.84±3.92a
17	3.2	250	10.55±3.19bcd	2.55±1.28c	4.62±1.65b
18	3.2	1000	4.92±1.35d	3.27±1.03bc	3.65±0.41b

Nd: No detectado. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas según la prueba de Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$, $n=3$).

Se ha reportado la disminución de las concentraciones de As en el tallo, la hoja y la cáscara del arroz integral tras la adición de Si (Li *et al.*, 2018). Además, la aplicación de Si a las plantas de tomate ha provocado una disminución de la acumulación de As en el fruto y en las partes aéreas (Marmioli *et al.*, 2014). Por otra parte se ha reportado, que la aplicación de NPs Si disminuyen la translocación de cadmio en un 60.8 % en plantas de arroz (Chen *et al.*, 2018).

4.4. Efecto del arsénico y las NPs Si en los pigmentos fotosintéticos

En la **figura 4** se muestran las clorofilas y se puede observar que de todas las clorofilas (a, b y total) fueron más altas que el control, en todas las dosis de As sin efecto de NPs.

La clorofila a aumentó hasta un 34.55 % con 3.2 mg L⁻¹ de As, mientras que la clorofila b aumentó hasta un 63.9 % con 0.8 mg L⁻¹ de As.

La interacción As y NPs Si, mostraron que la clorofila b, aumento significativamente a 3.2 mg L⁻¹ de As y 250 mg L⁻¹ de NPs Si en comparación con la dosis más alta de As.

El pigmento fotosintético más importante del cloroplasto está compuesto por dos tipos de clorofilas, la clorofila a y la clorofila b, que se diferencian químicamente entre sí y absorben luz de diferentes longitudes de onda para realizar la fotosíntesis (Azizur- Rahman *et al.*, 2007). Por otro lado se ha reportado una alta tolerancia al As en algunas plantas como Taray (*Tamaris gallica*), sin mostrar una variación significativa en la síntesis de clorofila (Sghaier *et al.*, 2015). Incluso la tasa de transporte de electrones de los fotosistemas (PSII y PSI) de plántulas de arroz expuestas a concentraciones de As no muestran efectos significativos (Song *et al.*, 2013). El As expuesto en plantas de *Vitis vinífera* primero reduce la fotosíntesis y con el paso del tiempo se estimula (Songy *et al.*, 2019).

En cuanto al efecto de las NPs Si, en ausencia de As, solo la dosis de 1000 mg L⁻¹ de NPs Si mostró un efecto significativo sobre el contenido de clorofila, que representó hasta un 76 % en clorofila total, 48.5 % clorofila b y 35.5 % clorofila a. En este estudio, todas las clorofilas fueron significativamente más altas que el control en cualquier dosis de As y NPs Si, lo que podría indicar que las NPs de Si pueden mantener o incrementar, como en nuestro caso, el contenido de clorofilas en presencia de estrés por As.

Los nanomateriales tienen el potencial de permitir propiedades funcionales nuevas y mejoradas en orgánulos y organismos fotosintéticos para mejorar el uso de la energía solar y la detección bioquímica (Giraldo *et al.*, 2014). En cuanto al silicio, el contenido de clorofila puede aumentar, lo que sugiere que se abren más centros

de reacción de PSII, lo que podría permitir que se use más energía de excitación para el transporte de electrones (Zhang *et al.*, 2018). Además, se ha reportado bajo exposición de cromo que las Si NPs aumentan el contenido de clorofila en plantas de *Pisum sativum* (Tripathi *et al.*, 2015).

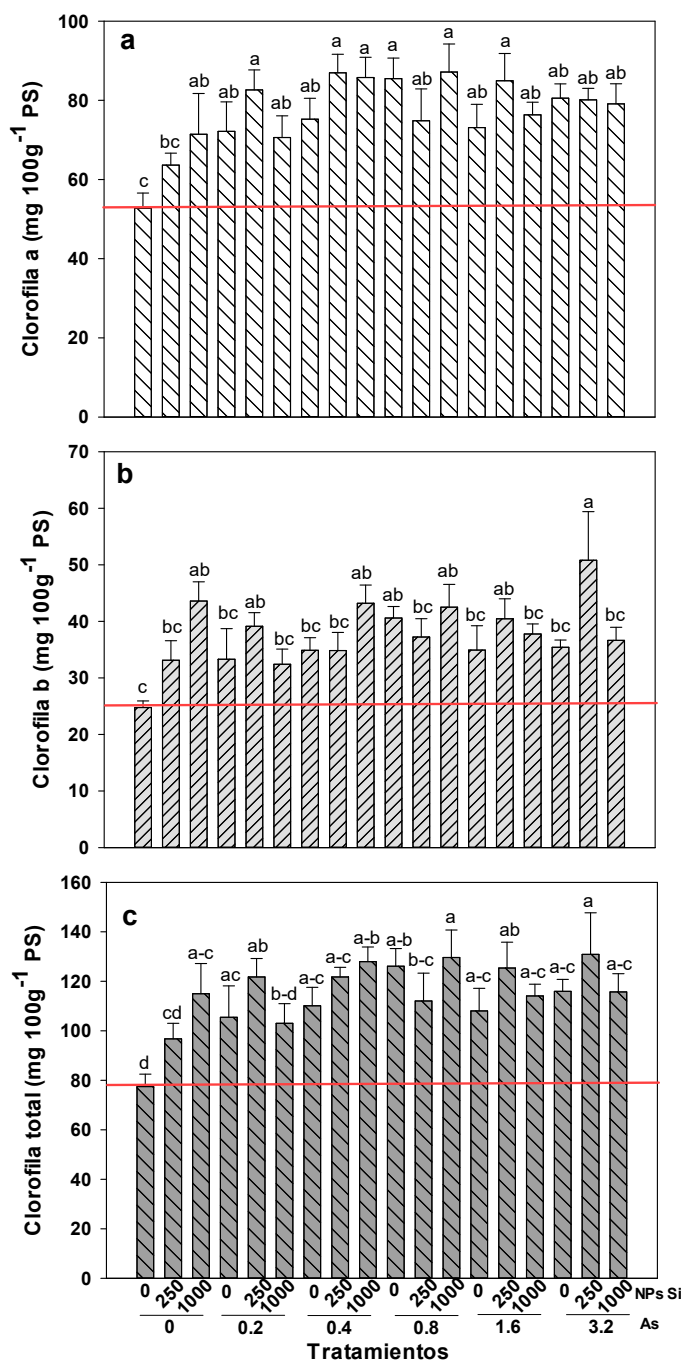


Figura 4. Contenido de clorofilas en plantas de tomate expuestas a As y NPs si

5. CONCLUSIONES

Las concentraciones de As en el agua de riego aumentan la concentración de As en el sustrato. Mientras que en la planta, la acumulación de As es mayor en raíces que en hojas y tallos. A mayor concentración de As en el agua de riego se genera una mayor translocación en los estratos superiores de la planta de tomate, lo que demuestra una relación directa entre la concentración de As en el agua de riego y la traslocación de este metaloide hacia la planta.

La aplicación de las NPs Si tienen un efecto positivo al reducir la translocación de As, acumulando el As en la raíces y limitando su transporte a los brotes

En este estudio el As no impacto negativamente en el contenido de clorofilas, y al aumentar las concentraciones de As en interacción con las NPs Si las clorofilas incrementan.

6. LITERATURA CITADA

- Ali, W.S., Fang-Jie Zhao S.V., & Maathuis F.J.M. (2009). Arsenite Transport in Plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 66(14): 2329–39.
- Asgari, F., Ahmad, M., Parissa, J., & Farzaneh, N. (2018). Effects of Silicon Nanoparticles on Molecular, Chemical, Structural and Ultrastructural Characteristics of Oat (*Avena Sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 127: 152–60.
- Azizur-Rahman, M., Hasegawa, H., Rahman, M.M., Islam, M.N., Miah, M.A., & Tasmien, A. (2007). Effect of Arsenic on Photosynthesis, Growth and Yield of Five Widely Cultivated Rice (*Oryza Sativa* L.) Varieties in Bangladesh. *Chemosphere*, 67(6): 1072–79.
- Beesley, L., Marmiroli, M., Pagano, L., Pignoni, V., Fellet, G., Fresno, T., Vamerli, T., Bandiera, M., & Marmiroli, N. (2013). Biochar Addition to an Arsenic Contaminated Soil Increases Arsenic Concentrations in the Pore Water but Reduces Uptake to Tomato Plants (*Solanum Lycopersicum* L.). *Science of the Total Environment*, 454–455: 598–603.
- Bhat, J.A., Shivaraj, S.M., Singh, P., Navadagi, D.B., Tripathi, D.K., Dash, P.K., Solanke A.U., Sonah, H., & Deshmukh, R. (2019). Role of Silicon in Mitigation of Heavy Metal Stresses in Crop Plants. *Plants*, 8(3): 71.
- Bonilla-Barrientos, O., Lobato-Ortiz, R., García-Zavala, J.J., Cruz-Izquierdo, S., Reyes-López, D., Hernández-Leal, E., & Hernández-Bautista, A. (2014). Diversidad agronómica y morfológica de tomates arriñonados y tipo pimiento de uso local en Puebla y Oaxaca, México. *Revista fitotecnia mexicana*, 37(2), 129-139.
- Buzea, C., Pacheco, II, & Robbie, K. (2007). Nanomateriales y nanopartículas: fuentes y toxicidad. *Biointerfases*, 2 (4), 17-71.
- Carbonell-Barrachina, A.A., Burló, F., Burgos-Hernández, A., López, E., & Mataix, J. (1997). The Influence of Arsenite Concentration on Arsenic Accumulation in Tomato and Bean Plants. *Scientia Horticulturae*, 71(3–4): 167–76.

- Carrillo-González, R., & González-Chávez, M.C. (2009) La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 2(2).
- Cao, X., Ma, L.Q., & Tu C. (2004). Antioxidative responses to arsenic in the arsenic-hyperaccumulator Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.). *Environmental Pollution*, 2004;128(3):317-25
- Castellanos-González, L., Mello-Prado, R., Campos, S., & Naudi, C. 2015. El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*, 36: 16-24.
- Castellanos, J. Z. (2009). *Manual de producción de tomate en invernadero*. (No. 635.64283 M3).
- Castro-Restrepo, D. (2017). Nanotecnología en la agricultura. *Bionatura*. 2(3): 48.
- Covarrubias, S.A., & Peña-Cabriales, J.J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. P.8-9.
- Cheng, H.N., Klasson, K.T., Asakura, T., & Wu, Q. (2016). *Nanotechnology in Agriculture*. 2:1-2.
- Chen, R., Zhang, C., Zhao, Y., Huang, Y., & Liu, Z. (2018). Foliar Application with Nano-Silicon Reduced Cadmium Accumulation in Grains by Inhibiting Cadmium Translocation in Rice Plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(3): 2361–68.
- Cui, J., Liu, T., Li, F., Yi, J., Liu, C., & Yu, H. (2017). Silica Nanoparticles Alleviate Cadmium Toxicity in Rice Cells: Mechanisms and Size Effects. *Environmental Pollution*, 228: 363–69.
- Cuizano, N.A., Reyes, U.F., Dominguez, S.L., Bertha, P., & Navarro, A.E. (2010). Relevancia del PH en la adsorción de iones metálicos mediante algas pardas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76(2), 123-130.
- de Sousa, A., Saleh, A.M., Habeeb, T.H., Hassan, Y.M., Zrieq, R., Wadaan, M.A.M., Hozzein, W.N., Selim, S., Matos, M., & AbdElgawad, H. (2019). “Silicon Dioxide Nanoparticles Ameliorate the Phytotoxic Hazards of Aluminum in Maize Grown on Acidic Soil.” *Science of the Total Environment*, 693: 133636.

- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., Xie, Y., Zheng, X., & Wang, Y. (2020). Silicon Dioxide Nanoparticles Improve Plant Growth by Enhancing Antioxidant Enzyme Capacity in Bamboo (*Pleioblastus Pygmaeus*) under Lead Toxicity. *Trees - Structure and Function*, 34(2): 469–81.
- Eufic (2001). The Origins of Tomatoes. En línea: <https://www.eufic.org/en/healthy-living/article/the-origins-of-tomatoes>. Revisado: 28/03/22
- FIRA (2016). Panorama agroalimentario tomate rojo. Pp. 2-5. En línea: <https://www.gob.mx/fira/documentos/panorama-agroalimentario>. Revisado: 28/03/22
- Flora, S.J.S. (2015). *Arsenic: Chemistry, Occurrence and Expusure*. Handbook of Arsenic Toxicology. Pp. 1-49.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2011). Ascorbate and Glutathione: The Heart of the Redox Hub. *Plant Physiology*. 155: 2–18.
- Garbinski, L. D., Barry P. R., & Jian, C. (2019). Pathways of Arsenic Uptake and Efflux. *Environment International*, 126: 585–97.
- García-Martí, M., Piñero, M.C., García-Sánchez, F., Mestre, T.C., López-Delacalle, M., Martínez, V., & Rivero, R.M. (2019). Amelioration of the Oxidative Stress Generated by Simple or Combined Abiotic Stress through the K⁺ and Ca²⁺ Supplementation in Tomato Plants. *Antioxidants*, 8(4): 81.
- Ghorbani, A., Pishkar, L., Roodbari, N., Pehlivan, N., & Wu, C. (2021). Nitric Oxide Could Allay Arsenic Phytotoxicity in Tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) by Modulating Photosynthetic Pigments, Phytochelatin Metabolism, Molecular Redox Status and Arsenic Sequestration. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167: 337–48.
- Giraldo J.P., Landry, M.P., Faltermeier, S.M., McNicholas, T.P., Iverson, N.M., Boghossian, A.A., Reuel, N.F., Hilmer A.J., Sen, F., Brew J.A., & Strano, M.S. (2014). Plant Nanobionics Approach to Augment Photosynthesis and Biochemical Sensing. *Nature Materials*, 13(4): 400–408.
- Gomes, M.P., Soares, A.M., & Garcia, Q.S. (2014). Phosphorous and Sulfur Nutrition Modulate Antioxidant Defenses in *Myracrodruom Urundeuva* Plants Exposed to Arsenic. *Journal of Hazardous Materials*, 276: 97–104.

- Foladori, G., & Invernizzi, N. (2008). Nanotecnologías en la Alimentación y Agricultura. Universidad de la Republica de Montevideo. Uruguay. p. 16.
- Holwerda, H.T., (2006). Guía de manejo nutrición vegetal de especialidad tomate. CropKit. The Worldwide Business Formula. Pp. 84.
- ISAAA (2018). Nanotechnology in Agriculture. Pp 39.
- Joseph, T. & Morrison, M. (2006). Nanotechnology in Agriculture and Food. European Nanotechnology Gateway. Pp.14.
- Pérez, J.C., & Mancilla, C.L.A. (2012). El Papel del Silicio en los Organismos y Ecosistemas. *Conciencia Tecnológica*, 43: 42-46.
- Juárez-Maldonado, A., Rosales-Velázquez, J. L., Ortega-Ortiz, H., Cabrera-de la Fuente, M., Ramírez H., & Benavides-Mendoza, A. (2013). Acumulación de nanopartículas de plata y su efecto en la capacidad antioxidante en *Allium cepa* L. *Phyton*, 82 (1): 91-97.
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortiz, H., Morales-Díaz, A.B., González-Morales, S., Morelos-Moreno, Á., Cabrera-De la Fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Cadenas-Pliego, G., & Benavides-Mendoza, A., (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Science*, 20:162
- Karimi, J., & Mohsenzadeh, S. (2016). Effects of Silicon Oxide Nanoparticles on Growth and Physiology of Wheat Seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, 63(1): 119–23.
- Katz, O. (2019). Silicon Content Is a Plant Functional Trait: Implications in a Changing World. *Flora*, 254: 88–94.
- Knapp, S. & Peralta E.I. (2006). The tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Its botanical relatives. *The Tomato Genome*, 7:21.
- Karn, B., Kuiken, T., & Otto, M. (2009). Nanotechnology and in situ remediation: a review of the benefits and potential risks. *Environmental health perspectives*, 117(12), 1813-1831.
- Le, V.N., Rui, Y., Gui, X., Li, X., Liu, S., & Han, Y. (2014). Uptake, Transport, Distribution and Bio-Effects of SiO₂ Nanoparticles in Bt-Transgenic Cotton. *Journal of Nanobiotechnology*, 12(1): 1-15.

- Li, G, Zheng, M., Tang, J., Shim, H., & Cai, C. (2018). Effect of Silicon on Arsenic Concentration and Speciation in Different Rice Tissues. *Pedosphere*, 28(3): 511–20.
- Llinas, M. C., & Sánchez-García, D. (2014). Nanopartículas de sílice: preparación y aplicaciones en biomedicina. *Afinidad: Revista de Química Teórica y Aplicada*, 71: 20-31.
- Londoño-Franco, L.F, Londoño-Muñoz, P.R., & Muñoz-García, F.G. (2016). los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153.
- Mandal, P. 2017. An insight of environmental contamination of arsenic on animal health. *Emerging Contaminant*, 3, 17-22.
- McClintock, T. R., Chen, Y., Bundschuh, J., Oliver, J. T., Navoni, J., Olmos, V., & Parvez, F. (2012). Arsenic exposure in Latin America: Biomarkers, risk assessments and related health effects. *Science of the Total Environment*, 429: 76-91.
- Mahmoud, L.M., Dutt, M., Shalan, A.M., El-Kady, M.E., El-Boray, M.S., Shabana, Y.M., & Grosser, J.W. (2020). Silicon Nanoparticles Mitigate Oxidative Stress of in Vitro-Derived Banana (*Musa Acuminata* 'Grand Nain') under Simulated Water Deficit or Salinity Stress. *South African Journal of Botany*, 132: 155–63.
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega Escobar, h. m., Ramírez Ayala, C., Uscanga Mortera, E., Ramos Bello, r., & Reyes-Ortigoza, A. I. (2012). Metales Pesados Totales y Arsénico En El Agua Para Riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 28(1): 39–48.
- Mandal, U., Singh, P., Kundu, A.K., Chatterjee, D., Nriagu, J., & Bhowmick, S., (2019). Arsenic retention in cooked rice: Effects of rice type, cooking water, and indigenous cooking methods in West Bengal, India. *Science of the Total Environment*, 648, 720–727.
- Marmioli, M., Pighi, V., Savo-Sardaro, M. L., & Marmioli, N. (2014). The Effect of Silicon on the Uptake and Translocation of Arsenic in Tomato (*Solanum Lycopersicum* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 99: 9–17.

- Miteva, E., Hristova, D., Nenova, V. & Maneva, S. (2005). Arsenic as a Factor Affecting Virus Infection in Tomato Plants: Changes in Plant Growth, Peroxidase Activity and Chloroplast Pigments. *Scientia Horticulturae*, 105(3): 343–58.
- Miteva, E. (2002). Accumulations in Soil Science and Plant Analysis. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 33: 1917–26.
- Moghanloo, M., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., Nejad Satari, T., & Oraghi Ardebili, Z. (2019). Seed priming with cold plasma and supplementation of culture medium with silicon nanoparticle modified growth, physiology, and anatomy in *Astragalus fridae* as an endangered species. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41 (4), 54.
- Mohammed, A.S., Kapri, A., & Goel, R. (2011). Heavy Metal Pollution: Source, Impact, and Remedies. In: Khan, M., Zaidi, A., Goel, R., Musarrat, J. (eds) *Bio-management of Metal-Contaminated Soils. Environmental Pollution*, vol 20. Springer, Dordrecht. vol 20. Springer, Dordrecht. Pp. 1-28.
- Mukhopadhyay S.S. (2014). Nanotechnology in agriculture: prospects and constraints. *Nanotechnology Science Applied*, 7:63-71.
- Nagata, M., & Yamashita, I. (1992) Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *Journal Japan Food Science Technology*, 39: 925–928.
- Nicola, S., Tibaldi, G. & Fontana. E. (2009). Tomato Production Systems and Their Application to the Tropics. *Acta Horticulturae*, 821: 27–33.
- Parisi, C., Vigani, M., & Rodríguez-Cerezo, E. (2015). Agricultural nanotechnologies: what are the current possibilities?. *Nano Today*, 10(2), 124-127.
- Prakash, J., Ho, P., Huang, Y., Sun, A., Chen, C., & Chen, C. (2019). The Removal of Arsenic from Arsenic-Bearing Groundwater in In-Situ and Ex-Situ Environment Using Novel Natural Magnetic Rock Material and Synthesized Magnetic Material as Adsorbent: A Comparative. *Environmental Pollution*, 253: 768–78.

- Prieto-Méndez, J., González-Ramírez, C., Román-Gutiérrez, A., & Prieto-García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (1): 29-44.
- Punshon, T., Jackson, B.P., Meharg, A.A., Warczack, T., Scheckel, K., & Guerinot, M.L. (2017). Understanding Arsenic Dynamics in Agronomic Systems to Predict and Prevent Uptake by Crop Plants. *Science of the Total Environment*, 581–582: 209–20.
- Quero, J.P.C., Zorrilla, V.M., Morales, F.S., & Rodríguez, P.M. (2017). Determinación de la contaminación por metales pesados en suelos aledaños a la empresa electroquímica de Sagua. *Centro Azúcar*, 44 (3): 53-62.
- Ramírez, H., López-Fabian, A., Peña-Cervantes, E., Zavala-Ramírez, M.G. & Zermeño-González, A. (2018). P-Ca, AG4/7 Y 6-BAP En La fisiología y nutrición de Tomate En Invernadero. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 9 (4):747-59.
- Rangel, M.E.A, Montañez-Hernández, L. E., Luévanos-Escareño, M.P., & Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118.
- Rastogi, A., Tripathi, D.K., Yadav, S., Chauhan, D.K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., El-Sheery, N.I., & Brestic, M. (2019). Application of Silicon Nanoparticles in Agriculture. *3 Biotech*, 9(3)
- Rai, M. & Ingle, A. (2012). Role of nanotechnology in agricultura with special reference to management of insect pests. 94(2):287.
- Ramos-Villegas, J.L., & Hernández-Viveros J.A. (2014). Asimilación de arsénico y metales pesados en maíz cultivado en suelos cercanos a jales. Universidad Autonoma Metropolitana. Mexico. Pp. 58.
- Reyes, Y.C., Vergara, I., Torres, O.E., Díaz, M., & Edgar E.G. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Heavy metals contamination: *implications for health and food safety*, 16(2): 66.

- Ruíz-Huerta, E.A., de la Garza-Varela, A., Gómez-Bernal, J.M., Castillo, F., Avalos-Borja, M., SenGupta, B., & Martínez-Villegas, N. (2017). Arsenic Contamination in Irrigation Water, Agricultural Soil and Maize Crop from an Abandoned Smelter Site in Matehuala, Mexico. *Journal of Hazardous Materials*, 339: 330–39.
- Saavedra, T. M., Figueroa, G. A., & Cauhi, J.G.D. (2017). Origin and evolution of tomato production *Lycopersicon esculentum* in México. *Ciencia Rural*, 47 (3).
- SAGARPA (2010). Jitomate. Monografías de cultivos. Pp. 10. En línea: <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/Monografias/Jitomate.pdf>. Revisado: 8/01/2022
- SAGARPA (2017). Jitomate Mexicano. Planeacion Agricola Nacional, 2017-2030. Pp. 14. En línea: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>. Revisado: 8/02/22
- Sahebi, M., Hanafi, MM & Azizi, P. (2016). Application of silicon in plant tissue culture. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 52, 226–232.
- Salehi, B., Sharifi-Rad, R., Sharopov, F., Namiesnik, J., Roointan, A., Kamle, M., Kumar, P., Martins, N., & Sharifi-Rad, J. (2019). Beneficial Effects and Potential Risks of Tomato Consumption for Human Health: An Overview. *Nutrition*, 62: 201–8.
- Sandil, S., Óvári, M., Dobosy, P., Vetési, V., Endrédi, A., Takács, A., Füzy, A., & Záray, G. (2021). Effect of Arsenic-Contaminated Irrigation Water on Growth and Elemental Composition of Tomato and Cabbage Cultivated in Three Different Soils, and Related Health Risk Assessment. *Environmental Research*, 197: 111098.
- Sandoval-Pinto, M.E. (2011). Arsénico propiedades y efectos. Tesis Licenciatura en Biología. Universidad de Guadalajara. Pp. 84.
- Santos, J. A.G., Gonzaga M.I.S, & Lena, Q.M. (2010). Optimum P Levels for Arsenic Removal from Contaminated Groundwater by *Pteris Vittata* L. of Different Ages. *Journal of Hazardous Materials*, 180(1–3): 662–67.

- SEPHU (2009). El silicio (si) como elemento fertilizante y protector de enfermedades y plagas. *Sociedad Española de Productos Húmicos*, 28: 1-5. En línea: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/81972/028---15.05.09---El-Silicio-como-fertilizante-y-fungicida.pdf. Revisado: 9/02/2022
- Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J.C., Bindraban, P., & Dimkpa, C., (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17, 1–21.
- Sghaier, D.B., Duarte, B., Bankaji, I., Caçador, I., & Sleimi, N. (2015). “Growth, Chlorophyll Fluorescence and Mineral Nutrition in the Halophyte *Tamarix Gallica* Cultivated in Combined Stress Conditions: Arsenic and NaCl. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 149: 204–14.
- Sharma, I. (2012). Arsenic Induced Oxidative Stress in Plants. *Biologia*, 67(3): 447–53.
- Song, R., Zhao, C.Y., Liu, J., Zhang, J., Du, Y.X., Li, J.Z., Sun, H.Z., Zhao, H.B., & Zhao, Q.Z. (2013). Effect of Sulphate Nutrition on Arsenic Translocation and Photosynthesis of Rice Seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(11): 3237–43.
- Songy, A., Vallet, J., Gantet, M., Boos, A., Ronot, P., Tarnus, C., Clément, C., Larignon, P., Goddard, M.L., & Fontaine, F. (2019). Sodium Arsenite Effect on *Vitis Vinifera* L. Physiology. *Journal of Plant Physiology*, 238: 72–79.
- Stazi, S.R., Cassaniti, C., Marabottini, R., Giuffrida, F., & Leonardi, C. (2018). “Influence of Organic Management on As Bioavailability: Soil Quality and Tomato As Uptake.” *Chemosphere*, 211: 352–59.
- Statista, 2020. Volumen de producción de tomate rojo en México de 2009-2020. Statista Research Departament. En línea: <https://es.statista.com/estadisticas/645652/volumen-produccion-tomate-rojo-mexico/#:~:text=En%202020%2C%20el%20volumen%20de,lo%20reportado%20el%20a%C3%B1o%20anterior>. Consultado 17/05/2022.

- Steiner, A.A. (1961) A Universal Method for Preparing Nutrient Solutions of a Certain Desired Composition. *Plant Soil*, 15;134–154.
- Torres, N.A.R., López, J.I.G., Ricardo, H.L.S., Reyes, I.V., & Arguello, B.M. (2016). Efecto de nanopartículas metálicas y derivadas del carbón en la fisiología de semillas. *Agronano tecnología*. pp: 42-60
- Tripathi, D.K., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K., & Dubey, N.K. (2015). “Silicon Nanoparticles (SiNp) Alleviate Chromium (VI) Phytotoxicity in *Pisum Sativum* (L.) Seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96: 189–98.
- Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K., & Dubey, N.K. (2016). “Silicon Nanoparticles More Efficiently Alleviate Arsenate Toxicity than Silicon in Maize Cultivar and Hybrid Differing in Arsenate Tolerance.” *Frontiers in Environmental Science*, 4:46
- Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Dubey, N.K., & Chauhan, D.K. (2017). Silicon Nanoparticles More Effectively Alleviated UV-B Stress than Silicon in Wheat (*Triticum Aestivum*) Seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110: 70–81.
- Vaculík, M., Jurkovič, L., Matejkovič, P., Molnárová, M., Lux, A. (2013). Potential risk of arsenic and antimony accumulation by medicinal plants naturally growing on old mining sites. *Water Air Soil Pollution*, 224: 1546.
- Wu, J., Mock, H.P., Giehl, R.F.H., Pitann, B., & Mühling, K.H. (2019). Silicon Decreases Cadmium Concentrations by Modulating Root Endodermal Suberin Development in Wheat Plants. *Journal of Hazardous Materials*, 364: 581–90.
- Xie, B.X., Wei, J.J., Zhang, Y.T., Song, S.W., Su, W., Sun, G.W, Hao, Y.W., & Liu, H.C. (2019). Supplemental Blue and Red Light Promote Lycopene Synthesis in Tomato Fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3): 590–98.
- Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., & Bi, J. (2018). A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 642: 690-700.

- Yoshida, W.S S. (2013). Concentration of Arsenic in Soil Samples Collected around the Monazite Processing Facility , Thailand. *Journal of Radioanalytical and nuclear chemistry*, 297: 343–46.
- Zechmann, B. (2020). Subcellular Roles of Glutathione in Mediating Plant Defense during Biotic Stress. *Plants*, 9: 1067.
- Zhang, Y., Shi, Y.,Gong, H.J., Zhao, H.L., Li, H.L., Hu, Y.H., Hu, Y.H., & Wang, Y.C. (2018). Beneficial Effects of Silicon on Photosynthesis of Tomato Seedlings under Water Stress. *Journal of Integrative Agriculture* 17(10): 2151–59.
- Zhao, F. J., Ma, J. F., Meharg, A.A. & McGrath,. S. (2009). Arsenic Uptake and Metabolism in Plants. *New Phytologist*, 181(4): 777–94.
- Zhao, F.J., McGrath, S., & Meharg, A.A. (2010). Arsenic as a Food Chain Contaminant: Mechanisms of Plant Uptake and Metabolism and Mitigation Strategies. *Annual Review of Plant Biology*, 61(1): 535–59.