

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Inducción de Tolerancia a Arsénico con la Aplicación de Nanopartículas de Silicio en
Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Por:

JANETH GARCÍA MENDOZA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Inducción de Tolerancia a Arsénico con la Aplicación de Nanopartículas de Silicio en
Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Por:

JANETH GARCÍA MENDOZA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal



M. C. Magín González Moscoso
Coasesor



Dr. Alonso Méndez López
Coasesor



Dr. Gabriel Gillegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2019



AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por permitirme tener tan buena experiencia dentro de mi Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por convertirme en una profesionista en lo que tanto me apasiona.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado, por la invitación y confianza por integrarme en uno de sus proyectos, agradezco el tiempo que me dedicó para la realización de este trabajo de investigación y por compartirme sus conocimientos y sobre todo por la paciencia que me demostró en mi trayecto.

M. C. Magín González Moscoso, por su gran apoyo que me dio durante la realización de mi trabajo tanto teórico como práctico, por su motivación y por toda la colaboración brindada durante la elaboración de este proyecto.

A la compañera Victoria Vásquez García, por su aportación en la parte práctica del proyecto y por su alegría que la caracteriza.

A un amigo, al Ing. Daniel Roblero González por su amistad, por sus consejos y por el apoyo que me dio durante etapa universitaria.

A los doctores Ismael Cabral Cordero, Jesús Valdés Reyna, José Ángel Villarreal Quintanilla, Miguel Ángel Pérez Rodríguez y Silvia Yudith Martínez Amador, a las maestras Laura María González, María Teresa Ruíz de León, Sofía Comparan Sánchez por sus conocimientos teóricos brindados y experiencias compartidas, por los consejos que me dieron en las diferentes circunstancias vividas en mi Alma Terra Mater. Además agradezco a todo el personal del Departamento de Botánica por hacerme sentir como en casa y a todos los maestros que me impartieron las clases en todas las materias que cursé durante este proceso.

DEDICATORIA

Gracias a Dios y al esfuerzo de mis padres Leonides García Mendoza y Cristina Mendoza Reyes, no me alcanzan las palabras para expresar el orgullo y lo bien que me siento por tener una familia tan asombrosa no solo por acompañarme a culminar mi estudio universitario sino también por todo lo que me han apoyado desde que llegue a este mundo. No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a su esfuerzo, a su amor, a su bondad y apoyo, lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos. Son los mejores papás que Dios me pudo enviar, los amo.

Éste momento tan especial se lo dedico y agradezco también a mis hermanos: Ana García Mendoza, Érica García Mendoza y Alexis García Mendoza, porque ellos con cada palabra de aliento me impulsaron a salir adelante y más en los momentos difíciles que pasé dentro y fuera de las aulas, que con sus consejos pude tomar mejores decisiones de la vida y por acompañarme en este arduo camino. Hermana mayor (Ana) gracias por cuidar de mí, por escucharme y por tu apoyo infinito.

A mi segunda mamá, Ignacia Reyes García quien me ha acompañado en cada logro y tropiezos que he tenido a lo largo de mi camino de la vida, quien con sus consejos y sus historias vividas me supo guiar en esta travesía tan complicada. Abuela te admiro y te amo con toda el alma.

Además este logro tan importante de mi vida se lo dedicó a una persona muy especial, al ing. Cristian Jonatan de los Santos Mendoza, quien me ha acompañado en cada momento, no solo en mi etapa profesional sino también desde que llego a mi vida, quien con sus regaños, consejos e inspiración hizo posible esta meta tan soñada por mí. Gracias infinitamente por siempre levantarme en mis caídas y por siempre tener una palabra de aliento en las diferentes circunstancias de mi vida, sabes que este proyecto no hubiera sido posible sin tu ayuda.

A mis familiares por siempre motivarme y darme un poco de su tiempo y en especial a mis tíos Francisca Mendoza Reyes, Hilario Mendoza Reyes y Domingo Mendoza Reyes y a un primo muy querido: José Alfredo Mendoza García que me apoyó tanto emocionalmente como económicamente.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
HIPÓTESIS	5
REVISIÓN DE LITERATURA	6
Contaminación ambiental por metales pesados	6
Toxicidad de los metales pesados en las plantas	7
Efectos ecotoxicológicos del arsénico	8
Efectos del arsénico en las plantas	8
Arsénico en cultivos	9
Contaminación por arsénico en cultivo de tomate	9
Daños a la salud pública	10
Tomate	11
Importancia mundial	11
Importancia nacional	12
La nanotecnología en la agricultura	12
Efecto del silicio en las plantas	14

Efecto del silicio contra el estrés por metales pesados en las plantas	15
Efecto de las nanopartículas de silicio en las plantas de tomate	16
MATERIALES Y MÉTODOS	18
Localización del experimento.....	18
Material vegetal.....	18
Diseño Experimental.....	18
Establecimiento del experimento	19
Labores culturales.....	21
VARIABLES EVALUADAS	22
Determinación de las variables agronómicas.....	22
Calidad de fruto.....	22
Índice relativo de fitotoxicidad.....	23
Análisis estadístico	24
RESULTADOS Y DISCUSIONES	25
VARIABLES AGRONÓMICAS.....	25
Calidad del fruto	29
Índice relativo de fitotoxicidad	32
CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes de contaminación por metales pesados en aire, suelo, agua y planta (Reyes et al., 2016).	7
Figura 2. Aplicaciones potenciales de la nanotecnología y de las nanopartículas en la agricultura, incluyendo la fabricación de nanosensores, nanofertilizantes, nanopesticidas y nanoherbicidas (Lira-Saldívar <i>et al.</i> , 2016).	13
Figura 3. Colocación del sistema de riego.	20
Figura 4. Distribución de las plantas de tomate dentro del invernadero en un diseño de bloques completos al azar. B1, B2 y B3 bloques.....	21
Figura 5. a) Medición de A, b) medición de D, c) conteo de NH, d) conteo de NF.	22
Figura 6. a) Determinación de SST, b) determinación de Fir, c) determinación de ORP, d) determinación de CE y pH.....	23
Figura 7. Índice relativo de fitotoxicidad de biomasa seca radical de plantas de tomate. IRF>1 indica estimulación de la biomasa; IRF=1 indica que no hubo efectos; IRF<1 indica inhibición de la biomasa. En las barras las letras diferentes indican diferencias estadísticas (LSD Fisher, ≤ 0.05).	32
Figura 8. Índice relativo de fitotoxicidad de biomasa seca aérea de plantas de tomate. IRF>1 indica estimulación de la biomasa; IRF=1 indica que no hubo efectos; IRF<1 indica inhibición de la biomasa. En las barras las letras diferentes indican diferencias estadísticas (LSD Fisher, ≤ 0.05).	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Abundancia de silicio y otros elementos en algunos reservorios de la corteza terrestre (Raya-Pérez y Aguirre-Mancilla, 2012).	14
Tabla 2. Caracterización de los tratamientos experimentales.....	19
Tabla 3. Efecto de la concentración de As y NPs-Si sobre las variables agronómicas relacionadas al crecimiento y desarrollo de cultivo de tomate.	26
Tabla 4. Respuestas de las variables agronómicas relacionadas al crecimiento y desarrollo de cultivo de tomate tratado con nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico.	27
Tabla 5. Efecto de la concentración de As y NPs-Si sobre el peso fresco y seco de la biomasa aérea y de raíz de las plantas de tomate.....	28
Tabla 6. Peso fresco y seco de la biomasa aérea y de raíz de las plantas de tomate aplicando nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico.....	29
Tabla 7. Efecto de la concentración de As y NPs-Si sobre la calidad de fruto de tomate...	30
Tabla 8. Parámetros relacionados a la calidad de fruto de tomate tratado con nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico.	31

RESUMEN

Se estableció un cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero con el objetivo de determinar el potencial de las nanopartículas de silicio (NPs-Si) para inducir tolerancia al arsénico en plantas. El diseño experimental que se utilizó fue parcelas divididas en bloques completos al azar, donde, parcela grande: dosis de As (0.2, 0.4, 0.8, 1.6, y 3.2 mg L⁻¹) y parcela chica: dosis de NPs-Si (250 y 1000 mg L⁻¹). Se simuló la contaminación de agua con As en el riego con solución nutritiva, como fuente de As se usó arseniato de sodio dibásico heptahidratado (Na₂HA₅O₄*7H₂O). Las NPs-Si fueron aplicadas cada tres semanas vía drench, 10 ml de solución en cada planta. Se evaluaron variables agronómicas (altura, diámetro, número de hoja, número de frutos y rendimiento), se aplicó un índice relativo de fitotoxicidad con base en la materia seca radical y aérea, y se determinó la calidad de fruto de tomate. Los resultados mostraron que las plantas con mayor altura (274.17 cm) fueron con dosis de As (0.8 mg L⁻¹) y NPs-Si (250 mg L⁻¹). En presencia de As, la altura de las plantas se redujo sin embargo, las NPs-Si favorecieron al aumento de la altura de las plantas de tomate. El mayor número (23.83) de frutos se produjo en el testigo absoluto, mientras que el menor (18.75) fue con dosis de 0- 250 mg L⁻¹ As y NPs-Si respectivamente; se observó que al aumentar la dosis de As se presentó una menor cantidad de número de fruto, aunque la aplicación de NPs-Si estimuló el aumento de número de fruto en la dosis más alta de As (3.2 mg L⁻¹). La mayor firmeza del fruto de tomate (6.07 kg cm⁻²) se presentó con la combinación de mayor concentración de As y NPs-Si. El rendimiento fue mayor en el tratamiento (3.18 kg) con dosis de 3.2mg L⁻¹ y sin NPs, el menor (2.04 kg) con dosis 1000 mg L⁻¹ de NPs-Si y sin As, lo cual indicó que la dosis de As de 3.2 mg L⁻¹ condujo una respuesta hormética. Con respecto al ORP, el mayor se presentó en el tratamiento absoluto y el menor fue en el tratamiento con dosis de 3.2- 1000 mg L⁻¹ de As y NPs respectivamente. Se demostró que la aplicación de las NPs-Si tiene efectos positivos en las variables relacionadas al vigor y características de calidad del fruto de las plantas de tomate.

Palabras claves: tomate, nanopartículas, arsénico, índice relativo de fitotoxicidad

INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados 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 *et al.*, 2016).

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos (Prieto-Méndez *et al.*, 2009). Algunos metales, tales como zinc, cobre, hierro, manganeso y el níquel, son requeridos en muy baja concentración por las plantas, como micronutrientes esenciales, para un crecimiento adecuado (Fageria *et al.*, 2009), sin embargo, en niveles excesivos, son tóxicos para las plantas y pueden causar inhibición del crecimiento, deterioro de la calidad del suelo y mala calidad de los alimentos (Seth, 2012).

El arsénico (As) es un metaloide considerado uno de los elementos más tóxicos en el medio ambiente (Otero *et al.*, 2016). Las plantas se ven expuestas al As a través del agua de riego o por captación desde el suelo (Su *et al.*, 2017). La acumulación de As en los tejidos de las plantas puede estar afectada por muchos factores, incluyendo las características de las especies vegetales, las condiciones del suelo y el empleo de productos sanitarios arsenicales y/o la aplicación de fertilizantes (Castillo *et al.*, 2013). Una de las preocupaciones por la presencia de una alta concentración del arsénico es que puede entrar a la cadena alimentaria, debido a que está presente en zonas agrícolas donde se cultivan alimentos como el maíz (Ruiz-Huerta *et al.*, 2017).

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los productos hortícolas más importantes en México debido al valor de su producción y a la demanda de mano de obra que genera. Esta especie es originaria de América del Sur, específicamente de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile, sin embargo es en México donde se domesticó (Álvarez-Medina, 2017).

Las plantas sometidas a algún tipo de estrés, en este caso el arsénico, pueden disminuir sus procesos fisiológicos y bioquímicos reduciendo sus cosechas, es por ello que se busca una técnica para reducir la absorción de arsénico por las plantas, o bien para disminuir el estrés de la planta y estimular su crecimiento. La principal 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).

La nanotecnología tiene el potencial de revolucionar la industria agrícola y alimentaria con nuevas herramientas para el manejo molecular de enfermedades, la detección rápida de enfermedades, la mejora de la capacidad de las plantas para absorber nutrientes, entre otros (Prasad *et al.*, 2014).

Las nanopartículas son materiales que tienen dimensiones entre 1-100 nanómetros, tienen propiedades fisicoquímicas únicas y potencial para impulsar el metabolismo de la planta, además las nanopartículas modificadas pueden internarse en las plantas, células y hojas, y también puede transportar ADN y sustancias químicas a las células de las plantas (Siddiqui *et al.*, 2015). Las nanopartículas de silicio (NPs-Si) se han visto implicadas en las mejoras del cultivo, ya que muchos informes indican que las concentraciones apropiadas de NPs-Si aumentan la geminación, crecimiento, y dan protección contra radiación, calor y estrés por sequía (Almutairi, 2016; Adrees *et al.*, 2015). Esto es debido en parte a que el silicio puede estimular la producción de exudados de raíces capaces de quelatar los metales y reducir su absorción por las raíces ya que la quelación del aluminio por exudados orgánicos reduce la actividad de los iones de aluminio (Al) libres y, en consecuencia, su unión a la pared celular de la raíz y/o membrana plasmática (Kidd *et al.*, 2001; Rogalla y Römheld, 2002).

JUSTIFICACIÓN

La absorción y posterior acumulación de metales pesados dependen en primera instancia del movimiento de los metales desde la solución en el suelo y la raíz de la planta. El arsénico es tóxico y análogo del fosfato por lo que si entra a la planta es altamente móvil. La mayor amenaza para la salud reside en la utilización de agua contaminada para regar cultivos alimentarios lo cual puede causar cáncer y diferentes enfermedades.

Una de las alternativas es la utilización de nanopartículas las cuales en pequeñas cantidades generan resultados positivos y en particular el uso de NPs-Si que en concentraciones apropiadas genera una mejora en el crecimiento y desarrollo de la planta además de protegerlas tanto de factores bióticos como abióticos.

Es por ello que el presente trabajo busca un beneficio para los productores, al identificar las concentraciones adecuadas se podrían disminuir los efectos negativos en el cultivo e inducirá resistencia contra metales pesados, particularmente el arsénico. Con la cual se espera obtener un mayor rendimiento del cultivo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el potencial de las nanopartículas de silicio para inducir tolerancia a arsénico en plantas de tomate.

Objetivos específicos

Evaluar el efecto del arsénico sobre el crecimiento de la planta en términos morfológicos.

Analizar el efecto de las NPs-Si sobre el arsénico y el desarrollo de la planta.

Evaluar el efecto de las NPs-Si y el arsénico sobre la calidad de fruto de tomate.

HIPÓTESIS

La aplicación de nanopartículas de silicio disminuirá el estrés por arsénico y promoverá el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate, a la vez que disminuirá la toxicidad por arsénico.

REVISIÓN DE LITERATURA

Contaminación ambiental por metales pesados

A partir de la década de los noventas se incrementó la preocupación por el deterioro del medio ambiente y sus afectaciones por la contaminación por metales pesados (MP) y además se posiciona como uno de los problemas más importantes que afectan a la sociedad del siglo XXI (Cuevas-Zúñiga *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2010). La pérdida de calidad del aire, del recurso hídrico y de suelos disponibles para actividades agrícolas se ha incrementado exponencialmente (Singh *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2013), siendo la agricultura una de las afectadas por estos contaminantes (Cuevas-Zúñiga *et al.*, 2016) y como consecuencia comprometen la seguridad alimentaria (Lira-Zaldívar y Méndez-Argüello, 2017). La tasa de contaminación del agua puede ser estimada en 2000 millones de metros cúbicos diarios. Se hace evidente una crisis de este recurso para los próximos años, lo que podría comprometer el cumplimiento de uno de los objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de Naciones Unidas la cual es “asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos”, otorgándole al agua un carácter prioritario para todos los países miembros (Reyes *et al.*, 2016).

La contaminación del suelo por MP es un problema cada vez mayor en el mundo, su distribución y concentración se incrementan significativamente a través de los años (Covarrubias y Peña-Cabriales, 2017), debido al crecimiento de la población y la generación de mayor cantidad de desechos, el ser humano ha tratado de eliminar estos contaminantes, pero sus esfuerzos no han sido suficientes. Esto ha provocado muy a menudo la transformación de los cursos fluviales en depósitos de residuos, ocasionando perturbación en el equilibrio natural y en muchos casos una ruptura del mismo (Tobar *et al.*, 2018). Los usos industriales de los metales y otros procesos internos como la quema de combustibles fósiles, incineración de residuos, tubos de escape de automóviles, los procesos de fundición, la utilización de los lodos de depuradora como material de relleno y fertilizantes han introducido grandes cantidades de metales pesados potencialmente tóxicos en la atmósfera y en los ambientes acuáticos y terrestres (Caviedes-Rubio *et al.*, 2016). En general, la distribución de MP en los suelos es un fenómeno complejo que se ve influenciada por factores como el potencial redox, el pH, el contenido de materia orgánica,

la capacidad de intercambio catiónico, el nivel de las aguas subterráneas y sus fluctuaciones, entre otros (Adamczyk-Szabela *et al.*, 2015).

El creciente problema de la escasez de agua tiene una influencia negativa significativa en el desarrollo económico, los medios de vida humanos y la calidad ambiental en todo el mundo. Los agricultores están interesados principalmente en beneficios generales, como mayor producción agrícola, fuente de agua de bajo costo, eliminación efectiva de efluentes, fuente de nutrientes, materia orgánica, etc., pero no son conscientes de sus efectos dañinos, como la contaminación por MP de suelos, cultivos y problemas de calidad relacionados con la salud, es por ello que buscan a soluciones que estén a su alcance y, una de ellas es la utilización de aguas residuales para el riego de cultivo (Chauhan y Chauhan, 2014). En la figura 1 se observan las diferentes fuentes de contaminación por metales pesados en aire, suelo, agua y planta.



Figura 1. Fuentes de contaminación por metales pesados en aire, suelo, agua y planta (Reyes *et al.*, 2016).

Toxicidad de los metales pesados en las plantas

Los suelos agrícolas en muchas partes del mundo son contaminados por MP como cadmio, cobalto, zinc, plomo, níquel, cromo y arsénico (Ulloa *et al.*, 2018; Yadav, 2010). Esto podría deberse al uso a largo plazo de fertilizantes fosfatados, aplicación de lodos cloacales, polvo de fundiciones, desechos industriales y malas prácticas de riego en tierras agrícolas.

En general, los niveles elevados de metales inducen la producción de ROS; por tanto, como respuesta a ese estrés, la célula presenta mecanismos antioxidantes enzimáticos que incluyen a la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa (POD) y sistemas no enzimáticos como el glutatión reducido (GSH), ascorbato y compuestos fenólicos (Cortés-Téllez *et al.*, 2018), además de interrumpir la cadena de transporte de electrones o perturbar el metabolismo de los elementos esenciales. Uno de los efectos más nocivos inducidos por la exposición a metales en las plantas es la peroxidación de lípidos, que puede causar el deterioro de la biomembrana (Yadav, 2010).

Efectos ecotoxicológicos del arsénico

El arsénico (As) es un elemento ampliamente distribuido en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera, el cual está presente en cuatro estados de oxidación As (V), As (III), As (0) y As (-III). Las especies formadas según el estado de oxidación son variadas y pueden ser de origen inorgánico u orgánico (Reyes *et al.*, 2016).

El As (III, arsenito) puede provenir de la reducción biológica del As (V, arseniato), y predomina en zonas cercanas a industrias con efluentes ricos en As (III), aguas geotermales y ambientes reductores. En general, en aguas superficiales, el As (V) predomina sobre el As (III) especie de mayor toxicidad. En aguas subterráneas pueden encontrarse ambos estados de oxidación ya que las concentraciones de As (III) y As (V) dependen de la entrada del As al sistema, de las condiciones redox y de la actividad biológica (Reyes *et al.*, 2016).

Efectos del arsénico en las plantas

Las plantas toman As principalmente como arseniato, la exposición al arseniato causa un estrés considerable en las plantas, incluida la inhibición del crecimiento, trastornos fisiológicos (Stoeva *et al.*, 2005) y finalmente la muerte (Stoeva y Bineva, 2003). El arseniato citoplasmático interfiere con los procesos metabólicos que involucran al fosfato, dándole el potencial de ser tóxico para las plantas, pero probablemente se reduce en el citoplasma al arsenito (Meharg y Hartley-Whitaker, 2002; Stoeva y Bineva 2003). El arsenito reacciona con los grupos sulfhidrilo (-SH) de enzimas y proteínas tisulares,

inhibiendo la función celular y causando la muerte (Gunes *et al.*, 2009). Aunque el arsénico no es un metal redox, existe evidencia significativa de que la exposición de las plantas al arsénico inorgánico da como resultado la producción de ROS, que están conectadas con los cambios de valencia que el elemento pasa fácilmente del arseniato al arsenito en las plantas (Meharg y Hartley-Whitaker, 2002).

Arsénico en cultivos

Prieto-García *et al.* (2010), concluyeron que la cebada presenta un alto nivel de acumulación de arsénico; que es absorbido por la planta desde el suelo y que es mayor en raíces que en frutos. Así también, el arsénico que puede llegar a lixiviarse por el suelo al medio acuoso durante el proceso de riego, que unido al arsénico presente o disponible en el agua de riego, producen un efecto que agrava o incrementa los niveles de bioacumulación de arsénico en la cebada.

Abedin y Meharg (2002), realizaron un estudio de germinación sobre semillas de arroz y un experimento de toxicidad a corto plazo con diferentes concentraciones de arsenito y arseniato en plántulas de arroz en Bangladesh. El porcentaje de germinación sobre el control disminuyó significativamente al aumentar las concentraciones de arsenito y arseniato. Se encontró que el arsenito era más tóxico que el arseniato para la germinación de las semillas de arroz. Hubo diferencias varietales entre las variedades de prueba en respuesta a la exposición a arsenito y arseniato. El rendimiento de la variedad de estación seca Purbachi fue el mejor entre las variedades. El índice de tolerancia de la raíz (RTI) y la altura relativa del brote (RSH) para las plántulas de arroz disminuyeron al aumentar las concentraciones de arsenito y arseniato y finalmente determinaron que, las variedades de estación seca tienen más tolerancia al arsenito o arseniato que las variedades de estación húmeda.

Contaminación por arsénico en cultivo de tomate

Burló *et al.* (1992), estudiaron los efectos del As en el comportamiento vegetal de *Lycopersicum esculentum* Mill incluyendo procesos de absorción, distribución y

acumulación del As en hojas y frutos de dicha especie de variedad Marmande, a lo largo del crecimiento, fructificación y maduración, donde concluyeron lo siguiente: el nivel de 10 mg L⁻¹ As en la disolución nutritiva fue claramente tóxico para las plantas estudiadas ya que produce considerables deterioros en la raíz. En segundo lugar, se observó que el nivel de As en hojas parece ser función de la actividad radicular, de modo que si aumenta la toxicidad de dicho elemento para la raíz, se restringe su translocación hacia las hojas, y por lo tanto se estabilizan sus niveles foliares. Por último apreciaron que en un aumento en el contenido de As en la parte aérea de la planta, reduce tanto los valores de los parámetros físicos como la producción.

Carbonell-Barrachina *et al.* (1997), examinaron la absorción de arsénico (As) por el tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) y el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) según se ve afectado por la concentración de arsenito en la solución nutritiva. Se estudiaron los procesos de asimilación y acumulación de As entre raíces, tallos, hojas y frutos. Las plantas de tomate y frijol se cultivaron en una solución nutritiva que contiene cuatro niveles de arsenito: 0, 2, 5 y 10 mg de As en un litro. El arsenito fue fitotóxico para ambas especies de plantas; las plantas de tomate, sin embargo, fueron más tolerantes a la contaminación por As que las plantas de frijol. Las plantas de frijol exhibieron síntomas de toxicidad que fueron marchitamiento, atrofia, clorosis, necrosis y las plantas tratadas con 10 mg de As contenidas en un litro murieron después de 36 días de tratamiento. En tomate, la exposición a As produjo una reducción significativa en la producción de biomasa seca, pero no se observaron clorosis o necrosis tisulares. El arsénico en el tejido de raíz de tomate parecía estar tan compartimentado que su impacto en el crecimiento y metabolismo de la planta era mínimo. La absorción diferencial observada y la translocación de arsenito o sus especies metabolizadas por las plantas de tomate y frijol fueron probablemente responsables de la tolerancia de las diferentes plantas a la contaminación por As.

Daños a la salud pública

El arsénico está clasificado como carcinógeno del grupo 1 por la IARC (Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer), ya que existen suficientes estudios experimentales y epidemiológicos que respaldan la causalidad de los cánceres de piel,

vejiga y pulmón. Los mecanismos potenciales de carcinogénesis de arsénico pueden ser daño oxidativo del ADN, amplificación génica, aneuploidización (por alteración del huso), inhibición de las enzimas de reparación del ADN y cambios en la metilación del ADN y modificaciones de histonas, dando lugar a expresiones genéticas alteradas y cambios en la diferenciación celular, proliferación, y respuesta a las vías de señalización (Roh *et al.*, 2017). Las vías de ingreso del As al organismo son a través de la piel, inhalación e ingestión. El 90 % del As inorgánico se incorpora por vía oral; genera daño renal, hepático, y daña otros órganos y sistemas. Clínicamente, la toxicidad por As se identifica por lesiones en la piel (melanosis, hiperqueratosis, leucomelanosis, despigmentación (Monroy-Torres y Espinoza-Pérez, 2018). La exposición aguda y crónica de As da como resultado patologías definidas como arsenicosis, arseniasis y muerte, también puede promover la angiogénesis y el aumento de la capacidad pulmonar (Tapase y Kodam, 2018).

Tomate

El *Solanum lycopersicum* L. es una planta agrícola y medicinal importante, cultivada en todo el mundo y consumida de diversas maneras. La fruta es rica en licopeno, uno de los antioxidantes naturales más poderosos, que nos protege contra el daño oxidativo epidemiológico y varias enfermedades crónicas, incluido el cáncer (Raliya *et al.*, 2015).

Importancia mundial

El tomate es una de las tres principales hortalizas cultivadas en el mundo, China es el principal productor con 52, 586,860 toneladas. Estados Unidos es el principal importador de tomate y México es el principal exportador de esta hortaliza, donde el destino comercial de tomate es Estados Unidos pues adquiere el 99.7% del volumen exportado (SIAP, 2017). El 62.1% de la producción se concentró en cinco países: China (30.8%), India (11%), Estados Unidos (8.5%), Turquía (6.9 %) y Egipto (4.9%). México se ubica en la décima posición en la producción mundial, con una participación de 2.1 por ciento (FIRA, 2017).

Importancia nacional

El cultivo del tomate es el quinto en importancia por su contribución en el valor de la producción agrícola primaria en México. En 2016, participó con 4.6 por ciento del valor total, después del maíz grano (19.4 por ciento), la caña de azúcar (6.0 por ciento), el aguacate (5.9 por ciento) y el chile verde con 4.7% (FIRA, 2017).

La superficie sembrada de tomate rojo para abril de 2017 fue de 29.2 miles de hectáreas; 1,106 más que las sembradas al mismo mes del año previo.

La producción acumulada enero-abril fue de 905 mil toneladas como resultado de incrementos en el área sembrada y en los rendimientos por hectárea (SAGARPA, 2017).

La nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología (NT), tiene un impacto significativo en la economía mundial, la industria y la vida de las personas. La NT, es la ciencia que está sustentada en la capacidad de medir, manipular y organizar la materia a escala nanométrica, entre 1 y 100 nanómetros (Siddiqui *et al.*, 2015). La NT es versátil, lo que significa que puede estar a la disposición de cualquier ciencia o industria, por sus prometedoras aplicaciones que brindan la posibilidad de contar con resultados satisfactorios, además, por el trabajo que se realiza con ésta a nivel atómico y molecular, sus formas de utilización serían prácticamente infinitas. En realidad, las mismas propiedades que conducen a las ventajas técnicas de la nanotecnología también conducen a efectos biológicos únicos en relación con las propiedades fisicoquímicas y los tipos de nanomateriales (Arora *et al.*, 2012).

En el sector agrícola los reportes sobre la aplicación de NPs metálicas con hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y plata (Ag), indican que mejoran la germinación de las semillas, el crecimiento, el contenido nutricional, la actividad enzimática y el rendimiento. Algunas NPs de óxido de zinc y óxido de cobre muestran efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas como las citoquininas (zeatina), auxinas (ácido indolacético) y ácido salicílico, compuestos que promueven elongación, división celular y crecimiento en las plantas (Lira-Saldívar, 2016). Las NPs derivadas del carbono como grafeno, fullereno y nanotubos de carbono (NTC) también son de importancia en la agricultura, debido a que

tienen un efecto estimulante del crecimiento. Los NTC promueven el crecimiento de las plantas debido a que los nanotubos se comportan como canales de agua similares a las acuaporinas, lo que promueve mayor presión hidrostática dentro de las células; induciendo absorción de agua, flujo de nutrientes y por consiguiente mayor crecimiento de la planta (Lira-Saldívar, 2016). Las NPs de óxido de grafeno también mejoran el crecimiento y la producción de biomasa en plantas, mientras que otras NPs como las de óxido de titanio causan incrementos en la actividad de varias enzimas y promueven la absorción de nitrato, el cual acelera la transformación del nitrógeno inorgánico a orgánico, haciéndolo más asimilable para las plantas (Lira-Saldívar, 2016).

En la Figura 2 se presenta un diagrama que ilustra el uso potencial de la NT para diseñar y fabricar nanosensores que permiten detectar la presencia de plagas y enfermedades de cultivos. La figura también muestra que diversos tipos de NPs metálicas como las de Ag, Fe, Cu, Zn, pueden ser utilizadas con un enfoque dual, ya sea como nanofertilizantes al promover el crecimiento de las plantas o como nanopesticidas. Algunos materiales como arcillas y zeolitas pueden ser empleados al nivel nano para mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo, y además actúan como materiales de lenta liberación de agua y fertilizantes, incrementando así la eficiencia en el uso de este recurso hídrico y de los nutrientes por las plantas (Lira-Saldívar, 2016).

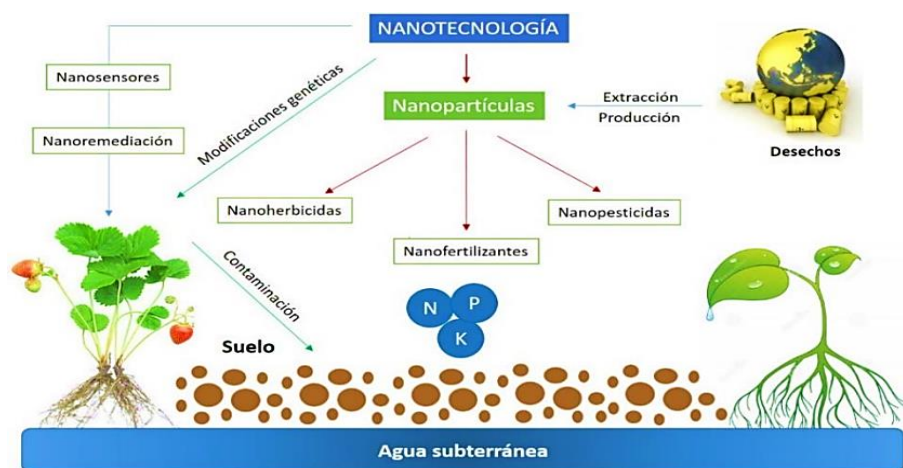


Figura 2. Aplicaciones potenciales de la nanotecnología y de las nanopartículas en la agricultura, incluyendo la fabricación de nanosensores, nanofertilizantes, nanopesticidas y nanoherbicidas (Lira-Saldívar *et al.*, 2016).

La NT en el futuro cercano promete revolucionar la industria agroalimentaria, de manera que aquellos países que no logren incorporarse a esta megatendencia, pueden quedar fuera

de la nueva redistribución industrial resultante de la competencia alimentaria. Es importante resaltar que la NT es el conocimiento emergente del siglo XXI en todos los campos de la ciencia, y estamos convencidos que sus diversas aplicaciones en la agricultura y la ganadería, la colocarán en la vanguardia de la Nueva Revolución Verde, con un enfoque sustentable y amigable con los agroecosistemas (Lira-Saldívar y Méndez-Argüello, 2017).

Efecto del silicio en las plantas

El silicio (Si) se reconoce como el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre que comprende 27.7% (Tabla 1). Está disponible para las plantas siendo tomado por la raíces en la solución como ácido monosilícico (Si(OH)_4) y es absorbido en un rango de pH de 2 hasta 9 en forma energéticamente pasiva. Desde hace algunas décadas, el papel fisiológico del Si en la regulación de los estreses abióticos y bióticos en las plantas ha despertado gran interés entre los investigadores (Currie y Perry, 2007; Borda *et al.*, 2007).

Tabla 1. Abundancia de silicio y otros elementos en algunos reservorios de la corteza terrestre (Raya-Pérez y Aguirre-Mancilla, 2012).

Elemento	Litósfera (%)	Biota (%)	Cultivos (%)
Si	27.7	0.03	0.1-10
O	47.4	24.9	45-47
C	0.48	24.9	48-50
N	0.03	0.27	0.5-6
Ca	4.1	0.07	0.1-6
K	2.1	0.05	0.8-8
Mg	2.3	0.03	0.05-1
P	1	0.03	0.15-0.5
Al	8.2	0.02	0.00001-0.05

Se ha demostrado que el Si tiene numerosos efectos beneficiosos directos e indirectos sobre el crecimiento y el desarrollo de las plantas, como son: mejora apreciablemente la resistencia de las plantas a varios metales tóxicos como aluminio (Al), cromo (Cr), cadmio (Cd), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn), conduce a la inhibición de los procesos de destrucción oxidativa que se acompaña con actividad creciente de algunas enzimas

antioxidantes que neutralizan las ROS inducidas por la sequía, salinidad y radiación ultravioleta (Balakhnina y Borkowska, 2013; Tripathi *et al.*, 2016).

La acumulación de Si en la planta ayuda a fortalecer la pared celular formando una barrera mecánica a la penetración de patógenos, además de cumplir una integridad estructural de las células vegetales contribuyendo a las propiedades mecánicas como rigidez y elasticidad. 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).

Efecto del silicio contra el estrés por metales pesados en las plantas

El silicio puede estimular la producción de exudados de raíces que pueden quelatar los metales y reducir su absorción por las raíces, ya que la quelación del aluminio por exudados orgánicos reduce la actividad de los iones de aluminio (Al) libres y, en consecuencia, su unión a la pared celular de la raíz y/o membrana plasmática. Los tipos de ácidos orgánicos secretados por las raíces expuestas al Al varían dependiendo de las especies de plantas, pero las más comúnmente son la secreción de citrato y malato. La secreción de citrato inducida por aluminio se mostró tanto en maíz como en frijol. Del mismo modo, el malato se secreta de las raíces de los cultivares de trigo resistentes al Al después de la exposición al Al. En las tres especies, la secreción fue mayor (hasta 10 veces) en los cultivares resistentes a Al que en los sensibles a ese mismo elemento (Kidd *et al.*, 2001). Además, esta reducción en la captación de metal también puede explicarse por el hecho de que Si reduce el transporte de metales apoplásmicos al disminuir la concentración de metal libre en dicho espacio extracelular, ya que el Si y el agua siguen la misma vía de transporte y distribución (Rogalla y Römheld, 2002). Por otra parte, la barrera física formada por el depósito de Si en la vecindad del endoderma puede reducir la porosidad de la pared celular de los tejidos de la raíz interna, reduciendo así la concentración de metal en el xilema. De manera similar, el Si disminuyó el transporte apoplásmico de Cd a través de la mayor absorción de Cd en las paredes celulares (Zhang *et al.*, 2015). La acumulación de

silicio en las raíces endodermis puede reducir la movilidad de metales pesados como Al y Cu (Adrees *et al.*, 2015).

Gu *et al.* (2011), reportaron que en el arroz las soluciones ricas en Si inmovilizaron Cu, Cd y Zn en suelos ácidos contaminados con múltiples metales al aumentar el pH del suelo. También mostraron que los metales se depositaron principalmente como silicatos, fosfatos e hidróxidos en tratamientos modificados.

Además, la aplicación de sílice de maíz en suelo contaminado redujo la movilidad del metal en el suelo y los datos de difracción de rayos X indicaron la formación de silicato de plomo insoluble en el suelo. Los estudios anteriores sugieren una interacción externa entre Si y metales pesados. En conjunto, la aplicación de Si puede inmovilizar metales tóxicos en el suelo aumentando el pH del suelo y cambiando la especiación del metal en el suelo (Adrees *et al.*, 2015).

Efecto de las nanopartículas de silicio en las plantas de tomate

Almutairi (2016), demostró que la exposición a las concentraciones de NPs-Si alivió los efectos adversos del estrés salino y mejoró el porcentaje de germinación, la tasa de germinación, el tiempo medio de germinación, la longitud de la raíz y el peso fresco de plántulas de semillas de tomate bajo estrés por NaCl. Cuatro genes de estrés salino, AREB, TAS14, NCED3 y CRK1, fueron regulados positivamente por N-Si bajo estrés salino, y seis genes, RBOH1, APX2, MAPK2, ERF5, MAPK3 y DDF2, se regularon negativamente. Los resultados sugieren que NPs-Si juega un papel importante en la moderación de la inhibición en la germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas en ambientes salinos.

Por otra parte Karunakaran *et al.* (2013), demostraron que la nanosilica desencadena el crecimiento de PGPR (Rizobacterias Promotoras del Crecimiento de las Plantas) y aumenta la población bacteriana total del suelo, además de mantener el pH del suelo, mejorar los valores de nutrientes del suelo y promover la germinación de la semilla de maíz.

Tripathi *et al.* (2015), Sugirieron cuatro mecanismos por los cuales las NPs-Si aliviaban la toxicidad inducida por Cr (VI): (i) reducción en la acumulación de Cr en raíces y brotes, (ii)

debido a la acumulación disminuida de Cr, una reducción en los niveles de ROS, (iii) regulación al alza del sistema de defensa antioxidante que regula eficazmente el estrés oxidativo y (iii) regulación al alza de la absorción de nutrientes minerales que proporcionan protección contra el estrés oxidativo. Este estudio puede proporcionar una base para comprender el papel de las NPs-Si en el alivio de la toxicidad del metal y sugiere la aplicación de NPs-Si contra los riesgos asociados con la toxicidad por metales pesados y la producción sustentable de plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

El presente trabajo se realizó en el invernadero del Departamento Forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), la cual se encuentra ubicada al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila. Cuenta con una altitud de 1742 msnm, la temperatura media anual es de 16.8°C, el clima es muy seco, semiárido y extremoso con lluvias en verano, la precipitación anual es de 350 a 450 mm (INEGI, 2015).

Material vegetal

Se usaron plántulas de tomate tipo Saladette de crecimiento indeterminado variedad “Sun 7705”. 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). Resistentes al agrietamiento.

Diseño Experimental

Se estableció un experimento con diseño en parcelas divididas en bloques completos al azar, parcela grande (dosis de As: 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 mg L⁻¹), parcela chica (dosis de NPs-Si: 0, 250, 1000 mg L⁻¹). Fueron 18 tratamientos, con 12 unidades experimentales cada uno (una planta fue una unidad experimental), en total 216 unidades experimentales (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización de los tratamientos experimentales.

Tratamiento	As	NPs-Si	Planta	Unidades experimentales
	PG	PCH		
	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

Establecimiento del experimento

Se usaron bolsas de polietileno con capacidad de 10 L y fueron llenadas con una mezcla de sustrato peat moss:perlita a una relación 1:1 en base a volumen.

Las nanopartículas fueron de dióxido de silicio (SiO₂) adquiridas por Sky Spring Nanomaterials Inc. USA (morfología esférica, pureza del 99.5%, diámetro promedio de 20 nm). Las aplicaciones de tratamientos de nanopartículas de silicio (NPs-Si) se realizaron vía

“drench” cada 21 días, a cada planta se le aplicaron 10 ml. Los tratamientos de arsénico fueron diferentes dosis de arseniato de sodio dibásico heptahidratado y se aplicó en el riego simulando la contaminación de aguas con As.

Se colocó un sistema de riego (Figura 3) y se usó un timer digital para programar la aplicación riegos (cuatro riegos por día).

La nutrición fue suministrada a través de un sistema de riego dirigido usando la solución 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.



Figura 3. Colocación del sistema de riego.

La distribución de los tratamientos en el invernadero se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 4.

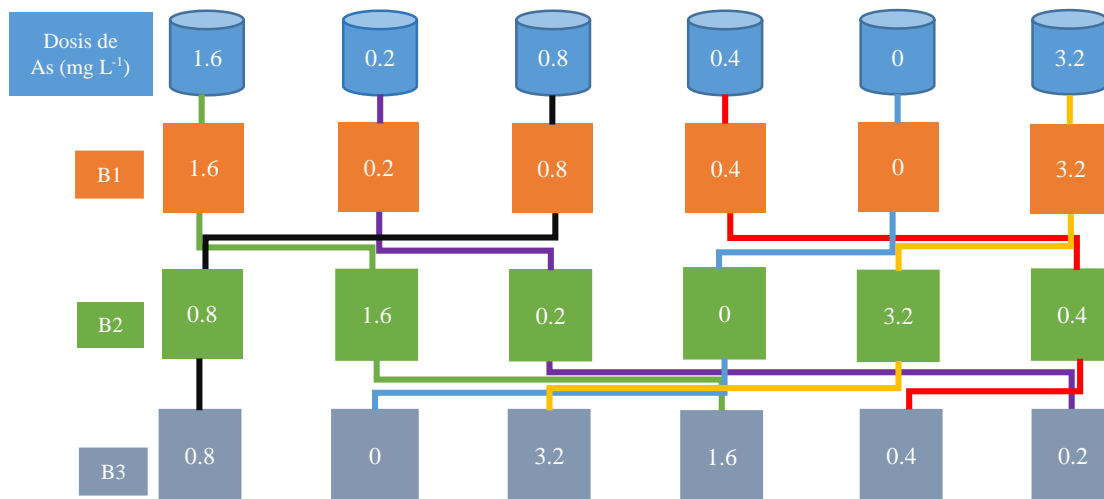


Figura 4. Distribución de las plantas de tomate dentro del invernadero en un diseño de bloques completos al azar. B1, B2 y B3 bloques.

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 tutoreo a partir de los 12 días después del trasplante, 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 m.

La cosecha se realizó manualmente y por racimo (conforme maduraron los frutos) y al mismo tiempo se midieron diversas variables agronómicas.

Variables evaluadas

Determinación de las variables agronómicas

La altura de la planta (A) y el diámetro (D) se consideró del primer par de hojas verdaderas al ápice y se midió cada 15 días con un flexómetro y un vernier respectivamente, para número de frutos y hojas fue un conteo directo y el rendimiento sacando el total de peso de frutos por planta para cada tratamiento (Figura 5).

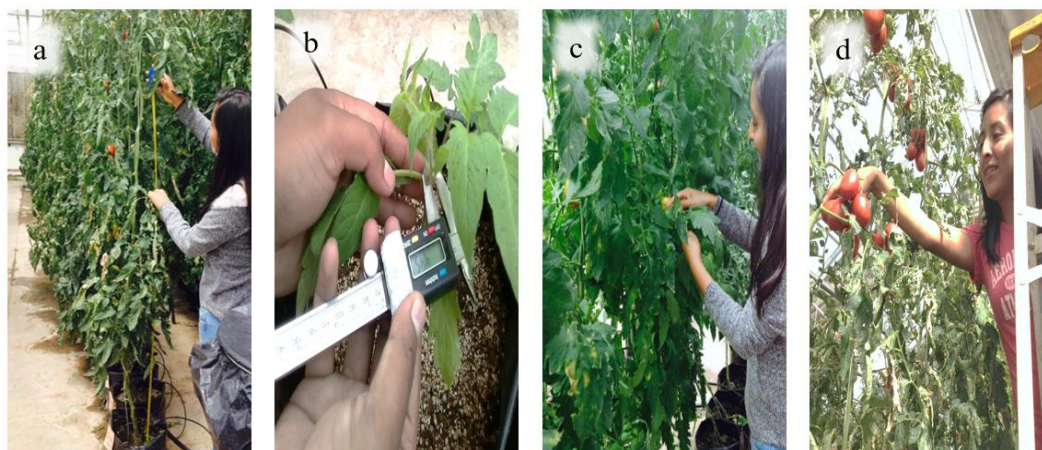


Figura 5. a) Medición de A, b) medición de D, c) conteo de NH, d) conteo de NF.

Calidad de fruto

Se cosecharon frutos de tomate completamente maduros, con más del 90% de superficie en color rojo (USDA, 1997) en el primer, cuarto y séptimo racimo. Sobre la pulpa se determinaron (Figura 6) sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix) (SST) (con refractómetro Atago), conductividad eléctrica (CE) y pH (potencial hidrógeno) (con potenciómetro digital HI98130, Hanna), potencial oxido reducción (ORP) y firmeza (Fir) (con penetrómetro WAGNER Force Dial FDK 20). En la figura 5 se aprecia las determinaciones en el laboratorio.



Figura 6. a) Determinación de SST, b) determinación de Fir, c) determinación de ORP, d) determinación de CE y pH.

Índice relativo de fitotoxicidad

El índice integra varias variables y proporciona valores que pueden utilizarse para determinar, de manera holística, el comportamiento de una planta en suelos contaminados con diferentes concentraciones de hidrocarburos (Alejandro-Córdova *et al.*, 2017) para este caso fue adaptado para las concentraciones de arsénico. El índice relativo de fitotoxicidad (IRF) se calculó para la variable de producción de materia fresca aérea de las plantas de tomate.

Para medir el efecto de los tratamientos con arsénico, el IRF de cada variable se compararon con los valores correspondientes al tratamiento de control (0 mg L⁻¹ de arseniato de sodio). Se utilizó y se adaptó la siguiente ecuación:

$$\text{IRFxi} = \text{ToC} / \text{TC}$$

Dónde

IRF= Índice relativo de fitotoxicidad

Xi= variable i

i= 1, 2, ..., n

TC= Tratamiento de control

ToC= Tratamiento contaminado

Los resultados se interpretaron de la siguiente manera:

Valor > 1 indica adaptación de planta a arsénico (la variable fue estimulada).

Valor = 1 indica tolerancia de planta, sin diferencias en comparación con el control (la variable no fue afectada).

El valor <1 indica la toxicidad del arsénico para la planta (la variable se inhibió).

Análisis estadístico

Para las variables agronómicas se utilizó el diseño en parcelas divididas en bloques completos al azar con 12 repeticiones por tratamiento. Las variables de calidad, un diseño completamente al azar con seis repeticiones. Se realizó análisis de varianza (ANOVA), y se compararon las medias con la prueba de LSD Fisher ($p \leq 0.05$.) mediante el paquete estadístico Infostat 2018.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Variables agronómicas

Los resultados de la evaluación de las variables agronómicas relacionados con el efecto de la concentración de As y NPs-Si sobre las variables agronómicas relacionadas al crecimiento y desarrollo de cultivo de tomate se presentan en la Tabla 3 mientras que en la tabla 4 se observan las respuestas de las variables agronómicas relacionadas al crecimiento y desarrollo de cultivo de tomate tratado con nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico en este último se observaron diferencias estadísticas significativas (LSD, $P < 0.05$) en altura de la planta, diámetro, número de hoja, número de fruto y el rendimiento en función de la concentración de As y NPs-Si.

Las plantas con mayor altura (274.17 cm) fueron con dosis de As (0.8 mg L^{-1}) y NPs-Si ($0.8\text{-}250 \text{ mg L}^{-1}$). En presencia de As, la altura de las plantas se redujo sin embargo, las NPs-Si favorecieron al aumento de la altura de las plantas de tomate. Estos resultados coinciden con Abedin *et al.* (2002), quienes estudiaron la variación de la altura con dosis de As de 0.1 a 8 mg L^{-1} y donde la dosis más baja de arseniato (0.1 mg L^{-1}) afectó la altura de la plantas disminuyendo 11 cm con respecto al testigo absoluto (91 cm), mientras que con dosis de 2.0 y 8.0 mg L^{-1} , la altura de las plantas fue de 79.2 y 63.8 cm respectivamente.

La aplicación de As afectó de manera significativa en la producción de follaje, por lo que mayor número de hojas (23.58) fue con la dosis más alta de As y sin NPs-Si, mientras que la menor fue de 21.83 con dosis de 0.2 mg L^{-1} de As y sin NPs-Si. Estos resultados concuerdan con Farooq *et al.* (2013), donde se presentó una reducción en la altura, longitud de raíz, número de hojas y área foliar en plantas de algodón en presencia de cadmio y donde se aplicó silicio las plantas fueron estimuladas en las variables antes mencionadas. Por otra parte Marmioli *et al.* (2014), estudiaron el efecto del silicio en la absorción y translocación del arsenito en tomate (*Solanum lycopersicum* L.), donde trabajaron con dos dosis: 5 mg L^{-1} de arsenito de sodio y 2 mg L^{-1} silicato de calcio, los resultados obtenidos demostraron el daño del As, las plantas presentaron marchitamiento, junto con la clorosis y necrosis foliar, sin embargo la aplicación de CaSiO_3 tuvo un efecto estimulador en el número de hojas. El mayor diámetro de tallo (14.59 mm) se observó con dosis de $0.4\text{-}0 \text{ mg L}^{-1}$ y la menor (13.12 mm) se presentó con dosis de $0.2\text{-}250 \text{ mg L}^{-1}$ de As y NPs-Si

correspondiente. En esta sentido, se destaca que el diámetro del tallo es una medida que en forma directa muestra la acumulación de biomasa, otorgándole a la planta una mayor resistencia a factores ambientales como el volcamiento (Borda *et al.*, 2007).

Tabla 3. Efecto de la concentración de As y NPs-Si sobre las variables agronómicas relacionadas al crecimiento y desarrollo de cultivo de tomate.

	mg L ⁻¹	A cm	D mm	NH	NF	Rend kg
As	0	257.78ab	13.79bcd	23.19a	20.67b	2.29b
	0.2	244.81c	13.46d	22.08b	21.53ab	2.26b
	0.4	250.75bc	14.34a	23.06a	23.08a	2.63a
	0.8	266.25a	13.96bc	23.08a	21.72ab	2.25b
	1.6	265.83a	13.67cd	23.19a	23.08a	2.62a
	3.2	253.53bc	14.05ab	23.06a	22.53ab	2.71a
NPs-Si	0	251.26b	14.07a	23.04a	23.13a	2.80a
	250	259.96a	13.70b	22.81a	21.26b	2.20c
	1000	258.25ab	13.86ab	22.99a	21.92ab	2.38b

A= altura de la planta, D= diámetro del tallo, NH=número de hojas, NF= número de frutos, Rend= rendimiento, C.V. = coeficiente de variación. En la columna las letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (LSD Fisher, ≤ 0.05).

En el parámetro rendimiento, el tratamiento con mayor peso (3.18 kg) fue con dosis de 3.2 mg L⁻¹ de As y sin NPs y el menor (2.04 kg) con las dosis más alta de NPs-Si y sin As. Los datos concuerdan con Begum *et al.* (2008), quienes estudiaron los efectos del arsénico y su interacción con el fósforo sobre el rendimiento y la acumulación de arsénico en el arroz, en donde observaron que sin suministro de P, el rendimiento fue bajo, pero aumentó cuando se agregó una concentración baja de As (15 mg L⁻¹) al suelo. Esta estimulación del crecimiento fue acompañada por un aumento de los niveles de P en el grano, y tales interacciones pueden conducir a respuestas de crecimiento hormético ya que el arsénico y el fosfato son químicamente similares en que ambos forman oxianiones. Estos pueden competir por la adsorción en partículas de suelo con carga positiva y tales interacciones pueden conducir a respuestas de crecimiento hormético (Poschenrieder *et al.*, 2013).

Respecto al número de frutos, el mayor (23.83) se produjo en el testigo absoluto y con dosis de 0.4 mg L⁻¹ de As mientras que el menor (18.75) fue con dosis de 250 mg L⁻¹ de NPs, además al aumentar la dosis de As se presentó una menor cantidad de NF. Sin embargo, la aplicación de NPs-Si estimuló el aumento de número de frutos en la dosis más alta de As (3.2 mg L⁻¹). Estos datos coinciden con Carbonell-Barrachina *et al.* (1997),

quienes estudiaron la absorción de As en plantas de tomate (*Lycopersicum esculentum* M.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) las cuales fueron afectados por la presencia de arsenito en la solución nutritiva con concentraciones de: 2, 5 y 10 mg L⁻¹ y un testigo. Los resultados obtenidos demostraron una disminución en la producción de tomate y frijol de 38, 54 y 65% con concentraciones de 2,5 y 10 mg L⁻¹ de As respectivamente.

Tabla 4. Respuestas de las variables agronómicas relacionadas al crecimiento y desarrollo de cultivo de tomate tratado con nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico.

As mg L ⁻¹	NPs-Si mg L ⁻¹	A cm	D mm	NH	NF	Rend kg
0	0	255.67abcd	14.08abcde	23.08abc	23.83a	2.66bcd
	250	260.00abcd	13.70cdef	23.08abc	18.75c	2.17gh
	1000	257.67abcd	13.57ef	23.42ab	19.42c	2.04h
0.2	0	233.42e	13.65cdef	21.83d	23.17ab	2.50cdefg
	250	249.58cde	13.12f	22.25cd	20.58bc	2.06h
	1000	251.42cde	13.61def	22.17cd	20.83abc	2.23efgh
0.4	0	250.17cde	14.59a	23.50ab	23.83a	3.06ab
	250	249.17cde	14.24abc	22.42bcd	21.67abc	2.21fgh
	1000	252.92bcd	14.20abcd	23.25abc	23.75a	2.65bcd
0.8	0	260.00abcd	14.10abcde	22.75abcd	23.17ab	2.60cdef
	250	274.17a	13.92bcde	23.42ab	21.08abc	2.10gh
	1000	264.58abcd	13.85bcde	23.08abc	20.92abc	2.07h
1.6	0	261.67abcd	13.58ef	23.50ab	23.58ab	2.87abc
	250	270.42ab	13.61def	23.25abc	22.83ab	2.37defgh
	1000	265.42abc	13.82cde	22.83abcd	22.83ab	2.64bcde
3.2	0	246.67de	14.42ab	23.58a	21.17abc	3.18a
	250	256.42abcd	13.60ef	22.42bcd	22.67ab	2.32defgh
	1000	257.50abcd	14.13abcde	23.17abc	23.75a	2.66bcd
C.V. (%)		9.06	5.31	5.98	16.89	20.90

A= altura de la planta, D= diámetro del tallo, NH=número de hojas, NF= número de frutos, Rend= rendimiento, C.V. = coeficiente de variación. En la columna las letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (LSD Fisher, ≤ 0.05).

El efecto de la concentración de As y NPs-Si sobre el peso fresco y seco de la biomasa aérea y de raíz de las plantas de tomate se presentan en la Tabla 5 y en la Tabla 6 se observan los resultados obtenidos de dicha variables pero con plantas tratadas con nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico.

Se observaron diferencias estadísticas significativas (LSD, $P < 0.05$) en peso fresco y seco de raíz, hoja y tallo en función de la concentración de As y NPs-Si.

Tabla 5. Efecto de la concentración de As y NPs-Si sobre el peso fresco y seco de la biomasa aérea y de raíz de las plantas de tomate.

mg L ⁻¹	PFR	PSR	PFH	PSH	PFT	PST	
	G						
As	0	39.00ab	4.37ab	509.92ab	70.01b	255.98a	47.21a
	0.2	43.38a	5.39a	479.42b	67.02b	246.29a	46.74a
	0.4	45.41a	5.11a	579.32a	79.63a	268.94a	48.76a
	0.8	30.60b	3.69b	501.76b	70.79b	264.43a	46.09a
	1.6	29.48b	3.73b	513.09ab	70.93b	264.19a	47.08a
	3.2	39.69ab	4.95a	539.83ab	80.01a	255.44a	49.99a
NPs-Si	0	49.73a	6.33a	578.10a	81.53a	255.24a	53.11a
	250	32.70b	3.93b	508.64b	69.57b	256.59a	46.22b
	1000	31.35b	3.37b	474.93b	68.11b	265.81a	43.61b

PFR= peso fresco de raíz, PSR= peso seco de raíz, PFH= peso fresco de hojas, PSH= peso seco de hojas, PFT= peso fresco de tallos, PST= peso seco de tallo. C.V. = coeficiente de variación. En la columna las letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (LSD Fisher, ≤ 0.05).

En el peso fresco de raíz, el mayor (59.80 g) fue con la dosis de As 0.4 mg L⁻¹ lo cual se sugiere que esta respuesta puede relacionarse con un efecto hormético producido por el As (inducción de crecimiento ante un gradiente de concentraciones del metal), pues se ha determinado que como primera barrera a la toxicidad de este metal, la mayoría de las especies acumulan As, con el fin de limitar su transporte (Toledo-Salas *et al.*, 2018). Respecto al parámetro de peso seco de la raíz surgió algo similar, la dosis más baja y la más alta de As tuvieron mayor peso seco.

El peso fresco y seco de las hojas fue mayor únicamente con dosis de As de 0.4 mg L⁻¹, con 686.93 y 93.70 g respectivamente, lo que indica que hubo un efecto hormético del As.

Tabla 6. Peso fresco y seco de la biomasa aérea y de raíz de las plantas de tomate aplicando nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico.

As	NPs-Si	PFR	PSR	PFH	PSH	PFT	PST
mg L ⁻¹		G					
0	0	48.87abc	5.48bcd	522.98bcd	73.68bcdef	227.70b	49.70abcd
	250	41.27abcde	4.31cdefg	557.68abcd	74.40bcde	272.83a	50.85abc
	1000	26.88def	3.32efgh	449.10d	61.93ef	267.42ab	41.08ef
0.2	0	57.20a	7.33a	533.35bcd	78.30bc	249.42ab	53.48ab
	250	31.10cdef	4.84cdef	474.43cd	62.97ef	242.73ab	42.05def
	1000	41.83abcde	4.02cdefgh	430.48d	59.80f	246.72ab	44.68cdef
0.4	0	59.80a	6.87ab	686.93a	93.70a	278.92a	54.48a
	250	33.87bcdef	4.02cdefgh	501.25bcd	70.03bcdef	248.87ab	44.37cdef
	1000	42.57abcde	4.43cdef	549.77bcd	75.17bcde	279.05a	47.43abcdef
0.8	0	36.23bcdef	4.91cde	505.83bcd	77.05bcd	255.88ab	50.97abc
	250	32.50cdef	3.67defgh	536.82bcd	72.18bcdef	276.88a	46.08bcdef
	1000	23.07ef	2.50gh	462.62d	63.15def	260.53ab	41.22ef
1.6	0	43.92abcd	5.85abc	611.73ab	82.43ab	263.22ab	55.20a
	250	24.12ef	3.02fgh	494.75bcd	65.78cdef	256.60ab	46.38bcdef
	1000	20.40f	2.32h	432.80d	64.58cdef	272.75a	39.67f
3.2	0	52.37ab	7.54a	607.78abc	84.00ab	256.30ab	54.83a
	250	33.33bcdef	3.71defgh	486.92bcd	72.03bcdef	241.65ab	47.57abcde
	1000	33.37bcdef	3.61efgh	524.78bcd	84.00ab	268.37ab	47.57abcde
C.V. (%)		45.11	35.29	22.37	16.70	14.98	14.22

PFR= peso fresco de raíz, PSR= peso seco de raíz, PFH= peso fresco de hojas, PSH= peso seco de hojas, PFT= peso fresco de tallos, PST= peso seco de tallo. C.V. = coeficiente de variación. En la columna las letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (LSD Fisher, ≤ 0.05).

Calidad del fruto

Para la variable de calidad del fruto de las plantas de tomate, el efecto de la concentración de As y NPs-Si se observa en la Tabla 7, y en la Tabla 8 se presentan las plantas de tomate tratadas con NPs-Si bajo estrés por As en la cual se encontraron diferencias significativas (LSD, $P < 0.05$) en firmeza, sólidos solubles totales, pH, conductividad eléctrica y potencial de reducción de oxidación.

Tabla 7. Efecto de la concentración de As y NPs-Si sobre la calidad de fruto de tomate.

	mg L ⁻¹	Fir kg cm ⁻²	SST °Brix	pH	CE mS cm ⁻¹	ORP mV
As	0	4.43c	4.86a	4.51a	3.49a	79.22a
	0.2	4.71bc	4.76a	4.48ab	2.76c	76.33a
	0.4	4.67bc	4.78a	4.45b	2.12d	62.17b
	0.8	50.3abc	4.90a	4.47ab	3.09b	53.42c
	1.6	5.18ab	4.83a	4.50ab	3.45a	53.47c
	3.2	5.54a	4.84a	4.52a	3.15b	44.39d
NPs-Si	0	4.89a	4.85a	4.49a	3.13a	62.33a
	250	4.80a	4.85a	4.48a	2.92b	60.81a
	1000	5.09a	4.78a	4.49a	2.98ab	61.36a

Fir= firmeza, SST= sólido solubles totales, CE= conductividad eléctrica, ORP= potencial de reducción de oxidación. En la columna las letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (LSD Fisher, ≤ 0.05).

La mayor firmeza del fruto de tomate fue con dosis de 3.2- 1000 mg L⁻¹ (6.07 kg cm⁻²) la cual tenía las mayores concentraciones de As y NPs-Si, esto pudo ser debido a que la concentración alta de silicio aumento la integridad estructural de las células incluyendo rigidez y elasticidad que son propiedades que se consideran son atribuidas por este elemento (Castellanos-González *et al.*, 2015) y la menor (4.00 kg cm⁻²) fue con dosis de 0.2 mg L⁻¹ de As y sin NPs.

En el contenido de sólidos solubles totales, el testigo absoluto fue el mayor (4.97°Brix) mientras que el menor contenido de este parámetro fue el tratamiento con dosis de 0.2- 1000 mg L⁻¹. Además al aumentar la dosis de NPs-Si en las plantas que no contenían As, los resultados de sólidos solubles totales (azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos) disminuían lo cual pudo ser causada por el uso de azúcares simples en la respiración celular que se debió al efecto inhibitorio sobre las actividades de hidrólisis es decir, una molécula de glucosa se degrada poco a poco en dióxido de carbono y agua (López-Vargas *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017).

El pH más alto fue de 4.62, se presentó en el testigo absoluto, y el menor fue de 4.42 en el tratamiento con dosis de 0.4 mg L⁻¹ de As y sin NPs. El rango de pH en los tomates de acuerdo a López-Vargas *et al.*, (2018), se encuentra normalmente entre 4.0 y 4.5, lo cual indica que los resultados obtenidos están dentro del rango. La calidad de la fruta está muy influida por el pH, y los consumidores aprecian más las frutas menos ácidas por su mejor

sabor. (López-Vargas *et al.*, 2018). Los resultados parecen indicar que al incrementar la dosis aplicada de As el pH aumenta, por lo que pudo pasar el proceso de hormesis el cual es un efecto estimulante de las concentraciones subinhibitorias de cualquier sustancia tóxica en cualquier organismo (Poschenrieder *et al.*, 2013).

La mayor CE en el fruto se encontró en el tratamiento con dosis de 0.8- 1000 mg L⁻¹ de As y NPs-Si respectivamente, lo cual indica que tuvo un mayor contenido de sales. La CE influye en la composición química de las plantas, esto se puede atribuir al aumento de K, ya que este elemento es uno de los solutos inorgánicos más importantes en las plantas (López-Vargas *et al.*, 2018; Lara-Herrera, 2000).

Con respecto al ORP, el mayor se presentó en el tratamiento absoluto y el menor fue en el tratamiento con la dosis más alta de As y de NPs-Si. Un ORP con valores bajos indica una mejor calidad de la fruta, lo que puede traducirse en un mayor potencial antioxidante (Juárez-Maldonado *et al.*, 2016).

Tabla 8. Parámetros relacionados a la calidad de fruto de tomate tratado con nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico.

As mg L ⁻¹	NPs-Si mg L ⁻¹	Fir kg cm ⁻²	SST °Brix	pH	CE mS cm ⁻¹	ORP mV
0	0	4.48def	4.97a	4.62a	3.63abc	81.33a
0	250	4.74bcdef	4.85ab	4.48bc	3.49bcd	77.33a
0	1000	4.09f	4.75abc	4.44bc	3.35cde	79.00a
0.2	0	4.00f	4.85ab	4.47bc	3.28cde	80.67a
0.2	250	4.62cdef	4.87a	4.47bc	2.62ghi	77.00ab
0.2	1000	5.52abcde	4.57c	4.49bc	2.37hij	71.33abc
0.4	0	4.80bcdef	4.58bc	4.42c	2.22ij	57.17defg
0.4	250	4.33ef	4.83abc	4.45bc	1.99j	65.67bcd
0.4	1000	4.88abcdef	4.92a	4.47bc	2.16j	63.67cde
0.8	0	4.34ef	4.92a	4.45bc	2.20ij	51.83fgh
0.8	250	5.73abcd	4.87a	4.47bc	3.00efg	47.92ghi
0.8	1000	5.02abcdef	4.92a	4.51bc	4.06a	60.50cdef
1.6	0	5.75abc	4.90a	4.44bc	3.89ab	57.83defg
1.6	250	4.81abcdef	4.82abc	4.52abc	3.25cde	49.25fghi
1.6	1000	4.99abcdef	4.77abc	4.53ab	3.22cde	53.33efgh
3.2	0	5.97ab	4.87a	4.53ab	3.54bcd	45.17hi
3.2	250	4.58cdef	4.88a	4.51bc	3.16def	47.67ghi
3.2	1000	6.07a	4.77abc	4.52abc	2.75fgh	40.33i
C.V. (%)		22.32	4.95	2.04	12.91	16.08

Fir= firmeza, SST= sólidos solubles totales, CE= conductividad eléctrica, ORP= potencial de reducción de oxidación, C.V. = coeficiente de variación. En la columna las letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (LSD Fisher, ≤ 0.05).

Índice relativo de fitotoxicidad

El índice relativo de fitotoxicidad (IRF) mide la tolerancia de las plantas de tomates tratados con nanopartículas de silicio bajo estrés por arsénico basado en su producción de materia seca aérea y de raíz. Los valores de IRF basados en materia seca de raíz fueron mayores a 1 en cuatro tratamientos (figura 7), las cuales tenían dosis de arsénico de 0.2, 0.4, 1.6 y 3.2 mg L⁻¹ respectivamente, lo que indica una respuesta no tóxica en esas dosis.

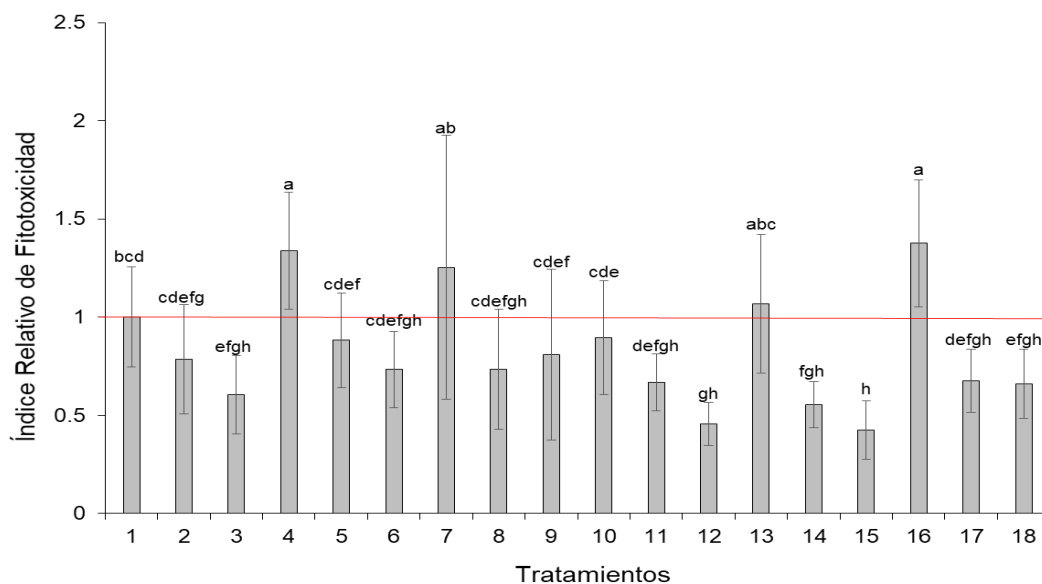


Figura 7. Índice relativo de fitotoxicidad de biomasa seca radical de plantas de tomate. IRF>1 indica estimulación de la biomasa; IRF=1 indica que no hubo efectos; IRF<1 indica inhibición de la biomasa. En las barras las letras diferentes indican diferencias estadísticas (LSD Fisher, ≤ 0.05).

Los valores basados en materia seca aérea fueron mayores a 1 en siete tratamientos (Figura 8) lo cual indica que el 39% de los tratamientos demostraron ser tolerantes al arsénico, sin embargo, los valores de los tratamientos de manera general se acercaban al 1. Una explicación para la respuesta negativa de las NPs-Si y la interacción con el As es que el silicio se acumula en las hojas viejas ya que una vez que se precipita es poco móvil y en lugares de mayor transpiración como hojas y brotes (Pozo y Urrestarazu, 2015). Además dichos resultados concuerdan con Furcal-Beriguete y Herrera-Barrante, (2013), que estudiaron el efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz, como resultado obtuvieron que la elevación de la concentración del silicio tiene efecto en la disminución de la toxicidad por hierro (Fe) y manganeso (Mn) en el cultivo de arroz ya que la presencia de silicio en las plantas, hace que en las hojas y tallos se incremente la cantidad

de oxígeno, el cual es impulsado hacia el parénquima de las raíces, oxidando la rizosfera, y logrando que el Fe y el Mn reducido se oxide, evitando una excesiva toma de estos elementos por parte de las plantas.

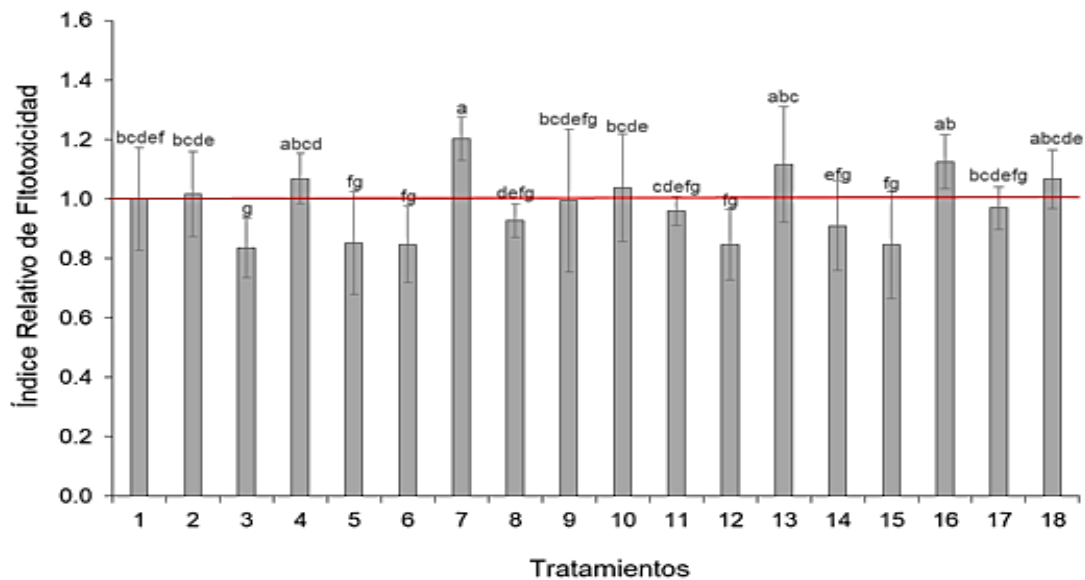


Figura 8. Índice relativo de fitotoxicidad de biomasa seca aérea de plantas de tomate. IRF>1 indica estimulación de la biomasa; IRF=1 indica que no hubo efectos; IRF<1 indica inhibición de la biomasa. En las barras las letras diferentes indican diferencias estadísticas (LSD Fisher, ≤ 0.05).

CONCLUSIONES

La aplicación de las NPs-Si tuvo un efecto positivo la altura de las plantas de tomate, diámetro del tallo, número de hojas, y al número de frutos bajo condiciones de estrés por arsénico.

Respecto a la calidad del fruto, el As y NPs-Si en sus dosis altas aumentaron la firmeza del fruto de tomate. La aplicación de la dosis más alta de NPs-Si y As disminuyó el potencial de óxido reducción.

La interacción As y NPs-Si tuvo un efecto fitotóxico en la biomasa de las plantas de tomate.

REFERENCIAS

- Abedin M. J., Cresser M. S., Meharg A. A., Feldmann J., Cotter-Howells J. 2002. Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science and Technology*. 36 (5): 962-968.
- Abedin M. J., Meharg A. A. 2002. Relative toxicity of arsenite and arsenate on germination and early seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*. 243 (1): 57-66.
- Adamczyk-Szabela D., Markiewicz J., Z., Wolf W. M. 2015. Heavy Metal Uptake by Herbs. IV. Influence of Soil pH on the Content of Heavy Metals in *Valeriana officinalis* L. *Water Air and Soil Pollution*. 226: 106.
- Adrees M., Ali S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman M., Ibrahim M., Abbas F., Farid M., Qayyum M. F., Irshad M. K. 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 119: 186-197.
- Almutairi Z. M. 2016. Effect of nano-silicon application on the expression of salt tolerance genes in germinating tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under salt stress. *Plant Omics*. 9 (1): 106.
- Arora S., Rajwade J. M., Paknikar K. M. 2012. Nanotoxicology and in vitro studies: the need of the hour. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 258 (2): 151-165.
- Balakhnina T., Borkowska A. 2013. Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses. *International Agrophysics*. 27 (2): 225-232.
- Begum M., Akter J., Jahiruddin M., Islam M. R. 2008. Effects of arsenic and its interaction with phosphorus on yield and arsenic accumulation in rice. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*. 6 (2): 277-284.
- Behling E., Marín J., Fernández K., Urdaneta Y., Carrasquero S. 2017. Efecto de la carga hidráulica sobre las remociones de Cd (II) y Cr (VI) en un reactor tipo biodiscos de tres etapas. *Impacto Científico*. 12 (2): 143-160.

- Borda O. A., Barón F. H., Gómez M. I. 2007. El silicio como elemento benéfico en avena forrajera (*Avena sativa* L.): respuestas fisiológicas de crecimiento y manejo. *Agronomía Colombiana*. 25 (2): 273-279.
- Brand-Williams W., Cuvelier M. E., Berset C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*. 28 (1): 25-30.
- Burló F., Carbonell A., Mataix J. 1992. Efectos del As en el comportamiento vegetal de *Lycopersicum esculentum* Mill. Relacion del As en hojas y frutos con parámetros físicos. *Suelo y Planta*. 2 (4): 641-650.
- Carbonell-Barrachina A. A., Burló F., Burgo-Hernández A., López, E., Mataix J. 1997. The influence of arsenite concentration on arsenic accumulation in tomato and bean plants. *Scientia Horticulturae*. 71: 167–176.
- Castellanos-González L., Mello-Prado R., Campos S., Naudi C. 2015. El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*. 36: 16-24.
- Castillo N., Franco M., González M., Santillan J., Vazquez M., Botto I. L. 2013. Efecto del riego con aguas conteniendo arsénico sobre un cultivo de rúcula (*Eruca sativa* L.). Comité Académico de Medio Ambiente de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo. 5 (I): 29-41.
- Caviedes-Rubio D. I., Ricardo-Delgado D., Olaya-Amaya, A. 2016. Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción Más Limpia*. 11 (2): 126-149.
- Chauhan G., Chauhan U. K. 2014. Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Rewa (MP), India. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*. 2: 444-460.
- Chen Y., Hu W., Huang B., Weindorf D. C., Rajan N., Liu X., Niedermann S. (2013). Accumulation and health risk of heavy metals in vegetables from harmless and organic vegetable production systems of China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 98: 324-330.

- Covarrubias S. A., Peña-Cabriales J. J. P. 2017. Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 33: 7-21.
- Cuevas-Zuñiga I. Y., Rocha-Lona L., Soto-Flores M. D. R. 2016. Las tecnologías verdes en la agroindustria en México. Caso de dos empresas hortofrutícolas. *Red Internacional de Investigadores en Competitividad*. 10 (1).
- Currie H. A., Perry C. C. 2007. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Annals of Botany*. 100 (7): 1383-1389.
- Fageria N. K., Filho M. B., Moreira A., Guimarães C. M. 2009. Foliar fertilization of crop plants. *Journal of Plant Nutrition*. 32 (6): 1044-1064.
- Farooq M. A., Ali S., Hameed A., Ishaque W., Mahmood K., Iqbal Z. 2013. Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 96: 242-249.
- FIRA. 2017. Tomate rojo 2017. Disponible en: https://documentop.com/tomate-rojo-2017-fira_5a03abc51723dd8174ee4963.html.
- Furcal-Beriguete P., Herrera-Corredor A. 2013. Efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz. *Agronomía mesoamericana*. 24 (2): 365-378.
- Gu H. H., Qiu H., Tian T., Zhan S. S., Chaney R. L., Wang S. Z., Tang Y. T., Morel J. L., Qiu R. L. 2011. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. *Chemosphere*. 83 (9): 1234-1240.
- Gunes A., Inal A., Bagci E. G., Pilbeam D. J. 2007. Silicon-mediated changes of some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic-B toxic soil. *Plant and Soil*. 290 (1-2): 103-114.
- INEGI. 2015. Anuario estadístico y geográfico de Coahuila de Zaragoza 2015. 505 p.

- Juárez-Maldonado A., Ortega-Ortiz H., Pérez-Labrada F., Cadenas-Pliego G., Benavides-Mendoza A. 2016. Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. 89: 183–189.
- Karunakaran G., Suriyaprabha R., Manivasakan P., Yuvakkumar R., Rajendran V., Prabu P., Kannan N. 2013. Effect of nanosilica and silicon sources on plant growth promoting rhizobacteria soil nutrients and maize seed germination. IET Nanobiotechnol. 7 (3): 70-77.
- Kidd P. S., Llugany M., Poschenrieder C., Gunsé B., Barceló J. 2001. The role of root exudates in aluminum resistance and silicon-induced amelioration of aluminum toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). Journal of Experimental Botany. 52 (359): 1339-1352.
- Lira-Saldívar R. 2016. Agronano Tecnología: Nueva frontera de la revolución verde. pp. 40-42.
- López-Vargas E., Ortega-Ortiz H., Cadenas-Pliego G., de Alba Romenus K., Cabrera de la Fuente M., Benavides-Mendoza A., Juárez-Maldonado A. 2018. Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. Applied Sciences. 8 (7): 1020.
- 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.
- Meharg A. A., Hartley-Whitaker J. 2002. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species. New Phytologist. 154 (1): 29-43.
- Monroy-Torres R., Espinoza-Pérez A. 2018. Factores que intensifican el riesgo toxicológico en comunidades expuestas al arsénico en agua. Ciencia de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. 12 (2): 148-157.
- Otero X. L., Tierra W., Atiaga O., Guanoluisa D., Nunes L. M., Ferreira T. O., Ruales J. 2016. Arsenic in rice agrosystems (water, soil and rice plants) in Guayas and Rios provinces, Ecuador. Science of the Total Environment. 573: 778-787.

- Poschenrieder C., Cabot C., Martos S., Gallego B., Barceló J. 2013. Do toxic ions induce hormesis in plants? *Plant Science*. 212: 15-25.
- Pozo J., Urrestarazu M. 2015. Beneficios de la aplicación de silicio en el cultivo de tomate sin suelo. *Vida rural*. 393: 72-80.
- Prasad R., Kumar V., Prasad K. S. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*. 13: 705-713.
- Prieto-García F., Prieto-Méndez J., Callejas-Hernández J., Román-Gutiérrez A. D., Méndez-Marzo M. A. 2010. Bioacumulación de arsénico en las etapas de desarrollo de la cebada maltera (*Hordeum distichon* L.). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 1 (1): 37-44.
- Prieto-Méndez J., González-Ramírez C. A., Román-Gutiérrez A. D., 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.
- Raliya R., Nair R., Chavalmane S., Wang W. N., Biswas P. 2015. Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*. 7 (12): 1584-1594.
- Raya-Pérez J. C., Aguirre Mancilla C. L. 2012. El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia Tecnológica*. 43: 42-46.
- Re R., Pellegrini N., Proteggente A., Pannala A., Yang M., Rice-Evans C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*. 26 (9-10): 1231-1237.
- Reyes Y., Vergara I., Torres O., Díaz-Lagos M., González-Jiménez E. E. 2016. Contaminación por metales pesados: implicaciones en Salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*. 16: 66-77.
- Rogalla H., Römheld V. 2002. Role of leaf apoplast in silicon-mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant, Cell and Environment*. 25 (4): 549-555.

- Roh T., Lynch C. F., Weyer P., Wang K., Kelly K. M., Ludewig G. 2017. Low-level arsenic exposure from drinking water is associated with prostate cancer in Iowa. *Environmental Research*. 159: 338-343.
- Ruiz-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: 330-339.
- SAGARPA. 2017. Boletín mensual de la producción tomate rojo (jitomate).
- Seth C. S. 2012. A review on mechanisms of plant tolerance and role of transgenic plants in environmental cleanup. *The Botanical Review*. 78 (1): 32-62.
- SIAP. 2017. Atlas Agroalimentario 2017. SIAP-SAGARPA. México. 94-95 pp.
- Siddiqui M. H., Al-Whaibi M. H., Mohammad F. 2015. *Nanotechnology and Plant Sciences*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. 19-35.
- Singh A., Sharma R. K., Agrawal M., Marshall, F. M. (2010). Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India. *Tropical Ecology*. 51 (2): 375-387.
- Stoeva N., Berova M., Zlatev Z. 2005. Effect of arsenic on some physiological parameters in bean plants. *Biologia Plantarum*. 49 (2): 293-296.
- Stoeva N., Bineva T. 2003. Oxidative changes and photosynthesis in oat plants grown in As-contaminated soil. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*. 29 (1-2): 87-95.
- Su Y. H., McGrath S. P., Zhao F. J. 2010. Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley. *Plant and Soil*. 328 (1-2): 27-34.
- Sykłowska-Baranek K., Pietrosiuk A., Naliwajski M. R., Kawiak A., Jeziorek M., Wyderska S., Lojkowska E., Chinou I. 2012. Effect of L-phenylalanine on PAL activity and production of naphthoquinone pigments in suspension cultures of *Arnebia euchroma* (Royle) Johnst. *In Vitro Cellular Developmental Biology-Plant*. 48 (5): 555-564.

- Tapase S. R., Kodam K. M. 2018. Assessment of arsenic oxidation potential of *Microvirga indica* S-MIIb sp. nov. in heavy metal polluted environment. *Chemosphere*. 195: 1-10.
- Tobar J., Ramírez-Muñoz, M., Fermín I., Senior W. 2018. Concentración de Metales Pesados en Bivalvos *Anadara tuberculosa* y *A. Similis* del Estero Huaylá, Provincia de el Oro, Ecuador. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*. 51 (2): 97-116.
- Toledo-Salas A., Hernández-Pimentel M. V., Rodríguez-Tovar A. V., Guerrero-Zúñiga, L. A., Rodríguez-Dorantes, A. 2018). Evaluación del efecto del cadmio sobre la actividad de fenoloxidasas de tejido calloso de *Epithelantha micromeris* inoculado con rizobacterias. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 34 (4): 725-735.
- 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 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: 189-198.
- Ulloa M., Bustos V., Neaman A., Gaete H. 2018. Comportamiento de evasión y reproducción de la lombriz *Eisenia foetida* en suelos agrícolas impactados por actividades mineras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 34 (1): 35-43.
- USDA. 1997. United States Department of Agriculture. Agricultural Marketing Service. United States standards for grades of fresh tomatoes. Disponible en: https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Tomato_Standard%5B1%5D.pdf

- Yadav S. K. 2010. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*. 76 (2): 167-179.
- Yu Z., Dahlgren R. A. 2000. Evaluation of methods for measuring polyphenols in conifer foliage. *Journal of Chemical Ecology*. 26: 2119-2140.
- Zhang J., Zeng L., Sun H., Zhang J., Chen S. 2017. Using Chitosan Combined Treatment with Citric Acid as Edible Coatings to Delay Postharvest Ripening Process and Maintain Tomato (*Solanum lycopersicon* Mill) Quality. *Journal of Food and Nutrition Research* 5 (3): 144-150.
- Zhang Q., Liu J., Lu H., Zhao S., Wang W., Du J., Yan, C. 2015. Effects of silicon on growth, root anatomy, radial oxygen loss (ROL) and Fe/Mn plaque of *Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco seedlings exposed to cadmium. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 4: 6-11.