

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Uso del Yodo (I) como Inductor a la Tolerancia al Estrés por Salinidad en Plántulas de Tomate (*Lycopersicon esculentum*) Var. Rio Grande.

Por:

ABNER SBDIEL PÉREZ SALAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

(Ciencias de Suelo y Producción de Cultivos)

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre de 2019.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Uso del Yodo (I) como Inductor a la Tolerancia al Estrés por Salinidad en
Plántulas de Tomate (*Lycopersicon esculentum*) Var. Rio Grande

Por:

ABNER SABDIEL PÉREZ SALAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría

En el presente trabajo de investigación el M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala Presidente de jurado, reconoce a la Dra. Julia Rosa Medrano Macías como Director de la tesis y como Coasesores al Dr. Adalberto Benavides Mendoza y al M.C. Jorge Enrique Canales Almendares del alumno Abner Sabdiel Pérez Salas.



M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala

Presidente

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Uso del Yodo (I) como Inductor a la Tolerancia al Estrés por Salinidad en Plántulas de Tomate (*Lycopersicon esculentum*) Var. Rio Grande.

Por:


ABNER SABDIEL PÉREZ SALAS


TESIS

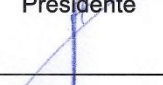
Se somete a la Consideración del H. Jurado Examinador como Requisito para Obtener el Título de:

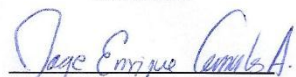
INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada Por:


M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala
Presidente


Dra. Julia Rosa Medrano Macías
Coasesor


Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Coasesor


M.C. Jorge Enrique Canales Aimendares
Vocal suplente




M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por brindarme la oportunidad de sacar adelante una de mis metas, y concluir con esta etapa muy importante de mi vida.

A mí Alma Terra Mater

UAAAN: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Por haberme albergado durante estos últimos cuatro años, dotándome de muchos conocimientos y herramientas para la vida.

A mis asesores

Dra. Julia Rosa Medrano Macías Por sus esfuerzos, dedicaciones, conocimientos, orientaciones, la manera de trabajar, sus paciencias y motivaciones han sido fundamentales para mi formación académica.

M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala. Gracias por su apoyo, tiempo y por sus enseñanzas, por la confianza y dedicación que me brindó en este trabajo.

Dr. Adalberto Benavidez Mendoza. Gracias por la oportunidad que me ha brindado, por su paciencia y comprensión, y por la gran confianza que me brindó para llevar a cabo esta investigación.

Uriel Salas

Por sus consejos, por su amistad durante estos últimos once años, por ser una muy buena persona, por su confianza, amabilidad y paciencia por el apoyo en todo momento, y por la motivación GRACIAS!!!

Arely de la fuente

Por el apoyo durante los años de mi carrera, por los ánimos y los consejos para que pudiera realizar mis sueños.

Carlos Ortega y Joní Morales

Por todo su apoyo en cada momento de mi carrera, gracias por su amistad y confianza

DEDICATORIA

A mis padres

Sr. Romeo Pérez

Sra. Bertha Salas

Este trabajo se los dedico a ustedes que nunca dejaron de creer en mí y estuvieron conmigo en todo momento, agradezco la oportunidad de continuar con mis estudios, sé que hicieron un gran esfuerzo para que este sueño se cumpla, gracias por esas palabras de aliento que me dieron fuerzas para continuar, por los consejos espero nunca defraudarlos, y no olviden que los amo. Es un privilegio y soy feliz de ser su hijo y que ustedes sean mis padres.

A mis hermanos

Josué & Berenice

Porque ustedes siempre están conmigo, escuchándome, ayudándome y brindándome su mejor aliento, GRACIAS por todos los momentos que hacen que mi vida sea feliz y sin complicaciones, pero sobre todo Gracias por creer en mí, por eso y más les dedico este triunfo con todo mi corazón. Los adoro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I.INTRODUCCIÓN	14
II.OBJETIVO GENERAL	16
2.1. Objetivos específicos	16
III.HIPÓTESIS	16
IV.REVISIÓN DE LITERATURA	17
4.1. Yodo y salud humana	17
4.2. Fertilización con yodo y biofortificación.....	18
4.3. Fertilización con yodo e incremento de la biomasa	20
4.4. Yodo y antioxidantes.....	22
4.5. Yodo y nutraceuticos	23
4.6. Absorción y transporte.....	24
4.7. El rol del yodo como inductor al estrés	27
4.8. EL CULTIVO DEL TOMATE.	27
4.8.1. Descripción botánica.	27
4.8.2. Importancia económica.....	28
4.8.3. Requerimientos edafoclimáticos	28
4.9. Estrés por salinidad	28

V.MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
5.1. Sitio experimental.	30
5.2. Preparación de charolas y siembra.....	30
5.3. Trasplante.....	31
5.4. Riego	31
5.5. Fertilización.....	31
5.6. Tratamientos.....	32
5.7. Diseño experimental	33
5.8. Sometimiento de plántulas a estrés.....	33
5.9. Muestreo	33
5.10 Variables de crecimiento.....	33
5.10.1. Altura de planta	33
5.10.2. Diámetro de tallo.....	34
5.10.3. Número de hojas.	34
5.10.4. Peso fresco y seco.	34
5.11. Análisis de antioxidantes	34
5.11.1. Capacidad antioxidante	34
5.11.2. Clorofilas.....	35
5.12. Análisis de minerales.....	36
5.12.1. Digestión ácida.	36
5.12.2. Determinación de minerales.....	36
5.12.3. Nitrógeno (N)	36
5.12.4. Fósforo (P).....	37
5.12.5. Contenido de yodo (I)	37
5.13. Análisis estadístico	37

VI.RESULTADOS	38
6.1. Contenido de yodo (I) en las plantas	38
6.2. Crecimiento de las plántulas de tomate	38
6.3. Antioxidantes	39
6.4. Contenido de minerales	40
VII.DISCUSIÓN	47
7.1. Crecimiento y elementos minerales.	47
7.2. Potencial antioxidante.....	50
VIII.CONCLUSIÓN.....	52
IX.BIBLIOGRAFÍA.....	53
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA.....	vi

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Concentraciones de la solución nutritiva según (Steiner, 1961).....	32
Cuadro 2. Tratamientos evaluados en el experimento.....	32
Cuadro 3. Acumulación de yodo en tejidos vegetales.....	38
Cuadro 4. Respuesta del crecimiento en los tratamientos.	39
Cuadro 5. Respuesta de las variables bioquímicas en los tratamientos.	39
Cuadro 6. Respuesta del contenido mineral acorde a los tratamientos.	40
Cuadro 7. Coeficientes de correlación de las variables de crecimiento.	43
Cuadro 8. Coeficientes de correlación de los elementos minerales.....	43
Cuadro 9. Coeficientes de correlación en las variables bioquímicas.	44
Cuadro 10. Tendencias obtenidas en las variables de crecimiento.	45
Cuadro 11. Tendencias obtenidas en los elementos minerales.....	46
Cuadro 12. Tendencias obtenidas en las variables bioquímicas.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circulación del yodo en la naturaleza según (Follis, 1996).....	25
Figura 2. Resumen de la captación, movilización y emisión del yodo acorde con (Gonzali et al., 2017).....	26
Figura 3. Biplot de componentes principales para crecimiento, antioxidantes y minerales de las plántulas de tomate.....	42
Figura 4. Esquema del Biplot. Tratamientos y su relación con las variables descritas en cada cuadrante.	44

RESUMEN

El yodo (I) es un elemento esencial en humanos. Sin embargo, no en todas las plantas la función de este elemento ha sido dilucidada, ejemplo de esto son las plantas terrestres, en donde hasta ahora se desconoce la ruta metabólica que sigue el yodo. No obstante, se ha demostrado que la aplicación exógena de diversas especies químicas de yodo induce efectos benéficos, debido a su amplio poder oxidoreductor. Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de yodo a plántulas de tomate sometidas a estrés por salinidad sobre el crecimiento, minerales y antioxidantes. La hipótesis fue que la aplicación de yodo (I) en plántulas de tomate, mitiga el estrés por salinidad aumentando la capacidad antioxidante, haciendo sinergia con la absorción de algunos minerales y favoreciendo la tasa de crecimiento de las plantas sometidas a estrés por salinidad. El diseño experimental fue completamente al azar con cuatro tratamientos: Testigo, KIO_3 100 μM , NaCl, KIO_3 100 μM + NaCl, a razón de quince repeticiones por tratamiento. A los datos obtenidos se les realizó un análisis de varianza, subsecuentemente una prueba de medias de Diferencia Mínima Significativa (LSD) al 0.05 y posteriormente un análisis multivariado por componentes principales. La aplicación foliar de yodato de potasio (KIO_3) se realizó 15 días después del trasplante y 20 días posteriores al trasplante fueron sometidas a estrés con 100 mM de cloruro de sodio (NaCl). El muestreo se llevó a cabo 30 días posteriores al trasplante y se tomaron 5 plántulas por tratamiento para el análisis de variables bioquímicas: capacidad antioxidante y clorofila a, b y total, otras 5 repeticiones por tratamiento fueron tomadas para la medición de macro y micronutrientes y 5 repeticiones más para la medición del crecimiento. Los resultados mostraron una tendencia de incremento en la capacidad antioxidante tras la aplicación de yodato de potasio (KIO_3) 100 μM sin estrés por salinidad, sin afectar el crecimiento y la absorción de algunos minerales. Además, hubo un aumento en el crecimiento y en el contenido de clorofilas a, b y total, así como un incremento en el contenido de los elementos calcio (Ca) cobre (Cu) y sodio (Na) en los tratamientos sometidos a estrés. **Palabras claves:** Capacidad antioxidante, balance nutracéutico, poder oxidoreductor, aplicación foliar, biomasa, yodato.

ABSTRACT

Iodine (I) is an essential element in humans. However, not all taxa function of this element is fully elucidated, examples of this are land plants, where until now the metabolic pathway that iodine follows is unknown. However, it has been shown that the exogenous application of various chemical species of iodine induces beneficial effects, due to its broad redox power. For this reason, the objective of the present work was to evaluate the effect of iodine application in tomato seedlings subjected to salinity stress on growth, minerals and antioxidants. The hypothesis was that the application of iodine (I) in tomato seedlings mitigates salinity stress by increasing antioxidant capacity, synergizing with the absorption of some minerals and improve the growth rate. The experimental design was completely randomized with four treatments: control, 100 μM KIO_3 , NaCl, 100 μM KIO_3 + NaCl, at the rate of fifteen repetitions per treatment. The data obtained was carried out by an analysis of variance, subsequently a Significant Minimum Difference (LSD), averages at 0.05 and additionally a multivariate analysis by principal components. Foliar application of potassium iodate (KIO_3) was performed 15 days after transplantation and 20 days after transplantation were subjected to stress with 100 mM sodium chloride (NaCl). Sampling was carried out 30 days after transplantation and 5 seedlings were taken per treatment for the analysis of biochemical variables: antioxidant capacity and chlorophyll a, by total, another five repetitions per treatment were taken for the measurement of macro and micronutrients and 5 repeats more for growth measurement. The results showed a tendency to increase antioxidant capacity after the application of 100 μM potassium iodate (KIO_3) without salinity stress, no changes on growth and absorption of some minerals. In addition, there was an increase in the growth and content of chlorophylls a, b and total, as well as an increase in the content of the elements calcium (Ca) copper (Cu) and sodium (Na) in plants under stress.

Keywords: Antioxidant capacity, nutraceutical balance, oxidoreductive power, foliar application, biomass, iodate.

I.INTRODUCCIÓN

El estrés por salinidad representa un grave problema a nivel mundial ya que se considera como el estrés abiótico más importante que afecta a más de 100 millones de hectáreas en zonas áridas y semiáridas provocando que la producción hortícola se vea muy limitada. Actualmente, en México y el mundo se continúa produciendo en mayor densidad el tomate a campo abierto enfrentando constantemente esta condición adversa. Ante ello se plantea probar una alternativa para mitigar los efectos negativos de alto contenido salino: aplicación de yodo en forma de yodato por aspersión foliar en plántulas de tomate como posible inductor a la tolerancia al estrés.

El yodo es considerado como un elemento esencial para los mamíferos, su papel principal es contribuir en la formación de hormonas tiroidea, así como el desarrollo normal y el buen funcionamiento del organismo. En los humanos, una dieta con reducido contenido de yodo desencadena un amplio espectro de patologías (Bastardo *et al.*, 2017), tanto que la recomendación de ingesta diaria de yodo para el caso de personas adultas es de 150 µg por día (Gómez y Alvarez, 1997), a pesar de ser un requerimiento sumamente bajo, una gran parte de la población sufre enfermedades causadas por la deficiencia de yodo, este problema está asociado directamente con el medio ambiente ya que en muchas regiones del mundo, las zonas montañosas, planicies de inundación en particular, los suelos contienen muy bajas cantidades de yodo, lo que afecta severamente el suministro de este elemento a los cultivos hortícolas, que a su vez son incapaces de proporcionar a las personas que se alimentan de los cultivos producidos allí (Kiferle *et al.*, 2013).

A la fecha se tiene considerado al yodo como elemento no esencial para las plantas terrestres, debido a que se desconoce la vía metabólica puntual que sigue. Sin embargo, se ha demostrado que el contenido de yodo en las plantas aumenta al aplicarse en forma de yoduro, yodato y otras formas químicas (CH₃COOI) mediante

solución nutritiva o por aspersión foliar (Weng *et al.*, 2008) y que este confiere efectos benéficos, relacionado principalmente con un incremento y potencialización en el metabolismo redox, actuando como prooxidante moderado, promoviendo la síntesis de antioxidantes no enzimáticos y enzimáticos, potenciando con ello la tolerancia al estrés (Gupta *et al.*, 2015) característica que conduce a un incremento a la tolerancia de muchos factores adversos. Adicionalmente a lo ya mencionado, también se ha argumentado que el yodo ejerce una función directa como donante de electrones (antioxidante inorgánico) al menos contra el radical superóxido.

(Venturi, 2012) planteó que el yodo fue uno de los primeros antioxidantes inorgánicos usados por organismos fotosintéticos, y (La Barre *et al.*, 2010) sugieren que las algas marinas son capaces de usar el yodo como antioxidante durante los eventos de estrés oxidativo, un hecho que podría funcionar de manera similar en plantas terrestres. Aunque esta peculiaridad del uso del yodo cuenta con poca investigación y aplicación en la agricultura.

El cultivo de tomate, son plantas capaces de soportar cantidades muy altas de yodo, hasta 5000 μM , sin sufrir daños graves en el crecimiento y producción (Kiferle *et al.*, 2013), aunada a que es una de las especies de hortalizas más cultivadas y de mayor importancia comercial, con una superficie a nivel mundial de más de cuatro millones de hectáreas sembradas (SAGARPA, 2017), tanto en campos abiertos como bajo condiciones de invernadero y siendo la salinidad el estrés abiótico más ampliamente distribuido alrededor del mundo; teniendo alrededor de 110 millones de hectáreas de suelos salinos, de acuerdo a la (FAO, 2013) entre 20 y 30 millones de estas están severamente deterioradas. Por lo que este trabajo de investigación preliminar se enfocará en dilucidar si la aplicación de yodo vía foliar en forma de KIO_3 a una concentración de 100 μM en plántulas de tomate ofrece una mayor tolerancia a los efectos negativos del estrés por salinidad cultivadas bajo condiciones de invernadero.

II.OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del yodo sobre el potencial antioxidante, el balance mineral y el crecimiento de plántulas de tomate cultivadas bajo condiciones de invernadero sometidas a estrés por salinidad.

2.1. Objetivos específicos

- a) Determinar el potencial antioxidante de las plántulas de tomate.
- b) Evaluar la acumulación de minerales en las hojas de las plantas de tomate.
- c) Evaluar el crecimiento de las partes vegetativas de las plantas de tomate tratadas con yodo y sometidas a estrés por salinidad.

III.HIPÓTESIS

La aplicación de yodo en plantas de tomate cultivadas bajo condiciones de invernadero, mitigará el estrés por salinidad, aumentando la capacidad antioxidante, la absorción de minerales y el crecimiento.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Yodo y salud humana

El yodo (I) es un elemento químico perteneciente al grupo de los halógenos con número atómico 53 de la tabla periódica de los elementos y se considera como un micronutriente esencial dentro de la nutrición humana desde el siglo pasado, pero recientemente ha comenzado a tener mucho auge ya que se ha logrado demostrar que su déficit ocasiona trastornos que pueden alterar seriamente el desarrollo integral del ser humano (Gómez y Alvarez, 1997), la función principal de este elemento es intervenir en la síntesis de hormonas tiroidea, mismas que se encargan de regular el crecimiento, desarrollo neurológico y metabolismo normal a lo largo de la vida, a su vez estas hormonas ayudan al funcionamiento normal de la tiroides, por ello una deficiencia de este elemento ocasiona severos daños en la salud humana a nivel mundial (Colomer *et al.*, 2008)

Cabe mencionar que hasta hace algunos años la deficiencia de yodo solamente se relacionaba con el bocio endémico pero con base en las investigaciones realizadas en varios países en las últimas décadas se ha podido demostrar que el bocio no es la única manifestación de la falta de yodo sino que también existe lo que se ha denominado como los Trastornos causados por la Deficiencia de Yodo (TYD), dentro de las cuales se encuentran el aumento de la mortalidad neonatal, defectos de audición, disminución de la capacidad intelectual y del crecimiento, aumento del número de abortos, anomalías congénitas con daño neuromotor permanente (Luis, Aller, e Izaola, 2005), el problema es enorme y tiene un impacto negativo en la población, además de que es evidente que la deficiencia de yodo es frecuente en diversas áreas del mundo, se estima que cerca de un tercio de la población vive en áreas con esta situación, esto indica que casi dos mil millones de personas se encuentran en riesgo, siendo más vulnerables las mujeres embarazadas y niños (Noa Cordero, 2011).

4.2. Fertilización con yodo y biofortificación.

El yodo se encuentra disponible de forma natural en el suelo pero su concentración está directamente influenciada por su cercanía al océano, así como de la composición del material madre del suelo, las zonas montañosas, planicies y valles en los continentes presentan bajas concentraciones de yodo (Colomer *et al.*, 2008), además este elemento muestra un amplio rango de concentraciones en el suelo desde <0.1 hasta 150 mg Kg^{-1} , se considera también que las concentraciones son más altas en el suelo que en la roca madre, debido a que gran cantidad de yodo proviene de la atmósfera (Fuge, 2013).

La disponibilidad y absorción del yodo del suelo se ve modificado debido al contenido de materia orgánica ya que esta misma ayuda a que las plantas puedan absorber con mayor facilidad el yodo en forma de yodato (IO_3) (Seki, *et al.*, 1984), aunque este efecto depende de la habilidad de las sustancias húmicas para absorber el yodo, disminuyendo su volatilización (Bostock *et al.*, 2003), además (Shinonaga *et al.*, 2001), afirman que el pH del suelo parece no tener influencia en el proceso de absorción de este elemento en valores de 5.4 a 7.6.

Por otra parte se tiene conocimiento de que la concentración de yodo en especies vegetales va de 0.1 hasta $1 \mu\text{g g}^{-1}$, casos específicos donde también puede alcanzar hasta $3 \mu\text{g g}^{-1}$ o más (Jones, 2012). Cabe destacar que se tienen pocos estudios sobre la acumulación de este elemento en plantas terrestres, sin embargo (Weng *et al.*, 2008), en un estudio con plantas de calabaza a las cuales se le suministraron yodo orgánico e inorgánico directamente al sustrato, se pudo demostrar que la mayor parte del yodo fue acumulado en la raíz mientras que otra pequeña porción fue transportada a las partes aéreas para posteriormente almacenarse en los cloroplastos.

Por consiguiente, los productos agrícolas son de vital importancia para la ingestión de nutrientes minerales por ello desde hace algunos años se está investigando la manera de enriquecer los productos vegetales destinados al consumo humano con la denominada biofortificación, la cual se define como el proceso de incrementar la concentración de elementos esenciales en la parte comestible de productos cosechados mediante la intervención agronómica (Rios, 2013), por su parte (Márquez *et al.*, 2015), mencionan que la biofortificación es una estrategia biológica que tiene como objetivo incrementar los micronutrientes contenidos en las partes comestibles de las plantas, animales o microorganismos a través del cultivo o uso de la biotecnología, además se considera que es una manera segura y eficaz para corregir la malnutrición.

(Antonio y Moreno, 2008), señalan que algunos estudios realizados durante el siglo pasado indican que el yodo tiene un efecto estimulante sobre el crecimiento de las plantas e incluso puede llegar hasta ser esencial, sin embargo estudios posteriores no confirman estas teorías, razón por la cual el yodo aún no es considerado como elemento esencial para las plantas terrestres, además de que, aplicaciones superiores a las 16 ppm afectan negativamente a la planta y el rendimiento, causando pérdida de coloración y necrosis. Por consiguiente, tal como lo menciona (Landini *et al.*, 2012), una de las formas más rentables para disminuir la deficiencia de yodo en los humanos es suministrar alimentos con mayor contenido de dicho elemento ya que por este medio es fácilmente disponible y asimilable, es por eso que se han implementado programas de biofortificación con yodo a plantas terrestres y se ha encontrado que una planta puede acumular fácilmente este elemento, pero los frutos y vegetales siguen siendo muy pobres, a su vez deficientes en yodo debido a que gran parte es volatilizado como Yoduro de metilo por acción de enzimas (Landini *et al.*, 2012).

Derivado de la necesidad de aumentar el contenido de yodo en especies vegetales se han hecho estudios con programas de biofortificación en arrozales, sin

mucha efectividad debido a que el yodo tiene poca movilidad floemática, por lo que la acumulación de este elemento en las hojas depende de su transporte a través del xilema (Blasco, 2010), cabe también mencionar que en algunos trabajos con plantas de tomate, papa, cebada y maíz a las cuales fueron suministradas mediante irrigación con concentraciones de 500 ppm y 1000 ppm con yoduro y yodato, se descubrió que existe una mayor facilidad de absorción del yoduro en comparación con el yodato (Leija *et al.*, 2017), por otra parte (Landini *et al.*, 2011) aseguran que en plantas de tomate una muy baja cantidad de yoduro puede estimular el crecimiento tangencial y hasta cierto punto mejorar el rendimiento. Además, investigaciones recientes han propuesto al tomate como el mejor candidato para los programas de fortificación debido a que se han obtenido resultados positivos en términos de acumulación efectiva de yodo en los frutos (Kiferle *et al.*, 2013).

4.3. Fertilización con yodo e incremento de la biomasa

Debido al auge que han tenido los programas de biofortificación y el interés por la suplementación con yodo en la cadena alimenticia mediante la captación y acumulación de este elemento en plantas para consumo humano (Nestel *et al.*, 2006), se ha demostrado que los mejores resultados se han obtenido al aplicar compuestos de yodo en la solución nutritiva o por aspersión foliar, pero en cada especie vegetal las respuestas son variables en el sentido que se modifica la respuesta frente a la concentración y cambia la distribución en los órganos de la planta (Weng *et al.*, 2008), tal es el caso de un estudio llevado a cabo por (Zhu *et al.*, 2003), donde estudiaron la absorción de yodo en plantas de espinaca bajo cultivo hidropónico a concentraciones de 0.127, 1.27, 6.35, y 12.7 mg L⁻¹ de yoduro y yodato, encontrándose como resultado que con 12.7 mg L⁻¹ de yoduro hubo efectos negativos en el crecimiento de las plantas, mientras que con esa misma concentración de yodato solo hubo un pequeño efecto sobre la biomasa de la planta. Por el contrario, a concentraciones bajas tal como 0.127mg L⁻¹ de yoduro y yodato, dieron como resultado una adecuada acumulación de

este elemento, presentando 3 y 1.8 $\mu\text{g l g}^{-1}$ de peso fresco, lo cual representa valores adecuados.

Además en otro experimento de biofortificación realizado por (Voogt *et al.*, 2010), donde se hicieron aplicaciones de yoduro y yodato en plantas de lechuga, a concentraciones muy bajas de entre 0.013 hasta 0.129 mg L^{-1} , y se encontró que ninguna de las concentraciones mostraron un efecto tóxico en las plantas de lechuga, sin embargo con una concentración de 0.129 mg L^{-1} de yoduro, las plantas presentaron una acumulación de 0.653 y 0.764 $\mu\text{g l g}^{-1}$ de tejido fresco, cinco veces menos que la concentración obtenida al aplicar yodato.

Por su parte, (Caffagni *et al.*, 2012) realizaron un estudio con aplicación de yoduro y yodato mediante irrigación a concentraciones de 500 y 1000 mg L^{-1} y 500, 1000, 2000 y 5000 mg L^{-1} , respectivamente, en cebada, maíz, tomate y papa. Donde se encontraron resultados favorables únicamente en los frutos de tomate y tubérculos de papa, alcanzando concentraciones de 272 a 6 245 $\mu\text{g l}$ por cada 100 g de peso fresco y de 527 a 5 375 $\mu\text{g l}$ por cada 100 g de peso fresco respectivamente. Se demostró que la concentración de yodo alcanzado en los frutos de tomate en plantas tratadas con yoduro a 500 mg L^{-1} fue siete veces más elevada que la concentración alcanzada con la aplicación de yodato a 500 mg L^{-1} (3 900-527 $\mu\text{g}/100 \text{ g}$), para el caso de los tubérculos de papa sucedió de manera similar y es que la concentración alcanzada con la aplicación de 500 mg L^{-1} de yoduro fue siete veces más que la concentración alcanzada en aplicaciones de yodato 500 mg L^{-1} (1 872-272 $\mu\text{g l}/100 \text{ g}$ de peso fresco), hecho que corrobora una mejor absorción del yoduro en comparación al yodato.

Sin embargo, (Tonacchera *et al.*, 2013) en un estudio también lograron aumentar la concentración de yodo en papa, zanahoria, lechuga y tomate, aplicando yodo como aspersión foliar, donde los resultados mostraron un incremento de yodo en

las partes comestibles, alcanzando hasta 30% de la recomendación diaria del consumo de yodo sin afectar otros aspectos de la calidad de los alimentos.

4.4. Yodo y antioxidantes.

Dada la importancia del yodo y su beneficio para el buen funcionamiento de la glándula tiroidea, se ha logrado demostrar en estudios recientes, una función distinta y es que el yodo también es capaz de actuar de dos diferentes formas: como antioxidante y como antiploriferativo de células malignas (Aceves y Anguiano, 2009), ya que en bajas concentraciones el yodo es capaz de neutralizar directamente radicales Hidroxilo (OH) y adicionalmente en su forma oxidada (I_2) compite con las Especies Reactivas al Oxígeno (ROS) por varios componentes celulares disminuyendo altamente la lipoperoxidación (Rösner *et al.*, 2016).

Por su parte, (Venturi, 2012) menciona que para el caso de plantas además de los efectos benéficos del yodo como fertilizante, también funciona como antioxidante en todos los organismos ya que se cree que es uno de los primeros antioxidantes utilizados por especies fotosintéticas primitivas. Aunado a su valor antioxidante el yodo parece estar directamente relacionado con el proceso de generación controlada de radicales libres lo cual eleva la capacidad de tolerancia de los organismos frente a cualquier tipo de estrés ambiental (Venturi, 2012), sin embargo para el caso de las plantas marinas el yodo es rápidamente incorporado en compuestos orgánicos formando aminoácidos y lípidos yodados con una mayor tolerancia al estrés oxidativo causado por radicales libres (Landini *et al.*, 2012).

4.5. Yodo y nutraceuticos

La maquinaria de defensa antioxidante protege a las plantas contra daños por estrés oxidativo, ya que poseen una enzima muy eficiente (superóxido dismutasa, SOD; catalasa, CAT; peroxidasa de ascorbato, APX; glutación reductasa, GR; monodehidroascorbato reductasa, MDHAR; deshidroascorbato reductasa; Sistemas de defensa antioxidantes no enzimáticos (ácido ascórbico, ASH; glutación, GSH; compuestos fenólicos, alcaloides, aminoácidos no proteicos y α -tocoferoles) que funcionan conjuntamente para controlar las diversas acciones de oxidación incontrolada y proteger las células de las plantas del daño oxidativo por la eliminación de ROS (Gill y Tuteja, 2010).

Además (Luna y Delgado, 2014), mencionan que los frutos de tomate son considerados como fuente importante de vitaminas (A, C y E) y fotoquímicos no nutritivos (licopeno, flavonoides, flavonas y compuestos fenólicos totales) por ello contienen propiedades antimutagénicas y anticancerígenas, por otra parte cabe resaltar que los antioxidantes son compuestos capaces de inhibir o retardar la oxidación mediante la captación de radicales libres, a su vez también estabilizan superóxidos o inactivan el oxígeno singlete (Luna y Delgado, 2014)

Y es que dentro del mundo de la biofortificación, se busca incrementar la capacidad antioxidante de las plantas para que sean capaces de actuar ante situaciones de estrés, por ello en un estudio realizado por (Flores *et al.*, 2016), donde evaluaron el efecto del yodo en forma de yoduro de potasio (KI), con aplicaciones vía foliar a concentraciones de 0, 10, 15, 30, 45, 50 mM KI L⁻¹, se encontró que en concentraciones de entre 10 y 15 mM KI L⁻¹ las plantas presentaron una mejor absorción de minerales, mayor cantidad y actividad de antioxidantes, así como un aumento en cuanto vigor de las plántulas.

4.6. Absorción y transporte.

El yodo se encuentra distribuido en la naturaleza siendo en el mar donde se encuentra en mayor proporción, de ahí que muchas especies marinas como algas, esponjas, corales, pescados y moluscos sean ricos en yodo, también podemos encontrar cantidades de este elemento en menor proporción ya sea en el suelo o los ríos donde se concentra por la actividad biológica de plantas y animales (Zimmermann y Andersson, 2012).

Adicionalmente, el ciclo del yodo es muy complejo y ha sido bien establecido, primeramente, comienza con la evaporación desde los mares, posteriormente se difunde por la atmósfera, se concentra en las nubes y termina precipitándose a la tierra junto con el agua de lluvia o la nieve (Follis, 1996); el yodo se concentra en la tierra, después suele ser arrastrado para llegar a los ríos y finalmente depositarse nuevamente en el mar (Hernandez, 2014).

Las plantas pueden absorber el yodo del suelo, pero el comportamiento del yodo en un sistema suelo-planta suele llegar a ser sumamente complejo debido a una gran cantidad de factores involucrados, este elemento puede estar presente de forma inorgánica como yoduro (I^-), yodato (IO_3^-), o algunas formas orgánicas. La composición del suelo, la textura, el pH y las condiciones Redox controlan la disponibilidad del yodo y su movilidad en el suelo, lo que afecta directamente su captación a través de las raíces (Blasco *et al.*, 2008)

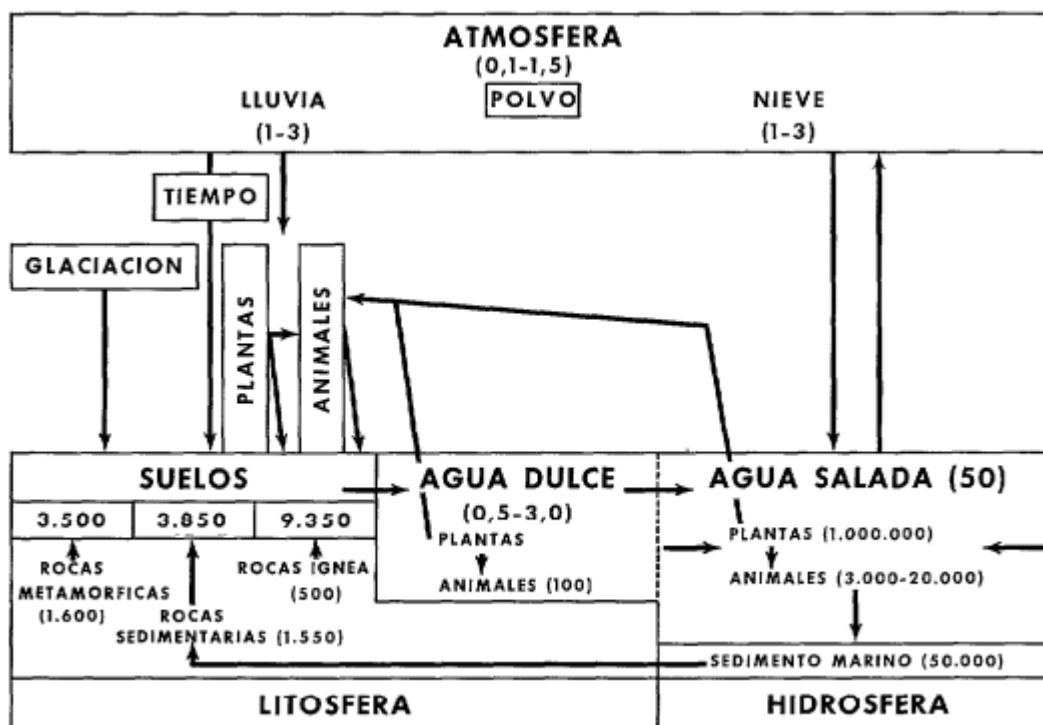


Figura 1. Circulación del yodo en la naturaleza según (Follis, 1996).

En la figura anterior, los números indican microgramos de yodo por kilogramo de materia seca, o por litro si esta materia se encuentra en estado Líquido.

El proceso de absorción depende de la concentración y de la forma existente en el medio por parte del yodo (Blasco, 2010), y comienza cuando el IO es reducido a través de la actuación del NADH y NAD para convertirlo en I, se ha demostrado que de esta forma a través de portadores o canales específicos es como logra ingresar a las células de la raíz hasta llegar al xilema, una vez dentro de la planta va disminuyendo su concentración desde la raíz, tallo, hojas y fruto. Por otra parte, se ha demostrado que en plantas de tomate y lechuga hay un transporte floemático de dicho elemento ya que algunas especies de yodo (orgánico e inorgánico) se encuentran presentes en la atmósfera. Finalmente, las plantas superiores pueden emitir yoduro de metilo (CHI) volátil, esta reacción se produce a través de una reacción catalizada por un haluro dependiente de S-adenosil-L-metionina (SAM) Metiltransferasa (HMT) o haluro

dependiente de SAM / tiolmetiltransferasa (HTMT) utilizando yoduro como sustrato. Estas actividades enzimáticas se han identificado en *Arabidopsis thaliana* y en muchas otras especies (Gonzali *et al.*, 2017).

Por otra parte, la emisión de yoduro de metilo de los órganos de la superficie de la planta se ha descrito recientemente en varias especies de plantas, y las enzimas responsables de contribuir a la volatilización del yodo son quienes poseen una actividad de S-adenosil-L-metionina (SAM) Metiltransferasa (HMT), además, es importante mencionar que la ingeniería metabólica ha tenido resultados positivos en biofortificación de cultivos con varios nutrientes, pero hasta ahora no se han publicado informes sobre la mejora del contenido de yodo en plantas desde el punto de vista molecular (Landini *et al.*, 2011).

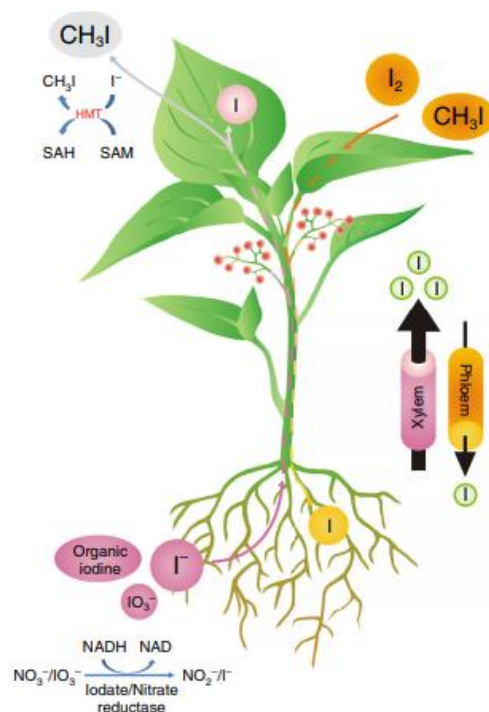


Figura 2. Resumen de la captación, movilización y emisión del yodo acorde con (Gonzali *et al.*, 2017).

4.7. El rol del yodo como inductor al estrés

Además, la capacidad del yodo como inductor al estrés oxidativo controlado y una posterior respuesta de tolerancia al estrés se extrae indirectamente de la siguiente evidencia experimental: (1) el yoduro en presencia de agua funciona como inductor en las bacterias de las haloperoxidasas, enzimas capaces de formar yodometabolitos (van Pée, 1996), demostrando una reacción de volatilización del yodo en presencia de estrés oxidativo. (2) La reacción de tinción de almidón frente al yodo-yoduro de potasio es evitada por la presencia de gran cantidad de ascorbato (10^{-4} M) (Sharma *et al.*, 1990), demostrando claramente un efecto oxidativo del yodo en los tejidos vegetales, efecto que se revierte por antioxidantes (Venturi y Venturi, 2007).

4.8. EL CULTIVO DEL TOMATE.

4.8.1. Descripción botánica.

El tomate es una hortaliza perteneciente a la familia de las solanáceas originaria de los Andes del Perú, posteriormente domesticada en México (Brouwer y Elliott, 2006), es una planta dicotiledónea, herbácea y perenne que es cultivada de forma anual para el consumo de sus frutos, se encuentra constituida por un tallo grueso, en cuanto a las hojas presenta de 7 a 9 folíolos peciolados, las flores se agrupan en inflorescencias de tipo racimo en grupos de tres a diez en variedades comerciales de tomate medianas y grandes. El fruto es una baya que en estado inmaduro presenta una coloración verde y al madurar es de color rojo. El sistema radicular está constituido por una raíz principal y raíces secundarias que no superan los 30 cm de longitud (López, 2017).

4.8.2. Importancia económica.

Alrededor del 98% del tomate rojo producido en México es consumido en fresco y el resto se industrializa, en el año 2015 el consumo nacional se ubicó en 1.26 toneladas representando el 47% de la producción total. Cabe señalar que el tomate es uno de los productos de mayor valor para México ya que es el producto dentro del rubro agrícola que más se exporta, tan solo para el año 2015 se obtuvo un ingreso de 1 665.8 millones de dólares con 1.43 millones de toneladas (FIRA, 2016).

4.8.3. Requerimientos edafoclimáticos

El tomate es una planta de estación cálida y su temperatura óptima de desarrollo varía de los 18°C a los 30°C, la humedad relativa adecuada para su desarrollo oscila entre 60 a 80% (Torres et al., 2017), y el requerimiento de luminosidad para las plantas de tomate es muy exigente ya que tiene gran influencia tanto en la fotosíntesis como en el fotoperiodismo (Juárez *et al.*, 2017).

4.9. Estrés por salinidad

Entre los estreses abióticos, el estrés de alta salinidad es el estrés ambiental más severo, que perjudica la producción de cultivos en al menos el 20% de la tierra irrigada en todo el mundo (Tuteja, 2007), perjudicando el crecimiento y el desarrollo de las plantas a través del estrés hídrico, la citotoxicidad debido a la absorción excesiva de iones como el sodio (Na⁺) y el cloruro (Cl⁻), así como un desequilibrio nutricional.

Además, la salinidad suele ir acompañada de estrés oxidativo debido a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Isayenkov, 2015), aunado a ello, las respuestas de las plantas a la salinidad se han dividido en dos fases principales. Una reducción del crecimiento independiente de iones, que se produce en cuestión de minutos a días, provoca el cierre del estoma e inhibe la expansión celular (Rajendran

et al., 2009). Una segunda fase tiene lugar durante días o incluso semanas y se refiere a la acumulación de niveles de iones citotóxicos, que ralentiza los procesos metabólicos, causa senescencia prematura y, en última instancia, la muerte celular (Munns y Tester, 2008; Tester y Roy, 2014), por otra parte, la tolerancia a ambos tipos de estrés se rige por una multitud de mecanismos fisiológicos y moleculares: tolerancia osmótica, tolerancia iónica y tolerancia tisular (Rajendran *et al.*, 2009; Tester y Roy, 2014). La tolerancia osmótica se inicia relativamente rápido e incluye una disminución rápida en la conductancia estomática para preservar el agua. Emplea mecanismos rápidos de señalización a larga distancia (Ismail *et al.*, 2007; Maischak *et al.*, 2010; Tester y Roy, 2014).

La entrada de sal en el sistema de raíces desencadena la activación de varias cascadas de señales que generan tolerancia iónica al restringir la entrada (neta) de Na^+ en la raíz y reducir la translocación (neta) de Na^+ . Por último, la tolerancia tisular se ve reforzada por la compartimentación de iones tóxicos en vacuolas para evitar efectos perjudiciales en los procesos citoplasmáticos. Las estrategias anteriores se han observado en muchos tipos de plantas, y las diferencias en la tolerancia entre los glucófitos y los halófitos se deben principal mente a la mayor robustez de los mecanismos empleados en este último, en lugar de una diferencia cualitativa (Flowers y Colmer, 2015; Maathuis, 2013).

La absorción de iones puede ocurrir por vía simplástica y apoplástica (Gao *et al.*, 2007; Maathuis, 2013; Negro *et al.*, 2011). La vía apoplástica es un flujo continuo entre el exterior y el xilema (Anil *et al.*, 2005; Krishnamurthy *et al.*, 2009). En la mayoría de las condiciones, la contribución de este flujo de "derivación" es inferior al 1% del flujo volumétrico transpiracional (Yeo *et al.*, 1987).

La respuesta de la planta a la salinidad es compleja, pero presumiblemente incluye algún mecanismo para informar niveles crecientes de iones, ya sea en el medio externo o dentro del sistema simple. Sin embargo, se desconoce cómo las plantas detectan Na^+ o Cl^- (Chatzigeorgiou *et al.*, 2013).

V.MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Sitio experimental.

La parte experimental del presente trabajo se realizó en las instalaciones de la Universidad autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAAN), en el Departamento de Horticultura, en un invernadero tipo capilla de medidas 7 metros (m) de ancho x 14 metros (m) de largo de mediana tecnología, ubicado en la colonia Buenavista al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila en las coordenadas geográficas de 25° 21’ 19” latitud N, y 101° 01’ 49” longitud W a una altitud de 1777 metros sobre el nivel del mar (msnm).

5.2. Preparación de charolas y siembra.

Se realizó el lavado y desinfectado de las charolas con una solución de hipoclorito de sodio y agua, posteriormente se realizó la siembra de las semillas de *Licopersicum esculentum* Var. Río Grande. Se utilizó como sustrato una mezcla de peat-moss y perlita en una relación 5:1 previamente hidratado a capacidad de campo, en charolas de poliestireno de 200 cavidades, colocando la semilla a 0.5 cm de profundidad.

5.3. Trasplante.

A los 40 Días Después de la Siembra (DDS) fueron seleccionadas las plántulas uniformes, con buen desarrollo radicular, previo al trasplante se acondicionó la mezcla de sustrato Peat-moss + perlita en una relación 1:1 hidratado de manera preliminar, colocándolo en contenedores de plástico polietileno de baja densidad color negro con una capacidad de 10 L.

5.4. Riego

El manejo del riego en el cultivo de tomate requiere de cálculos eficientes para satisfacer la demanda hídrica en el momento preciso y oportuno ya que en diversas ocasiones se ve limitada la presencia de agua en las raíces debido al volumen del contenedor y el tipo de sustrato, por consiguiente, para satisfacer esta demanda se utilizó la programación del Timer GE Mod. 15089. Aplicando al cultivo tres riegos al día, 200 mL en cada ocasión, a intervalos de ocho horas con una duración del riego de 7 minutos utilizando sistema de riego por goteo en Spaghetti. Las adecuaciones posteriores, al sistema de riego, fueron realizadas de acuerdo a las condiciones fisiológicas del cultivo y las condiciones climatológicas dentro del invernadero.

5.5. Fertilización

Se llevó a cabo a través del sistema de riego, dirigida al sustrato. Como fertilización se aplicó la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) con base en las concentraciones indicadas en el cuadro 1, a su vez diluida al 25%.

Cuadro 1. Concentraciones de la solución nutritiva según (Steiner, 1961).

Macronutrientes	Miliequivalentes (Meq)
KH ₂ PO ₄	1
MgSO ₄ .7H ₂ O	4
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	9
KNO ₃	12
K ₂ SO ₄	7
Micronutrientes	Partes por millón (ppm)
HBO ₃	0.5
MnSO ₄	0.7
ZnSO ₄	0.09
CuSO ₄	0.02
Fe quelado	3

5.6. Tratamientos

Se realizó una aplicación de yodo en forma de yodato de potasio (KIO₃) por aspersión foliar mediante el uso de atomizador, a una concentración de 100 µM quince días posteriores al trasplante; a plantas con y sin estrés por salinidad, en forma completamente aleatorizada. A los dos testigos se le realizó una aplicación de agua vía aspersión foliar con un atomizador. Los tratamientos evaluados fueron 4, quedando distribuidos en el invernadero tal como se muestra en el cuadro 2, con un total de 15 repeticiones por cada tratamiento.

Cuadro 2. Tratamientos evaluados en el experimento.

TRATAMIENTOS
1 Testigo
2 KIO ₃ 100 µM
3 NaCl
4 KIO ₃ 100 µM + NaCl

5.7. Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos de quince repeticiones cada uno.

5.8. Sometimiento de plántulas a estrés.

Se realizó a los 20 días posteriores al trasplante, donde se aplicó una concentración de 100 mM de cloruro de sodio (NaCl), en la solución nutritiva dirigida al sustrato, a través del sistema de riego.

5.9. Muestreo

Se realizó un solo muestreo completamente al azar a los 30 días después del trasplante donde se tomaron 5 plántulas por tratamiento para el análisis de variables bioquímicas, otras 5 repeticiones por tratamiento fueron tomadas para la medición de elementos minerales y 5 repeticiones más para la medición de las variables de crecimiento.

5.10 Variables de crecimiento

5.10.1. Altura de planta

La altura se midió con cinta métrica flexible desde la base del tallo hasta el ápice.

5.10.2. Diámetro de tallo

El diámetro del tallo se tomó mediante el uso de un vernier digital a 10 cm sobre la base del tallo.

5.10.3. Número de hojas.

El número de hojas se cuantificó contando cada lámina foliar dentro de la hoja compuesta.

5.10.4. Peso fresco y seco.

A cada una de las plántulas se les retiró todo tipo de residuos en la raíz, después se pesaron en una balanza digital marca *OHAUS* y se registró el peso fresco. Posteriormente se colocaron en un horno de secado a 80 °C durante 24 horas, una vez que habían perdido todo rastro de humedad se pesaron y se tomó el registro del peso seco.

5.11. Análisis de antioxidantes

5.11.1. Capacidad antioxidante

Para la determinación de esta variable se pesaron 100 mg de tejido previamente macerado, se colocaron en tubos eppendorf, se le adicionaron 1.5 ml de extractante, después fueron agitados en Vórtex por 20 segundos, luego se sonificaron por 10 minutos y centrifugaron a 12000 rpm, el extracto obtenido fue filtrado con pirinola.

Una vez obtenido el filtrado, para la lectura en microplaca se tomaron 50 μl de cada muestra, se colocaron en la placa y se agregaron 50 μl de solución DPPH, se dejó reposar por 15 minutos y cuantificó en lector de placa marca Biotek Elx 808 a 530 nm.

5.11.2. Clorofilas

El contenido de clorofila en hoja se cuantificó mediante el método propuesto por (Arnon, 1939) modificado por (Munira *et al.*, 2015). Se pesó 1 g de material vegetal fresco, se homogenizó en mortero, enseguida se agregó 5 mL de acetona al 90% y re-homogenizó, Adicionalmente se le colocó 10 mg de carbonato de magnesio (para proteger y estabilizar las clorofilas). De aquí se tomaron 2 mL del extracto y se colocaron en tubo eppendorff, se centrifugó por 5 minutos a 10 000 rpm a 2°C y se extrajo el sobrenadante. Las clorofilas se cuantifican leyendo las absorbancias de 663 y 645 nm, respectivamente. Se utilizó 90% de acetona como blanco. El contenido total de clorofila se expresó como $\mu\text{g g}^{-1}$, y se determinó usando las siguientes fórmulas:

$$\text{Clorofila a } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 25.38\cdot A_{663} + 3.64\cdot A_{645}$$

$$\text{Clorofila b } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 30.38\cdot A_{645} - 6.58\cdot A_{663}$$

$$\text{Clorofila total } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 18.8\cdot A_{663} + 34.02\cdot A_{645}$$

5.12. Análisis de minerales.

5.12.1. Digestión ácida.

Se pesó 1 g de tejido en una balanza analítica digital marca OHAUS, el cual fue tomado de las muestras deshidratadas y después fueron colocadas en un vaso de precipitado, se le agregaron 30 ml de ácido nítrico, posteriormente fueron dispuestas en una plancha de calentamiento hasta la clarificación de la muestra. Finalmente fue aforado a 100 ml con agua desionizada y filtrado en papel Whatman #1. (AOAC, 1990).

5.12.2. Determinación de minerales.

De la extracción ácida fueron analizados mediante un espectrofotómetro de absorción Atómica (AA) marca Varian *spectra fs-240* los siguientes elementos K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn y Cu.

5.12.3. Nitrógeno (N)

Fue determinado utilizando la técnica del micro Kjeldhal (Muller, 1961) donde se pesaron 0.05 g de tejido previamente deshidratado y digerido, la muestra se colocó en un matraz adicionándole 3 ml de mezcla digestora, una vez digerida la muestra transcurridos 30 minutos cuando la mezcla se había tornado de color verde transparente se procedió a pasar la muestra al tubo destilador agregándole 25 ml de hidróxido de sodio al 50%; posterior a ello en un vaso de precipitado se colocaron 30 ml de ácido bórico + 4 gotas de indicador mixto + la destilación, hasta haber obtenido 60 ml de solución con un color verde-celeste, al final para la titulación se realizó colocando una bureta con ácido sulfúrico 0.025N y se dejó caer gota a gota a la muestra destilada hasta obtener una coloración rosa. La determinación del contenido de N se hizo con base en los ml gastados de ácido sulfúrico.

5.12.4. Fósforo (P)

Se determinó mediante la técnica espectrofotométrica del ácido aminonaftolsulfónico (ANSA), para ello de la muestra digerida para absorción atómica se tomó 1 ml y se colocó en un tubo de ensaye, a la muestra se le adicionaron 5 ml de una solución de molibdato de amonio + 2 ml de solución ANSA, una vez agitado se dejó reposar durante 20 minutos, al final se la muestra, fue dispuesta en la celdilla para dar posterior lectura en un espectrofotómetro Uv Vis Thermo Genesys 102 a una longitud de onda de 650nm.

5.12.5. Contenido de yodo (I)

La cuantificación del yodo se realizó en las hojas de las plántulas de tomate por μ -fluorescencia de rayos-X de energía dispersiva (μ -EDXRF) con el equipo M4 Tornado TM. El generador de rayos X para la medición fue operado a 50 kV y 100 μ A con un filtro de 12.5A. La detección de la radiación de fluorescencia se realizó mediante un detector de dispersión de silicio, dispersor de energía XFlashTM, con un área sensible de 30 mm² y resolución de energía de 142 eV y los resultados fueron expresados en unidades de mg de I por kg de tejido seco.

5.13. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se corrieron en el paquete estadístico Infostat versión 2008, previamente se realizó una prueba de medias de diferencia mínima significativa (LSD) al 0.05, posteriormente se hizo un análisis multivariado de componentes principales.

VI.RESULTADOS

6.1. Contenido de yodo (I) en las plantas

En el cuadro 3 se muestra la concentración de yodo acumulado en las hojas de las plántulas de tomate, en donde la mayor concentración encontrada fue de 19.76 mg I kg⁻¹ de peso seco, tras la aplicación de yodato de potasio (KIO₃), seguido por las plántulas que fueron tratadas KIO₃ más estrés salino donde se obtuvo una concentración de 12.76 mg I kg⁻¹ de peso seco. En las plantas testigo la concentración del elemento no rebasó el límite de detección del equipo analítico, que es de 0.1 ppm.

Cuadro 3. Acumulación de yodo en los tratamientos.

Número de tratamiento	Tratamientos	Concentración de yodo (mg kg ⁻¹ de peso seco)	LSD
1	Testigo	0.1	C
2	KIO ₃	19.76	A
3	NaCl	0.1	C
4	KIO ₃ + NaCl	12.76	B

6.2. Crecimiento de las plántulas de tomate

Las aplicaciones de yodo no afectaron el crecimiento de las plántulas de tomate, ninguna de las variables analizadas presentó una diferencia estadísticamente significativa, esto incluyendo a las plántulas que fueron sometidas a estrés por salinidad, ver Cuadro 4.

Cuadro 4. Respuesta del crecimiento en los tratamientos.

Tratamientos	Peso fresco	Peso seco	Altura	Diámetro de tallo	Número de hojas
Testigo	25.33 a	2.67 a	18.80 a	0.74 a	44 a
KIO ₃	26.76 a	2.66 a	19.80 a	0.76 a	43 a
NaCl	34.90 a	3.10 a	17 a	0.76 a	46 a
KIO ₃ + NaCl	32.98 a	3.50 a	17.6 a	0.78 a	47 a

6.3. Antioxidantes

En el cuadro 5 se pueden observar las medias del potencial antioxidante, clorofilas a, b y total para cada tratamiento. De acuerdo a un análisis de varianza con una posterior prueba de medias de diferencia mínima significativa (LSD), se encontró un incremento en la síntesis de clorofila b en las plántulas sometidas a estrés por salinidad.

Cuadro 5. Respuesta de las variables bioquímicas en los tratamientos.

Tratamientos	Potencial antioxidante (mM equivalentes trolox)	Clorofila a ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Clorofila b ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Clorofila total ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Testigo	35.65 a	61.95 a	12.87 b	74.82 a
KIO ₃	37.44 a	58.81 a	13.01 b	71.82 a
NaCl	32.07 a	72.17 a	18.64 a	90.81 a
KIO ₃ NaCl	35.98 a	66.79 a	14.20 a	80.99 a

6.4. Contenido de minerales

En el cuadro 6 se muestran las medias de las concentraciones de los macro y micro elementos esenciales, del mismo modo, posterior al análisis de varianza se le realizó una prueba de medias de diferencia mínima significativa, donde se encontró respecto a los macros que no hubo una diferencia estadísticamente significativa con el nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca) y magnesio (Mg). En el potasio (K) se encontró una reducción tras la aplicación del control salino, caso no evidenciado con el tratamiento en la misma situación + yodato de potasio (KIO₃). El contenido de sodio fue superior en ambos tratamientos con condiciones salinas.

En lo concerniente a los microelementos esenciales se observó una reducción en la concentración de Fe con todos los tratamientos en comparación con las plantas control absoluto, caso contrario al Cu en donde las plántulas que estaban bajo condiciones salinas incrementaron la concentración de este. En el contenido de Zn disminuyó en las plantas que estuvieron bajo condiciones de alta salinidad, pero esto no sucedió en las plantas sometidas a estrés por salinidad + KIO₃. En la concentración de Mn no se observaron diferencias entre tratamientos.

Cuadro 6. Respuesta del contenido mineral acorde a los tratamientos.

Tratamientos	Macronutrientes (g kg ⁻¹)					
	N	P	Ca	K	Mg	Na
Testigo	39.39 a	3.73 a	14.40 a	14.92 a	4.48 a	2.96 b
KIO ₃	34.30 a	2.64 a	15.20 a	14.04 ab	4.08 a	2.84 b
NaCl	33.55 a	3.02 a	15.70 a	9.10 b	4.04 a	3.66 a
KIO ₃ NaCl	28.63 a	3.09 a	14.88 a	13.56 ab	4.16 a	3.84 a
	Micronutrientes (mg kg ⁻¹)					
	Fe	Mn	Cu	Zn		
Testigo	89.6 a	118 a	5.20 b	47.20 a		
KIO ₃	76.4 b	96 a	3.20 b	41.20 a		
NaCl	70 b	88 a	9 a	36 b		
KIO ₃ NaCl	69.2 b	96.40 a	10 a	40.8 a		

Los análisis univariados llevados a cabo señalaron poco impacto tanto de la salinidad como del yodo sobre las plántulas. Sin embargo, como el objetivo central del estudio es verificar la hipótesis propuesta de que el yodo puede funcionar como un inductor de tolerancia frente a la salinidad, se llevó a cabo un análisis multivariado exploratorio (PCA) que permite analizar la estructura subyacente de los datos de todas las variables. De esa forma es posible revisar si la distribución de los tratamientos y de las variables en un plano cartesiano, que representa la distribución multidimensional de los datos, se ajusta o no a la hipótesis propuesta.

Un análisis de componentes principales (PCA) es una técnica estadística descriptiva que consiste en expresar un conjunto de variables que para este caso fueron 19, en un conjunto de combinaciones lineales de factores no correlacionados entre sí, además de que permite representar óptimamente en un espacio de dimensión pequeña, observaciones de un espacio general y por consiguiente la mejor interpretación de los datos.

Para evaluar la relación entre las diferentes variables y los tratamientos fueron usados las 19 variables en dos componentes (PCA 1 Y PCA 2). Los resultados obtenidos indican que dos componentes principales explican el 85.7 % de la varianza en la aplicación de yodo a plantas con y sin estrés por salinidad (Figura 3).

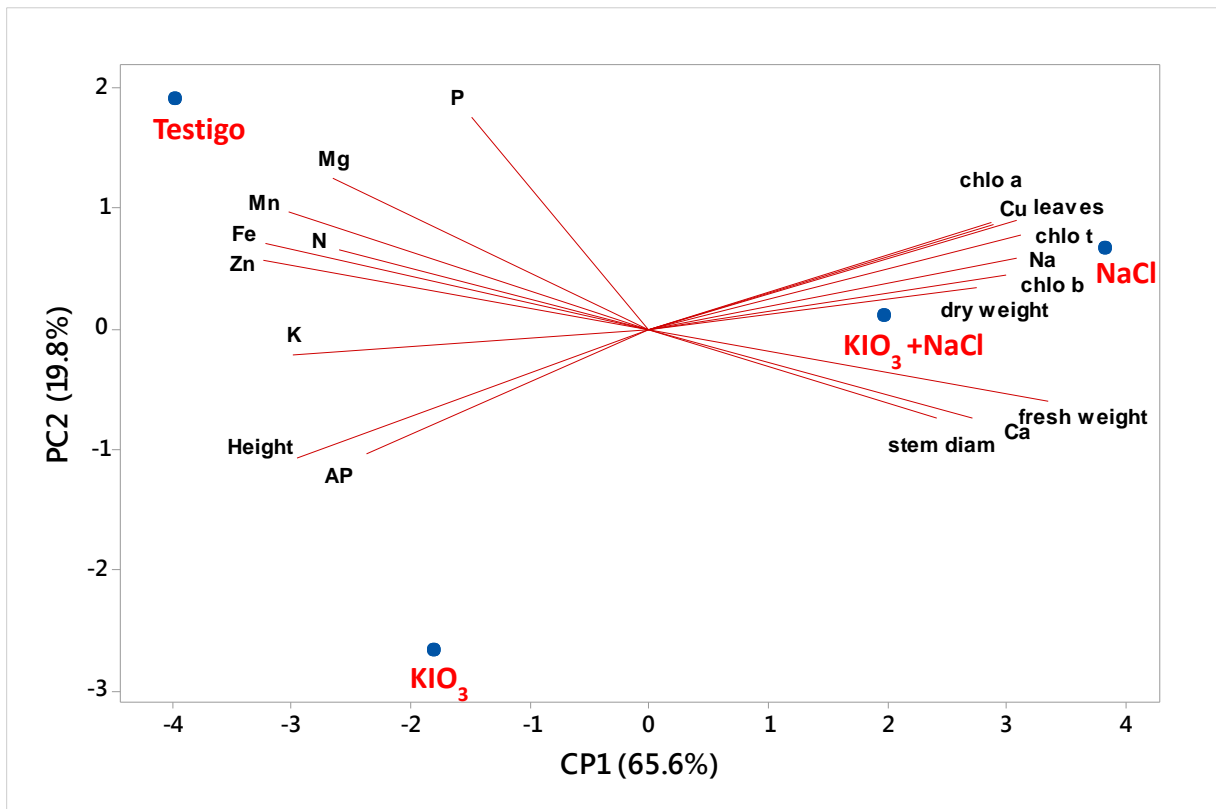


Figura 3. Biplot de componentes principales para crecimiento, antioxidantes y minerales de las plántulas de tomate tratadas con aplicaciones de yodo de manera foliar, con y sin estrés por salinidad

Además, en el Cuadro 7 se presentan los coeficientes pertenecientes a las variables de crecimiento, lo cual indica de acuerdo a los valores obtenidos que el diámetro de tallo, No. de folíolos, peso fresco, así como el peso seco se encuentran correlacionados de manera positiva con el componente principal 1 a diferencia de la variable Altura quien se ve directamente influenciado de manera negativa con el mismo componente principal (1.)

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de las variables de crecimiento.

Variables de crecimiento		
	CP 1	CP 2
Altura	-0.86	-0.51
Diámetro tallo	0.69	-0.39
No. foliolos	0.85	0.41
Peso fresco	1	0.07
Peso seco	0.81	0.16

Para el caso de los elementos minerales se puede visualizar en el Cuadro 8 que el Cu, Na, y Ca mostraron una correlación positiva con el componente principal 1, además se observa que elementos como el Mn, Fe, Zn, K, Mg, así como el N de acuerdo a sus coeficientes presentan una correlación negativa con el componente principal 1. Se presenta también al fósforo como el único elemento que tuvo una correlación positiva con el componente principal 2.

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de los elementos minerales.

Elementos minerales		
	CP 1	CP 2
Cu	0.85	0.42
Mn	-0.82	0.55
Fe	-0.9	0.41
Zn	-0.89	0.36
K	-0.83	-0.04
Na	0.84	0.26
Mg	-0.71	0.69
Ca	0.73	-0.45
P	-0.37	0.93
N	-0.74	0.36

Adicionalmente en cuanto a las variables bioquímicas se refiere se destaca que el potencial antioxidante fue la única variable que mostro una correlación negativa con el componente principal 2, diferente a los coeficientes obtenidos para clorofila a, clorofila b y clorofila total, los cuales mostraron una correlación positiva con el componente principal 1 (Ver Cuadro 9).

Cuadro 9. Coeficientes de correlación en las variables bioquímicas.

Variables bioquímicas		
	CP 1	CP 2
Potencial antioxidante (PA)	-0.57	-0.74
Clorofila a	0.89	0.41
Clorofila b	0.84	0.16
Clorofila total	0.89	0.34

Por otra parte, en la Figura 4 se ilustra una representación de la localización en cada cuadrante del Biplot, cada uno de los tratamientos, así como las variables con las que se encuentran correlacionados.

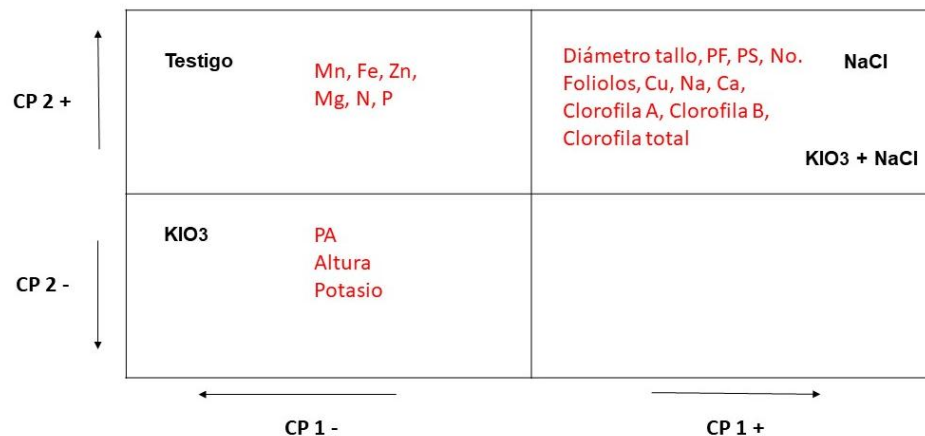


Figura 4. Esquema del Biplot. Tratamientos y su relación con las variables descritas en cada cuadrante.

Con respecto a las tendencias, se encontró que la variable altura mostro una correlación positiva con el testigo absoluto, así como en el tratamiento con yodo sin estrés por salinidad, además cabe mencionar que las variables diámetro de tallo, No. De foliolos, Peso fresco, así como el peso seco presentaron una correlación positiva con los tratamientos donde las plantas fueron sometidas a estrés por salinidad (ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Tendencias obtenidas en las variables de crecimiento.

Variable	Tratamientos			
	Testigo	KIO ₃	NaCl	KIO ₃ +NaCl
Altura	+	+	-	-
Diámetro de tallo	-	-	+	+
No. Foliolos	-	-	+	+
Peso fresco	-	-	+	+
Peso seco	-	-	+	+

Para el caso de los minerales, se encontró una correlación positiva de los elementos Mn, Fe, Zn, K, Mg y N con el testigo absoluto y con el tratamiento al cual solamente se le suministro yodo vía foliar. Sin embargo, los elementos Cu, Na, así como el Ca, presentaron una correlación positiva con los tratamientos donde las plantas fueron sometidas a estrés por salinidad. Caso especial el del Fosforo (P) quien mostro una correlación negativa con el tratamiento con yodato de potasio (KIO₃), donde a las plántulas de tomate solamente se les suministro yodo en forma de KIO₃ vía foliar, presentando además una correlación positiva con el testigo y el resto de los tratamientos (Ver Cuadro 11).

Cuadro 11. Tendencias obtenidas en los elementos minerales

Elemento	Tratamientos			
	Testigo	KIO ₃	NaCl	KIO ₃ +NaCl
Cu	-	-	+	+
Mn	+	+	-	-
Fe	+	+	-	-
Zn	+	+	-	-
K	+	+	-	-
Na	-	-	+	+
Mg	+	+	-	-
Ca	-	-	+	+
P	+	-	+	+
N	+	+	-	-

En el Cuadro 12 se observa algo sumamente interesante, ya que se encontró que el Potencial Antioxidante (PA) presentó una correlación positiva únicamente con el tratamiento 2 donde las plántulas no fueron sometidas a estrés por salinidad, solamente recibieron aplicación de yodo vía foliar. Y para el caso de la Clorofila a, b y total reflejaron positivamente una correlación con los tratamientos donde las plántulas sí fueron sometidas a estrés por salinidad, además tanto el PA como clorofila tuvieron una correlación negativa con el testigo absoluto.

Cuadro 12. Tendencias obtenidas en las variables bioquímicas.

Variable	Tratamientos			
	Testigo	KIO ₃	NaCl	KIO ₃ +NaCl
Potencial antioxidante (PA)	-	+	-	-
Clorofila a	-	-	+	+
Clorofila b	-	-	+	+
Clorofila total	-	-	+	+

VII.DISCUSIÓN

7.1. Crecimiento y elementos minerales.

En el presente trabajo de investigación se encontró un contenido de 12.7 y 19.7 mg I Kg⁻¹ de peso seco en hojas de las plántulas tratadas con yodo con y sin estrés por salinidad respectivamente. Sin embargo, este hecho ya ha sido previamente reportado, ejemplo de esto fueron los hallazgos realizados por (Altinok *et al.*, 2003) donde encontraron que tras la aplicación foliar de yoduro de potasio (KI) a concentraciones de 22000 µM, las hojas de las plantas de alfalfa acumularon 2 mg de I por Kg de tejido fresco, por otro lado (Lawson *et al.*, 2016), observaron que tras la aplicación de 1.5 M de yodato de potasio (KIO₃) en diversas especies vegetales de hoja tuvieron una acumulación entre 0.5 y 1.5 mg de I por Kg de tejido vegetal en fresco. Por su parte, (Zou *et al.*, 2019), aplicaron un cocktail de micronutrientes en donde se incluía el yodo a una concentración de 2330 µM encontrando una acumulación en los granos de trigo entre 0.36 a 0.633 mg de I por Kg de semilla de acuerdo a la localidad.

Los valores de acumulación son bastante variados, tales diferencias pudieron ser debidas a la especie vegetal, ya que se ha demostrado que los factores de transferencia del yodo son mayores en especies de hojas que en las gramíneas (Medrano *et al.*, 2016), sin embargo dependen de una gran variedad de factores como la estación en la cual este elemento es aplicado, si contenía un surfactante, estadio de la especie, etc.

Por otra parte, también se ha reportado previamente que pese a que dicho elemento no es esencial en las plantas terrestres, estas son capaces de acumularlo y metabolizarlo, tanto en forma de yoduro de potasio (KI), como yodato de potasio (KIO₃) y en formas orgánicas (Golubkina *et al.*, 2018), provocando a su paso cambios sobre el metabolismo de las mismas (Halka *et al.*, 2019). Hecho corroborado por los

resultados aquí obtenidos, en donde se encontró una correlación positiva entre el crecimiento de las plantas y ambos tratamientos que enfrentaron condiciones de salinidad, así como un incremento en el contenido de clorofilas a, b y total. Se ha encontrado que tanto que la acumulación del yodo (I) como del cloro (Cl) se lleva a cabo de modo preferente en los cloroplastos, cuando este ha alcanzado tejido foliar (Eichert y Fernández, 2012; Weng *et al.*, 2008). Adicionalmente, el efecto sobre el crecimiento pudo estar aunado a la correlación positiva con el contenido de los elementos como: calcio (Ca) y cobre (Cu).

Los mecanismos puntuales por los cuales el yodo es absorbido vía foliar no están plenamente dilucidados. Sin embargo, se sabe que la permeación de minerales vía aérea tiene lugar principalmente a través de poros dentro de la cutícula, más que por los estomas y se ha observado una translocación de estos desde la vía aérea a la raíz, solo si la concentración del mineral en cuestión es inferior en este último que en la parte aérea (Clarkson y Scattergood, 1982), por otra parte, para el caso de las algas, se sabe que el yodo se reduce y entra por difusión facilitada (Kupper *et al.*, 2008), mientras que plantas terrestres, algunos autores afirman que el yodato (IO_3) se reduce a I, para su absorción radicular (Blasco *et al.*, 2008; Umaly y Poel, 1971; Whitehead, 1975), por lo que se requieren de un mecanismo de transporte regulado por transportadores, convirtiéndolo en un proceso más complejo que lo sucedido vía foliar (Broadley *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2010). Por su parte (Hageman, Hodge, & McHargue, 1942) plantean que los cambios en la composición mineral de las plantas que se producen al aplicar el yodo se encuentra directamente relacionado con un fenómeno redox, por lo tanto, dicho fenómeno tendrá un mayor o menor impacto en la biodisponibilidad de otros elementos en función de la complejidad y el número de componentes en la interacción.

Por ende, en un sistema de suelo este número, resulta ser mayor ya que se llegan a presentar componentes biológicos, orgánicos e inorgánicos que interactúan

tanto en la matriz de intercambio como en la solución del suelo, a diferencia de un sistema de cultivo sin suelo (Jones *et al.*, 2010), ejemplo de ello son las investigaciones hechas por (Hageman *et al.*, 1942) donde, demostraron que con la aplicación de dosis incrementales al suelo (0, 4, 16, 36, 64 y 100 mg I Kg⁻¹ de suelo) en forma de yoduro de potasio (KI), se observaron aumentos en el contenido de calcio (Ca) y cobre (Cu), en plantas de tomate.

En el presente experimento se obtuvo un incremento en el contenido de elementos como el calcio (Ca) y el cobre (Cu), en las plantas que fueron sometidas a estrés por salinidad, tanto en las que se les aplicó yodato de potasio (KIO₃) como en las que no. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por, (Begoña *et al.*, 2011; García *et al.*, 2014; Leyva *et al.*, 2011), donde evidenciaron un aumento en el contenido de cobre (Cu) al usar yoduro de potasio (KI) en la irrigación de *Opuntia ficus* bajo condiciones de túnel. Por su parte (Hageman *et al.*, 1942), argumentan que el yodo también es capaz de estimular la absorción de cobre (Cu). Adicionalmente (Azmat y Khan, 2011) mencionan que un aumento en la cantidad de cobre (Cu) en plantas, se encuentra directamente relacionado con el estrés oxidativo, a su vez una explicación a la relación entre el cobre y el yodo tiene que ver con las oxidasas de cobre para oxidar I⁻ a I₂ o HOI (Xu, 1996), además, es posible que una mayor cantidad de yodo presente en los tejidos de las plantas induzca una mayor actividad en los sistemas que disipan el Cu, como las oxidasas de cobre y posiblemente otras oxidasas con Fe y Mn (Klebanoff, 1982; Schlorke *et al.*, 2016). Por lo que se puede argumentar que cuando se aplica yodo por vía foliar es posible que un fenómeno de translocación suceda desde las hojas hacia la raíz y que en este tejido se lleven a cabo los ya mencionados cambios oxidoreductivos que dan lugar a la sinergia en la absorción de Ca y Cu (Sci y Cultus, 2015).

Respecto a la correlación negativa encontrada entre los tratamientos que fueron sometidos a estrés por salinidad y el contenido de N, Mg, K, Zn, Fe y Mn puede estar ligada con el desbalance osmótico y iónico que produce el exceso de Cl^- y Na^+ (Acosta *et al.*, 2017). Cabe mencionar que esta correlación negativa no fue evidenciada desde el punto de vista fisiológico y hallazgos similares fueron encontrados por (Smoleń y Sady, 2012) en plantas de lechuga, en donde argumentan que dicho fenómeno probablemente suceda por una serie de factores adicionales como dosis, forma química, medio de cultivo, condiciones ambientales, etc.

7.2. Potencial antioxidante

En el presente estudio se observó un incremento del potencial antioxidante en plantas tratadas con yodo sin estar sometidas a un estrés por salinidad, en donde este último indica principalmente la presencia de moléculas de bajo peso molecular con poder reductor: antioxidantes no enzimáticos, dentro de los cuales, de acuerdo a la naturaleza química de la extracción, se trata de moléculas polares como glutatión reducido, ácido ascórbico y compuestos fenólicos (Kasote *et al.*, 2015). La síntesis de estos se ve incrementado cuando se presenta una sobreproducción de radicales libres (Foyer y Noctor, 2013).

Los resultados obtenidos en este experimento coinciden con los obtenidos por (Smoleń *et al.*, 2015), donde evaluaron la aplicación KIO_3 con dosis de $7.88 \mu\text{M}$ a través de solución nutritiva en un cultivo de tomate, en el cual reportaron un incremento en el contenido de ácido ascórbico y compuestos fenólicos totales, además, en otro estudio realizado por (García *et al.*, 2014), informaron de manera similar, un incremento en el contenido de ácido ascórbico en *Opuntia ficus*, cultivado bajo túneles mediante la aplicación de 10^{-4} M de yodato de potasio (KIO_3) por fertirrigación.

Adicionalmente (Leyva *et al.*, 2011) realizaron un experimento donde la aplicación de IO_3 (20-80 μM) en plantas de lechuga bajo estrés por salinidad (100 mM de NaCl) ejerció un efecto significativamente positivo sobre la biomasa y elevó los niveles de azúcares solubles, así como el aumento de la actividad de las enzimas antioxidantes como SOD, APX, DHAR y GR, mientras que en un estudio reciente se presencié un aumento en la respuesta antioxidante y una mayor acumulación de compuestos fenólicos totales utilizando KIO_3 en concentraciones de 20 y 40 μM en cultivo de lechuga hidropónica (Blasco *et al.*, 2013).

Por su parte, (Golubkina *et al.*, 2018), realizaron un experimento, donde se aplicó yoduro de potasio (KI) vía foliar 6 mM en plantas de *Brassica juncea L.* se obtuvo un incremento en el potencial antioxidante, ácido ascórbico y compuestos fenólicos totales caso similar fue lo obtenido por (Strzetelski *et al.*, 2010), en donde aplicaron KI 0.2% a plantas de rábano y se obtuvo un incremento en la acumulación de ácido ascórbico. Sin embargo, estos mismos autores proponen que es necesaria más investigación para el establecimiento del mecanismo de acción de este elemento sobre el metabolismo antioxidante. Por otra parte, en un experimento realizado con fines de enriquecimiento en la leguminosa *Pisum sativum L.*, aunque se obtuvo un incremento en la concentración de yodo en los diferentes tejidos de las plantas tras la aplicación de KI y KIO_3 a 1000 mg L^{-1} vía foliar, no se encontraron diferencias en las concentraciones de antioxidantes como antocianinas o glutatión (Jerše *et al.*, 2018).

Adicionalmente, (Blasco, 2010) afirma que, en lechuga, la aplicación de yodato (20, 40 y 80 μM) altera el metabolismo de N y la fotorespiración, además, han observado efectos positivos sobre la biomasa y la absorción de N con el uso de yodato, ya que el transporte de yodo depende tanto de la concentración como de su forma iónica en la que se encuentra el elemento en el medio ambiente, aunque en algunas especies la mayor parte de este nutriente se retiene en las raíces (Whitehead, 1975)

por ende, las altas concentraciones de antioxidantes como el ácido ascórbico y GSH son necesarias para combatir el estrés oxidativo en los cloroplastos y otros orgánulos (Mittler, 2002).

Dichos fenómenos antes mencionados pudieran estar relacionados con la amplia capacidad oxidoreductor del yodo, ya que puede comportarse tanto como aceptor como donador de electrones (Küpper *et al.*, 2008; Venturi *et al.*, 2002). Siendo en este caso probablemente un prooxidante moderado, en donde no causa un efecto negativo sobre el crecimiento, pero si un incremento en el potencial antioxidante de las plantas que fueron tratadas con KIO_3 y esto permitió que las plantas sometidas a estrés por salinidad no mostraran un efecto negativo en el crecimiento, así como mejor captación de calcio (Ca).

VIII.CONCLUSIÓN

Con base en los objetivos planteados, se concluye que el yodo (I) aplicado de manera foliar en forma de yodato de potasio (KIO_3), es capaz de aumentar la capacidad antioxidante, sin afectar el crecimiento de las plántulas de tomate, y sin tener un efecto negativo sobre la absorción de macros y micronutrientes esenciales, a pesar de ello, no se logra evidenciar claramente un incremento a la tolerancia al estrés por salinidad, posiblemente debido al estadio temprano de las plantas.

Por lo que se recomendaría llevar el cultivo a etapa reproductiva con la posibilidad de realizar un mayor número de aplicaciones de yodo por aspersion foliar, y lograr con ello una mejor asimilación de dicho elemento, aumentando con ello la posibilidad de contrarrestar los efectos causados por estrés salino.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Aceves, C., y Anguiano, B. 2009. Chapter 26. Is Iodine an Antioxidant and Antiproliferative Agent for the Mammary and Prostate Glands? En *Comprehensive Handbook of Iodine* (pp. 249–257). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374135-6.00026-1>
- Acosta-Motos, J. R., Ortuño, M. F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M. J., y Hernandez, J. A. 2017. Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1), 1–38. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- Altinok, S., Sozudogru-Ok, S., y Halilova, H. 2003. Effect of iodine treatments on forage yields of alfalfa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(1–2), 55–64. <https://doi.org/10.1081/CSS-120017415>
- Anil, V., Krishnamurthy, P., Kuruvilla, S., Sucharitha, K., Thomas, G., y Mathew, M. 2005. Regulation of the uptake and distribution of Na⁺ in shoots of rice (*Oryza sativa*) variety Pokkali: Role of Ca²⁺ in salt tolerance response. *Physiologia Plantarum*, 124, 451–464. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00529.x>
- Antonio, D., y Moreno, B. 2008. *Efecto de un activador fisiológico a base de yodo en el cultivo de frijol var. Amadeus 77 en Zamorano, Honduras.*
- AOAC. 1990. *AOAC: Official Methods of Analysis (Volume 1)*. 1(Volume 1).
- Arnon, D. I. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14(2), 371–375. <https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>
- Azmat, R., y Khan, N. 2011. Nitrogen metabolism as a bio indicator of Cu stress in *Vigna radiata*. *Pakistan Journal of Botany*, 43.
- Bastardo, G., Quintero, Y., Angarita, C., Acero, C., Barrera, O., Castañeda, G., ... Rivas, J. G. 2017. *Status of Two Communities With Different Altitude.*

- Blasco-Leon, B. 2010. *Biofortificación con yodo en plantas de lechuga (Lactuca sativa L.): Implicaciones fisiológicas y nutricionales*.
- Blasco, B, Rios, J. J., Cervilla, L. M., Sánchez-Rodríguez, E., Ruiz, J. M., & Romero, L. 2008. Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: potential benefits for cultivation and human health. *Annals of Applied Biology*, 152(3), 289–299. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2008.00217.x>
- Blasco, Begoña, Ríos, J. J., Leyva, R., Cervilla, L. M., Sánchez-Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, M. M., ... Romero, L. 2011. Does iodine biofortification affect oxidative metabolism in lettuce plants. *Biological Trace Element Research*, 142(3), 831–842. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8816-9>
- Blasco Leon, M. B., Leyva, R., Romero, L., y Manuel Ruiz, J. 2013. Iodine Effects on Phenolic Metabolism in Lettuce Plants under Salt Stress. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61. <https://doi.org/10.1021/jf303917n>
- Bostock, A. C., Shaw, G., y N B Bell, J. 2003. The volatilisation and sorption of ¹²⁹I in coniferous forest, grassland and frozen soils. *Journal of environmental radioactivity*, 70, 29–42. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(03\)00120-6](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(03)00120-6)
- Broadley, M. R., White, P. J., Bryson, R. J., Meacham, M. C., Bowen, H. C., Johnson, S. E., ... Tucker, M. 2006. Biofortification of UK food crops with selenium. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 65(2), 169–181.
- Brouwer, C., & Elliott, M. 2006. El Tomate, sus Datos e Historia. *Texas Cooperative Extension*, 1, 2. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Caffagni, A., Pecchioni, N., Meriggi, P., Bucci, V., Sabatini, E., Acciarri, N., ... Milc, J. 2012. Iodine uptake and distribution in horticultural and fruit tree species. *Italian Journal of Agronomy*, 7(3), 229–236. <https://doi.org/10.4081/ija.2012.e32>
- Chatzigeorgiou, M., Bang, S., Hwang, S. W., y Schafer, W. R. 2013. tmc-1 encodes a sodium-sensitive channel required for salt chemosensation in *C. elegans*. *Nature*, 494(7435), 95–99. <https://doi.org/10.1038/nature11845>

- Clarkson, D. T., & Scattergood, C. B. 1982. Growth and Phosphate Transport in Barley and Tomato Plants During the Development of, and Recovery from, Phosphate-stress. *Journal of Experimental Botany*, 33(136), 865–875. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/23690398>
- Colomer, M. C. 2008. *Déficit de yodo Prevención y tratamiento*. 27, 110–111.
- Eichert, T., y Fernández, V. 2012. Chapter 4 - Uptake and Release of Elements by Leaves and Other Aerial Plant Parts. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)* (Third Edition, pp. 71–84). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00004-2>
- FAO. 2013. *Agricultura para el desarrollo*.
- FIRA. 2016. Tomate rojo 2016. *Panorama alimentario*, 2. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200635/Panorama_Agroalimentario_Tomate_Rojo_2016.pdf
- Flores, C. C., Mendoza, N. R., Mendoza, A. B., Cué, J. L. G., Campante, M. T., y García, P. S. 2016. El Yodo Aumenta El Crecimiento Y La Concentración De Minerales En Plántulas De Pimiento Morrón. *Agrociencia*, 50(6), 747–758.
- Flowers, T., y Colmer, T. 2015. Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes. *Annals of botany*, 115, 327–331. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu267>
- Follis, R. H. 1996. Distribucion Geografica De La Deficiencia De Yodo En America Latina. *Garden*, (1), 90–92.
- Foyer, C. H., y Noctor, G. 2013. Redox Signaling in Plants. *Antioxidants & Redox Signaling*, 18(16), 2087–2090. <https://doi.org/10.1089/ars.2013.5278>
- Fuge, R. 2013. Soils and Iodine Deficiency. En *Soils and Iodine Deficiency. Essentials of Medical Geology* (pp. 417–432). https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5_17

- Gao, J., Chao, D., y Lin, H. 2007. *Understanding Abiotic Stress Tolerance Mechanisms: Recent Studies on Stress Response in Rice*. 49(6), 742–750. <https://doi.org/10.1111/j.1672-9072.2007.00495.x>
- García-Osuna, H. T., Benavides-Mendoza, A., Rivas-Morales, C., Morales, M., Verde-Star, M., y Ruvalcaba, R. 2014. Iodine application increased ascorbic acid content and modified the vascular tissue in *Opuntia Ficus-Indica* L. *Pakistan Journal of Botany*, 46, 127–134.
- Gill, S. S., y Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Golubkina, N., Kekina, H., y Caruso, G. 2018. Yield, Quality and Antioxidant Properties of Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) in Response to Foliar Biofortification with Selenium and Iodine. *Plants*, 7(4), 80. <https://doi.org/10.3390/plants7040080>
- Gómez-Martínez, F., y Alvarez-Olvera, C. A. 1997. Trastornos por deficiencia de yodo. *Gaceta médica de México*, 133(5), 455–460.
- Gonzali, S., Kiferle, C., y Perata, P. 2017. Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current Opinion in Biotechnology*, 44, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.10.004>
- Gupta, N., Bajpai, M., Majumdar, R., y Mishra, P. 2015. Response of iodine on antioxidant levels of *Glycine max* L. Grown under Cd²⁺ stress. *Advances in Biological Research*, 9(1), 40–48. <https://doi.org/10.5829/idosi.abr.2015.9.1.9183>
- Hageman, R. H., Hodge, E. S., y McHargue, J. S. 1942. Effect of Potassium Iodide on the Ascorbic Acid Content and Growth of Tomato Plants. *Plant Physiology*, 17(3), 465–472. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/4257628>

- Halka, M., Smoleń, S., Czernicka, M., Klimek-Chodacka, M., Pitala, J., y Tutaj, K. 2019. Iodine biofortification through expression of HMT, SAMT and S3H genes in *Solanum lycopersicum* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 144(June), 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.028>
- Hernandez J. 2014. Metabolismo del yodo y síntesis de hormonas tiroideas en microalgas marinas Metabolismo del yodo y síntesis de hormonas tiroideas en microalgas marinas. *Tesis doctoral. Universidad de Cádiz*, (December).
- Isayenkov, S. V. 2015. *Physiological and Molecular Aspects of Salt Stress in Plants*. (September). <https://doi.org/10.3103/S0095452712050040>
- Ismail, A. M., Heuer, S., Thomson, M. J., y Wissuwa, M. 2007. Genetic and genomic approaches to develop rice germplasm for problem soils. *Plant Molecular Biology*, 65(4), 547–570. <https://doi.org/10.1007/s11103-007-9215-2>
- Jerše, A., Kacjan Maršič, N., Kroflič, A., Germ, M., Šircelj, H., y Stibilj, V. 2018. Is foliar enrichment of pea plants with iodine and selenium appropriate for production of functional food? *Food Chemistry*, 267, 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.112>
- Jones, C. E., Hornsby, K. E., Sommariva, R., Dunk, R. M., von Glasow, R., McFiggans, G., y Carpenter, L. J. 2010. Quantifying the contribution of marine organic gases to atmospheric iodine. *Geophysical Research Letters*, 37(18). <https://doi.org/10.1029/2010GL043990>
- Jones Jr., J. B. 2012. Plant Nutrition and Soil Fertility Manual. En *Plant Nutrition and Soil Fertility Manual*. <https://doi.org/10.1201/b11577>
- Juárez, A., De Alba, K., Zermeño, A., y Benavides, A. 2017. Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 943. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i5.589>

- Kasote, D. M., Katyare, S. S., Hegde, M. V., y Bae, H. 2015. Significance of antioxidant potential of plants and its relevance to therapeutic applications. *International Journal of Biological Sciences*, 11(8), 982–991. <https://doi.org/10.7150/ijbs.12096>
- Kiferle, C., Gonzali, S., Holwerda, H. T., Ibaceta, R. R., y Perata, P. 2013. Tomato fruits: a good target for iodine biofortification. *Frontiers in Plant Science*, 4(June), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00205>
- Klebanoff, S. J. 1982. The iron-H₂O₂-iodide cytotoxic system. *The Journal of Experimental Medicine*, 156(4), 1262–1267. <https://doi.org/10.1084/jem.156.4.1262>
- Krishnamurthy, P., Ranathunge, K., Franke, R., Prakash, H. S., Schreiber, L., y Mathew, M. K. 2009. The role of root apoplastic transport barriers in salt tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). *Planta*, 230(1), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s00425-009-0930-6>
- Kupper, F. C., Carpenter, L. J., McFiggans, G. B., Palmer, C. J., Waite, T. J., Boneberg, E.-M., ... Feiters, M. C. 2008. Iodide accumulation provides kelp with an inorganic antioxidant impacting atmospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(19), 6954–6958. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709959105>
- Küpper, F. C., Carpenter, L. J., McFiggans, G. B., Palmer, C. J., Waite, T. J., Boneberg, E.-M., ... Feiters, M. C. 2008. Iodide accumulation provides kelp with an inorganic antioxidant impacting atmospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(19), 6954–6958. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709959105>
- La Barre, S., Potin, P., Leblanc, C., y Delage, L. 2010. The halogenated metabolism of brown algae (phaeophyta), its biological importance and its environmental significance. *Marine Drugs*, 8(4), 988–1010. <https://doi.org/10.3390/md8040988>

- Landini, M., Gonzali, S., Kiferle, C., Tonacchera, M., Agretti, P., Dimida, A., ... Perata, P. 2012. Metabolic engineering of the iodine content in Arabidopsis. *Scientific Reports*, 2, 1–6. <https://doi.org/10.1038/srep00338>
- Landini, M., Gonzali, S., y Perata, P. 2011. Iodine biofortification in tomato. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(3), 480–486. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000395>
- Lawson, P. G., Daum, D., Czauderna, R., y Vorsatz, C. 2016. Factors influencing the efficacy of iodine foliar sprays used for biofortifying butterhead lettuce (*Lactuca sativa*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179(5), 661–669. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600213>
- Leija, P., Benavides, A., Rocha, A., Medrano, J. R. 2017. Biofortificación con yodo en plantas para consumo humano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(8), 2025. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i8.134>
- Leyva, R., Sanchez-Rodriguez, E., Rios, J. J., Rubio-Wilhelmi, M. M., Romero, L., Ruiz, J. M., y Blasco, B. 2011. Beneficial effects of exogenous iodine in lettuce plants subjected to salinity stress. *Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology*, 181(2), 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.007>
- López, L. 2017. *Manual técnico del cultivo de tomate*. Recuperado de <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/3143/1/BVE17079148e.pdf>
- Luis, D. A. de, Aller, R., e Izaola, O. 2005. Problemática de la deficiencia de yodo durante la gestación. *Anales de Medicina Interna*, 22(9), 445–448. <https://doi.org/10.4321/s0212-71992005000900011>

- Luna, M. L., y Delgado, A. 2014. Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). (Spanish). *Importance, contribution and stability of antioxidants in fruits and products of tomato (Solanum lycopersicum L.). (English)*, 18(1), 51–66. Recuperado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=94439990&lang=es&site=ehost-live>
- Maathuis, F. 2013. Sodium in plants: Perception, signalling, and regulation of sodium fluxes. *Journal of experimental botany*, 65. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert326>
- Maischak, H., Zimmermann, M. R., Felle, H. H., y Boland, W. 2010. *Alamethicin-induced electrical long distance signaling in plants*. 5(8), 988–990. <https://doi.org/10.1104/pp.108.133884.ystemic>
- Márquez, C., Guillén, M., De La Cruz, E., Castañón, G., Latournerie, L., y López, S. T. 2015. La biofortificación de cultivos: una alternativa que contribuye a la seguridad alimentaria y nutricional. *UJED Editorial*, (June 2016), 14–22.
- Medrano, M.J., *et al.* 2016. “Efecto de la aplicación de yodo sobre antioxidantes en plántulas de jitomate”. *Revista Chapingo Serie Horticultura XXII(2)*: 133–43.
- Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405–410.
- Muller, L. 1961. *23 tool-ow 'ck*. 3–6.
- Munira, S., Hossain, M. M., Zakaria, M., Ahmed, J. U., e Islam, M. M. 2015. *Evaluation of Potato Varieties against Salinity Stress in Bangladesh*. 6(April 2012), 73–81. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/15879>
- Munns, R., y Tester, M. 2008. *Mechanisms of Salinity Tolerance*. (May 2014). <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

- Negrao, S., Courtois, B., Ahmadi, N., y Abreu, I. A. 2011. *Recent Updates on Salinity Stress in Rice : From Physiological to Molecular Critical Reviews in Plant Sciences Recent Updates on Salinity Stress in Rice : From Physiological to Molecular Responses.* (May 2014). <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.587725>
- Nestel, P., E Bouis, H., Meenakshi, J. V, y Pfeiffer, W. 2006. Biofortification of Staple Food Crops. *The Journal of nutrition*, 136, 1064–1067. <https://doi.org/10.1093/jn/136.4.1064>
- Noa Cordero, S. S. 2011. Antecedentes, diagnóstico, repercusión y prevención del déficit de yodo en la salud humana. (Spanish). *Revista Cubana de Endocrinología*, 22(3), 244–254. Recuperado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=lth&AN=77709582&lang=es&site=ehost-live>
- Rajendran, K., Tester, M., y Roy, S. J. 2009. *Quantifying the three main components of salinity tolerance in cereals.* 237–249. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01916.x>
- Rios, J. 2013. Biofortificación: La agricultura del futuro. *Tierras*, pp. 126–128.
- Rösner, H., Möller, W., Groebner, S., y Torremante, P. 2016. Antiproliferative/cytotoxic effects of molecular iodine, povidone-iodine and Lugol's solution in different human carcinoma cell lines. *Oncology Letters*, 12(3), 2159–2162. <https://doi.org/10.3892/ol.2016.4811>
- SAGARPA. 2017. Agrícola Nacional JITOMATE. *Planeación agrícola nacional 2017-2030*, 2–20.
- Schlorke, D., Flemmig, J., Birkemeyer, C., y Arnhold, J. 2016. Formation of cyanogen iodide by lactoperoxidase. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 154, 35–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2015.11.005>

- Sci, A., y Cultus, H. 2015. Mineral composition of field-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) depending on the diversified fertilization with iodine and selenium compounds Sylwester Smoleń, Łukasz Skoczylas, Roksana Rakoczy, Iwona Ledwoż yw-Smoleń, Aneta Kopeć, Ewa Piątk. 14(6), 97–114.
- Seki, R., Takahashi, T., e Ikeda, N. 1984. [Adsorption behavior of radioactive iodide and iodate in soil]. *Radioisotopes*, 33, 51–54.
- Sharma, S. S., Sharma, S., y Rai, V. K. 1990. Interference of Ascorbic Acid with the Starch-Iodine Reaction. *Annals of Botany*, 65(3), 281–283. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087935>
- Shinonaga, T., H Gerzabek, M., Strebl, F., y Muramatsu, Y. 2001. Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria. *The Science of the total environment*, 267, 33–40. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00764-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00764-6)
- Smoleń, S., y Sady, W. 2012. Influence of iodine form and application method on the effectiveness of iodine biofortification, nitrogen metabolism as well as the content of mineral nutrients and heavy metals in spinach plants (*Spinacia oleracea* L.). *Scientia Horticulturae*, 143(2012), 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.06.006>
- Smoleń, S., Wierzbińska, J., Sady, W., Kołton, A., Wiszniewska, A., y Liszka-Skoczylas, M. 2015. Iodine biofortification with additional application of salicylic acid affects yield and selected parameters of chemical composition of tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae*, 188, 89–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.023>
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain. (2).
- Strzetelski, P., Smoleń, S., Rozek, S., y Sady, W. 2010. The effect of diverse iodine fertilization on nitrate accumulation and content of selected compounds in radish plants (*Raphanus sativus* L.). *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*, 9(2), 65–73.

- Tester, M., y Roy, S. J. 2014. Salt resistant crop plants *ScienceDirect* § ´nia Negra. (April). <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.12.004>
- Tonacchera, M., Dimida, A., De Servi, M., Frigeri, M., Ferrarini, E., De Marco, G., ... Vitti, P. 2013. Iodine fortification of vegetables improves human iodine nutrition: In vivo evidence for a new model of iodine prophylaxis. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 98(4). <https://doi.org/10.1210/jc.2012-3509>
- Torres, A., Guzmán, A., Corradini, F., Martínez, J. P., Allende, M., Abarca, P., ... Sepúlveda, P. (2017). *Manual de cultivo del tomate al aire libre BOLETÍN INIA N° 11. 94.* Recuperado de <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/11 Manual Tomate Aire Libre.pdf>
- Tuteja, N. 2007. Mechanisms of high salinity tolerance in plants. *Methods in Enzymology*, 428, 419–438. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(07\)28024-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(07)28024-3)
- Umaly, R. C., y Poel, L. W. 1971. Effects of Iodine in Various Formulations on the Growth of Barley and Pea Plants in Nutrient Solution Culture. *Annals of Botany*, 35(139), 127–131. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/42908322>
- van Pée, K.-H. 1996. Biosynthesis of Halogenated. *Annu. Rev. Microbiol*, 50, 375–399.
- Venturi, S. 2012. Evolutionary Significance of Iodine. *Current Chemical Biology*, 5(3), 155–162. <https://doi.org/10.2174/2212796811105030155>
- Venturi, S., Donati, F. M., Venturi, A., y Venturi, M. 2002. Environmental Iodine Deficiency: A Challenge to the Evolution of Terrestrial Life? *Thyroid*, 10(8), 727–729. <https://doi.org/10.1089/10507250050137851>
- Venturi, S., y Venturi, M. 2007. Evolution of Dietary Antioxidants: Role of Iodine. *Tutto Sulla Nutrizione*, (January 2007), 1–25.

- Voogt, W., T Holwerda, H., y Khodabaks, R. 2010. Biofortification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with iodine: The effect of iodine form and concentration in the nutrient solution on growth, development and iodine uptake of lettuce grown in water culture. *Journal of the science of food and agriculture*, 90, 906–913. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3902>
- Weng, H.-X., Hong, C.-L., Yan, A., Pan, L.-H., Qin, Y.-C., Bao, L.-T., y Xie, L.-L. 2008. Mechanism of Iodine Uptake by Cabbage: Effects of Iodine Species and Where It is Stored. *Biological trace element research*, 125, 59–71. <https://doi.org/10.1007/s12011-008-8155-2>
- Weng, H. X., Weng, J. K., Yan, A. L., Hong, C. L., Yong, W. Bin, & Qin, Y. C. 2008. Increment of iodine content in vegetable plants by applying iodized fertilizer and the residual characteristics of iodine in soil. *Biological Trace Element Research*, 123(1–3), 218–228. <https://doi.org/10.1007/s12011-008-8094-y>
- Whitehead, D. D. C. 1975. Uptake by perennial ryegrass of iodide, elemental iodine and iodate added to soil as influenced by various amendments. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 26(3), 361–367. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740260317>
- Xu, F. 1996. Catalysis of novel enzymatic iodide oxidation by fungal laccase. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 59(3), 221. <https://doi.org/10.1007/BF02783566>
- Yeo, A. R., Yeo, M. E., y Flowers, T. J. 1987. The Contribution of an Apoplastic Pathway to Sodium Uptake by Rice Roots in Saline Conditions. *Journal of Experimental Botany*, 38(7), 1141–1153. <https://doi.org/10.1093/jxb/38.7.1141>
- Zhao, X. Q., Mitani, N., Yamaji, N., Shen, R. F., y Ma, J. F. 2010. Involvement of Silicon Influx Transporter OsNIP2;1 in Selenite Uptake in Rice. *Plant Physiology*, 153(4), 1871–1877. <https://doi.org/10.1104/pp.110.157867>

- Zhu, Y., Huang, Y.-Z., Hu, Y., y Liu, Y.-X. 2003. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: Effects of iodine species and solution concentrations. *Environment international*, 29, 33–37. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00129-0)
- Zimmermann, M. B., y Andersson, M. 2012. Assessment of iodine nutrition in populations: past, present, and future. *Nutrition Reviews*, 70(10), 553–570. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2012.00528.x>
- Zou, C., Du, Y., Rashid, A., Ram, H., Savasli, E., Pieterse, P. J., ... Cakmak, I. 2019. Simultaneous Biofortification of Wheat with Zinc, Iodine, Selenium, and Iron through Foliar Treatment of a Micronutrient Cocktail in Six Countries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(29), 8096–8106. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01829>