



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Torreón

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TORREÓN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADOS E INVESTIGACIÓN

**BIOFORTIFICACION AGRONOMICA CON YODO, EN EL
RENDIMIENTO Y CALIDAD NUTRACÉUTICA DEL
TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

Tesis que presenta:

CINTHYA RAMÍREZ DÍAZ

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN SUELOS

Director de tesis:

DR. MANUEL FORTIS HERNÁNDEZ



Torreón, Coahuila, México

Septiembre, 2020

Tesis elaborada bajo la dirección del Comité Particular de tesis la cual ha sido aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN SUELOS

COMITÉ PARTICULAR

Director de tesis: _____
Dr. Manuel Fortis Hernández

Co director de tesis: _____
Dra. Erika Lagunes Fortiz

Asesor: _____
Dr. Pablo Preciado Rangel

Asesor: _____
Dr. Héctor Zermeño González

Torreón, Coahuila, México 2020

DEDICATORIA

A mis padres: **Fidel Ramírez Hernández y Lucina Díaz Ávila.**

Gracias infinitas por darme la oportunidad de tener un estudio profesional, por el apoyo para lograr una meta mas en mi vida, por alentarme y animarme siempre, por formar la mujer que hoy en día soy.

A mis hermanos: **Mary Ramírez y Fidel Ramírez.**

Gracias por siempre estar, por ese apoyo incondicional que nunca me ha faltado y fue clave para el logro de este objetivo.

A mi amiga: **Verónica Soriano Puente.**

Amiga de toda la vida y compañera de esta etapa, gracias por tu amistad y apoyo incondicional en todo momento.

POR Y PARA USTEDES.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por permitirme llegar al fin de esta etapa tan importante en mi vida.

Al **Instituto Tecnológico de Torreón** por aceptarme en el programa de maestría en ciencias del suelo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría.

A mi director de tesis, el **Dr. Manuel Fortis Hernández** por la oportunidad que me brindo, por su paciencia y comprensión, así como su apoyo y tiempo prestado durante la realización de esta tesis.

A mis asesores **Dr. Pablo Preciado Rangel, Dr. Héctor Zermeño González y Dra. Erika Lagunes Fortiz**, por la revisión y sugerencias aportadas para mejorar el contenido de la tesis, mil gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Página

COMITÉ PARTICULAR.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE CUADROS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN.....	X
SUMMARY.....	XI
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 Objetivo general.....	5
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
1.2 Hipótesis.....	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1 Características botánicas del cultivo de tomate.....	7
2.1.1 Origen.....	7
2.1.2 Taxonomía y morfología.....	8
2.2 Importancia del cultivo.....	10
2.2.1 Producción mundial.....	10
2.2.2 Producción en México.....	12
2.2.3 Producción en la Comarca Lagunera.....	13
2.3 La biofortificación de cultivos.....	14
2.4 Yodo.....	20
2.4.1 Generalidades del yodo.....	20
2.4.2 El yodo en las plantas.....	25
2.4.3 El yodo en la salud humana.....	28
2.5 Potencial nutracéutico.....	30
2.5.1 Nutracéuticos.....	30

2.5.2 Los antioxidantes y la salud.....	32
2.5.3 Compuestos fenólicos	34
2.5.4 Licopeno	35
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1 Localización del experimento.....	38
3.2 Características de la malla sombra	39
3.3 Tratamientos evaluados	39
3.4 Diseño experimental	40
3.5 Material vegetal.....	40
3.6 Trasplante y sustrato	40
3.7 Manejo del cultivo	41
3.7.1 Poda.....	41
3.7.2 Tutorio	42
3.8 Nutricion del cultivo.....	42
3.9 Control de plagas y enfermedades	43
3.10 Variables evaluadas	44
3.10.1 Rendimiento	44
3.10.2 Variables de calidad del fruto	44
3.10.2.1 Diametro polar y ecuatorial del fruto	44
3.10.2.2 Firmeza.....	45
3.10.2.3 Solidos solubles totales de frutos.....	45
3.10.3 Muestreo y análisis nutricional	45
3.10.3.1 Determinacion de fósforo.....	46
3.11 Compuestos bioactivos	47
3.11.1 Obtención de extractos	47
3.11.2 Capacidad antioxidante total	47
3.11.3 Compuestos fenólicos	48
3.11.4 Flavonoides.....	49
3.11.5 Licopeno	49
3.12 Cuantificación de yodo	50
3.13 Análisis estadístico	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52

4.1 Calidad comercial de los frutos	52
4.1.1 Diametro polar y ecuatorial de los frutos	52
4.1.2 Firmeza y solidos solubles totales.....	54
4.2 Contenido nutrimental	55
4.2.1 Contenido de macronutrimientos	55
4.2.2 Contenido de micronutrimientos.....	61
4.3 Rendimiento	66
4.4. Calidad nutracéutica	68
4.4.1 Vitamina C	68
4.4.2 Capacidad antioxidante total	69
4.4.3 Compuestos fenólicos	71
4.4.4 Flavonoides	74
4.4.5 Licopeno	76
4.5 Concentración de yodo.....	78
V. CONCLUSIONES	81
VI. LITERATURA CITADA	82

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 2. 1. Principales países productores de tomate a nivel mundial de los años 2017 y 2018.....	11
Cuadro 2.2 Elementos esenciales para plantas y humanos.....	20
Cuadro 2.3 Ingesta diaria recomendada de yodo en el ser humano	30
Cuadro 3.1 Aplicaciones para el control de plagas y enfermedades.....	43
Cuadro 4.1 Efecto de la aplicación foliar de yodo en el diametro polar y ecuatorial de frutos de tomate.....	53
Cuadro 4.2 Efecto de la aplicación foliar de yodo en la firmeza y sólidos solubles totales en frutos de tomate.	55
Cuadro 4.3 Contenido promedio de macronutrientes en el tejido vegetal de plantas de tomate por efecto de la aplicación foliar de yodo.	57
Cuadro 4.4 Nutrientes vegetales esenciales y su concentracion tipica en el cultivo de tomate.....	59
Cuadro 4.5 Contenido promedio de micronutrientes en el tejido vegetal de plantas de tomate por efecto de la aplicación foliar de yodo.	63
Cuadro 4.6 Efecto de la aplicación foliar de yodo sobre el rendimiento del cultivo de tomate.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Principales estados productores de tomate en México.	13
Figura 2.2 Tecnicas de biofortificacion en plantas.....	19
Figura 3.1 Localización del sitio experimental	38
Figura 3.2 Poda de brotes axilares en plantas de tomate	41
Figura 4.1 Efecto de la aplicación foliar de yodo en la acumulación de vitanina C de frutos de tomate	69
Figura 4.2 Efecto de la aplicación foliar de yodo en la capacidad antioxidante de frutos de tomate.....	70
Figura 4.3 Efecto de la aplicación foliar de yodo en los compuestos fenólicos de frutos de tomate.....	72
Figura 4.4 Efecto de la aplicación foliar de yodo en el contenido de flavonoides de frutos de tomate.....	75
Figura 4.5 Efecto de la aplicación foliar de yodo en el licopeno de frutos de tomate.. ..	76
Figura 4.6 Efecto de la aplicación foliar de yodo en la acumulación de yodo en frutos de tomate	78

RESUMEN

El yodo no es un nutrimento esencial para las plantas terrestres, y en algunas plantas acuáticas juega un papel crítico en el metabolismo antioxidante. En humanos, el yodo es esencial para el metabolismo de la tiroides y para el desarrollo de habilidades cognitivas, y está asociado con menores riesgos de desarrollar ciertos tipos de cáncer. En este sentido, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación foliar con yodo sobre el rendimiento, calidad comercial y nutracéutica, así como su concentración en frutos de tomate. Los tratamientos fueron cinco concentraciones crecientes de yoduro de potasio (0, 5, 10, 15 y 20 $\mu\text{M L}^{-1}$). Los resultados muestran que dosis altas de yodo mejoran el rendimiento del cultivo, sin afectar la calidad comercial de sus frutos (sólidos solubles y firmeza). Además, la calidad nutracéutica se mejoran a excepción de licopeno el cual disminuye. Por lo que la biofortificación agronómica con yoduro de potasio puede ser una alternativa viable para mejorar el rendimiento y la calidad nutracéutica de frutos de tomate.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., fertilización foliar, compuestos fitoquímicos.

SUMARY

Iodine is not an essential nutrient for land plants; however, in some aquatic plants it plays a critical role in antioxidant metabolism. In humans, iodine is essential for thyroid metabolism and for the development of cognitive abilities, and is associated with lower risks of developing certain types of cancer. The objective of this research was to evaluate the effect of foliar application with iodine on yield, commercial quality and nutraceutical, as well as its concentration in tomato fruits. The treatments were five increasing concentrations of potassium iodide (0, 5, 10, 15 and 20 $\mu\text{M L}^{-1}$). The results show that high doses of iodine improve crop yield, without effects on commercial quality (soluble solids and firmness). The nutraceutical quality of the tomato is improved, except the lycopene that decreased. Agronomic biofortification may be a viable alternative to improve the yield and nutraceutical quality of tomato fruits.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., foliar fertilization, phytochemicals compounds.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente 3000 millones de personas en todo el mundo padecen de desnutrición o sufren de carencia de algún micronutriente (Welch y Graham, 2004), siendo esta una cuestión prioritaria en materia de nutrición para el futuro inmediato. Por lo que es necesario buscar estrategias que permitan implementar nuevas alternativas para la obtención de alimentos funcionales.

La biofortificación agronómica para aumentar el contenido de micronutrientes de los alimentos constituye una estrategia realmente prometedora (López *et al.*, 2014). Esta se define como el proceso de incrementar la concentración de elementos esenciales en la parte comestible de los productos cosechados mediante intervención agronómica (White y Broadley, 2005). Se considera que un alimento está biofortificado o enriquecido cuando la proporción de uno o varios de los nutrientes que lo integran es superior a su composición normal, la cual se ha modificado o producido de forma artificial.

I. INTRODUCCIÓN

Esta estrategia tiene el potencial de ser sostenible y rentable y de llegar a poblaciones rurales apartadas (Bouis *et al.*, 2011). Además, busca incrementar el contenido de nutrientes en los cultivos mediante técnicas de fertilización, fitomejoramiento tradicional o fitomejoramiento asistido con biotecnología (Welch y Graham, 2004).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) las deficiencias nutrimentales más comunes son las de hierro (Fe), zinc (Zn), yodo (I) y Vitamina A (Burlingame, 2013).

En el caso del yodo, la biofortificación permitiría obtener plantas con una mayor capacidad antioxidante y mayor tolerancia al estrés, además de que se mejoraría sustancialmente el valor nutricional de sus frutos. Las fuentes de yodo (I) pueden ser sales inorgánicas como el yodato y yoduro de potasio (KIO_3 y KI) (Medrano-Macías *et al.*, 2016).

La carencia de alguno de estos micronutrientes en una determinada población provocaría problemas de malnutrición, término erróneamente asociado a la desnutrición, en los segmentos más vulnerables. Otros micronutrientes que suelen faltar más frecuentemente en cantidades adecuadas en la dieta son: hierro, zinc, cobre, calcio, magnesio, yodo y selenio; los cuales

I. INTRODUCCIÓN

producen en la mayoría de los casos deficiencias que supondrían una mayor propensión a ciertas enfermedades, con la subsiguiente pérdida de calidad de vida y/o muerte prematura (López *et al.*, 2014).

Con relación al consumo de yodo, el cual es esencial para el buen funcionamiento de la glándula tiroidea, se ha demostrado recientemente una función distinta a la ya mencionada, asociada con la carcinogénesis y su tratamiento en diversas líneas celulares, mostrando que el yodo es capaz de actuar de dos formas: como antioxidante y como antiproliferativo de células malignas (Aceves y Anguiano, 2009).

Los elementos calcio, hierro, zinc, selenio y yodo pueden aportarse a la población humana por diferentes medios: a) A través de sales y compuestos sintéticos contenidos en complementos de vitaminas y minerales, b) Por medio de alimentos fortificados, como los cereales procesados a los que se añaden sales de hierro y zinc, c) Por medios de alimentos biofortificados, alimentos vegetales que durante su crecimiento reciben una adecuada fertilización, del tal forma que su densidad nutricional es alta y aportan a quien los consume todos los elementos necesarios para una vida sana.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha determinado que la mejor fuente de los cinco elementos minerales antes mencionados son los alimentos biofortificados (Leija *et al.*, 2016 b).

La biofortificación con calcio, hierro y zinc ocurre más fácilmente ya que estos elementos se encuentran en el listado de los 17 elementos esenciales para las plantas. En cambio, aunque el yodo y el selenio se incluyen en el listado de los 28 esenciales tanto para los humanos como para sus animales domésticos, estos elementos no se anotan en el listado de reconocidos como esenciales para las plantas (Leija *et al.*, 2016b).

Con base en lo anterior, en el presente estudio se analizó la aplicación de yodo como yoduro de potasio (KI) de forma foliar al cultivo de tomate y su efecto sobre el rendimiento, calidad comercial y nutraceutica de sus frutos.

OBJETIVOS

General:

- Evaluar el yoduro de potasio (KI) en el rendimiento, calidad comercial y nutraceútica en tomate establecido en malla sombra.

Específicos:

- Determinar el rendimiento y la calidad comercial (sólidos solubles, firmeza, diámetro polar y ecuatorial y firmeza) de los frutos de tomate por efecto de la aplicación foliar de KI.
- Determinar la calidad nutraceútica (flavonoides, fenólicos, licopeno, capacidad antioxidante) de los frutos de tomate.
- Cuantificar la acumulación de Yodo en los frutos de tomate.

HIPÓTESIS

La aspersión foliar de dosis altas de yoduro de potasio (15 y 20 μM) incrementan el rendimiento, la calidad nutraceútica y comercial de frutos de tomate establecidos en malla sombra.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Características botánicas del cultivo del tomate

2.1.1 Origen

El origen del género *Lycopersicon* se localiza en la región andina que se extiende desde el sur de Colombia al norte de Chile. Probablemente desde allí fue llevado a Centroamérica y México donde se domesticó y ha sido por siglos parte básica de la dieta. Luego, fue llevado por los conquistadores a Europa. Durante el siglo XVI se consumían en México tomates de distintas formas y tamaños e incluso rojos y amarillos y para entonces ya habían sido traídos a España y servían como alimento en España e Italia. En otros países europeos solo se utilizaban en farmacia y así se mantuvieron en Alemania hasta comienzos del siglo XIX. Los españoles y portugueses difundieron el tomate a Oriente Medio y África, y de allí a otros países asiáticos, y de Europa también se difundió a Estados Unidos y Canadá (Escalona *et al.*, 2009).

2.1.2 Taxonomía y morfología

El tomate pertenece al filo Tracheophyta, clase Magnoliopsida, orden Solanales, familia Solanaceae, género Solanum, especie ***Solanum lycopersicum***. Existen otros sinónimos desde el punto de vista científico con los que es, o era conocida esta planta (Espinoza, 2019).

El nombre científico del tomate ha sido discutido durante muchos años. Originalmente Linneo lo había bautizado con el nombre de *Solanum lycopersicon* pero posteriormente Miller en 1768 propuso el nombre de *Lycopersicon esculentum* nombre mayormente adjudicado a variedades consideradas como silvestres (Argerich y Gaviola, 2019)

El tomate cultivado corresponde, básicamente, a *L. esculentum*, aunque también se cultiva una fracción de la variedad botánica *cerasiforme* y de *Lycopersicon pimpinellifolium* ("cherry", "cereza", o "de cóctel"). El mejoramiento ha generado muchas variedades distintas para fines muy específicos.

Planta: El tomate puede presentar básicamente dos hábitos de crecimiento: determinado e indeterminado. El tomate de hábito indeterminado se caracteriza por tener un crecimiento extensivo, postrado, desordenado y sin límite. En ella, los tallos presentan segmentos uniformes con tres hojas (con

II. REVISIÓN DE LITERATURA

yemas) y una inflorescencia, terminando siempre con un ápice vegetativo. A diferencia de esta, el tomate de crecimiento determinado tiene tallos con segmentos que presentan progresivamente menos hojas por inflorescencia y terminan en una inflorescencia, lo que resulta en un crecimiento limitado.

Sistema radical: El sistema radical alcanza una profundidad de hasta 2 m, con una raíz pivotante y muchas raíces secundarias. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de cultivo, se daña la raíz pivotante y la planta desarrolla un sistema radical fasciculado, en el cual dominan raíces adventicias y se concentran en los primeros 30 cm de profundidad.

Tallo principal: Los tallos son ligeramente angulosos, semi leñosos, de grosor mediano y con tricomas (pilosidades), simples y glandulares. El eje cuenta con un grosor que oscila entre 2-4 cm en su base, sobre el que se van desarrollando las hojas, tallos secundarios e inflorescencias. En la parte distal se encuentra el meristemo apical, donde se inician los nuevos primordios foliares y florales.

Hojas: Las hojas son compuestas e imparipinnadas, con folíolos peciolados, lobulados y con borde dentado, en número de 7 a 9 y recubiertos de pelos glandulares. Las hojas se disponen de forma alternada sobre el tallo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Flor: La flor del tomate es perfecta. Consta de 5 o más sépalos, de igual número de pétalos de color amarillo dispuestos de forma helicoidal y de igual número de estambres que se alternan con los pétalos. Los estambres están soldados por las anteras y forman un cono estaminal que envuelve al gineceo y evitan la polinización cruzada. El ovario es bi o plurilocular. Las flores se agrupan en inflorescencias denominadas comúnmente como “racimos”. La primera flor se forma en la yema apical y las demás se disponen lateralmente por debajo de la primera, alrededor del eje principal. Las inflorescencias se desarrollan cada 2-3 hojas en las axilas.

Fruto: baya bi o plurilocular que puede alcanzar un peso que oscila entre unos pocos miligramos y 600 gramos. Está constituido por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas (Escalona *et al.*, 2009).

2.2 Importancia del cultivo

2.2.1 Producción mundial

La producción y el consumo mundial de tomate rojo, así como el consumo promedio per cápita, registran tendencia al alza durante la década reciente.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

China es el más importante productor y consumidor mundial, Estados Unidos es el principal importador, y México el principal exportador de esta hortaliza (FIRA, 2017). Según las estadísticas agrícolas de tomate a nivel mundial de la base de datos de la FAO, el 71.52% de la producción (ton) mundial en el 2018 se concentró en cinco países: China (39.19%), India (12.34%), Estados Unidos (8.03%) Turquía (7.74%), y Egipto (4.22%) de la producción cosechada (FAOSTAT, 2019).

Los países con una superficie cosechada en 2017 mayor al 10% son: China (26.36%), India (20.01%), y Nigeria (15.48%) del total de las hectáreas cosechadas.

Cuadro 2.1. Principales países productores de tomate a nivel mundial de los años 2017 y 2018.

	2017	2018
	----- ton -----	----- ton -----
China	59 488 179	61 523 462
India	20 708 000	19 377 000
Turquía	12 750 000	12 150 000
Estados Unidos	11 141 862	12 612 139
Egipto	6 729 004	6 624 733

Fuente: FOASTAT (2019).

2.2.2 Producción en México

El tomate en México representa 3.46% del PIB agrícola nacional y el 22.55% de la producción de hortalizas. En el mercado internacional, durante el 2016, el jitomate mexicano cubrió el 90.67% de las importaciones de Estados Unidos y 65.31% de Canadá (SAGARPA, 2017).

México es el primer exportador mundial de tomate rojo, en 2017 exportó 1.7 millones de toneladas, equivalentes al 24% del volumen mundial exportado (SAGARPA, 2018). A pesar de que durante el periodo 2003-2016 hubo una reducción en la superficie sembrada, presentó un crecimiento acumulado en la producción (54.25%) y en las exportaciones en fresco (77.87%), convirtiéndose en uno de los cultivos con mayor incremento en la productividad (SAGARPA, 2017).

En la Figura 2.1, se muestran los 10 principales estados productores de tomate en México.

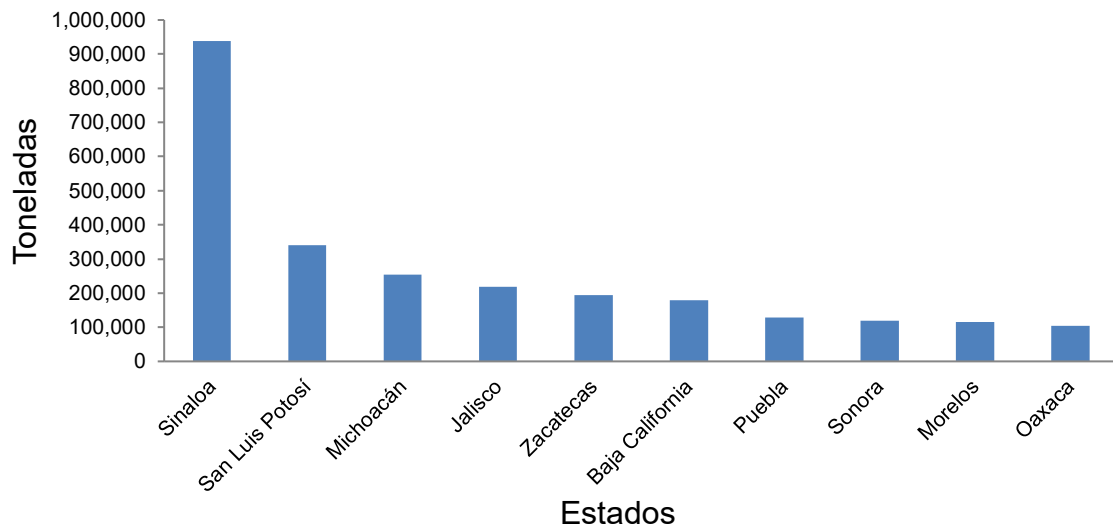


Figura 2.1 Principales estados productores de tomate en México (SIAP, 2017).

2.2.3 Producción en la Comarca Lagunera

Una de las actividades agrícolas que ha ido en aumento en los últimos años en la Comarca Lagunera y que se ha consolidado de forma significativa, es la producción de tomate en fresco con fines de exportación. SAGARPA a través del SENASICA, implementa el Programa de Buenas Prácticas Agrícolas y Buenas Prácticas de Manufactura, en donde alrededor de 15 unidades de producción, que en conjunto suman una superficie aproximada a las 900

hectáreas y las cuales en su mayoría están equipadas con tecnología de punta en sistemas de producción de agricultura protegida (malla-sombra e invernaderos), exportan tomate durante todo el año a los Estados Unidos. La producción anual estimada de tomate en esta región durante el año 2017 fue de 184 mil 973.63 toneladas (El Siglo de Torreón, 2018).

2.3 La biofortificación de cultivos

Las deficiencias nutricionales ocasionan enfermedades con lesiones bioquímicas y sintomatología clínica características, que pueden ser irreversibles y conducir a la muerte (FAO/OMS, 1992). Su corrección implica la implementación de estrategias generales tales como (Liyanage & Hettiarachchi, 2011):

- Educación nutricional: promoviendo cambios de hábitos alimentarios, mediante la incorporación de los alimentos aportadores de los nutrientes deficitarios. Los cambios de hábitos alimentarios son difíciles de implementar debido a actitudes culturales y problemas socioeconómicos. Además, no tienen efecto en el corto plazo y es difícil mantenerlos a lo largo del tiempo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

- Fortificación/enriquecimiento de los alimentos es una estrategia efectiva para combatir las deficiencias de nutrientes a nivel poblacional. La fortificación puede ser comercial/industrial (ej. harinas, arroz, aceites, etc.) o casera (ej. gotas de vitamina D (Darnton-Hill & Nalubola, 2002).

- Administración de nutrientes como fármacos, en dosis fisiológicas (suplementos) o como megadosis: se deben aplicar cuando las deficiencias son graves, en casos diagnosticados clínicamente y requieren el seguimiento médico.

La administración de suplementos dietarios está contemplada en el Código Alimentario Argentino (CAA) que los define como los productos destinados a incrementar la ingesta dietaria habitual, suplementando la incorporación de nutrientes en la dieta de las personas sanas que, no encontrándose en condiciones patológicas, presenten necesidades básicas dietarias no satisfechas o mayores a las habituales.

Los diferentes enfoques agronómicos para mejorar los niveles de los micronutrientes en los cultivos han demostrado ser efectivos (Lyons *et al.*, 2004), el manejo del suelo y la fertilización contribuyen de manera significativa a la mejora de la calidad de los frutos (Nestel *et al.*, 2006; Sida-Arreola *et al.*, 2017).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Esta última práctica incluye la aplicación de fertilizantes minerales y/o abonos orgánicos al suelo para elevar el suministro de nutrientes disponibles para el cultivo que se encuentra en desarrollo (Hoseinzade *et al.*, 2015), incrementando sus funciones morfológicas, fisiológicas y metabólicas que permiten la expresión de su potencial genético (Anchal Dass *et al.*, 2017).

Estos métodos se desarrollan con el fin de combatir la desnutrición mineral en las personas, como un desafío global serio de la humanidad. La desnutrición mineral se puede afrontar a través del enriquecimiento de alimentos, la diversificación de la dieta, la biofortificación y la suplementación mineral. Sin embargo, estas estrategias no siempre han tenido éxito, pero entre ellas, la biofortificación ha demostrado que la aplicación de fertilizantes es la mejor manera de adquirir elementos minerales de manera inmediata.

La biofortificación se define como el proceso consistente en aumentar la concentración de nutrientes esenciales en la parte comestible de las plantas, mediante el manejo agronómico y/o genético. Yin *et al.* (2012) indican que es una estrategia biológica cuyo objetivo es el incremento de los micronutrientes contenidos en las partes comestibles de las plantas, animales o microorganismos, a través del cultivo o el uso de la biotecnología, además se

II. REVISIÓN DE LITERATURA

considera que es una manera segura y eficaz para aliviar la malnutrición en aéreas deficientes.

Se puede decir entonces que la biofortificación es un proceso a través del cual se incrementa la concentración de elementos esenciales biodisponibles en las porciones comestibles de las plantas de cultivo a través de la intervención agronómica. Además, existe la posibilidad del uso de estos productos vegetales tanto para el consumo humano como para el animal, generándose así un sistema de flujo de micronutrientes.

La biofortificación con micronutrientes en cultivos básicos se presenta como una alternativa para incrementar el contenido de nutrientes en los cultivos mediante técnicas de fertilización, fitomejoramiento tradicional o asistido con biotecnología-(Welch and Graham, 2004).

La biofortificación en cultivos de alimentos básicos para aumentar su contenido de micronutrientes tiene un enfoque de salud pública para el control de las deficiencias de hierro, zinc, yodo y selenio en los países en desarrollo (Bouis y Welch, 2010).

Diversos estudios epidemiológicos han demostrado una relación directa entre una dieta rica en frutas y hortalizas y la menor incidencia de enfermedades

II. REVISIÓN DE LITERATURA

crónicas, efecto que se atribuye a la presencia de minerales, vitaminas, compuestos bioactivos y fibra. Los cuales ejercen un efecto protector ante algunas enfermedades degenerativas. Estas sustancias en su mayoría se caracterizan por su capacidad antioxidante y son una alternativa natural que protege de la oxidación a las macromoléculas biológicas en el cuerpo (Cano *et al.*, 2005). Estos compuestos cumplen un papel crítico como protectores de procesos celulares ante el estrés oxidativo, que genera un desbalance entre la producción de radicales libres y las defensas antioxidantes (Rousseaux *et al.*, 2005).

Por lo tanto, esto puede satisfacerse mediante, la suplementación con minerales, la fortificación de los alimentos o el aumento de la concentración y/o la biodisponibilidad de los elementos minerales y compuestos bioactivos en los productos (White y Broadley, 2008).

En muchos países, los programas de biofortificación y suplementación se han implementado para combatir esas deficiencias, por ejemplo, el enriquecimiento de Fe en la harina de trigo en Pakistán, suplementos de vitamina A en Nigeria, el uso de la sal yodada en Marruecos, etc. (Imhoff-Kunsch *et al.*, 2007). Por lo tanto, la biofortificación se considera una estrategia

sostenible, rentable (Bouis y Welch, 2010) y viable a corto plazo para mejorar la composición mineral de los alimentos básicos (Bouis, 2007).

Actualmente existen tres principales estrategias de biofortificación (Figura 2.2), las cuales son empleadas ampliamente, pero siempre hay que considerar que la biofortificación debe realizarse en un menor tiempo y a un costo más bajo (White y Broadley, 2005).

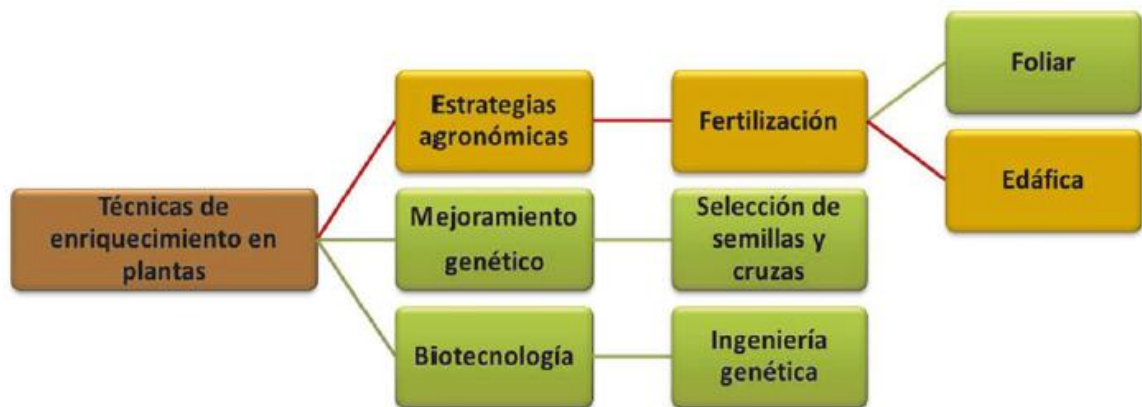


Figura 2.2 Técnicas de biofortificación en plantas (White y Broadley, 2005).

2.4 Yodo

2.4.1 Generalidades del yodo

Se reconocen 17 elementos esenciales en las plantas (Kabata-Pendias, 2010) mientras que en los humanos se necesitan 28 (Huaraguchi, 2004) (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Elementos esenciales para plantas y humanos.

Elementos	Indispensables para las plantas	Indispensables para los humanos
O, C, H, N, Ca, P	Si	Si
K, Mg, S	Si	Si
B, Fe, ZN, Cu, Mn, Cl, Mo, Ni	Si	Si
Se, I	No	Si
Na, Si, F, Pb, Sn, Cr, As, Co, V	No	Si

Fuente: Leija-Martínez *et al.* (2016a).

En la actualidad al menos una cuarta parte de la población mundial no consume la cantidad suficiente de por lo menos uno de los siguientes elementos: calcio (Ca), hierro (Fe), zinc (Zn), selenio (Se) y yodo (I). Esta

II. REVISIÓN DE LITERATURA

malnutrición mineral acarrea una serie de trastornos y enfermedades que son de gran importancia en la salud pública (Fraga, 2005). Entre las probables causas por las cuales se dificulta el consumo natural de estos elementos se encuentran los factores que disminuyen la biodisponibilidad de los mismos en los alimentos, la distribución irregular de los elementos en el suelo o su presencia en formas no disponibles para las plantas, y el empobrecimiento mineral de los suelos debido a la extracción continua de elementos por la producción intensiva (Gómez-Galera *et al.*, 2010).

El yodo o iodo (I) es el elemento químico número atómico 53, situado en el grupo de los alógenos (grupo 17) de la Tabla periódica. Su peso atómico del isótopo más abundante es de 126.9 g mol⁻¹. Como los restantes alógenos del grupo VII de la Tabla periódica, el yodo forma moléculas diatómicas (Díaz, 2017).

El yodo inorgánico se encuentra en dos formas; el yodato (IO₃⁻) y el yoduro (I⁻). Desde el punto de vista termodinámico la forma inorgánica de yodo más probable (esto es, que se ve químicamente favorecida) es el yodato; de hecho el equilibrio químico esperado resultaría en niveles prácticamente indetectables de yoduro, encontrándose, sin embargo, concentraciones de yoduro hasta de 0.038 mg L⁻¹ (Tian *et al.*, 1996), con lo que, al menos en los

II. REVISIÓN DE LITERATURA

entornos marinos la concentración de yoduro vs yodato es significativamente mayor a la esperada (Wong, 1991).

A pesar de que no se conoce una función metabólica del yodo en las plantas terrestres (Kabatas-Pendias, 2011; Mengel *et al.*, 2001), su valor como micronutriente benéfico está bien establecido (Borst-Pauwles, 1961). Diversos trabajos de investigación indican que en las plantas el yodo induce mayor presencia de antioxidantes, aportando incremento en la tolerancia a algunos factores adversos (Blasco *et al.*, 2008; Blasco *et al.*, 2011; Gupta *et al.*, 2015; International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders [ICCIDD], 2009; Leyva *et al.*, 2011). Sin embargo, existen evidencias de toxicidad en las plantas por la aplicación de este elemento por encima de ciertas concentraciones (Caffagni *et al.*, 2011; Landini *et al.*, 2011; Mackowiak & Grossl, 1999; Zhu *et al.*, 2003). Diversos estudios indican que los alimentos de origen vegetal presentan normalmente baja concentración de yodo, de allí la necesidad de comprender mucho más sus efectos en los cultivos, con el objetivo de obtener cosechas biofortificadas con este elemento (White & Broadway, 2009).

El yodo es un elemento traza clasificado como no indispensable para las plantas (Kabata-Pendias, 2011), pero esencial para los humanos por ser un componente esencial de las hormonas tiroideas, tiroxina (T4) y triyodotironina

II. REVISIÓN DE LITERATURA

(T3). Estas hormonas desempeñan un papel clave en la síntesis de proteínas, regulación del metabolismo, crecimiento y desarrollo normal del organismo humano (Dong *et al.*, 2009). Se estima que unas dos mil millones de personas en el mundo tienen riesgo de ingesta insuficiente de yodo, mientras que aproximadamente un tercio de la población mundial vive en áreas con aporte natural insuficiente de yodo (Andersson *et al.*, 2012).

La presencia del yodo en las plantas comestibles se considera muy deseable ya que las fuentes orgánicas del elemento son efectivas para complementar la ingesta diaria de yodo que se consigue de forma natural y por parte de la yodatización de la sal de mesa (WHO, 2014). Una mayor concentración de yodo en los órganos comestibles de las plantas cultivadas se logra por medio de la biofortificación, complementando así los esquemas de fertilización basados en los 17 elementos que se sabe son esenciales para las plantas, con la aplicación del elemento yodo que es esencial para los consumidores animales o humanos (Dai *et al.*, 2006; Blasco *et al.*, 2008; Caffagni *et al.*, 2011;).

Lamentablemente el conocimiento sobre la fisiología del yodo en las plantas es escaso (Landini *et al.*, 2012) y las reacciones fisiológicas y bioquímicas de las plantas frente al yodo aún no son bien entendidas (Smoleń *et al.*, 2014). A pesar de lo anterior, algunos reportes en la literatura indican que el

II. REVISIÓN DE LITERATURA

yodo puede ejercer efectos estimulantes sobre las plantas (Dai *et al.*, 2006), elevando la tolerancia al estrés en las plantas (Leyva *et al.*, 2011; Gupta *et al.*, 2015) e induciendo mayor contenido de vitaminas y potencial antioxidante en los tejidos de las plantas (Benavides-Mendoza *et al.*, 2012).

Se dispone de poca información acerca de la forma en que el yodo es acumulado y metabolizado en especies terrestres (Weng *et al.*, 2008a); sin embargo, el proceso está mejor entendido en especies marinas como *Laminaria digitata* (kelp). Dicha especie se reporta como acumuladora de yodo, alcanzando hasta 1 % de su peso seco (Colin *et al.*, 2003). Se ha encontrado que la inducción de acumulación celular, o volatilización, hacia la atmósfera de este elemento está relacionada con el nivel de estrés oxidativo. Es decir, bajo condiciones de producción alta de especies reactivas del oxígeno (ROS) este elemento es volatilizado; mientras que a concentración baja de ROS el yodo es almacenado para estar disponible en caso de aumento del estrés (Küpper *et al.*, 2008).

Venturi (2011) propuso la hipótesis de que el yodo constituyó uno de los primeros antioxidantes utilizados por los organismos fotosintéticos. Del mismo modo, (La Barre *et al.*, 2010) plantearon que el yodo es usado por las algas marinas como antioxidante durante los eventos de estrés oxidativo; hecho que pudiera ser similar en las plantas terrestres. Sin embargo, hasta donde se sabe,

esta faceta del uso del yodo no ha sido investigada ni aplicada en la práctica agrícola.

2.4.2 El Yodo en las plantas

No se considera al yodo como un elemento esencial para las plantas terrestres, aunque diversos estudios demostraron que estas absorben y acumulan yodo (Mackowiak y Grossl, 1999; Zhu *et al.*, 2003). Esta aparente no esencialidad explica porque el yodo no se contempla en los programas de fertilización mineral de los cultivos, ello a pesar de que se ha demostrado que el aporte de sales inorgánicas de yodo permite elevar la tolerancia al estrés en las plantas (Leyva *et al.*, 2011; Gupta *et al.*, 2015).

El contenido de yodo en las plantas generalmente aumenta al aplicar el yodo como yoduro, yodato u otras formas químicas (Weng *et al.*, 2008b). Los mejores resultados se han obtenido al aplicar los compuestos de yodo en la solución nutritiva o por aspersión foliar. En cada especie vegetal los resultados son variables en el sentido que se modifica la respuesta frente a la concentración y cambia la distribución en los órganos de la planta. Por ejemplo, en un estudio llevado a cabo en espinaca bajo cultivo hidropónico se aplicaron diferentes formas químicas de yodo como ácido yodoacético, yoduro y yodato y se comprobó que con concentraciones mayores a 0 y hasta 1 mg L⁻¹ la tasa de

II. REVISIÓN DE LITERATURA

absorción del yodo aumentó linealmente, manteniendo una proporción de concentración de 1:1 en raíces y hojas (Smolen y Sadi, 2012).

En un estudio llevado a cabo por Shinonaga *et al* (2001) se estableció que la concentración de yodo en cereales de grano de zonas agrícolas continentales de Europa fue particularmente baja, con valores de 0.002 a 0.03 $\mu\text{g g}^{-1}$, en comparación con los de suelos cercanos al océano. Poco se conoce sobre la forma en que éste elemento es acumulado en plantas terrestres, sin embargo, en una investigación realizada en plantas de calabaza se dedujo mediante un estudio con microscopia electrónica que al aplicarse yodo inorgánico y orgánico directamente al sustrato, la mayor parte del yodo se acumuló en la raíz, mientras otra pequeña porción fue transportada a las partes aéreas para almacenarse en los cloroplastos (Weng *et al.*, 2008a), hecho que pudiera explicar parcialmente su carácter de inductor de tolerancia frente a algunos tipos de estrés ya que un volumen importante de la maquinaria antioxidante celular se encuentra en los cloroplastos (Leija *et al.*, 2016b)

Zhu *et al.*, (2003) estudiaron la absorción del 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 donde encontraron las concentraciones bajas, tal como 0.127 mg L^{-1} de yoduro y yodato resultaron en una adecuada acumulación de este

II. REVISIÓN DE LITERATURA

elemento, presentando 3 y 1.8 $\mu\text{g l g}^{-1}$ de peso fresco, la cual se considera adecuada.

Voogt *et al.*, (2010) realizaron otro experimento de biofortificación con yodo en forma de yoduro y yodato en plantas de lechuga, aplicaron concentraciones muy bajas de estas formas químicas, las cuales oscilaban entre 0.013 y 0.129 mg L^{-1} , encontrando la concentración de 0.129 mg L^{-1} de yoduro obtuvieron una acumulación de 0.653 y 0.764 $\mu\text{g l g}^{-1}$ de tejido fresco, cinco veces menos de la concentración obtenida al aplicar yodato.

La concentración de yodo encontrada normalmente en tejidos de plantas terrestres es de 0.1 a 1 mg kg^{-1} , pudiendo alcanzar hasta 3 mg kg^{-1} ó más. Sin embargo, Whitehead (1975) reportó concentraciones de yodo en *Lolium perenne* de 4.3 hasta 56.9 mg kg^{-1} en un estudio en donde aplicó yodo al suelo. Igualmente, Aller *et al.* (1990) reportaron valores en el espectro de 0.002 hasta 59 mg kg^{-1} en diferentes especies de cultivo. Nuestros estudios acerca de la fertilización con yodo en México indican que pueden obtenerse tejidos vegetales comestibles hasta con 156 mg kg^{-1} de yodo. Es un indicativo claro de la factibilidad de la biofortificación con yodo de cultivos en zonas terrestres (Benavides-Mendoza *et al.*, 2012)

2.4.3 El Yodo en la salud humana

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la deficiencia de yodo se encuentra entre las deficiencias nutricionales más comunes, junto con las de hierro (Fe), zinc (Zn) y vitamina A (Burlingame, 2013; Prasad, 2013).

El consumo insuficiente de los micronutrientes través de los alimentos causa una malnutrición mineral en humanos. Hasta ahora se han determinado 11 elementos traza que son esenciales para el desarrollo y crecimiento adecuado de los humanos (Fraga, 2006). Algunos de estos elementos son requeridos en cantidades tan pequeñas que su deficiencia puede llegar a ser rara o incluso desconocida (Stein, 2009).

Uno de los elementos más estudiados debido a su importancia metabólica en mamíferos es el yodo (FAO, 2009). El organismo humano adulto contiene entre 20 y 25 mg de iodo, localizándose entre 70 y 80 % en la glándula tiroidea, donde es indispensable para la elaboración de las hormonas tiroideas: tetraiodotironina o tiroxina (T4) y triiodotironina (T3) (Martín, 2015).

Se estima que 2 000 millones de personas viven con una ingesta insuficiente de este elemento (Mottiar, 2013), provocando los denominados desordenes por deficiencia de yodo (DDY) (Weng *et al.*, 2008). Los DDY se

II. REVISIÓN DE LITERATURA

refieren a todos los desórdenes asociados con la baja ingesta de yodo y que pueden ser prevenidos asegurando el consumo adecuado del elemento (WHO, 2001). Los DDY ocurren cuando la ingesta y asimilación de yodo es más baja que la cantidad requerida por la glándula tiroidea para sintetizar suficientes cantidades de las hormonas tiroxina y triyodotironina. El DDY más conocido por su clara sintomatología es el bocio, sin embargo, en las últimas décadas se ha reconocido la presencia de desórdenes menos obvios desde el punto de vista de la sintomatología, tales como el impacto adverso del consumo insuficiente de yodo en el desarrollo mental y físico en niños así como en la productividad de los adultos (Lazarus, 2015).

Adicional a la importancia del consumo de yodo, justificada por la esencialidad para el funcionamiento adecuado de la glándula tiroidea, se ha demostrado recientemente una función distinta a la ya mencionada, asociada con la carcinogénesis y su tratamiento en diversas líneas celulares, mostrando que el yodo es capaz de actuar de dos formas: como antioxidante y como antiproliferativo de células malignas (Aceves y Anguiano, 2009). En bajas concentraciones el yodo puede neutralizar directamente radicales hidroxilo (OH) y adicionalmente en su forma oxidada (I₂) compite con las especies reactivas del oxígeno (ROS) por varios componentes celulares disminuyendo significativamente la lipoperoxidación. En altas concentraciones el yodo actúa

II. REVISIÓN DE LITERATURA

como un oxidante moderado, disipando el potencial de membrana mitocondrial y promoviendo la apoptosis en células cancerosas (Torremante y Rosner, 2011).

Los requerimientos diarios de yodo, de acuerdo con las Recommended Dietary Allowances (RDA), se presentan en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Ingesta diaria recomendada de yodo en el ser humano.

Cantidad diaria	Edad
90 µg	Infantes (0-59 meses)
120 µg	Niños (6-12 años)
150 µg	Adultos (mayores de 12 años)
200 µg	Embarazo y lactancia

Fuente: Andersson *et al.* (2011).

2.5 Potencial nutracéutico

2.5.1 Nutracéuticos

La introducción formal del término nutracéutico fue planteada por el Doctor Stephen De Felice en 1989, y consta simplemente de la fusión de dos elementos básicos: un componente nutricional y otro farmacéutico. De Felice resumió el término como “un alimento (o parte del mismo) que proporciona

II. REVISIÓN DE LITERATURA

beneficios a la salud, que incluye la prevención y/o tratamiento de una enfermedad; tales productos pueden variar desde nutrientes aislados, suplementos dietarios, hasta productos diseñados genéticamente”, esta definición hoy en día continúa vigente, aunque con algunas modificaciones (González *et al.*, 2013).

La clasificación de los nutraceuticos por mecanismo de acción los separa en subgrupos según las funciones metabólicas y fisiológicas sobre las que actúan, entre ellos se pueden reconocer los agentes antioxidantes, reguladores del metabolismo lipídico, antiinflamatorios e inmunorreguladores, osteogénicos y que tienen actividad anticancerígena (González *et al.*, 2013; Balcerczyk *et al.*, 2014; Carrasco *et al.*, 2012; Lakshmana *et al.*, 2012).

La mayoría de los autores, a nivel internacional, hacen mención a tres categorías principales para los nutraceuticos (González *et al.*, 2013; Das *et al.*, 2012):

- Nutrientes: sustancias con funciones nutricionales establecidas, como vitaminas, minerales, aminoácidos y ácidos grasos. ·
- Herbales: productos herbales o botánicos, procesados en forma de concentrados o extractos. ·
- Suplementos de la dieta: productos derivados de otras fuentes como el piruvato, condroitín sulfato, hormona precursora de esteroides, etc.

Para el caso de las hortalizas, la categoría de importancia son los nutrientes.

2.5.2 Los antioxidantes y la salud

Un antioxidante es una sustancia que forma parte de los alimentos de consumo cotidiano y que puede prevenir los efectos adversos de especies reactivas sobre las funciones fisiológicas normales de los humanos (Patthamakanokporn *et al.*, 2008). Las propiedades antioxidantes no sólo deben estudiarse por sus interacciones químico-biológicas, sino por su función en el deterioro oxidativo (Pastene, 2009). Son sustancias existentes en determinados alimentos que nos protegen frente a radicales libres, causantes de los procesos de envejecimiento y de algunas enfermedades (Luna y Delgado, 2014).

De acuerdo con Núñez (2011) se han estudiado alrededor de 100 enfermedades y su relación con el desbalance del sistema oxidativo, entre otras: cardiovasculares, cáncer, gástricas, respiratorias, neurológicas y del sistema endocrino. Entre éstas las de tipo cardiovascular tienen amplia evidencia.

En el caso de la diabetes los posibles mecanismos de los antioxidantes se relacionan con la inhibición en el intestino de la digestión de los carbohidratos, en particular la glucosa, de la cual también se modula su

II. REVISIÓN DE LITERATURA

liberación por el hígado. Podrían también estimular la secreción de insulina en el páncreas y activar los receptores de la misma y de alguna manera activar la recaptura de glucosa en los tejidos blanco para la hormona. Otros efectos pueden ser la modulación de las rutas genéticas (Reyes *et al.*, 2011).

Respecto al cáncer, señalan Llancari y Matos (2011) que si los radicales libres afectan el DNA (ácido desoxirribonucleico) pueden ocurrir mutaciones que en su momento se transforman en células cancerosas. Zamora (2007), señala la relación entre cáncer gástrico derivado de la presencia de *Helicobacter pilori*, bacteria que causa gastritis crónica y que puede conducir a lesiones precancerosas relacionadas con el estrés oxidativo.

Es posible que las enfermedades neurodegenerativas sean de las más estudiadas en el contexto del estrés oxidativo. Se ha advertido el aumento del deterioro de proteínas específicas por la presencia elevada de las especies reactivas del oxígeno. De igual manera en algunas zonas del cerebro ocurre la disminución de algunos metales de transición ($\text{Fe}^{+2} \rightarrow \text{Fe}^{+3}$) propias del efecto oxidativo, lo cual agrava la enfermedad. El metabolismo de glutatión, también se ve afectado lo cual se asocia con enfermedades como Parkinson, Alzheimer u otras degenerativas del sistema neurológico (Nuñez, 2011). Quiñones *et al.* (2012), abordan el efecto benéfico de los antioxidantes (polifenoles) en el daño hepático y gástrico producido por ingesta de alcohol y la protección del intestino

o como coadyuvante en el tratamiento de cataratas propias de la diabetes, entre otras.

2.5.3 Compuestos fenólicos

Las plantas sintetizan una gran variedad de productos secundarios que contienen un grupo fenol. Estas sustancias reciben el nombre de compuestos fenólicos, polifenoles o fenilpropanoides y derivan todas ellas del fenol, un anillo aromático con un grupo hidroxilo (Isaza, 2007). Químicamente, los compuestos fenólicos son un grupo muy diverso que comprende desde moléculas sencillas como los ácidos fenólicos, hasta polímeros complejos como los taninos condensados y la lignina. Dentro de los compuestos fenólicos también se encuentran pigmentos flavonoides. Muchos de estos productos están implicados en las interacciones planta-herbívoro (Avalos y Pérez, 2009).

En la naturaleza existe una amplia variedad de compuestos que presentan una estructura molecular caracterizada por la presencia de uno o varios anillos fenólicos. Estos compuestos denominados polifenoles, se originan principalmente en las plantas, que los sintetizan en gran cantidad, como producto de su metabolismo secundario. Algunos son indispensables para las funciones fisiológicas vegetales. Otros participan en funciones de defensa ante

situaciones de estrés y estímulos diversos (hídrico, luminoso, etc.) (Quiñones *et al.*, 2012).

La capacidad de los polifenoles para modular la actividad de diferentes enzimas, y para interferir consecuentemente en mecanismos de señalización y en distintos procesos celulares, puede deberse, al menos en parte, a las características fisicoquímicas de estos compuestos, que les permiten participar en distintas reacciones metabólicas celulares de óxido-reducción. Sus propiedades antioxidantes justifican muchos de sus efectos beneficiosos (Quiñones *et al.*, 2012).

2.5.4 Licopeno

El licopeno es un carotenoide de estructura acíclica, isómero del beta caroteno, que carece de actividad provitamina A (por no contar con el anillo de beta-ionona), cuya fórmula es $C_{40}H_{56}$. Se encuentra en la naturaleza como pigmento natural liposoluble responsable del color rojo y naranja de algunas frutas y verduras y se caracteriza por poseer una estructura química de cadena abierta alifática formada por cuarenta átomos de carbono con trece enlaces dobles de los cuales once son conjugados, por lo que es muy reactivo frente al oxígeno y a los radicales libres. Se sintetiza exclusivamente por las plantas y los microorganismos y una de sus funciones principales es absorber la luz durante

la fotosíntesis para proteger a la planta contra la fotosensibilización (Vitale *et al.*, 2010).

Además de estar presente en los alimentos, el licopeno es uno de los carotenoides que se encuentra distribuido en mayores cantidades en el suero humano (21- 43% de los carotenoides totales) y en los diferentes tejidos (hígado, riñón, glándulas renales, testículos, ovarios y próstata). Su concentración depende de su ingestión alimentaria, pero está poco influenciada por la variación del día a día, debido a que la vida media del licopeno en plasma es de 12 a 33 días (Waliszewski y Blasco, 2010; Lu *et al.*, 2011).

Diversos estudios *in vitro* han demostrado la capacidad antioxidante del licopeno, aunque los resultados de los estudios *in vivo* han sido menos concluyentes. En cualquier caso se le atribuyen funciones entre las cuales se distinguen la inhibición de la proliferación celular y su importante potencial antioxidante capaz de eliminar el singlete de oxígeno y los radicales peroxilo derivados del estrés oxidativo (González *et al.*, 2010).

El estrés oxidativo es un proceso natural derivado de las funciones vitales que dependen del oxígeno. Cuando la producción de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ERO/ERN) supera los mecanismos corporales de defensa mediadas por antioxidantes no enzimáticos (como el glutatión) y enzimáticos

II. REVISIÓN DE LITERATURA

(como la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT) y la glutatión peroxidasa (GPx) endógenos, se produce daño a las membranas celulares, a las proteínas y al ADN y se desencadena una serie de reacciones que afecta la homeostasis celular y que desempeñan un papel patogénico importante en las enfermedades cardiovasculares e inflamatorias y en el envejecimiento (Veneroso *et al.*, 2009; Dionisio *et al.*, 2009).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del experimento

El presente trabajo se realizó durante el ciclo primavera- verano del 2018, durante los meses de marzo a julio, establecido en la malla sombra del Instituto Tecnológico de Torreón (ITT), localizado entre las coordenadas $25^{\circ}36'37''$ Norte y $103^{\circ}22'33''$ Oeste, a una altitud de 1150 msnm. Ubicado en el km. 7.5 de la antigua Carretera Torreón-San Pedro, Municipio de Torreón, Coahuila, México (Figura 3.1).



Figura 3. 1. Localización del sitio experimental.

3.2 Características de la malla sombra

La malla sombra es de estructura metálica, cubierta con malla antiáfidos en color blanco, permitiendo la entrada de la luz uniformemente, que además proporciona otras ventajas como lo son la prevención de efectos del viento, reducir la evaporación y transpiración de las plantas y disminuye afectaciones por insectos plaga.

3.3 Tratamientos evaluados

Como fuente de I, se utilizó yoduro de potasio (Fagalab ®), se evaluaron cinco dosis crecientes, 0, 5, 10, 15 y 20 $\mu\text{M L}^{-1}$, de acuerdo con Cortes *et al.*, (2016), al testigo no se le realizó aplicación alguna, cada tratamiento fue evaluado con cinco repeticiones. Previo a la aplicación de los tratamientos se diluyó el yoduro de potasio en agua tridestilada. Este fue aplicado por las mañanas (8:00 am- 9:00 am) de manera foliar homogéneamente a toda la planta con un intervalo de 15 días, acumulando un total de cinco aplicaciones durante el experimento.

3.4 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cinco tratamientos y cinco repeticiones por tratamiento, con un total de 25 unidades experimentales (cada planta considerada como unidad experimental).

3.5 Material vegetal

El material vegetal que se utilizó para este trabajo fueron plantas de tomate tipo roma o Saladette híbrido Sahel de la empresa Syngenta, fueron germinadas en la malla del Instituto Tecnológico de Torreón en charolas de germinación de polietileno de 200 cavidades, utilizando como sustrato peat moss y vermiculita.

3.6 Trasplante y sustrato

Se utilizaron canaletas hidropónicas de plástico negro, que fueron rellenas con sustrato utilizando una mezcla de arena y perlita en una proporción 80:20, respectivamente. La arena fue lavada y esterilizada con una solución de hipoclorito de sodio al 5% dejándola reposar por 24 horas posterior a eso se le dio un lavado con agua.

III. MATERIALES Y METODOS

El trasplante se realizó a los 47 días después de la siembra, cuando las plántulas presentaron 6 hojas verdaderas.

3.7 Manejo del cultivo

3.7.1 Poda

Las plantas fueron podadas a una sola guía o tallo, eliminando las yemas axilares (Torres, 2017) regularmente cada semana. Se realizaron podas de hojas senescentes para mejorar la aireación y penetración de luz en la parte inferior de las plantas.



Figura 3. 2. Poda de brotes axilares en plantas de tomate

3.7.2 Tutorio

Se utilizó rafia agrícola de polipropileno calibre 4 para mantener las plantas erguidas. Las plantas fueron amarradas con rafia al tutor principal de la estructura de la malla sombra.

3.8 Nutrición del cultivo

Se aplicó solución nutritiva (Steiner, 1984) en base a estos fertilizantes; MKP, CaNO_3 , MgNO_3^- y KNO_3 . La solución Steiner se aplicó desde el momento del trasplante hasta la cosecha. La concentración de la solución varió dependiendo de la etapa fenológica de cultivo; iniciando al trasplante con el 30% y llegando al 100% al iniciar la etapa de floración del cultivo.

Los riegos durante el experimento se dieron en función de la demanda de agua del cultivo por etapa fenológica y considerando los factores climáticos presentados durante el experimento, se aplicaron desde el momento del trasplante por un periodo de 15 días a razón de 250 mL de solución diarias por planta, aplicando hasta 1.2 L día^{-1} .

3.9 Control de plagas y enfermedades

Las plagas que incidieron en el tomate fueron mosca blanca (*Bemisia tabaci*), trips (*Frankliniella occidentalis*); las enfermedades la principal fue alternaría (*Alternaria solani*). Controlándolas con los productos que a continuación se presentan (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Aplicaciones y dosis para el control de plagas y enfermedades

Producto	Ingrediente activo	Dosis	Plaga	Frecuencia de aplicación
Extracto de Ajo		100 g L ⁻¹ agua	Mosquita blanca	Intervalo de 3 días
Muralla max	Betacyflutrin + Imidacloprid	25 mL 100 L ⁻¹ agua	Mosquita blanca	Una sola aplicación
Oxicob	Oxicloruro de cobre	2 g L ⁻¹ agua	Alternaría alternatta	Dos aplicaciones con intervalo de 7 días

3.10 Variables evaluadas

3.10.1 Rendimiento

Se cosecharon frutos de tomate en un estado de maduración plena (80%) y maduración completa (100%) (Meza *et al.*, 2013) a los 65 días después del trasplante. Considerando el número de frutos promedio de la variedad (se evaluó hasta el cuarto racimo). Se utilizó una balanza analítica de la marca ADAM con capacidad de 450 g determinando el peso de los frutos. Los resultados fueron expresados en kgm^{-2} .

3.10.2 Variables de calidad del fruto

3.10.2.1 Diámetro polar y ecuatorial del fruto

Los diámetros longitudinal y transversal se obtuvieron de los todos frutos cosechados, utilizando un vernier digital marca Truper modelo 14388 y se expresaron en milímetros (mm).

3.10.2.2 Firmeza

A cada fruto se le determinó la firmeza con un penetrómetro (Fruit Hardness Tester FHT200). El fruto se colocó en una mesa para ser apoyados contra una superficie dura y fija en el momento de efectuar la medición, para aplicar correctamente la presión con el penetrómetro, esto se repitió dos veces en cada fruto, los resultados se expresaron en newton (N).

3.10.2.3 Sólidos solubles totales de frutos

Para los frutos colectados en base a la clasificación “rojo” se midió la cantidad de sólidos solubles totales (SST). Se perforó cuidadosamente cada fruto para obtener una gota de jugo que se colocó en un refractómetro manual (Master Refractometer Automatic Atago) debidamente calibrado, se cerró la tapa suavemente de manera que la muestra cubriera completamente la superficie del prisma, se observó a través de la mirilla y se tomó la lectura en la intersección de los dos campos, los valores se reportaron en °Brix.

3.10.3 Muestreo y análisis nutricional foliar

Para el muestreo foliar se tomaron hojas maduras completamente desarrolladas y sin ningún daño, en la parte media de la planta durante la etapa

III. MATERIALES Y METODOS

de floración del cultivo, seleccionando dos hojas de cada una de las repeticiones y formar una muestra compuesta para cada tratamiento, Las hojas fueron secadas a la estufa a 70 °C en papel estraza y posteriormente se maceraron en un mortero, los análisis se realizaron en el laboratorio de Fisiología y Nutrición vegetal del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. (CIAD), Unidad Delicias, Chihuahua. Se cuantificaron K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn y Ni en el espectrofotómetro de absorción atómica (Alcantar y Sandoval, 1999).

3.10.3.1 Determinación de fósforo

El fósforo se cuantifico por el método colorimétrico del reactivo ácido aminonaftol sulfónico ANSA (Harris y Popat, 1954). Se utilizaron las digestiones elaboradas previamente para la cuantificación de los minerales (K, Ca, Mg, Fe, Zn). Posteriormente se tomó una alícuota de 1 mL con una micropipeta de la solución de ceniza que contenía 0.01–0.2 mg de fósforo mL⁻¹, se añadieron 5 mL de molibdato de amonio, y 2 mL de ANSA, se mezcló para combinar todos los reactivos.

La lectura se realizó en un espectrofotómetro UV-visible (Genesys 10S Thermo Scientific), después de 20 minutos, a una longitud de onda de 640 nm. Con el dato obtenido se buscó la concentración parcial de fósforo por medio de la curva estándar y se ajustó este valor con la cantidad de muestra que se pesó.

3.11 Compuestos Bioactivos

Para los análisis de los compuestos nutraceuticos en los frutos de tomate, se utilizó una muestra compuesta por cada uno de los tratamientos, considerando un tomate por repetición y un total de cinco por tratamiento. Estos análisis fueron realizados en el laboratorio de tecnología del agua en la Universidad Tecnológica de Rodeo.

3.11.1 Obtención de extractos

La obtención de extractos se realizó según Molina-Quijada *et al.*, (2010) con algunas modificaciones. Se mezclaron 2 g de muestra en 10 mL de metanol al 80% en tubos de plástico con tapa de rosca, los cuales fueron colocados en agitador rotatorio (ATR Inc., EEUU) durante 4h a 20 rpm a 5°C los tubos fueron centrifugados luego a 3000 rpm durante 5 min, y el sobrenadante fue extraído para su análisis.

3.11.2 Capacidad antioxidante

Capacidad antioxidante se determinó con el método in vitro DPPH⁺. Para lo cual, se preparó una solución de DPPH⁺ (Aldrich, St. Louis, Missouri, EU) en etanol, ajustando la absorbancia de la solución a $1,100 \pm 0,010$ a una longitud

III. MATERIALES Y METODOS

de onda de 515 nm. Para la determinación de la capacidad antioxidante se mezclaron 50 μ L de muestra y 1950 μ L de solución DPPH⁺, y después de 30 min de reacción se leyó la absorbancia de la mezcla a 517 nm en un espectrofotómetro UV (Genesys 10). Las lecturas se tomaron por triplicado y como blanco se utilizó etanol. Se preparó una curva estándar con Trolox (Aldrich, St. Louis, Missouri, EU), y los resultados se reportan como capacidad antioxidante equivalente en μ M equivalente en Trolox por 100 g en base peso fresco (mequiv. Trolox $\cdot$ 100 gm⁻¹ PF) (Brand- Williams *et al.*, 1995).

3.11.3 Compuestos fenólicos

Compuestos fenólicos totales se midió usando una modificación del método de Folin-Ciocalteu (Singleton *et al.*, 1999). Donde 30 μ L de extracto se mezclaron con 270 μ L de agua destilada en un tubo de ensayo, para luego añadir 1,5 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich, St Louis MO, EE.UU.) diluido (1:15) y se agitó con vortex durante 10 s. Después de 5 min se añadió 1,2 ml de carbonato de sodio (7,5 % w / v) y se agitó durante 10 s. La solución se colocó en baño de agua a 45 °C durante 15 min, y después se dejó enfriar a temperatura ambiente. La absorbancia de la solución se leyó a 765 nm en un espectrofotómetro UV (Genesys 10). Para calcular el contenido fenólico se realizó una curva de calibración utilizando ácido gálico como estándar, y los

resultados se registraron en mg de equivalente de ácido gálico por 100 g en base a peso fresco (mg AGE/100 g PF).

3.11.4 Flavonoides

Para el contenido de flavonoides totales se utilizó la técnica descrita por Lamaison y Carnet (1990), tomando una alícuota de 250 μ L del sobrenadante del extracto etanólico para luego agregar 1.25 mL de agua destilada y 75 μ L de NaNO_2 al 5 % agitando en vortex la mezcla y dejando reaccionar por 5 min. Posteriormente se agregaron 150 μ L $\text{AlCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ al 10 % agitando en vortex la mezcla dejando reaccionar por 6 min. Luego se agregaron 500 μ L NaOH 1 M y 275 μ L agua, agitando en vortex. La absorbancia se leyó en un espectrofotómetro UV (Genesys 10) a una longitud de onda 510 nm. Para la cuantificación de la concentración se realizó una curva patrón ($y = 0.0122x - 0.0067$; $r^2 = 0.9653$) preparada con quercetina. Los resultados fueron expresados en mg equivalentes de quercetina (QE) por 100 g en base al peso fresco (mg QE/100 g-1 PF).

3.11.5 Licopeno

Se determinó por el método us/vis propuesto por García–Osorio *et al.* (2016). Para el cual se pesó 1 g de muestra, que se molió en un mortero,

III. MATERIALES Y METODOS

agregando poco a poco 10 ml de solución hexano: acetona: etanol (50, 25, 25, la mezcla se colocó en un matraz de 125 mL cubierto con aluminio para evitar la fotoxidación. Se colocó en una plancha magnética durante 15 minutos a 6 stir, con la finalidad de romper las membranas y extraer la mayor mezcla de licopeno posible. Después se le agrego 1.5 mL de agua destilada con la finalidad de separar las fases, se agitó 5 minutos. Transfiriendo la fase orgánica (licopeno) en tubos de 10 mL (cubiertos con aluminio), al residuo se le agrego otros 10 mL de hexano: acetona: etanol, se regresa al matraz y se agita nuevamente por 15 minutos a 6 stir con la finalidad de extraer el mayor contenido de licopeno posible. Se agregan 1.5 mL de agua destilada y agitar 5 minutos. Se transfiere a la fase orgánica al frasco de recolección (mezclando con la recolección previa). Se midió el volumen total obtenido y se midió la absorbancia a 473 nm. Los resultados se expresaron en mg kg^{-1} de peso seco.

3.12 Cuantificación de yodo en frutos

La determinación de yodo en el fruto se utilizó el método catalítico por espectrometría de masas plasmáticas (ICP-MS) (Krishna *et al.*, 1992; Landini *et al.*, 2011). El yodo se determinó mediante una dilución de isótopos con ^{127}I . El ácido 2-yodosobenzoico se sintetizó mediante una modificación del método de Chinard y Hellerman. La fase móvil se preparó mezclando acetonitrilo y agua, 60:40 (v/v) y 45:55 (v/v). El reactivo de 2-yodosobenzoato de sodio se preparó

III. MATERIALES Y METODOS

agitando 400 mg de ácido libre con un ligero exceso molar de hidróxido de sodio (7,6 ml de hidróxido de sodio 0,2 M) y diluyendo hasta 100 ml con agua en un matraz estándar. Se filtró a través de un filtro de membrana de 0,45 μ m. Se usó una solución de 100 mg de 2,6-dimetilfenol en 100 mL de fase móvil como eliminador de halógeno. El tampón fosfato contenía 10 g de cada uno de KH_2PO_4 y K_2HPO_4 en 250 ml de agua y se ajustó a pH 6,4. La solución de ácido ascórbico se preparó disolviendo 100 mg de reactivo en 100 mL de agua. Se preparó una solución de ácido sulfúrico diluyendo 2 ml de ácido sulfúrico concentrado de grado reactivo analítico a 100 ml con la fase móvil.

La concentración de yodo en las muestras se evaluó mediante una curva de calibración obtenida con el método de adiciones estándar. Se analizaron réplicas para cada tratamiento.

3.13 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante Análisis de Varianza y la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.5$), utilizando el programa estadístico SAS versión 9.1 (SAS, 1990).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Calidad comercial de los frutos

4.1.1 Diámetro polar y ecuatorial de los frutos

El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para las variables diámetro ecuatorial y polar, lo que significa que las aplicaciones de Yodo afectaron el tamaño de los frutos de tomate. El Cuadro 4.1, presenta la comparación de medias de estas variables; observándose que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes al tratamiento testigo. Para el diámetro polar, el tratamiento con la dosis $20 \mu\text{M L}^{-1}$ de yodo, superó al testigo en un 13.70 %.

Para el diámetro ecuatorial el mejor resultado se obtuvo con el tratamiento $20 \mu\text{M L}^{-1}$ de yodo, siendo el único tratamiento que mostró diferencia significativa con respecto al resto de los tratamientos y superando al tratamiento testigo en un 12.19 %.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 4.1 Efecto de la aplicación foliar de yodo en el diámetro polar y ecuatorial de frutos de tomate.

Yodo ($\mu\text{M L}^{-1}$)	Diámetro	
	Polar	Ecuatorial
	----- mm -----	
Testigo	51.248 $\pm$ 1.337 b*	36.658 $\pm$ 1.280 bc
5	53.632 $\pm$ 3.626 a	34.662 $\pm$ 1.699 c
10	57.792 $\pm$ 1.487 a	38.522 $\pm$ 1.08 ab
15	57.254 $\pm$ 2.800 a	39.380 $\pm$ 1.156 ab
20	58.272 $\pm$ 2.793 a	41.128 $\pm$ 2.128 a
DSM	4.847	2.878
ECM	6.559	2.313
CV	4.603	3.995

DMS= diferencia mínima significativa; ECM= cuadrado medio del error; CV= coeficiente de variación (%). *Valores seguidos de la misma literal no son diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

Al respecto, Smoleń *et al.* (2018), biofortificaron papas con yodato de potasio (KIO_3) en combinación con selenio y ácido salicílico, no encontrando efectos positivos en el diámetro de los tubérculos. Cabe mencionar que en dicho trabajo la combinación del ácido salicílico y selenio jugaron un papel importante pues en todos sus tratamientos con esta combinación se observaron

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

disminuciones en ciertas variables, tales como capacidad antioxidante, antocianinas, compuestos fenólicos, flavonoides, ácido ascórbico, entre otras.

En este estudio, los frutos de tomate biofortificado con yodo respondieron de manera positiva en dicha variable, teniendo diferencia significativa entre los tratamientos.

El uso de dosis elevadas (80, 120, 160 y 240 $\mu\text{M L}^{-1}$) de yoduro y yodato puede ser un factor de estrés para las plantas (Blasco, 2010; Kato *et al.*, 2013). Dosis demasiado altas que las exógenas pueden causar, en casos extremos, cambios en apariencia morfológica de las plantas, lo que lleva a una reducción de la biomasa y el tamaño del rendimiento (Ríos *et al.*, 2008; Ríos *et al.*, 2010).

4.1.2 Firmeza y sólidos solubles totales

Los resultados obtenidos para las variables firmeza del fruto y sólidos solubles totales no mostraron diferencias estadísticas significativas ($P \geq 0.05$) a la aplicación foliar de yodo (cuadro 4.2).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 4.2. Efecto de la aplicación foliar de yodo en las variables Firmeza y Sólidos Solubles Totales (SST) en frutos de tomate.

Tratamientos	Firmeza	Sólidos solubles Totales
$\mu\text{M L}^{-1}$	N	°Brix
0	4.048 a	6.128 a
5	3.976 a	6.480 a
10	3.936 a	5.978 a
15	4.194 a	6.014 a
20	4.202 a	5.862 a

N= newton. *Valores seguidos de la misma literal no son diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.2 Contenido nutrimental

4.2.1 Contenido de macronutrientes

En el Cuadro 4.3, se muestra el contenido promedio de macronutrientes en el tejido vegetal. Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el potasio (K) la mayor concentración se obtuvo con el tratamiento $20\mu\text{ML}^{-1}$ de yoduro de potasio, siendo estadísticamente igual a los tratamientos testigo, 5 y $15\mu\text{M L}^{-1}$ de yodo. En el caso del calcio (Ca) la mayor concentración se encontró en tratamiento $15\mu\text{M L}^{-1}$ siendo estadísticamente igual a los tratamientos 10 y $20\mu\text{M L}^{-1}$ de KI.

En cuanto al magnesio (Mg) la mayor acumulación se obtuvo con el tratamiento $10\mu\text{M L}^{-1}$, pero resultando estadísticamente igual al tratamiento $5\mu\text{M L}^{-1}$. En el caso del fósforo, el análisis de varianza no mostró diferencias entre tratamientos.

Estudios realizados por Blasco *et al.* (2011), indican que la aplicación de yodo en la lechuga a dosis no mayores de 40 mM L^{-1} , favorece la calidad nutricional, sin un efecto fitotóxico, por lo que consideran al yodo como un elemento beneficioso para las plantas y puede utilizarse en esas dosis.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 4.3. Contenido promedio de macronutrientes en el tejido vegetal de plantas de tomate por efecto de la aplicación de Yodo en diferentes concentraciones.

Yodo ($\mu\text{M L}^{-1}$)	Macronutrientes				
	K	Ca	Mg	Na	P
	----- % -----				
Testigo	1.472 $\pm$ 0.267 a*	0.855 $\pm$ 0.449 b	0.287 $\pm$ 0.068 dc	0.069 $\pm$ 0.002 a	0.038 $\pm$ 0.007 a
5	1.323 $\pm$ 0.620 a	1.743 $\pm$ 0.195 a	0.504 $\pm$ 0.076 a	0.063 $\pm$ 0.003 bc	0.043 $\pm$ 0.002 a
10	0.456 $\pm$ 0.093 b	2.296 $\pm$ 0.327 a	0.605 $\pm$ 0.126 a	0.058 $\pm$ 0.001 cd	0.048 $\pm$ 0.010 a
15	1.290 $\pm$ 0.218 ab	2.409 $\pm$ 0.048 a	0.199 $\pm$ 0.018 d	0.055 $\pm$ 0.001 d	0.039 $\pm$ 0.009 a
20	1.480 $\pm$ 0.057 a	0.388 $\pm$ 0.177 b	0.399 $\pm$ 0.016 bc	0.066 $\pm$ 0.0005 ab	0.040 $\pm$ 0.006 a
DSM	0.863	0.742	0.198	0.005	0.020
ECM	0.103	0.076	0.005	0.0000046	0.000061
CV	26.675	17.96	18.468	3.429	18.454

N= nitrógeno; P= fosforo; K= potasio; Ca= calcio; Mg= magnesio; DMS= diferencia mínima significativa; ECM= cuadrado medio del error; CV= coeficiente de variación. *Valores seguidos con la misma literal no son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con las concentraciones típicas de los minerales citados por Molina (2016), los resultados del análisis mineral de macronutrientes de nuestro experimento muestran que en el caso del potasio (K), los valores no se encuentran dentro de los rangos de suficiencia (Cuadro 4.4). Aún contemplando lo anterior, la mayor acumulación del mineral se obtuvo en el tratamiento 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ mostrando mejoría en la acumulación de este mineral, sin una tendencia a disminuir por causa de la aplicación del yodo.

Smolen *et al.* (2018), reportaron en sus resultados de biofortificación de yodo en papa que las aplicaciones de yodo en conjunto con selenio y ácido salicílico inducen un aumento en la acumulación de potasio (K), sin embargo Islam *et al.* (2018) obtuvieron resultados distintos, ya que al evaluar la biofortificación con hierro, yodo y selenio en tomates cherry, no encontraron diferencias entre las aplicaciones de los diferentes tratamientos en comparación con el tratamiento testigo.

Para el caso de calcio (Ca), Molina (2016) menciona como concentración típica del calcio en tejido vegetal de tomate un rango de 1.0 - 3.0%. En nuestros resultados observamos que la acumulación de Ca muestra una tendencia a aumentar conforme incrementan las dosis de I aplicadas, pero solo hasta el tratamiento de 15 $\mu\text{M L}^{-1}$ ya que en el tratamiento 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ mostró una

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

disminución en su concentración, esto debido probablemente a que los tratamientos 5, 10 y 15 $\mu\text{M L}^{-1}$ se encuentran dentro de los rangos de suficiencia ya citados. Islam *et al.* (2018), en un experimento de biofortificación con hierro, yodo y selenio, reportaron que ninguno de los elementos estudiados tuvo influencia positiva o negativa en frutos de tomate cherry.

Cuadro 4.4 Nutrientes vegetales esenciales y su concentración típica en el cultivo de tomate según (Molina, 2016).

Nutriente	Bajo	Concentración típica en planta (materia seca)	Alto
		%	
Nitrógeno (N)	2.50-3.99	4-6	> 6.0
Fosforo (P, P_2O_5)	0.20-0.24	0.25-0.75	> 0.75
Potasio (K, K_2O)	1.05-2.89	2.9-5	> 5.0
Azufre (S)	0.25-0.39	0.4-1.20	> 1.20
Calcio (Ca)	0.80-0.99	1-3	> 3.0
Magnesio (Mg)	0.25-0.39	0.4-0.6	> 0.60
		ppm	
Boro (B)	20-24	6-60	> 60
Hierro (Fe)	30-39	50-250	> 200
Manganeso (Mn)	30-39	20-500	> 250
Cobre (Cu)	3-4	5-20	> 20
Zinc (Zn)	18-19	21-150	> 50

Nutriente	Concentración típica en planta (materia seca)
Molibdeno (Mo)	Por debajo de 1 ppm

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cloro (Cl)	0.2-2 ppm
níquel (Ni)	10-100 ppm

Fuente: Adaptado de Roy *et al.*, (2006); Kabata-Pendias (2011); El-Ramady *et al.* (2014a).

Para el caso del magnesio (Mg) se citan rangos típicos de concentración de entre 0.4 y 0.6%. Nuestros resultados muestran diferencia estadística significativa, obteniendo el mayor valor de acumulación la dosis de 10 $\mu\text{M L}^{-1}$, mejorando la concentración del mineral en comparación con los tratamientos de 5 $\mu\text{M L}^{-1}$ y el testigo. Las dosis 15 y 20 $\mu\text{M L}^{-1}$, mostraron una disminución en los valores de concentración, por lo que las únicas dosis con que se obtuvieron valores dentro de los rangos de suficiencia son 5 y 10 $\mu\text{M L}^{-1}$.

En el caso del fósforo (P), no se observaron diferencias estadísticas significativas. Aunque los resultados del análisis foliar no se encuentran dentro de los rangos típicos (0.25-0.75). En sus resultados, Smolen *et al.* (2018) reportaron que las aplicaciones de yodo, yodo+ selenio y yodo+ selenio+ ácido salicílico no mostraron diferencia estadística significativa en los tratamientos en comparación con el tratamiento testigo en la acumulación del mineral para los análisis de tubérculos, hojas y peciolo. Para el caso de las raíces, los análisis mostraron, una tendencia a disminuir con la aplicación de los tratamientos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dai *et al.* (2004), reportaron en un estudio el efecto residual de yodo en el suelo, mencionan que concentraciones bajas de este elemento promueve la absorción y aprovechamiento de elementos esenciales (P y N) en varias especies de plantas como pakchoi (*Brassica chinensis* L.), espinacas (*Spinacia oleracea* L.), cebolla (*Allium cepa* L.), espinacas de agua (*Ipomoea aquatica* Forsk.), Apio (*Apium graveolens* L.) y zanahoria (*Daucus carota* var. *Sativa* DC.)

4.2.2 Contenido de micronutrientes

En el Cuadro 4.5, se muestran los resultados de las concentraciones de micronutrientes en el tejido vegetal. Se muestran diferencias significativas en cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y níquel (Ni). Para el cobre la mayor acumulación fue en el tratamiento 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ de yodo, siendo estadísticamente diferente al resto de los tratamientos.

En el caso del hierro todos los tratamientos resultaron diferentes estadísticamente, obteniendo la concentración más alta en la dosis 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ de yodo. Para manganeso los tratamientos 5, 10, 15 y 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ resultaron ser estadísticamente iguales pero se encontró un pequeño aumento en la acumulación del elemento en el tratamiento 20 $\mu\text{M L}^{-1}$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Y para el caso del níquel se obtuvo mayor acumulación en el tratamiento de 20 $\mu\text{M L}^{-1}$. De acuerdo al análisis de varianza el zinc no mostro diferencias significativas entre las diferentes dosis.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 4.5. Contenido promedio de micronutrientes en el tejido vegetal de plantas de tomate por efecto de la aplicación de Yodo en diferentes concentraciones.

Yodo ($\mu\text{M L}^{-1}$)	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
	----- mg kg^{-1} -----				
0	510.910 $\pm$ 9.42 c	133.245 $\pm$ 4.510 c	179.463 $\pm$ 19.857 b	3.60 $\pm$ 0.256 abc	28.895 $\pm$ 5.542 a
5	616.110 $\pm$ 8.55 b	182.465 $\pm$ 0.145 b	250.130 $\pm$ 0.765 a	2.972 $\pm$ 0.142 bc	32.030 $\pm$ 0.045 a
10	581.810 $\pm$ 44.75 b	108.530 $\pm$ 1.215 e	168.135 $\pm$ 7.030 b	1.970 $\pm$ 0.400 c	35.707 $\pm$ 2.017 a
15	330.250 $\pm$ 2.985 d	125.030 $\pm$ 1.285 d	160.518 $\pm$ 3.162 b	4.570 $\pm$ 1.147 ab	34.448 $\pm$ 1.877 a
20	814.440 $\pm$ 8.55 a	209.658 $\pm$ 2.422 a	273.910 $\pm$ 3.600 a	5.097 $\pm$ 1.042 a	29.680 $\pm$ 2.595 a
DSM	56.962	6.5113	25.978	1.9563	8.0671
ECM	449.345	5.871	93.457	0.530	9.012
CV	3.714	1.596	4.683	20.026	9.337

Fe= hierro; Zn= zinc; Mn= manganeso; Ni= níquel; DMS= diferencia mínima significativa; ECM= cuadrado medio del error; CV= coeficiente de variación. *Valores seguidos con la misma literal no son estadísticamente diferentes (Tukey; $P \leq 0.05$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el caso del cobre (Cu), los resultados mostraron diferencias estadísticas significativas. La mejor concentración del mineral se presentó con el tratamiento 20 $\mu\text{M L}^{-1}$. Según Molina (2016), la concentración típica del cobre debe oscilar entre 5-20 ppm, todos nuestros resultados se encuentran dentro de estos rangos, pero aun así la dosis más alta se obtuvo con la dosis mayor de yodo aplicada.

Los resultados del hierro (Fe) muestran diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$), la mayor concentración del elemento se obtuvo con la dosis de 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ (Cuadro 4.5). Con base en las concentraciones típicas de los minerales antes citadas, estas deben estar dentro del rango 40-200 ppm. Nuestros tratamientos se encuentran dentro de los rangos establecidos, y observándose que las aplicaciones de yodo de 5 y 20 $\mu\text{M L}^{-1}$, presentaron la mayor asimilación de este elemento. Smolen *et al.* (2017), encontraron una disminución en la acumulación de este mineral al fertirrigar con 40 $\mu\text{M I}$ en forma de yodato de potasio. Smolen y Sady (2012) por el contrario obtuvieron respuesta favorable, pues lograron aumentar la asimilación del hierro en hojas de espinaca.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respecto al manganeso (Mn), se obtuvo la mayor acumulación con el tratamiento $20 \mu\text{M L}^{-1}$. De acuerdo con Molina (2016), la concentración de este mineral debe oscilar entre 40-250 ppm, los resultados se encuentran dentro de este rango de suficiencia, lo que indica que las aplicaciones de yodo incrementaron la asimilación de este elemento por las plantas de tomate. Estos resultados coinciden con Islam *et al.* (2018), quienes en su trabajo con tomates cherry no encontraron influencia positiva o negativa por causa de la aplicación de yodo en sus tratamientos.

En los análisis de níquel (Ni), el tratamiento $20 \mu\text{M L}^{-1}$ fue el que mostro la mejor acumulación de este elemento. Las concentraciones típicas mencionan que el rango óptimo para este elemento es entre 10 y 100 ppm (Roy *et al.*, 2006; Kabata-Pendias, 2011; El-Ramady *et al.*, 2014a). Los resultados del experimento para este mineral se encuentran por debajo del rango óptimo, aun así, los tratamientos con aplicaciones de yodo mostraron los mayores valores, inclusive superando al tratamiento testigo.

Y con respecto a Zinc Roy *et al.* (2006); Kabata-Pendias (2011); El-Ramady *et al.* (2014a), mencionan que la concentración de este elemento debe oscilar entre 20 y 50 ppm. Los resultados del experimento se encuentran dentro

del rango óptimo. El análisis de este mineral no mostro diferencia significativa en la asimilación del elemento por efecto de los tratamientos de yodo (4.5).

Cortés-Flores *et al.* (2016), señalan que la aplicación foliar de yodo, como KI, mejoró la absorción de minerales y el vigor de plántulas de chile morrón. Medrano-Macías *et al.* (2016) y Gonzali *et al.* (2017), mencionan que este proceso es complejo y que puede provenir de las diferencias en los mecanismos de ingesta y metabolismo de iodo.

4.3 Rendimiento

El análisis de varianza del rendimiento (Cuadro 4.6) mostro diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos aplicados. Aunque los tratamientos 10, 15 y 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ resultaron ser estadísticamente iguales, el tratamiento cinco (20 $\mu\text{M L}^{-1}$) sin embargo se muestra una tendencia creciente conforme se aumenta la dosis de yodo y además se observa una diferencia del 25.49% entre el tratamiento cinco (20 $\mu\text{M L}^{-1}$) y el testigo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 4.6. Efecto de la aplicación foliar de yodo sobre el rendimiento del cultivo de tomate establecido en malla sombra.

Yodo ($\mu\text{M L}^{-1}$)	Peso fruto	Rendimiento	
	---g---	--g/planta--	--kg m ⁻² --
0	41.370 $\pm$ 0.691 b	1487.10	5.948
5	44.098 $\pm$ 1.048 ab	1520.94	6.083
10	44.868 $\pm$ 0.542 a	1568.04	6.272
15	50.066 $\pm$ 1.709 a	1579.98	6.319
20	51.918 $\pm$ 2.145 a	1593.54	6.374
DSM	2.594		
ECM	1.879		
CV %	2.653		

DMS= diferencia mínima significativa; ECM= cuadrado medio del error; CV= coeficiente de variación. *Valores seguidos con la misma literal no son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

Al respecto, Smoleń *et al.* (2017), reportan que el biofortificar espinacas con KIO_3 no influye en los resultados de rendimiento. De igual manera, Smoleń *et al.* (2018) encontraron resultados similares, pues el aplicar yodo en combinación con selenio y ácido salicílico en papas no se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en el rendimiento. Sin embargo, nuestros resultados coinciden con Lehr *et al.* (1958), quienes obtuvieron mayores rendimientos de tomate al aplicar 2 mgL^{-1} KI. Esto puede ser debido a que el yodo está considerado como un elemento benéfico para las plantas (Borst- Pauwles, 1961).

(Blasco *et al.*, 2008, 2012) mencionan que las diferencias en la productividad de la biomasa dependen de la dosis de yodo y la forma química: I^- y IO_3^- . Sin embargo, existen fuertes indicios sobre la influencia positiva del yodo en la eficiencia del uso de nitrógeno por parte de las plantas (Blasco *et al.*, 2012; Smoleń y Sady, 2012) o la mejora de los frutos de tomate (Kiferle *et al.*, 2013; Smoleń *et al.*, 2015).

En un experimento de maceta realizado en un invernadero, Dai *et al.* (2004) no observaron síntomas de toxicidad ni reducción de la biomasa de zanahoria en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de fertilización con KIO_3 (0, 1 y 5 mg $I \cdot kg^{-1}$ de tierra). Sin embargo, se desconocen los mecanismos bioquímicos y fisiológicos responsables de las respuestas tan diversas de la planta a la aplicación de I (Smoleń *et al.*, 2016).

4.4 Calidad Nutracéutica

4.4.1 Vitamina C

La Figura 4.1, muestra los resultados por efecto de la aplicación foliar de yodo en la variable vitamina C contenida en frutos, los cuales no mostraron diferencias estadísticas significativas. Aun con estos resultados, numéricamente

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

los valores obtenidos en los frutos a los que se le aplicaron las dosis de yodo son mayores en comparación con el tratamiento testigo y obteniendo la mayor concentración con la dosis de yodo de $20 \mu\text{M L}^{-1}$.

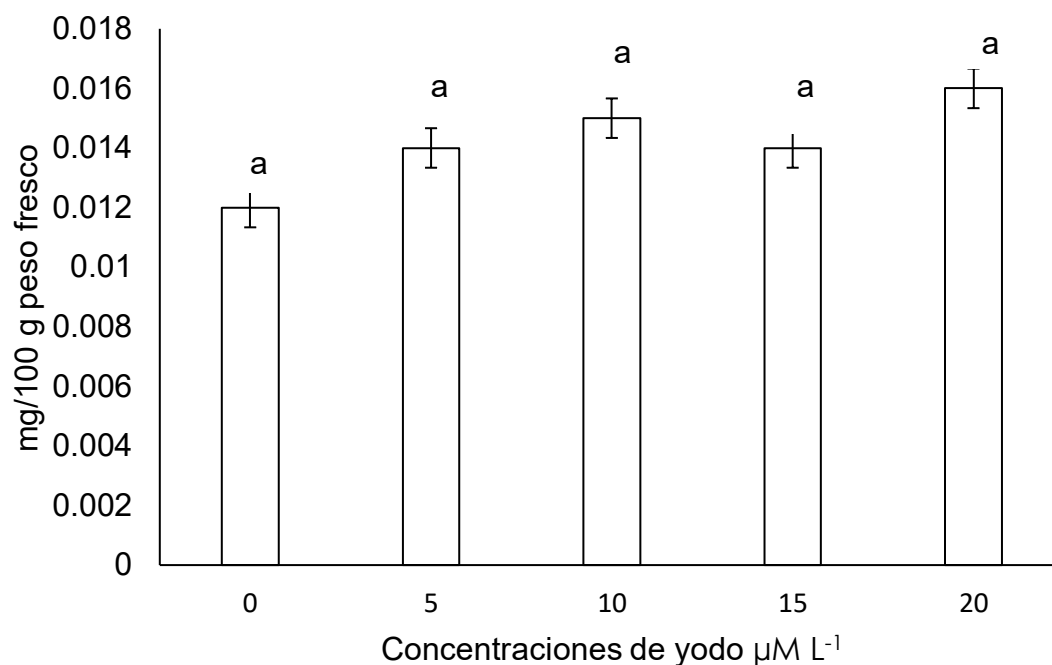


Figura 4.1. Efecto de la aplicación foliar de yodo en la acumulación de vitamina C de frutos de tomate. Barras con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.4.2 Capacidad antioxidante total

Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre las distintas concentraciones de yodo.

La dosis que logra la mayor capacidad antioxidante fue el tratamiento $20 \mu\text{M L}^{-1}$ de yodo, superando al tratamiento testigo un 32%. Los resultados de las dosis 10 y $15 \mu\text{M L}^{-1}$, resultaron ser estadísticamente iguales, aun y con este resultado

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

los datos muestran tendencia en aumento conforme van incrementando las dosis de yodo aplicada (Figura 4.2).

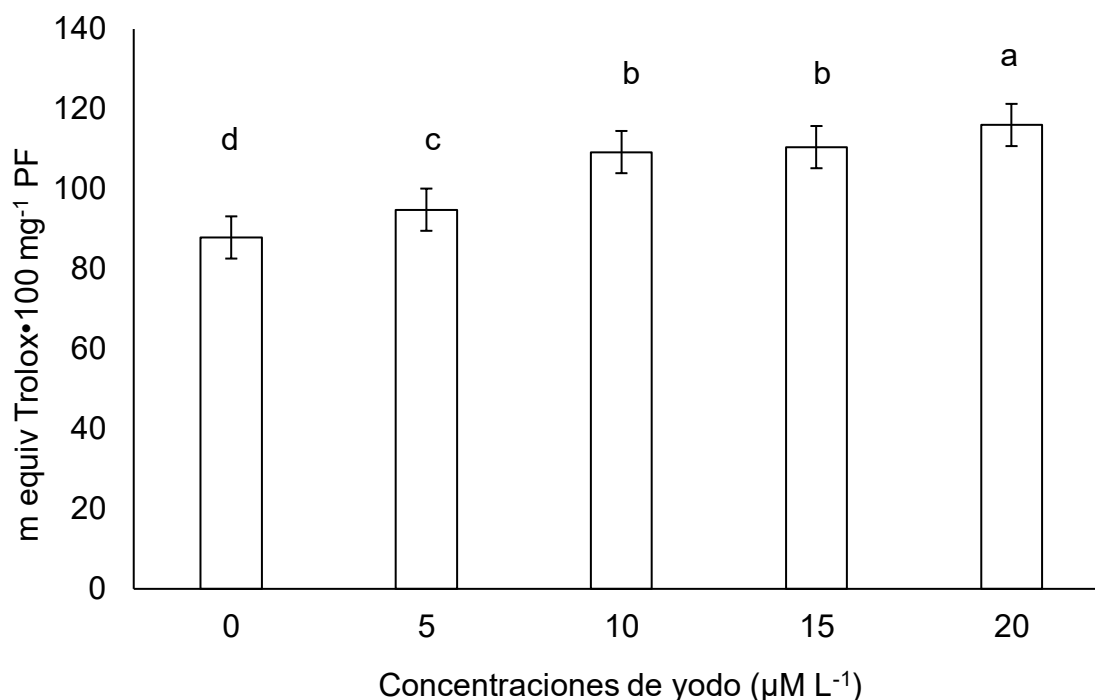


Figura 4.2. Efecto de la aplicación foliar de yodo en la Capacidad antioxidante total de frutos de tomate. Barras con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

Los antioxidantes son compuestos que actúan protegiendo al organismo humano de la acción de los radicales libres, causantes de los procesos de envejecimiento y de algunas otras enfermedades (Gutiérrez *et al.*, 2007).

En nuestro experimento la capacidad antioxidante aumento a medida que se incrementaron las dosis de yodo aplicadas, alcanzando el valor más alto con el tratamiento 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ de yodo (Figura 4.2). Estos resultados son similares a

los reportados por Kiferle *et al.* (2013), quienes reportan que la mayor capacidad antioxidante total acumulada en frutos de tomate se obtuvieron en frutos con la mayor acumulación de yodo la cual fue de 4.5 mg l kg⁻¹ peso fresco.

Lo que sugiere que el yodo, por encima de cierto umbral, podría desencadenar una respuesta antioxidante moderada en la fruta, probablemente contra el estrés leve causado por el mismo yodo, esto coincide con efectos similares detectados por Blasco *et al.* (2008; 2011). Efecto presumiblemente asociado a las aplicaciones de yodo que puede funcionar como agente inductor de antioxidantes (Zhu *et al.*, 2003; Blasco *et al.*, 2008).

Medrano-Macías *et al.* (2016b), mencionan que la aplicación con yodo mostró efectos mixtos sobre el potencial antioxidante en varias especies de cultivos, dependiendo de la fuente de yodo, la concentración y el tipo de aplicación.

4.4.3 Compuestos fenólicos

Los resultados para la variable compuestos fenólicos mostraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) por efecto de la aplicación foliar de yodo. Lo que indica que la aplicación de yodo al cultivo de tomate resulta una alternativa favorable para lograr el aumento en la síntesis de compuestos

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

fenólicos en los frutos de tomate. El tratamiento que obtuvo la mayor concentración de compuestos fenólicos fue el tratamiento $20 \mu\text{M L}^{-1}$ de yodo con $219.547 \text{ mg}/100 \text{ g}$ de PF, superando al tratamiento testigo en un 24.18%, al tratamiento $5 \mu\text{M L}^{-1}$ con un 18.2%, a la dosis $10 \mu\text{M L}^{-1}$ con un 11.47% y al tratamiento $15 \mu\text{M L}^{-1}$ lo supero con un 7.02% (Figura 4.3).

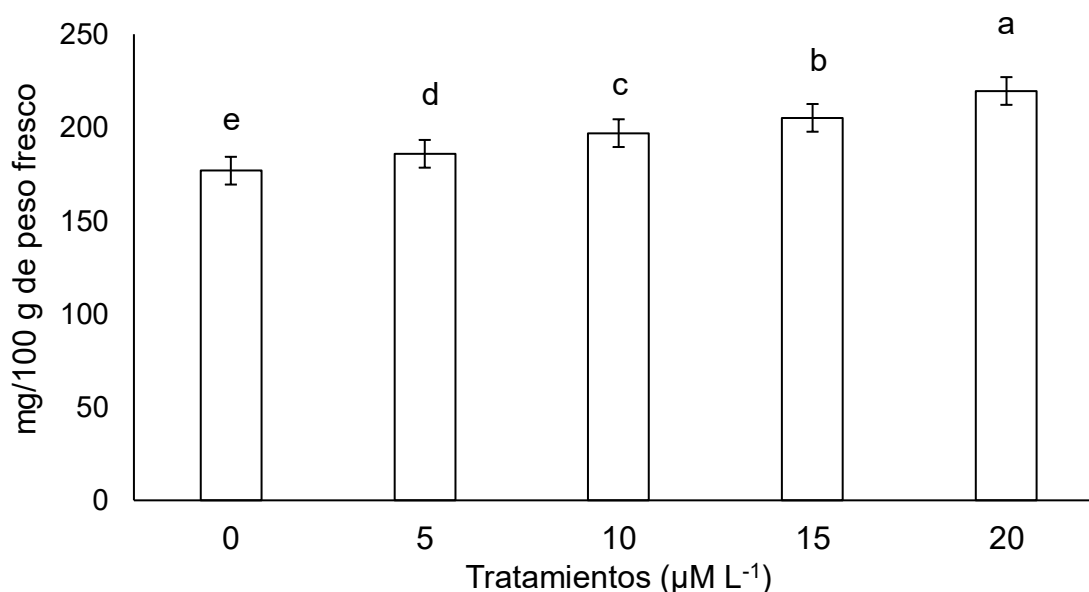


Figura 4.3. Efecto de la aplicación foliar de yodo en los compuestos fenólicos en frutos de tomate. Barras con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

Los compuestos fenólicos son compuestos químicos que se encuentran ampliamente distribuidos en las frutas y vegetales (López, 2008). Se les ha atribuido un posible papel anti-carcinogénico ya que son capaces de bloquear o inhibir enzimas que son potenciales activadores de precarcinógenos (Parr y Bollwell, 2000).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente trabajo coinciden con Blasco (2010), quien encontró que los compuestos fenólicos muestran un aumento positivo a medida que se incrementaron la dosis de yodo en hojas de lechuga, obteniendo el valor más alto de compuestos fenólicos en la dosis de 160 μM .

Caso contrario al estudio realizado por Medrano-Macías *et al.*, (2016), donde no encontró diferencias en compuestos fenólicos en frutos de tomate tratados con aplicaciones foliares de yodo de 1 μM y 100 μM diaria y quincenalmente.

Medrano-Macías *et al.*, (2016) reportaron en un experimento una clara disminución de la actividad superóxido dismutasa (SOD) ante las aplicaciones de yoduro y yodato. De acuerdo con (Sakihama, *et al.*, 2002). La acumulación de fenoles es inducida en respuesta a la mayor cantidad de H_2O_2 resultante del estrés oxidativo. La menor actividad de SOD, es obtenida posiblemente derivada de un efecto antioxidante del yodo, pudo ser la causal de la ausencia de diferencias entre tratamientos. Resultados que coinciden con Blasco *et al.* (2011), para el caso de tratamientos con 20, 40 y 80 $\mu\text{M L}^{-1}$, por esta razón atribuyeron la ausencia de diferencias estadística significativas en la concentración de fenoles en plantas de tomate.

Aunque en nuestro experimento no se analizaron actividades enzimáticas posiblemente los resultados obtenidos pudieron deberse a que las dosis son menores a las utilizadas por Blasco *et al.* (2011), por lo que posiblemente las dosis evaluadas no influyeron en la síntesis de la SOD.

4.4.4 Flavonoides

Los resultados del análisis de varianza para flavonoides mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) por efecto de la aplicación foliar de yodo. Confirmando que las aplicaciones de yodo pueden ser una práctica que logre un aumento en la concentración de flavonoides. La mayor concentración de flavonoides se obtuvo con las dosis 15 y 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ con 188.377 y 193.797 mg/100 g PF, respectivamente. Ambos tratamientos superaron al tratamiento testigo en un 48.04 y un 52.30% respectivamente. La dosis más baja (5 $\mu\text{M L}^{-1}$) mostro un aumento del 5.21% al tratamiento testigo, y la dosis 20 $\mu\text{M L}^{-1}$ aumento un 44.75% con respecto a la dosis 5 $\mu\text{M L}^{-1}$ (Figura 4.4).

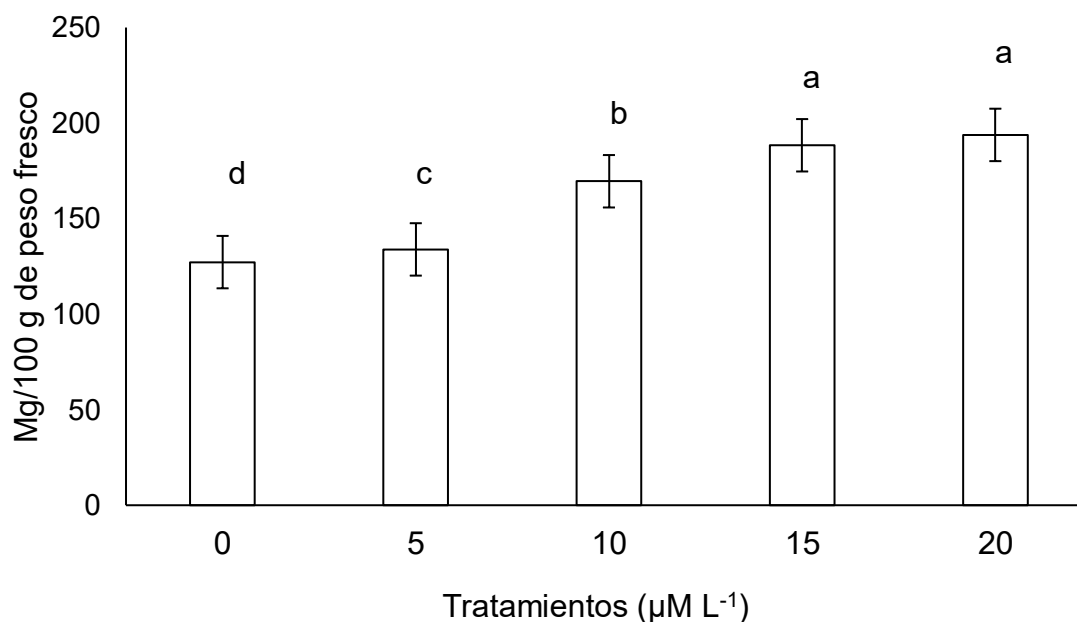


Figura 4.4. Efecto de la aplicación foliar de yodo en el contenido de flavonoides en frutos de tomate. Barras con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

Los flavonoides son compuestos antioxidantes de gran importancia (Martínez *et al.*, 2002) que ejercen efectos beneficiosos en la prevención de un gran número de enfermedades, incluidas el cáncer, las enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Duarte y Pérez-Vizcaíno, 2015). Blasco *et al.* (2008), reportaron resultados similares a los obtenidos en nuestro trabajo, señalan que altas concentraciones de yodo (160 μM) aplicadas en lechuga proporcionan mayor acumulación de flavonoides.

4.4.5 Licopeno

El análisis de varianza para el licopeno mostro diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) por efecto de las aplicaciones de yodo. El tratamiento con el cual se logró la mayor acumulación de licopeno fue en el tratamiento testigo, mostrando los demás tratamientos una disminución del 20% a medida que se incrementaron las dosis (Figura 4.5).

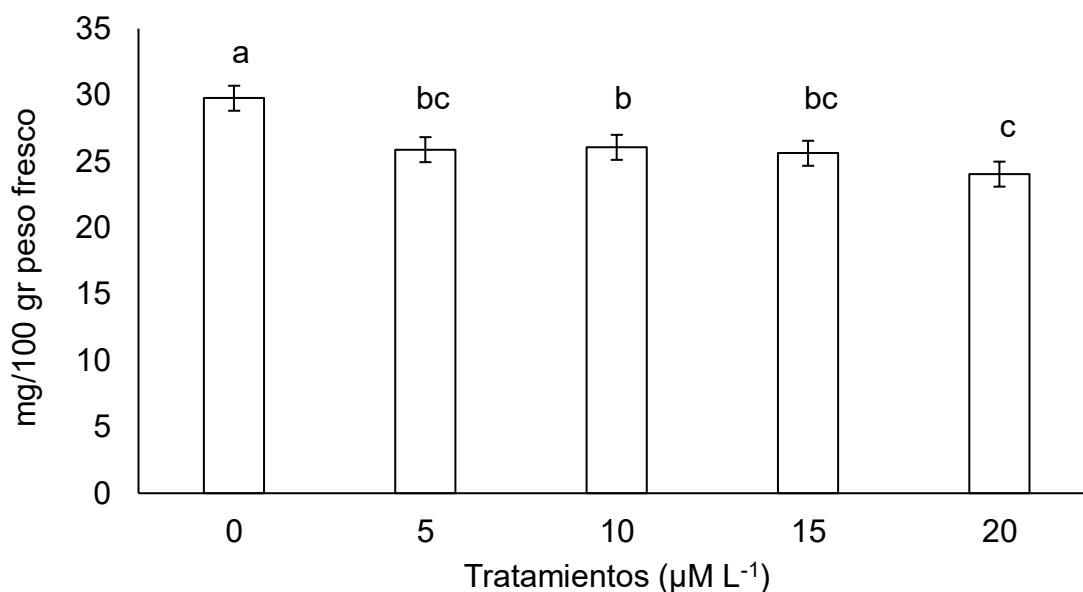


Figura 4.5. Efecto de la aplicación foliar de yodo en el licopeno en frutos de tomate. Barras con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

El licopeno es un carotenoide, principal pigmento responsable de la característica coloración roja del tomate (*Lycopersicon esculentum*) y sus productos derivados, y se sintetiza exclusivamente por plantas y

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

microorganismos. Una de las funciones del licopeno y otros compuestos relacionados con los carotenoides es la de absorber la luz durante la fotosíntesis, protegiendo a la planta contra la fotosensibilización, además es un potente antioxidante y está asociado con un menor riesgo de desarrollar enfermedades crónicas como cáncer, enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Moritz y Cardoso, 2006).

Los resultados de esta investigación indican una clara disminución de la concentración de licopeno a medida que se aumentaron las dosis de yodo. Smoleń *et al.* (2015), encontraron que el aplicar 7.88 μM de yoduro y yodato de potasio no tiene influencia en la concentración de licopeno en frutos de tomate.

Islam *et al.* (2018), estudiaron tomates cherry con tratamientos de hierro, yodo y selenio, en dicho estudio no tuvieron diferencias significativas en datos de licopeno, haciendo mención a que fueron muy cuidadosos al elegir los frutos, procurando que todos estuvieran estrictamente en el mismo estado de maduración.

4.5 Concentración de Yodo

El análisis de varianza para el contenido de yodo en frutos mostro diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos evaluados, encontrando la mejor concentración de yodo con el tratamiento 20 $\mu\text{M L}^{-1}$, obteniendo 29.181 mg kg^{-1} yodo de peso fresco (Figura 4.6).

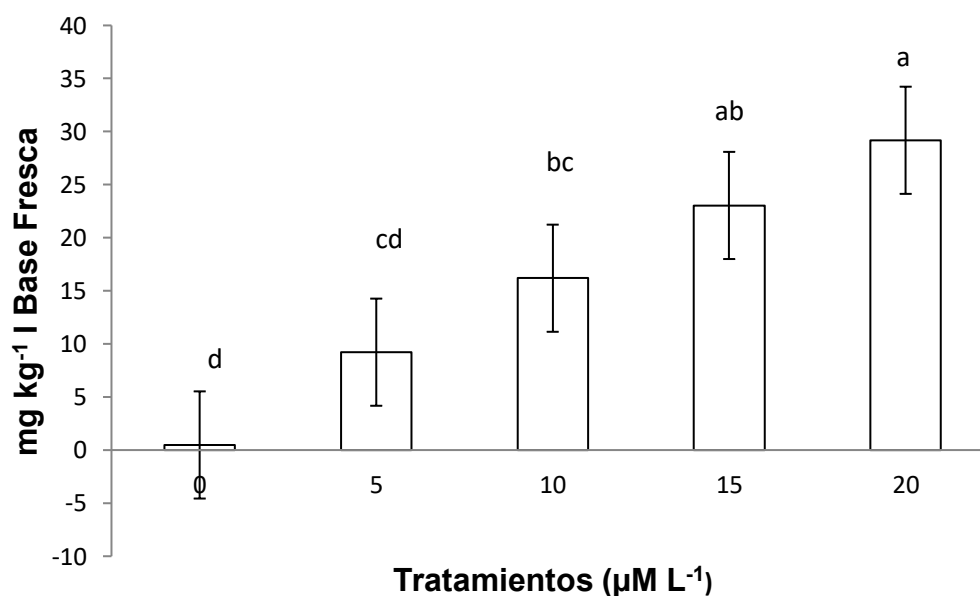


Figura 4.6. Efecto de la aplicación foliar de yodo en la acumulación de yodo en frutos de tomate. Barras con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El yodo es un micronutriente esencial para los humanos (Delange, 1994). A pesar de que no se conoce una función metabólica del yodo en las plantas terrestres (Kabatas-Pendias, 2011), su valor como micronutriente benéfico está bien establecido (Borst-Pauwles, 1961). El aporte inadecuado de yodo produce trastornos graves como discapacidad cognitiva, complicaciones durante el embarazo como la muerte fetal y anomalías congénitas, además de la posibilidad de causar lesiones cerebrales irreversibles en el feto (del campo, 2017). En los resultados de este trabajo podemos observar un aumento significativo en la concentración de yodo en frutos de tomate. En la Figura 4.6 se observa el aumento del contenido de I conforme incrementó la concentración de I en las aplicaciones foliares, mostrando la mayor acumulación de yodo al aplicar $20 \mu\text{M L}^{-1}$. Smolen *et al.* (2018) encontraron resultados favorables en la acumulación de yodo en papas, donde mencionan que el contenido de yodo fue varias veces menor en plantas control en comparación con las plantas que fueron tratadas con yodo.

Zhu *et al.*, (2003); Dai *et al.*, (2004) encontraron una clara relación entre la concentración de yodo de la solución y la absorción del elemento, ya que a medida que incrementaban la concentración del yodo en la solución nutritiva aumentaba la concentración del elemento en la biomasa aérea.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantas pueden absorber y trasladar eficientemente cantidades suficientes de este elemento a las frutas, incluso si se fertilizan con bajas dosis no tóxicas de KI y KIO₃. (Kiferle *et al.*, 2013).

V. CONCLUSIONES

La aspersión foliar del yoduro de potasio incrementa el rendimiento y mejora los diámetros de frutos de tomate.

La aplicación foliar de dosis altas de yoduro de potasio incrementa la calidad nutracéutica de los frutos de tomate, pero disminuye los niveles de licopeno en los frutos.

La aspersión foliar de yoduro de potasio favorece la acumulación de yodo en frutos de tomate producidos en malla sombra.

VI. LITERATURA CITADA

- Aceves, C. and Anguiano, B. 2009. Is iodine an antioxidant and antiproliferative agent for the mammary and prostate glands? *In*: Preedy, V. R.; Burrow, G. N. and Watson, R. R. (Eds.). Handbook of iodine. San Diego, California: Elsevier. 249-257.
- Alcantar, G. G., Sandoval, V. M. 1999. Manual de analisis quimico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial Num. 10 de la sociedad mexicana de la ciencia del suelo, AC. Chapingo, Mexico 155 p.
- Andersson, M.; Karumbunathan, V. and Zimmermann, M. B. 2012. Global iodine status in 2011 and trends over the past decade. *J. Nutr.* 142(4):744-750.
- Argerich, C. y Gaviola, J. C. 2019. Manual de produccion de semillas hortícolas. https://inta.gob.ar/sites/default/files/scripttmp2_cap_2clasificacin_botanica_del_tomate.pdf (Verified mayo 2019)
- Avalos García, Adolfo; Pérez-Urria Carril, Elena. 2009. Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología)* 2(3): 119-145.
- Balcerczyk, A., Gajewska, A., Macierzyńska-Piotrowska, E., Pawelczyk, T., Bartosz, G., & Szemraj, J. 2014. Enhanced antioxidant capacity and anti-ageing biomarkers after diet micronutrient supplementation. *Molecules* 19(9): 14794-14808.
- Benavides-Mendoza, A.; H. Ramírez, H.; Robledo-Torres, V.; Fuentes- Lara, L.O. y A. Sandoval-Rangel. 2012. Elementos traza y calidad nutricional, casos del yodo, zinc y selenio. *In*: Rocha- Estrada, S. A.; Moreno-Limón, M. del C. y González-de la Rosa (Eds.). Tópicos Selectos de Botánica 6. Anatomía y Palinología, Biotecnología vegetal, diversidad y ecología, producción agrícola. UAL, Monterrey, México 139-164.
- Blasco, B., Ríos, 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.

VI. LITERATURA CITADA

- Blasco, B., Ríos, JJ, Leyva, R., Cervilla, LM, Sánchez-Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, MM, Rosales, MA, Ruiz, JM, Romero, L., 2010. ¿Afecta la biofortificación de yodo al metabolismo oxidativo en plantas de lechuga? *Biol. Trace Elem. Res.* 142 (3): 831-842.
- Blasco, B., Ríos, J. J., Leyva, R., Cervilla, L. M., Sánchez- Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, M., Rosales, M. A., Ruiz, J. M., & Romero, L. 2011. Does iodine biofortification affect oxidative metabolism in lettuce plants. *Biological Trace Element Research* 142(3): 831-842.
- Blasco, B., Ríos, J. J., Sánchez-Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, M. M., Leyva, R., Romero, L. 2012. Study of the interactions between iodine and mineral nutrients in lettuce plants. *J. Plant Nutr.* 35: 1958-1969.
- Borst-Pauwels, G. W. F. H. 1961. Iodine as a micronutrient for plants. *Plant Soil* 14(4): 377-392.
- Bouis, H.E., 2007. The potential of genetically modified food crops to improve human nutrition in developing countries. *Journal of Development Studies* 43:79-96.
- Bouis, H.E., Christine, H., McClafferty, B., Meenakshi, J.V. and Pfeiffer, W.H. 2011. Biofortification: A new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food and nutrition Bulletin*. 32:31-40.
- Bouis, H.E., Welch, R.M., 2010. Biofortification a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop Science* 50: 20-32.
- Burlingame, B. 2013. The role of agriculture in diet: quantity versus quality. Conference frontiers in agricultural sustainability: studying the protein supply chain to improve dietary quality. The New York Academy of Sciences.
https://books.google.com.mx/books?id=yJO7DwAAQBAJ&pg=PA105&lpg=PA105&dq=Burlingame,+B.+2013.+The+role+of+agriculture+in+diet:+quantity+versus+quality.+Conference+frontiers+in+agricultural+sustainability:+studying+the+protein+supply+chain+to+improve+dietary+quality.&source=bl&ots=4m53We3HMg&sig=ACfU3U1r4NW13pq_jhClkVO0zFKyUvWB1A&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjox8PKzchQAhUPeKwKHeAcBzAQ6AEwAHoECAoQ

- [AQ#v=onepage&q=Burlingame%2C%20B.%202013.%20The%20role%20of%20agriculture%20in%20diet%3A%20quantity%20versus%20quality.%20Conference%20frontiers%20in%20agricultural%20sustainability%3A%20studying%20the%20protein%20supply%20chain%20to%20improve%20dietary%20quality.&f=false](#)
- Caffagni, A., Arru, L., Meriggi, P., Milc, J., Perata, P., & Pecchioni, N. 2011. Iodine fortification plant screening process and accumulation in tomato fruits and potato tubers. *Communications in Soil Science Plant Analysis* 42(6):706-718.
- Carrasco-Gallardo C., Farías G.A., Fuentes P., Crespo F., Maccioni RB. 2012. Can nutraceuticals prevent Alzheimer's disease? Potential therapeutic role of a formulation containing shilajit and complex B vitamins. *Arch Med Res* 43(8): 699-704.
- Colin, C., Leblanc, C., Wagner, E., Delage, L., Leize-Wagner, E., Van Dorselaer, A., Kloareg, B., & Potin, P. 2003. The brown algal kelp *Laminaria digitata* features distinct bromoperoxidase and iodoperoxidase activities. *The Journal of Biological Chemistry*, 278(26): 23545-23552.
- Crispín Cortés-Flores, M. Nieves Rodríguez-Mendoza, Adalberto Benavides-Mendoza, J. Luis García-Cué, Mario Tornero-Campante, Prometeo Sánchez-García. 2016. El yodo aumenta el crecimiento y la concentración de minerales en plántulas de pimienta morrón. *Agrociencia*. 50(6): 747-758.
- Dai, J. L., Zhu, Y. G., Zhang, M., and Huang, Y. Z. 2004. Selecting iodine-enriched vegetables and the residual effect of iodate application to soil. *Biol. Trace Elem. Res.* 101: 265–276.
- Dai, J. L.; Zhu, Y. G.; Huang, Y. Z.; Zhang, M. and Song, J. L. 2006. Availability of iodide and iodate to spinach (*Spinacia oleracea* L.) in relation to total iodine in soil solution. *Plant Soil*. 289(1-2): 301-308.
- Darnton-Hill, A. & F. Nalubola. 2002. Fortification strategies to meet micronutrient needs: successes and failures. *Proc. Nutr. Soc.* 61: 231-341.

VI. LITERATURA CITADA

- Das L, Bhaumik E, Raychaudhuri U, Chakraborty R. 2012. Role of nutraceuticals in human health. *J Food Sci Technol* 49(2):173-83.
- Delange F. 1994. The disorders induced by iodine deficiency. *Thyroid* 4: 107-108.
- Del campo, Alicia Mayor. 2017. Métodos analíticos existentes para determinar el estado nutricional en yodo en la población. Universidad Complutense de Madrid.
- Dionisio, N., García-Mediavilla, M. V., Sánchez-Campos, S., & Majano, P. L. I. 510 Benedicto, JA Rosado, GM Salido, and J. González-Gallego. 2009. Hepatitis 511 C virus NS5A and core proteins induce oxidative stress-mediated calcium signalling 512 alterations in hepatocytes. *J. Hepatol* 50: 872-882.
- Dong, J., Liu, W., Wang, Y., Hou, Y., Xi, Q., & Chen, J. 2009. Developmental iodine deficiency resulting in hypothyroidism reduces hippocampal ERK1/2 and CREB in lactational and adolescent rats. *BMC neuroscience* 10(1): 149.
- Duarte, Juan, Pérez-Vizcaíno, Francisco. 2015. Protección cardiovascular con flavonoides. Enigma farmacocinético. *Ars Pharm* 56(4): 193-200.
- El-Ramady, H., T. Alshaal, M. Amer, É. Domokos- Szabolcsy, N. Elhawat, J. Prokisch and M. Fári 2014a. Soil quality and plant nutrition. In: E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews* 14: 345-447. DOI: 10.1007/978-3-319-06016-. Springer International Publishing Switzerland.
- El Siglo de Torreón. 2018. Al alza, producción de tomate para exportar. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1431318.al-alza-produccion-de-tomate-para-exportar.html> (Verified 12 MAYO 2019).
- Escalona, V., Alvarado, P., Monardes, H., Urbina, C., & Martín, A. 2009. Manual de cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Chile*. http://www.cepoc.uchile.cl/pdf/manua_cultivo_tomate.pdf. (Verified junio 2018).
- Espinoza, Georgina. 2019. Tomate, *Solanum lycopersicum*, características de la planta y fruto. <https://naturaleza.paradais-sphynx.com/plantas/verduras/tomate-solanum-lycopersicum.htm> (verified junio 2019).

VI. LITERATURA CITADA

- FAO (Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación) y OMS (Organización mundial de la salud). 1992. Conferencia Internacional Sobre Nutrición: elementos principales de estrategias nutricionales. <http://www.fao.org/3/a-z9120s.pdf> (verified 23 febrero 2019)
- FAO (Food and Agriculture of the United Nations). 2009. The state of food insecurity in the world, Rome: Electronic Publishing Policy and Support Branch Communication Division. <http://www.fao.org/3/i0680e/i0680e.pdf> (verified 28 marzo 2019).
- FAOSTAT. 2019. Países del mundo productores de tomate en 2018. <https://blogagricultura.com/paises-productores-tomate-2018/> (Verified 20 abril 2019).
- Fraga, C. G. 2005. Relevance, essentiality and toxicity of trace elements in human health. *Molecular aspects of medicine* 26(4-5): 235-244.
- Gómez-Galera, S., Rojas, E., Sudhakar, D., Zhu, C., Pelacho, A. M., Capell, T., & Christou, P. 2010. Critical evaluation of strategies for mineral fortification of staple food crops. *Transgenic research*, 19(2): 165-180.
- Gonzali, S., Kiferle, C., & Perata, P. 2017. Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current opinion in biotechnology* 44: 16-26.
- González-Sarrías, A., Larrosa, M., García-Conesa, M. T., Tomás-Barberán, F. A., & Espín, J. C. 2013. Nutraceuticals for older people: Facts, fictions and gaps in knowledge. *Maturitas*, 75(4): 313-334.
- González-Gallego, J., García-Mediavilla, M. V., Sánchez-Campos, S., & Tuñón, M. J. 2010. Fruit polyphenols, immunity and inflammation. *British journal of nutrition* 104(S3): S15-S27.

VI. LITERATURA CITADA

- Gupta, N., Shukla-Bajpai, M., Singh-Majumdar, R., & Mishra, P. K. 2015. Response of iodine on antioxidant levels of *Glycine max* L. grown under Cd²⁺ stress. *Advances in Biological Research* 9(1):40-48.
- Gutierrez Zavala, Ángel; Ledesma Rivero, Luis; García García, Isabel y Grajales Castillejos, Octavio. 2007. Capacidad antioxidante total en alimentos convencionales y regionales de Chiapas, México. *Rev Cubana Salud Pública*, 33 (1) ISSN 0864-3466
- Haraguchi, H. 2004. Metallomics as integrated biometal science. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 19(1): 5-14.
- Hosseinzadeh, S., Jafarikukhdan, A., Hosseini, A., & Armand, R. 2015. The application of medicinal plants in traditional and modern medicine: a review of *Thymus vulgaris*. *International Journal of Clinical Medicine* 6(09): 635.
- Imhoff-Kunsch, B., Flores, R., Dary, O., Martorell, R., 2007. Wheat flour fortification is unlikely to benefit the neediest in Guatemala. *The Journal of Nutrition*, 137:1017-1022.
- International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders (ICCID). (2009). Iodine biofortifications in plants: an 'alternative' to iodized salt? *IDD news Letter* 32(2):16.
- Isaza, M. (2007). Taninos o polifenoles vegetales. *Scientia et Technica*, 1(33): 13-18.
- Kabata-Pendias, A. 2010. Trace elements in soils and plants. CRC Press. Florida, USA.
- Kato, S., Wachi, T., Yoshihira, K., Nakagawa, T., Ishikawa, A., Takagi, D., Tezuka, A., Yoshida, H., Yoshida, S., Sekimoto, H., Takahashi, M., 2013. Arroz (*Oryza sativa* L.) las raíces tienen actividad de reducción de yodato en respuesta al yodo. *Frente. Plant Sci.* 4: 227.

VI. LITERATURA CITADA

- Kiferle, Claudia and Gonzali, Silvia and Holwerda, Harmen and Real Ibaceta, Rodrigo and Perata, Pierdomenico. 2013. Tomato fruits: a good target for iodine biofortification. *Frontiers in Plant Science* 4: 205-215.
- Krishna K. Verma, Archana Jain, and Archana Verma. 1992. Determination of Iodide by High-Performance Liquid Chromatography after Precolumn Derivatization. *Anal. Chem.* 1992, 64: 1484-1489.
- Küpper, F. C., Carpenter, L. J., Mcfiggans, G. B., Palmere, C. J., Waiteh, T. J., Bonebergb, E., Woitsch, S., Weiller, M., Abela, R., Grolimund, D., Potin, P., Butler, A., Luther, G. W., Kroneck, P. M. H., Meyer-Klaucke, W., & 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.
- La Barre, S., Potin, P., Leblanc, C., & Delage, L. 2010. The halogenated metabolism of brown algae (Phaeophyta), its biological importance and its environmental significance. *Marine Drugs* 8(4): 988-1010.
- Lakshmana S, Suriya Prakash TNK, Dinesh C, Suresh Kumar S, Ragavendran T. 2012. Nutraceuticals: A review. *Elixir Pharmacy* 46: 8372-7.
- Landini, M., Gonzali, S., & Perata, P. 2011. Iodine biofortification in tomato. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(3): 480-486.
- Lehr, J. R., & Brown, W. E. 1958. Calcium phosphate fertilizers: II. A petrographic study of their alteration in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 22(1): 29-32.
- Lazarus, J. H. 2015. The importance of iodine in public health. *Environmental geochemistry and health* 37(4): 605-618.
- Leija-Martínez, P., Medrano-Macías, J., Fuentes-Lara, L., Benavides-Mendoza, A. 2016. Biofortificación de granos con yodo y selenio. *Revista granos* 1: 22-28.
- Leija-Martinez, Paola, Benavides-Mendoza, Adalberto, Rocha-Estrada, Alejandra y Medrano-Macias, Julia Rosa. 2016. Biofortificacion con yodo en plantas para consumo humano. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 7(8): 2025-2036.

VI. LITERATURA CITADA

- Leyva, R., Sánchez-Rodríguez, E., Ríos, J. J., Rubio-Wilhelmi, M. M., Romero, L., Ruiz, J. M., & Blasco, B. 2011. Beneficial effects of exogenous iodine in lettuce plants subjected to salinity stress. *Plant Science*, 181(2): 195-202.
- Llancari, A., & Matos, A. 2011. Valoración de los nutrientes y antioxidantes en la salud humana e industria alimentaria. In *Universidad Peruana Unión. I Congreso Nacional de Investigación. Perú, Lima*.
- Liyanage, C. y Hettiarachchi, M. 2011. Fortificación de alimentos. *Ceylon Medical Journal* 56 (3): 124-127
- López-Bellido, F.J., Suarez-Barcena, M. J. P., Morales-Rodrigo, S., Lopez-Bellido, L. 2014. Biofortificación agronómica de los cultivos: el caso de selenio en España. *Vida rural* 347: 60-65.
- Lu R, Dan H, Wu R, Meng W, Liu N, Jin X, Zhou M, X, Zhou G, Chen Q. 2011. Lycopene features and potential significance in the oral cancer and precancerous lesions. *J Oral Pathol Med* 40: 361-368.
- Luna-Guevara, M.L.; Delgado-Alvarado, A. 2014. Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) avances en investigación agropecuaria. 18: 51-66.
- Mackowiak, C. L., & Grossl, P. R. 1999. Iodate and iodide effects on iodine uptake and partitioning in rice (*Orizaba sativa* L.) grown in solution culture. *Plant Soil*, 212(2): 135-143. Retrieved from Mengel, K., Kosegarten, H., Kirkby, E. A., & Appel, T. 2001. Further elements of importance. In: Mengel, K., Kirkby, E. A., Kosegarten, H., & Appel, T. (Eds.), *Principles of plant nutrition* (5th. ed., pp. 639-655). Netherlands: Springer.
- Martin, P. 2015. Fortificación de alimentos con micronutrientes: riesgos y beneficios. Catedra de Nutricion, Facultad de farmacia y Bioquimica, Universidad de Buenos Aires 157 (1-2): 53-66.

VI. LITERATURA CITADA

- Martínez-Flórez, S.; González-Gallego, J.; Culebras, J. M. y Tuñón, M.^a J. 2002. Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutrición Hospitalaria*, 17: 271-278.
- Medrano-Macías, J., Leija-Martínez, P., Juárez-Maldonado, A., Rocha-Estrada, A., & Benavides-Mendoza, A. 2016a. Effect of iodine application on antioxidants in tomato seedlings. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 22(2):133-143.
- Medrano-Macías, J., Leija-Martínez, P., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., & Benavides-Mendoza, A. 2016b. Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops. *Frontiers in plant science* 7: 1146.
- Mengel, K. 2001. Alternative or complementary role of foliar supply in mineral nutrition. In *International Symposium on Foliar Nutrition of Perennial Fruit Plants* 594: 33-47.
- Meza, J., Pantoja, A., Galan, P. R., Godoy, N., Gattini, J., Villasanti, C., & Díaz, J. 2013. El Cultivo De Tomate Con Buenas Prácticas Agrícolas En La Agricultura Urbana Y Periurbana. *FAO. E*.
- Molina-Quijada, D., Medina-Juárez, L., González-Aguilar, G., Robles-Sánchez, R., Gámez-Meza, N. 2010. Compuestos fenólicos y actividad antioxidante de cáscara de uva (*vitis vinifera* L.) de mesa cultivada en el noroeste de México phenolic compounds and antioxidant activity of table grape (*vitis vinifera* L.) skin from northwest Mexico. *CyTA—Journal of Food* 8: 57-63.
- Moritz, B. y Cardoso, T.V.L. 2006. La biodisponibilidad del licopeno. *Rev. Nutr* 19(2): 38-45.
- Mottiar, Y. 2013. Iodine biofortification through plant biotechnology. *Nutrition*. 29(11-12):1431-1433.
- Núñez, A. 2011. Terapia antioxidante, estrés oxidativo y productos antioxidantes: retos y oportunidades. *Rev Cubana Salud Pública* 37: 644-660.
- Nestel, P., Bouis, H. E., Meenakshi, J. V., & Pfeiffer, W. (2006). Biofortification of staple food crops. *The Journal of nutrition*, 136(4): 1064-1067.

VI. LITERATURA CITADA

- Parr AJ, Bolwell GP. 2000. Phenols in the plant and in man. The potential for possible nutritional enhancement of the diet by modifying the phenols content or profile. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80: 985-1012.
- Pastene, E. 2009. Estado actual de la búsqueda de plantas con actividad antioxidante. *Boletín Latinoamericano Caribe Plantas Med Aromáticas* 8(6): 449- 55
- Patthamakanokporn, O., Puwastien, P., Nitithamyong, A., & Sirichakwal, P. P. 2008. Changes of antioxidant activity and total phenolic compounds during storage of selected fruits. *Journal of Food Composition and Analysis* 21(3): 241-248.
- Prasad, A. S. 2013. Discovery of human zinc deficiency: its impact on human health and disease. *Adv. Nutr.* 4: 176-190.
- Quiñones, M., Miguel, M., Aleixandre, A. 2012. Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria* 27(1): 76-89.
- Rao, A. V., & Agarwal, S. 1999. Role of lycopene as antioxidant carotenoid in the prevention of chronic diseases: a review. *Nutrition research*, 19(2): 305-323.
- Reyes, A., Galicia, M., Carrillo, M. 2011. Antioxidantes: la magia de lo natural. *Rev Tlatemoani* 8: 1-16.
- Ríos Ruiz, J.J. 2013. Biofortificación: La agricultura del futuro. *Tierras: Agricultura* 204: 126-128.
- Ríos, JJ, Rosales, MA, Blasco, B., Cervilla, LM, Romero, L., Ruiz, JM, 2008. Biofortificación de Se e inducción de la capacidad antioxidante en plantas de lechuga. *Sci. Hortico* 116: 248-255.
- Ríos, JJ, Blasco, B., Cervilla, LM, Rubio-Wilhelmi, MM, Rosales, MA, Sánchez-

VI. LITERATURA CITADA

- Rodríguez, E., Romero, L., Ruiz, JM, 2010. Eficiencia en el uso de nitrógeno en relación con diferentes formas y tasas de aplicación de Se en plantas de lechuga. *J. Crecimiento vegetal Regul.* 29: 164-170.
- Rousseaux, M.C., C.M. Jones, D. Adams, R. Chetelat, A. Bennett and A. Powell. 2005. QTL analysis of fruit antioxidants in tomato using *Lycopersicon pennellii* introgression lines. *Theor Appl Genet* 11: 1396-1408.
- Roy R. N.; A. Finck, G. J. Blair; H. L. S. Tandon 2006. Plant nutrition for food security – A guide for integrated nutrient management. *Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 16, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- SAGARPA. 2017. Planeación agrícola nacional 2017-2030 jitomate mexicano <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf> (verified 20 abril 2019).
- SAGARPA. 2018. Reporte del mercado del tomate rojo. https://www.cima.aserca.gob.mx/work/models/cima/pdf/cadena/2018/Reporte_ercado_jitomate_130918.pdf (verified 20 abril 2019).
- Sakihama, Y., Cohen, M. F., Grace, S. C., & Yamasaki, H. 2002. Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants. *Toxicology*, 177(1): 67-80.
- Shinonaga, T.; Gerzabek, M. H.; Strebl, F. and Muramatsu, Y. 2001. Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria. *Sci. Total Environ.* 267(1-3): 33-40.
- Sida-Arreola, J.P., E. Sánchez, G.D. Ávila-Quezada, C.H. Acosta-Muñíz y P. B. Zamudio-Flores. 2015. Biofortificación con micronutrientes en cultivos agrícolas y su impacto en la nutrición y salud humana. *Tecnociencia Chihuahua* 9(2): 67-74.

- Smoleń, S., and 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.). *Sci. Hortic.* 143: 176-183.
- Smoleń, S., Kowalska, I., & Sady, W. 2014. Assessment of biofortification with iodine and selenium of lettuce cultivated in the NFT hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 166, 9-16.
- Smoleń, S., Wierzbińska, J., Sady, W., Kołton, A., Wiszniewska, A., & 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.
- Smoleń, S., Skoczylas, Ł., Ledwożyw-Smoleń, I., Rakoczy, R., Kopeć, A., Piątkowska, E. & Kapusta-Duch, J. 2016. Biofortification of carrot (*Daucus carota* L.) with iodine and selenium in a field experiment. *Frontiers in plant science* 7: 730.
- Smoleń, S., Ledwożyw-Smoleń, I., Halka, M., Sady, W., & Kováčik, P. 2017. The absorption of iodine from 5-iodosalicylic acid by hydroponically grown lettuce. *Scientia Horticulturae*, 225: 716-725.
- Smoleń, S., Kowalska, I., Skoczylas, Ł., Liszka-Skoczylas, M., Grzanka, M., Halka, M., & Sady, W. 2018. The effect of salicylic acid on biofortification with iodine and selenium and the quality of potato cultivated in the NFT system. *Scientia Horticulturae* 240: 530-543.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In 6. *International Congress on Soilless Culture, Lunteren (Netherlands), 29 Apr-5 May 1984*. ISOSC.
- Tian, R. C., Marty, J. C., Nicolas, E., Chiaverini, J., Ruiz-Ping, D., & Pizay, M. D. 1996. Iodine speciation: a potential indicator to evaluate new production versus regenerated production. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 43(5): 723-738.
- Torremante, P. E. and Rosner, H. 2011. Antiproliferative effects of molecular iodine in cancers. *Current Chemical Biology*. 5(13):168-176.

VI. LITERATURA CITADA

- Torres, P. A. 2017. Manual de cultivo del tomate al aire libre. Instituto de Boletín INIA número 11. Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Veneroso C, Tuñón MJ, González-Gallego J, Collado PS. 2009. Melatonin reduces the cardiac inflammatory injury induced by acute exercise. *J Pineal Res* 47: 184-191.
- Venturi, S. (2011). Evolutionary significance of iodine. *Current Chemical Biology* 5(3): 155-162.
- Vitale, A. A., Bernatene, E. A., & Pomilio, A. B. 2010. Carotenoides en quimioprevención: Licopeno. *Acta bioquímica clínica latinoamericana* 44(2): 195-238.
- Voogt, W.; Holwerda, H. T. and Khodabaks, R. 2010. Biofortification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with iodine: the effect of iodine form and concentration on growth, development and iodine uptake of lettuce grown in water culture. *J. Sci. Food Agric* 90(5): 906-913.
- Waliszewski K, Blasco G. 2010. Propiedades nutraceuticas del licopeno. *Salud Pública Mex* 52: 254-265.
- Waliszewski, K. N., & Blasco, G. 2010. Propiedades nutraceuticas del licopeno. *Salud Pública de México* 52(3): 254-265.
- Weng, H. X., Hong, C. L., Yan, A. L., Pan, L. H., Qin, Y. C., Bao, L. T., & Xie, L. L. 2008a. Mechanism of iodine uptake by cabbage: Effects of iodine species and where it is stored. *Biological Trace Element Research* 125(1): 59-71.
- Weng, H. X.; Yan, A. I.; Hong, C. L.; Xie, L. L.; Yong, W. B. and Qin, Y. C. 2008b. Increment of iodine content in vegetable plants by applying iodized fertilizer and the residual characteristics of iodine in soil. *Biol. Trace Elem. Res.* 123(1-3):218-228.
- Weng, H. X.; Liu, H. P.; Li, D. W.; Ye, M.; Pan, L. and Xia, T. H. 2014. An innovative approach for iodine supplementation using iodine-rich phyto-genic food. *Environ. Geo. Health.* 36(4):815-828.

VI. LITERATURA CITADA

- Welch, R. M., & Graham, R. D. 2004. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of experimental botany* 55(396): 353-364.
- White, P.J., Broadley, M.R., 2005. Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science* 10:586-593.
- White, P. J., & Broadley, M. R. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* 182(1): 49-84.
- WHO/UNICEF/ICCIDD (2001) Indicators for assessing Iodine Deficiency Disorders and their control through salt iodination. Micronutrient Series.
- Wong, G. T. (1991). The marine geochemistry of iodine. *Rev. Aquat. Sci.* 4: 45-73.
- Zamora, J. 2007. Antioxidantes: micronutrientes en lucha por la salud. *Rev Chil Nutr.* 34(1): 17-26.
- Zhu, Y. G., Huang, Y. Z., Hu, Y., & Liu, X. Y. 2003. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations. *Environment International*, 29(1), 33-37.