

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Impacto del Selenio Sobre la Producción y Calidad del Fruto de Tomate
(*Lycopersicon esculentum* L. Mill)

Por:

JOSÉ MANUEL RICARDO MENDOZA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México.

Marzo 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Impacto del Selenio Sobre la Producción y Calidad del Fruto de Tomate
(*Lycopersicon esculentum* L. Mill)

Por:

JOSÉ MANUEL RICARDO MENDOZA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada

Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Asesor Principal

M.C. Rocío Guadalupe Castillo Godina

Coasesor

Dr. Antonio Juárez Maldonado

Coasesor

Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinación
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Marzo 2015

DEDICATORIA

¡A Dios! Señor Padre, por todas las bendiciones derramadas sobre mí, por estar siempre a mi lado cuidándome, protegiéndome y guiándome por el camino correcto, ¡te doy gracias Señor! porque sin ti nada en esta vida hubiera sido posible.

A mi amada madre, **Valentina Mendoza Bruno** quien me ha heredado el tesoro mas valioso que puede dársele a un hijo ¡el amor!, A quien sin escatimar esfuerzo alguno ha sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme, A quien la ilusión de su vida ha sido convertirme en una persona de provecho, A quien nunca podre pagar todo los sacrificios, Ni aun con las riquezas más grandes del mundo, por esto y más... Eternamente Agradecido, con amor y respeto ¡Gracias!

A mis queridos hermanos, **Norma Angélica Mendoza Mendoza** y **Omar Mendoza Mendoza**, como un testimonio de su cariño y eterno agradecimiento por el apoyo y estímulo brindado durante toda mi vida, por ser mi fortaleza y por la gran confianza que siempre han depositado en mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura a través del programa de Ingeniero Agrónomo en Horticultura.

Al **Departamento de Horticultura** y todos los maestros que fueron parte de mi formación académica durante mi estancia en mi gloriosa Alma Mater, dedicando parte de su tiempo y compartiendo sus grandes conocimientos, cultura y sabiduría, forjando en mí persona valores, enseñanzas y conocimientos invaluable.

A mi **Madre Valentina Mendoza Bruno**, por darme la vida y todo el amor del mundo, su incondicional apoyo, sus sabios consejos y por ser mí ejemplo de vida.

A mis hermanos **Norma Angélica Mendoza Mendoza** y **Omar Mendoza Mendoza**, por todo el apoyo incondicional, el cariño fraternal y las grandes alegrías compartidas en esta maravillosa vida.

Al Dr. **Adalberto Benavidez Mendoza**, por permitirme trabajar en este proyecto de investigación, por todo el apoyo brindado y su oportuna asesoría.

A la M.C. **Rocío Guadalupe Castillo Godina**, por todo su tiempo, apoyo, amistad y asesoría brindada para la realización de este proyecto de investigación.

Al Dr. **Antonio Juárez Maldonado**, por su tiempo y asesoría en la revisión del presente trabajo de investigación.

Al Ing. **Humberto Martínez Núñez**, por darme la oportunidad de seguir creciendo profesionalmente, por su amistad brindada, por ser un gran ejemplo a seguir en el ámbito laboral y ser una persona con gran calidad humana.

A mis estimados amigos del alma, **José Manuel Placido Durazno, Sergio Pérez Jiménez, Hugo Sánchez Ruíz, Jesús Martínez Martínez, Fernando Sánchez Pedraza, José Oliver Jiménez Gómez, Rafael Altamirano Morales, Edwin Vuelvas Aguilar, Miguel Ángel Manzano Carreón, Julio Cesar Manzano Carreón**, por su amistad invaluable, por todo el cariño y apoyo que me han brindado durante estos años y por todos los momentos y situaciones agradables que hemos compartido a lo largo de esta vida tan maravillosa ¡BUITRES POR SIEMPRE!

A **Miriam Cantor Juárez**, por todo el gran cariño y apoyo que me ha brindado durante esta etapa en mi vida, por estar a mi lado y apoyarme siempre, llegando a ser una persona muy especial en mi vida a quien siempre tendré personal cariño y afecto.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE DE CUADROS	ix
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE APENDICE	xii
RESUMEN	xv
I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Hipótesis	3
II REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Generalidades del cultivo de tomate.....	4
2.1.1 Origen	4
2.1.2 Importancia	4
2.1.3 Clasificación taxonómica	6

2.2 Características botánicas del tomate.....	7
2.2.1 Raíz	7
2.2.2 Tallo.....	7
2.2.3 Hojas	8
2.2.4 Flores.....	8
2.2.5 Frutos	9
2.2.6 Semillas	9
2.3 Parámetros de calidad en tomate	9
2.3.1 Diámetro polar y ecuatorial	9
2.3.2 Firmeza.....	10
2.3.3 Contenido de sólidos solubles totales (Grados Brix)	10
2.3.4 Ácido ascórbico (Vitamina C).....	11
2.3.5 Glutación peroxidasa (GSH-Px)	11
2.4 Selenio.....	12
2.4.1 Generalidades del selenio	12
2.4.2 Selenio en suelos y su disponibilidad	14
2.4.3 Selenio en plantas	16

2.4.4 Metabolismo del selenio en las plantas	18
2.4.5 Tolerancia de las plantas al selenio	19
2.4.6 Toxicidad del selenio en las plantas	20
2.4.7 Selenio y salud humana	21
2.5 Antioxidantes	23
2.5.1 Generalidades de los antioxidantes en el cuerpo humano	23
2.5.2 Generalidades de los antioxidantes en las plantas.....	24
2.5.3 Importancia del potencial antioxidante en el ser humano	26
2.5.4 Importancia del ácido ascórbico (Vitamina C).....	27
2.5.5 Importancia de la glutatión peroxidasa (GSH-Px).....	29
2.6 Reacciones redox	30
III MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1 Localización del experimento.....	32
3.2 Material vegetal	32
3.3 Preparación del área de invernadero.....	32
3.4 Siembra	33
3.5 Trasplante.....	34

3.6 Manejo del cultivo	34
3.7 Nutrición del cultivo.....	35
3.8 Análisis estadístico	37
3.9 Variables evaluadas	37
3.9.1 Calidad de fruto	37
3.9.1.1 Peso de fruto	37
3.9.1.2 Diámetro polar y ecuatorial de fruto	37
3.9.1.3 Firmeza.....	38
3.9.1.4 Sólidos solubles totales (Grados brix)	38
3.9.1.5 Contenido de macro y micronutrientes	39
3.9.2 Actividad Antioxidante	42
3.9.2.1 Ácido ascórbico (Vitamina C)	42
3.9.2.2 Actividad enzimática Glutación Peroxidasa (GSH-Px)	43
3.9.2.3 Potencial oxido reducción (ORP)	45
IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1 Peso de fruto	46
4.2 Diámetro polar y ecuatorial de fruto.....	47

4.3 Firmeza.....	48
4.4 Sólidos solubles totales (Grados Brix)	50
4.5 Contenido de macro y micro nutrientes	51
4.5.1 Micronutrientes	51
4.5.2 Macronutrientes	53
4.6 Ácido ascórbico (Vitamina C).....	56
4.7 Actividad enzimática Glutación Peroxidasa (GSH-Px)	58
4.8 Potencial oxido reducción (ORP).....	60
V CONCLUSIONES	63
VI LITERATURA CITADA.....	64
VII APENDICE.....	83

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos aplicados en el cultivo de tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> L. Mill) variedad Toro.....	34
Cuadro 2. Requerimientos de fertilizantes para 200 L de agua de acuerdo con Steiner (1961).	35
Cuadro 3. Valores promedio para la curva patrón de fósforo.	42
Cuadro 4. Peso de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se). ..	46
Cuadro 5. Diámetro polar y ecuatorial de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).	48
Cuadro 6. Firmeza del fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se). ..	49
Cuadro 7. Contenido de sólidos solubles totales (Grados brix) en frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).	50
Cuadro 8. Contenido de micronutrientes en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).	52

Cuadro 9. Contenido de macro nutrientes en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).....**54**

Cuadro 10. Contenido de ácido ascórbico (Vitamina C) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).....**57**

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formas del selenio en función del pH y las condiciones de óxido reducción (Eh) del medio (Camps, 2001).	15
Figura 2. Reacciones en las que participa la glutatión peroxidasa (GSH-Px)	29
Figura 3. Impacto del selenio en la actividad enzimática Glutatión Peroxidasa GSH-Px bajo dos tratamientos (2mg L ⁻¹ y 5 mg L ⁻¹ Se) y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	59
Figura 4. Caracterización de la variable potencial oxido reducción (ORP) bajo dos tratamientos de selenio (2mg L ⁻¹ y 5 mg L ⁻¹ Se) y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	61

INDICE DE APÉNDICE

Apéndice 1. Análisis de varianza para la variable peso de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	84
Apéndice 2. Análisis de varianza para la variable diámetro polar de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	84
Apéndice 3. Análisis de varianza para la variable diámetro ecuatorial de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	85
Apéndice 4. Análisis de varianza para la variable firmeza del fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	85
Apéndice 5. Análisis de varianza para la variable contenido de sólidos solubles totales (Grados brix) en frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	86
Apéndice 6. Análisis de varianza para la variable de contenido de micronutrientes (Fe) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos	

de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se)
.....86

Apéndice 7. Análisis de varianza para la variable contenido de micronutrientes (Zn) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se)
.....87

Apéndice 8. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (N) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se)
.....87

Apéndice 9. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (P) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se)
.....88

Apéndice 10. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (K) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se)
.....88

Apéndice 11. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (Ca) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).....89

Apéndice 12. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (Mg) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	89
Apéndice 13. Análisis de varianza para la variable contenido de ácido ascórbico (Vitamina C) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	90
Apéndice 14. Análisis de varianza para la variable actividad enzimática glutatión peroxidasa (GSH-Px) en el fruto de tomate con aplicación de tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	90
Apéndice 15. Análisis de varianza para la variable potencial oxido reducción (ORP) en el fruto de tomate con aplicación de tratamientos de selenio (2 y 5 mg L ⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L ⁻¹ Se).....	91

RESUMEN

El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la fertilización con selenio en forma de selenito de sodio (Na_2SeO_3) en el fruto de tomate, aplicándose por vía riego en la solución nutritiva universal Steiner, usando tres tratamientos, $0 \text{ mg L}^{-1} \text{ Se}$ (Testigo), $2 \text{ mg L}^{-1} \text{ Se}$ y $5 \text{ mg L}^{-1} \text{ Se}$. Para este trabajo se utilizó como sustrato peat moss mezclado con perlita en proporción 70:30 respectivamente, estableciendo 33 repeticiones por tratamiento, la unidad experimental fue una planta. El diseño del experimento fue completamente al azar. Se realizó un análisis de varianza y prueba de medias de Tukey, por medio del paquete estadístico SAS para cada variable analizada. En los resultados, las aplicaciones de Se, no tuvieron impacto en las variables tales como peso, diámetro polar y diámetro ecuatorial de fruto, al no mostrar diferencias significativas. En contraparte las aplicaciones de selenio tuvieron impacto benéfico al modificar las variables de contenido de ácido ascórbico, firmeza y contenido de sólidos solubles totales siendo superiores al adicionar Se. El contenido de macro y micronutrientes, no mostró tener diferencias significativas, a excepción del elemento potasio, al encontrarse disminuido cuando se adicionó selenio. La capacidad antioxidante del fruto se vió modificada positivamente por la adición de Se en bajas concentraciones del elemento. La actividad enzimática Glutatió n Peroxidasa GSH-Px, mostró tener una relación directa con la aplicación del elemento, al modificarse favorablemente cuando se aplicaron $5 \text{ mg L}^{-1} \text{ Se}$.

Palabras clave: selenio, tomate, fertilización por riego, actividad antioxidante, glutatión peroxidasa.

Correo Electrónico: José Manuel Ricardo Mendoza
chivas.regal18@outlook.com

I INTRODUCCIÓN

El tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Mill) es la hortaliza de mayor importancia en el mundo teniendo en cuenta su valor económico y nutricional. Posee un alto contenido de licopeno, ácido ascórbico (vitamina C), minerales (calcio, hierro, fósforo y potasio) y aminoácidos (tiamina y niacina) (Broadley *et al.*, 2006).

El ácido ascórbico y algunos otros antioxidantes como el licopeno, son importantes en la dieta humana; ya que estos metabolitos secundarios atrapan los radicales libres, lo cual reduce el riesgo de contraer enfermedades crónicas, tales como las cardiovasculares y el cáncer (Wesburguer, 2002), además en este grupo de antioxidantes pueden encontrarse enzimas detoxificadoras, como la glutatión peroxidasa (GSH-Px) (Sahnoun *et al.*, 1997).

Las enzimas antioxidantes utilizan en su mayoría elementos como cofactores para sus reacciones y se destaca la función del selenio (Se) como elemento esencial y cofactor para la actividad de la glutatión peroxidasa (GSH-Px) (Céspedes-Cabrera, 2000; Arthur, 2003), por ello la deficiencia de este elemento pudiera inducir modificaciones del estado oxidativo celular y la aparición de diversas enfermedades, como ciertos tipos de cáncer (Jackson *et al.*, 2004). La función biológica más trascendente que se le atribuye al

selenio es su poder antioxidante a través de su rol como cofactor de selenoenzimas (Combs, 2001; Rayman, 2008).

En cuanto a las formas químicas del selenio todas han sido encontradas en hojas, tallos y raíces de plantas (Broadley *et al.* 2006). El selenio es metabolizado en las plantas por la vía de asimilación del azufre y su distribución y acumulación dependerá de la especie química (Cartes *et al.*, 2006), demostrándose que el selenito es un inductor más eficiente de la actividad glutatión peroxidasa (Cartes *et al.*, 2005).

La referencia de la ingesta promedio de selenio en la población de México es de 40 µg al día por persona (AMDN A.C., 2009), encontrándose valores por debajo de los niveles recomendados (300 µg Se/ día) para reducir el riesgo de cáncer (Combs, 2001).

Por lo citado anteriormente, el proyecto plantea como estrategia el enriquecer el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Mill) con Se en forma de selenito de sodio (Na_2SeO_3) para inducir el aumento de la actividad antioxidante y determinar el impacto de este elemento en la calidad del fruto de tomate.

1.1 Objetivo general

Determinar el impacto del selenio sobre la producción y calidad del fruto de tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Mill).

1.2 Objetivos específicos

- Incorporar el selenio por medio de la fertilización en riego al cultivo de tomate, para determinar su impacto en la producción.
- Analizar la producción de antioxidantes no enzimáticos (Vitamina C)
- Medir la actividad enzimática de la GSH-Px a través del rol del selenio, como cofactor de selenoenzimas.
- Determinar el impacto del selenio sobre la acumulación de macro y micronutrientes en el fruto de tomate.
- Medir la relación directa del selenio con el potencial oxido reducción.

1.3 Hipótesis

Los aportes de selenito de sodio (Na_2SeO_3) por medio de la solución nutritiva utilizada en el riego, permite una mayor calidad de frutos de tomate, aumentando así mismo su capacidad antioxidante.

II REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del cultivo del tomate

2.1.1 Origen

El origen del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Mill) se localiza en la región andina que comprende a los países de Chile, Colombia, Ecuador, Bolivia y Perú (Vavilov, 1951) donde se encuentra la mayor variabilidad genética de tipos silvestres (Valadez, 2001). Sin embargo muchos autores declaran que el centro de origen probablemente fue México, ya que aquí alcanzó un elevado grado de domesticación antes de ser llevado a Europa (Villarreal, 1982). El Nombre tomate proviene de tomatl, en la lengua náhuatl de México (Nuez, 2001).

2.1.2 Importancia

El tomate es un cultivo de alto valor comercial y tiene una enorme importancia mundial, por la aceptación general del fruto en la alimentación y su utilización en forma variada, además de sus excelentes cualidades organolépticas y por su alto valor nutricional y contenido de licopeno y ácido ascórbico, demostrando que están inversamente relacionados con el desarrollo de ciertos tipos de cáncer (Morales, 2002).

Dicho fruto es la hortaliza más difundida en todo el mundo y la de mayor valor económico. Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio (Morales, 2002).

En México, como en otras partes del mundo se prefiere el consumo de tomate en fresco, pero también es utilizado como producto industrializado para elaborar pastas, salsas, purés, etc. El tomate es un fruto fuente de vitaminas, A, B1, B2, B5, C y E y de minerales como fósforo, potasio, magnesio, manganeso, zinc, cobre, sodio, hierro y calcio, además incluye proteínas, hidratos de carbono, fibra, ácido fólico, ácido tartárico, ácido succínico y ácido salicílico (Morales, 2002).

Este fruto es la hortaliza más importante del mundo, constituye el 30 % de la producción hortícola, con alrededor de 2.9 millones de hectáreas sembradas y 72 744 000 toneladas de frutos cosechados. Los países en vías de desarrollo contribuyen de manera significativa a la producción mundial con aproximadamente 47 283 600 toneladas, que representan el 65 % de dicha producción. Europa y Norte América contribuyen con el resto de la producción. (Vallejo y Estrada, 2004).

En México, el tomate se ubica entre las cuatro primeras hortalizas de importancia económica. El Comercio de tomate rojo mexicano depende en gran medida del mercado estadounidense, incrementándose las exportaciones en los últimos 10 años en un 67%. En el 2000, México exportó 590 000 toneladas (80.8%) de tomate fresco a los Estados Unidos De

Norteamérica seguido por Canadá (13.9) y los países bajos (38%) (FAS-USDA, 2001). La importancia del tomate mexicano en el mercado estadounidense se relaciona con la cercanía geográfica, competitividad en el precio y calidad, sabor, vida de anaquel y con el descenso de la producción del cultivo de tomate en los Estados Unidos De Norteamérica en el invierno. En el 2000, el tomate mexicano aportó 12.8% del valor de las exportaciones agropecuarias en México (3655.2 millones de dólares) y 25.4% del valor de las exportaciones de legumbres y hortalizas frescas (INEGI, 2001).

México se encuentra en el décimo lugar a nivel mundial en la producción de tomate, sin embargo, ocupa el primer lugar en exportación del fruto según datos de la SAGARPA (2011). Los estados con mayor aportación son Sinaloa, Baja California, Michoacán, Zacatecas y Jalisco (SIAP, 2012).

Entre las diferentes variedades que se producen en México, se encuentra el tomate rojo saladette, tomate bola, cherry, tomate verde y otras variedades como el criollo (Berenguer, 2003).

2.1.3 Clasificación taxonómica

Reino: plantae, División: spermatophyta, Clase: dicotyledoneae, Orden: solanaceae, Familia: solanaceae, Genero: *Lycopersicon*, Especie: *esculemtum*, Nombre científico: *Lycopersicon esculentum* Mill. Nombre Comun: tomate (Saldaña, 2003).

2.2 Características botánicas del tomate

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia de las solanáceas, es una planta de porte arbustivo que se cultiva como anual. Puede desarrollarse de manera rastrera, semierecta o erecta. Existen variedades de crecimiento limitado (determinadas) o de crecimiento ilimitado (indeterminadas) (Nuño *et al.*, 2007).

2.2.1 Raíz

La planta presenta una raíz principal pivotante, crece unos 3 cm al día hasta alcanzar los 60 cm de profundidad, simultáneamente se producen raíces adventicias y ramificaciones que pueden llegar a formar una masa densa y de cierto volumen. Sin embargo, este sistema radical puede ser modificado por las prácticas culturales de tal forma que cuando la planta procede de un trasplante, la raíz pivotante desaparece siendo mucho más importante el desarrollo horizontal (Rodríguez *et al.*, 2001).

2.2.2 Tallo

El tallo es erguido y cilíndrico en plantas jóvenes, a medida que esta crece, el tallo cae y se vuelve anguloso, presenta una ramificación abundante y yemas axilares, si al final del crecimiento todas las ramificaciones exhiben yemas

reproductivas, estas se clasifican como de crecimiento determinado, y si terminan con yemas vegetativas, son de crecimiento indeterminado (Rodríguez *et al.*, 2001).

2.2.3 Hojas

Las hojas son compuestas, se insertan sobre los diversos nudos de forma alterna, el limbo se encuentra fraccionado en siete, nueve y hasta once foliolos. (Rodríguez *et al.*, 2001).

2.2.4 Flores

Las flores son pequeñas, pedunculadas de color amarillo, formando corimbos axilares. La flor está formada por un pedúnculo corto, el cáliz es gamosépalo, es decir, con los sépalos soldados entre si y la corola gamopétala. El androceo tiene cinco o más estambres adheridos a la corola con las anteras que forman un tubo. El gineceo presenta de dos a treinta carpelos que al desarrollarse darán origen a los lóculos o celdas del fruto (Rodríguez *et al.*, 2001).

2.2.5 Frutos

Los Frutos de tomate son bayas carnosas con diferencias en formas (lisa, asurcado, aperado, etc.) e intensidad en coloración, de rojiza o amarillo en caso de ciertas variedades de tomate, con cavidades o lóculos internos variables, en donde se desarrollan las semillas de forma reniforme y aplanadas (COVECA, 2010).

2.2.6 Semillas

Las semillas son de forma lenticular con dimensiones promedio de 5x4x2 milímetros y está constituida por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal. El embrión lo forman una yema apical, dos cotiledones, el hipocótilo y la radícula. La testa o cubierta seminal es el tejido duro e impermeable (COVECA, 2010).

2.3 Parámetros de calidad en tomate

2.3.1 Diámetro polar y ecuatorial

El diámetro polar y ecuatorial es un factor importante, ya que refleja el tamaño y calidad del fruto y entre los valores que contribuyen significativamente al incremento en volumen de los frutos se encuentra los reguladores de crecimiento como las giberelinas, responsables de la expansión celular (García *et al.*, 1997).

2.3.2 Firmeza

La firmeza de frutos de tomate es un parámetro que mide la resistencia de penetración de los tejidos del fruto este es un factor importante ya que la firmeza generalmente está relacionada con la sanidad del fruto, la concentración de azúcares, el pH, el sabor y el aroma del fruto, sobre todo al alcanzar la coloración de consumo. Este carácter se puede evaluar por métodos objetivos, aplicando procedimientos destructivos que miden la resistencia que ofrecen a la penetración de la pulpa, corte o compresión (Kader *et al.*, 1978; Riquelme, 1995). Cantwel (2004) menciona que la mayor resistencia que ha manifestado el tomate es de 1.8 kg.cm^{-1} .

2.3.3 Contenido de sólidos solubles totales (Grados Brix)

Se le conoce como grados brix a las sustancias solubles en agua que reflejan la calidad de sólidos totales que contienen los frutos; un valor mayor o igual a 4.0 en tomate es considerado bueno. Además existe una correlación directa entre sólidos solubles y firmeza, a mayor concentración de éstos es mayor la firmeza. Alemán *et al.*, (2010), reporta un valor ligeramente mayor o igual a 4 °brix en tomate lo cual es considerado como adecuado.

Algunos investigadores han sugerido que la relación de sólidos solubles/acides titulable es importante para definir las diferencias en el sabor entre cultivares de tomate, otros indican que el sabor de los frutos puede ser

mejorado incrementando el contenido total de azúcares y ácidos (Prado, 2002).

2.3.4 Ácido ascórbico (Vitamina C)

El ácido ascórbico es un importante antioxidante hidrosoluble que actúa potenciando el efecto de otros antioxidantes; tal como sucede como el α -tocoferol y el selenio. Sus principales funciones son neutralizar el oxígeno singlete (O_2), capturar radicales hidroxilos y aniones superóxido y regenerar la forma oxidada del α -tocoferol una vez que ha reaccionado con un radical libre (Shekelle *et al.*, 2003).

El tomate tiene altos contenidos de ácido ascórbico la cual desempeña un papel importante en la prevención de enfermedades degenerativas, cáncer, desórdenes neurológicos y de la vista. Es difícil aumentar la cantidad por la elevada influencia que el ambiente tiene en la acumulación de ácido ascórbico en tomate (Galiana-Balaguer *et al.*, 2008).

Otros autores mencionan que el contenido promedio de ácido ascórbico en tomate es de 18.89 mg/100g peso fresco (Galiana-Balaguer *et al.*, 2008).

2.3.5 Glutación Peroxidasa (GSH-Px)

La glutatión peroxidasa es una enzima selenio (Se) dependiente que cataliza la reducción del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) o lipo peróxido (L-OOH),

utilizando como agente reductor el glutatión reducido (GSH). Se conoce que los L-OOH son tóxicos en los tejidos vegetales y que dan lugar a especies reactivas del oxígeno como los radicales peróxido (L-OO), que son compuestos indeseables para los organismos vivos (Maiorino *et al.*, 1991).

La GPx, como parte del mecanismo de defensa antioxidante, evita la oxidación de los L-OOH, reduciéndolos en presencia de GSH, esta reacción produce hidróxidos que son elementos potencialmente dañinos y que al oxidarse se convierten en radicales alcoholóxidos, para los que no se conoce enzima que los metabolice (Maiorino *et al.*, 1991)

Esta enzima desempeña un importante papel en la defensa antioxidante, como parte del sistema antioxidante del glutatión (Lam *et al.*, 1993).

El sistema antioxidante de las plantas incluye un conjunto amplio de compuestos de naturaleza proteínica, entre las que se encuentran las enzimas antioxidantes; así como el ácido ascórbico, el á-tocoferol y el glutatión (González *et al.*, 2000).

2.4 Selenio

2.4.1 Generalidades del selenio

El selenio es un elemento mineral natural, distribuido en la naturaleza en la mayoría de las rocas y suelos; en forma pura existe en forma de cristales hexagonales de color gris metálico a negro, pero en la naturaleza

generalmente esta combinado con sulfuro o con minerales de plata, cobre, plomo y níquel (ATSDR, 2009). Este mineral fue identificado como nuevo elemento químico en 1818 por J. J. Berzelius en Gripsholm, Suecia. Fue aislado del residuo color rojo producido durante la oxidación del dióxido de azufre proveniente de piritas de cobre para la producción de ácido sulfúrico (Terry *et al.*, 2000).

El Se es un elemento químico del grupo 16, encontrándose justo abajo del azufre en la tabla periódica, dándole así propiedades químicas similares a este último elemento (Cruz - Jiménez, 2005), el selenio tiene variedad en sus estados de oxidación como seleniuro (Se^{2-}), selenio elemental (Se^0), selenito (Se^{4+}) y selenato (Se^{6+}). Las formas oxidadas del selenio (Se^{4+} y Se^{6+}) son absorbidas por las plantas debido a su elevada solubilidad, sin embargo el Se^0 y el Se^{2-} son insolubles, por lo cual difícilmente son absorbidas por las plantas (Broadley *et. al.*, 2006).

Fordyce, (2005) señala que en la mayoría de los suelos del mundo las concentraciones de selenio son bajas, alcanzando de 0.01 a 2.0 mg Kg^{-1} y una media de 0.4 mg Kg^{-1} , aunque pueden encontrarse concentraciones de $>1200 \text{ mg Kg}^{-1}$, en suelos denominados seleníferos.

El selenio es un oligoelemento que puede funcionar como un nutriente esencial para los seres humanos, plantas y animales o como un medio tóxico; el límite es muy estrecho y depende de su forma química, la concentración y variables ambientales. Se considera un microelemento

importante, existe en pequeñas cantidades en todos los seres vivos y aunque es un nutriente traza esencial importante para los seres humanos y en la mayoría de los animales como un antioxidante, puede presentar toxicidad, que se produce a altas concentraciones debido a la sustitución de azufre con selenio en los aminoácidos resultantes en el plegamiento incorrecto de las proteínas y enzimas en consecuencia no funcionales (Fan *et al.*, 2002: Shardendu *et al.*, 2003).

2.4.2 Selenio en suelos y su disponibilidad

El selenio (Se) se encuentra ampliamente distribuido entre los materiales de la corteza terrestre aunque de forma poco uniforme (Magos y Berg, 1988). En la mayoría de suelos las concentraciones de Se, varían entre 0.01 y 2 mg Kg⁻¹ (Mayland, 1994), mientras que concentraciones elevadas de Se, se asocian generalmente a suelos formados a partir de materiales sedimentarios de origen marino (Presser, 1994).

La cantidad de selenio en el suelo puede ser clasificada con base en los niveles del mismo encontrados en plantas que no lo acumulan, pero que crecen en dicho suelo, o bien de acuerdo al nivel de selenio en el propio suelo (Davis, 2002). La especie química de selenio en ambientes está determinada por una variedad de factores físicos, químicos y biológicos, los cuales están asociados con cambios en su estado de oxidación (Figura 1).

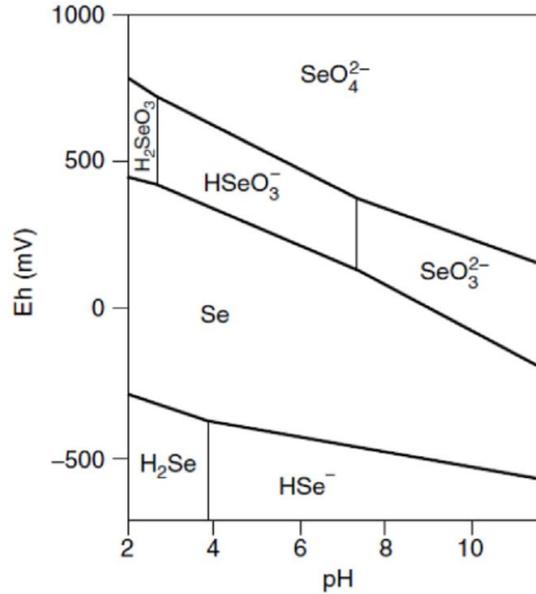


Figura 1. Formas del selenio en función del pH y las condiciones de óxido reducción (Eh) del medio (Combs, 2001).

De manera similar al elemento del azufre, el selenio puede existir en cinco estados de oxidación: 1.-) selenuro (2^-), 2.-) selenio elemental Se(O) , 3.-) thioselenato (2^+), 4.-) selenito (4^+) y 5.-) selenato (6^+) (Reamer y Soller, 1980). Las diferentes formas de selenio determinan su solubilidad y en consecuencia su disponibilidad. Los selenatos (6^+) es la forma más oxidada de selenio, son altamente solubles en agua y es considerada la forma más toxica. Los selenitos (4^+) se encuentran en ambientes oxicos y suboxicos y son menos disponibles para los organismos, en virtud de su alta afinidad por los sitios de absorción de sedimentos y constituyentes del suelo. Bajo condiciones anoxicas el selenio elemental y los selenuros (2^-) son las formas termodinámicamente más estables. El selenio elemental es relativamente insoluble y los selenuros (2^+) precipitan como metales de selenuros (2^-) de

muy baja solubilidad. Los compuestos de selenio orgánico (2^-) tales como la selenometionina y la selenocisteína pueden acumularse en el suelo en forma de sedimentos o mineralizarse a selenio inorgánico. De esta manera, $Se(6^+)$, $Se(4^+)$ y el Se orgánico (2^-) son las formas solubles más importantes en ambientes naturales (Zhang *et al.*, 1999). El selenio también existe en formas volátiles, como los dimetilselenuros ($DMSe$, $(CH_3)_2Se$) y los dimetildiselenuros ($DMDSe$, $(CH_3)_2Se_2$) (Fan *et al.*, 1997).

2.4.3 Selenio en plantas

El selenio no ha sido clasificado como un elemento esencial para las plantas, aunque en el papel se ha considerado que es beneficioso en plantas capaces de acumular grandes cantidades del elemento (Terry *et al.*, 2000). La captación y acumulación de selenio por las plantas es determinado por la forma química y la concentración, los factores del suelo tales como el pH, la salinidad y el contenido de $CaCO_3$, la identidad y la concentración de iones competitivos, y la capacidad de la planta para absorber y metabolizar selenio (Kabata-Pendias y Pendias, 2001), activamente tejidos en crecimiento por lo general contienen las mayores cantidades de selenio (Kahakachchi *et al.*, 2004).

Todas las formas de selenio han sido encontradas en hojas, tallos y raíces de plantas, pero las plantas suelen acumular más selenio en los brotes y hojas que en los tejidos de la raíz (Zayed *et al.*, 1998). Las plantas cultivadas

que crecen en suelos no seleníferos, presentan concentraciones de selenio de 0.01 a 1 mg Kg⁻¹ de peso seco (Marschner, 2002). Debido a que las plantas difieren en su capacidad de acumulación, se le han clasificado en tres grupos; 1) Acumuladoras de selenio, 2) No acumuladoras de selenio, 3) acumuladoras secundarias de selenio. En el primer grupo se encuentran diversas especies de los géneros *Astragalus*, *Stanleya*, *Morinda*, *Neptunia*, *Oonopsis* y *Xylorhiza*; acumulando selenio desde cientos hasta varios miles de miligramos de selenio por kilogramo de peso seco en sus tejidos. En el segundo grupo, se incluyen la mayoría de las especies forrajeras, plantas cultivadas, así como los pastos conteniendo menos de 25 mg Kg⁻¹ de peso seco y no acumulan selenio por arriba del límite de 100 mg Kg⁻¹ de peso seco cuando crecen en suelos seleníferos (Brown y Shrift, 1982). Las especies no acumuladoras contienen altas concentraciones de selenometionina, mientras que las altas acumuladoras contienen cantidades mínimas de selenometionina y grandes cantidades de las formas inorgánicas como selenato y selenito de sodio (Mayland, 1994; Wu, 1998). La tercera categoría de plantas (también llamadas semi acumuladoras) crecen en suelos que contienen niveles medios o altos de selenio y acumulan hasta 1000 mg Kg⁻¹ de peso seco. Recientemente se han identificado especies de *Brassicaceae* de rápido crecimiento como la mostaza india (*Brassica juncea*) y canola (*B. napus*), como nuevas especies acumuladoras secundarias de selenio, con una concentración de algunos cientos de mg Kg⁻¹ Se, de peso seco en tallos, cuando crecen en suelos contaminados con niveles moderados de Se (Bañuelos *et al.*, 1997).

2.4.4 Metabolismo del selenio en las plantas

El selenio es metabolizado en las plantas por la vía de asimilación del azufre y su distribución y acumulación dependerá de la especie química y la concentración del elemento suministrado a las raíces y por vía foliar, así como por vía de la naturaleza y la concentración de otras sustancias en la solución (Terry *et al.*, 2000). Respecto a su forma química, en el corto plazo la mayor parte de selenio tomado como selenato se mantiene en forma inorgánica, mientras que cuando se aplica como selenito se acumula en su forma orgánica (Cartes *et al.*, 2006).

Cantidades mínimas de selenio han incrementado el crecimiento de algunas especies de plantas. Bajas concentraciones de este elemento inhiben la peroxidación de lípidos en *Lolium perenne*, y esta disminución coincide con un mayor crecimiento (Hartikainen *et al.*, 2000).

Las plantas absorben el selenio del agua, suelo o sedimentos y pueden acumularlo en sus tejidos y volatilizarlos. El selenio tomado por las plantas puede ser asimilado como formas inorgánicas (sin sufrir alteraciones), incorporado en proteínas que contienen selenio, siguiendo la ruta metabólica del azufre, pudiendo ser incorporado de manera no específica dentro de compuestos de bajo y alto pesos molecular o formando parte de especies de selenio no proteicas (evitándose así la adición de Se – aminoácidos dentro de las proteínas) (Montes y Bayón *et al.*, 2002).

Los selenatos son tomados por la planta de una manera preferentemente sobre los selenitos y acumulando tanto en raíces como en la parte aérea. En cuanto a la habilidad para inducir la capacidad antioxidante Cartes *et al.* (2005) demostraron que el selenito es un inductor más eficiente de la actividad glutatión Peroxidasa.

2.4.5 Tolerancia de las plantas al selenio

El principal mecanismo de tolerancia al selenio es la reducción de la concentración intracelular de SeCys y SeMet las que de otra manera pueden ser incorporadas dentro de proteínas con efectos perjudiciales en la función de la planta. Un mecanismo alternativo para la exclusión de selenio de las proteínas puede ser mediante la capacidad de los acumuladores de selenio, para discriminar contra la incorporación de los selenoaminoácidos dentro de las proteínas (Burnell y Shrift, 1979).

Otro aspecto relacionado con la tolerancia a selenio, es la capacidad de las plantas para volatilarlo (fitovolatilización). Las tasas de la volatilización varía también considerablemente entre especies; por ejemplo, con un abastecimiento de 10 μM de selenato; arroz, brócoli y calabaza volatilaron entre 200 y 350 $\mu\text{M Se m}^{-2}$ de área foliar por día, comparado con menos de 15 $\mu\text{g Se m}^{-2}$ de área foliar por día en remolacha azucarera, lechuga y cebolla (Terry *et al.*, 1992).

2.4.6 Toxicidad del selenio en las plantas

Cuando las plantas son expuestas a altas concentraciones de selenio presentan diferentes síntomas de daños, como: inhibición de crecimiento, clorosis, hojas blanquecinas y quebradizas, disminución de la síntesis de proteínas y una muerte prematura de la planta (Mengel y Kirkby, 1987).

La cantidad de selenio que pueden absorber las plantas sin que presenten síntomas de toxicidad, varía de manera muy significativa entre plantas acumuladoras de selenio y las no acumuladoras. La concentración crítica de selenio en tejido en plantas no acumuladoras, que resulta en una reducción del 10% en el rendimiento varía en $2 \text{ mg Kg}^{-1} \text{ Se}$, en arroz a $330 \text{ mg Kg}^{-1} \text{ Se}$, en trébol blanco, por otro lado las plantas acumuladoras de selenio pueden presentar concentraciones en exceso de $4.000 \text{ mg Kg}^{-1} \text{ Se}$, sin exhibir cualquier efecto negativo que afecte su crecimiento y desarrollo (Mikkelsen *et al.*, 1989). La tolerancia a selenio puede incrementarse con el aumento en el abastecimiento de sulfatos, con lo cual el umbral en la concentración de selenio puede ser o no siempre la misma (Mikkelsen *et al.*, 1989).

La biodisponibilidad del selenio como un nutrimento o como agente tóxico depende altamente de las especies de Se presentes (Zhang *et al.*, 2001). Selenatos y selenitos son las formas principales en las que el selenio puede ser tóxico para las plantas.

El principal mecanismo por el que una alta acumulación de selenio en planta induce la toxicidad por selenio está asociado con la incorporación de

selenocisteína (SeCys) y selenometionina (SeMet) en las proteínas, en sustitución de cisteína (Cys) y metionina (Met), respectivamente (Brown y Shrift, 1982). Las diferencias en tamaño y propiedades de ionización entre el azufre y el selenio, conducen a alteraciones significativas en la estructura de la proteína. El enlace entre dos átomos de selenio es aproximadamente un séptimo más largo (distante) y un quinto más débil que el enlace disulfuro. De esta manera, la incorporación de la SeCys en lugar de la Cys dentro de la proteína puede interferir en la formación de puentes disulfuro, lo que origina alteraciones en la estructura terciaria de las S-proteínas y en un efecto negativo en su actividad catalítica.

Este elemento induce clorosis, posiblemente a través de un efecto adverso en la producción de porfobilinógenosintetasa, una enzima requerida para la síntesis de clorofila (Padmaja *et al.*, 1989). El selenato y el selenito interfieren con la reducción *in vivo* del nitrato en hojas. El selenato puede interferir con la síntesis de GSH (glutathiona); lo cual puede disminuir las defensas de la planta contra radicales hidroxilos y el estrés oxidativo (De Kok y Kuiper, 1986).

2.4.7 Selenio y salud humana

La importancia biológica se puso en evidencia; primero como un tóxico y después como un nutrimento indispensable en la dieta de animales y humanos. Marco Polo describió signos de intoxicación por selenio en los

animales de carga en su trayecto por China Occidental en el siglo XIII, ya que se dio cuenta que la ingestión de algunas plantas de la zona les hacía cojear y perder las pezuñas (Oldfield, 1995). En seres humanos, fue el padre Pedro Simón en 1560 quien informó sobre pérdida de pelo y uñas en personas que vivían en cierta región de Colombia, la que ahora se sabe tiene un suelo muy rico en selenio (National Academies Press, 1983).

El selenio es de fundamental importancia para la salud humana como un componente de selenoproteínas, que desempeñan funciones estructurales y enzimáticas (Combs, 2001; Rayman, 2002). Entre las más conocidas están la de antioxidante (Combs, 2001) y catalizador para la producción de la hormona tiroidea activa (Thomson *et al.*, 2005). Existe evidencia creciente de que la deficiencia de selenio puede causar efectos adversos a la salud y además que su aumento como componente nutricional puede otorgar protección adicional contra las enfermedades (Diplock, 1993; Combs, 2001). Las selenoproteínas están involucradas en muchos aspectos del metabolismo celular, entre otros la enzima glutatión peroxidasa (GPX) contiene como componente fundamental al selenio y es esencial para proteger a las células y tejidos del daño autooxidativo debido a la producción de radicales libres (Arthur, 2003). Por otra parte, la deficiencia del selenio tiene un efecto adverso sobre la inmunocompetencia, existiendo evidencia de que la suplementación con selenio mejora la respuesta inmune en humanos y que este elemento es un nutriente clave en la lucha contra determinadas infecciones virales como la influenza y VIH-SIDA (Jackson *et al.*, 2004)

La deficiencia de selenio está asociada con estados de ánimo negativos. Igualmente cada vez hay más evidencias de que niveles de ingesta de selenio superiores a 300 µg por persona (Combs, 2001) se encuentran asociados con la reducción de riesgo de cáncer (Whanger, 2004; Jackson *et al.*, 2004; Rayman, 2005; ATSDR, 2009), específicamente en el de hígado, próstata, colo-rectal y de pulmón (Rayman, 2005), así como la disminución de la incidencia de enfermedades cardiovasculares (Céspedes y Cabrera, 2000), disminución del estrés oxidativo, aumento de la fertilidad y de la función inmune (Broadley *et al.*, 2006).

2.5 Antioxidantes

2.5.1 Generalidades de los antioxidantes en el cuerpo humano

Los antioxidantes son agentes reductores que pueden reaccionar fácilmente con las sustancias oxidantes y por eso protegen de la oxidación a las moléculas más importantes, entre los antioxidantes biológicos figuran el ácido ascórbico y el α -tocoferol, la coenzima Q, y algunos carotenoides. La bilirrubina formada por la degradación del hemo, también protege contra la degradación. De especial importancia es el glutatión, un tripéptido que existe en altas concentraciones en casi todas las células, el glutatión tiene un enlace peptídico y atípico entre Glu y Cis. El grupo tiólico del residuo de cisteína tiene actividad redox y cuando se oxidan dos moléculas de la forma

reducida (GSH) se enlazan y forman el disulfuro (GSSG) (Koolman *et al.*, 2004).

Las células poseen antioxidantes para protegerse de las ROS (Especies Reactivas del Oxígeno) y de otros radicales. En la última década se han acumulado evidencias que permiten afirmar que los radicales libres y el conjunto de especies reactivas que se les asocian juegan un papel central en el equilibrio homeostático del cuerpo humano. Las reacciones químicas de los radicales libres se dan constantemente en las células del cuerpo humano y son necesarias para la salud, pero el proceso debe ser controlado con una adecuada protección antioxidante (Avello y Suwalsky., 2006).

Entre los antioxidantes que se ingieren por la dieta destacan las vitaminas y los compuestos fenólicos que por diversos mecanismos neutralizan especies de radicales. Estas especies pueden encontrarse en el plasma sanguíneo, el que puede estabilizar especies reactivas del oxígeno, previniendo reacciones que pueden generar especies aún más nocivas. Es de especial importancia su consumo moderado a través de la dieta y evitar los factores de riesgo que inducen reacciones oxidativas en el organismo del cuerpo humano (Avello y Suwalsky, 2006).

2.5.2 Generalidades de los antioxidantes en las plantas

Los antioxidantes son compuestos que permiten la vida celular en un ambiente oxidante y son los responsables de la eliminación de los radicales

libres los cuales se producen, de manera natural, en los sitios de actividad energética celular; la función química de los antioxidantes es ceder potencial reductor a los compuestos oxidantes capaces de dañar a los componentes celulares (Benavides *et al.*, 2009). Los organismos poseen numerosos sistemas de defensa antioxidantes regulables, enzimáticos (superóxido dismutasa, catalasa, GSH peroxidasa, quinona reductasa y hemoxigenasa) y no enzimáticos (selenio, zinc, ácido ascórbico, α -tocoferol y carotenoides) que son los encargados de evitar estos factores (Murillo *et al.*, 2007). Estas defensas de respuesta; se desencadenan por factores bióticos tales como patógenos, plagas y simbiontes o por factores abióticos como alta o baja temperatura, radiación, salinidad entre otros y no necesariamente en condiciones que originan estrés (Benavides *et al.*, 2009).

En las plantas una de las más rápidas reacciones de defensa al ataque por patógenos es la llamada explosión oxidativa, la cual constituye la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), principalmente $\cdot O^2$ y H_2O_2 en el sitio de invasión y para la eliminación del exceso de estas ROS, la planta ha diseñado estrategias dependiendo del sitio donde se encuentren, existiendo dos mecanismos de acción; enzimáticos y no enzimáticos (Miranda y Castro, 2009).

El papel del selenio como un antioxidante en pastos sugiere que la adición al suelo puede mejorar la calidad del forraje, por la disminución de la senescencia y persistencia de la pastura (Cartes *et al.*, 2005). Estudios realizados indican que este elemento se asocia a cambios en el estado redox

celular, esto a su vez se relaciona con la habilidad de las plantas a tolerar el estrés ambiental. El selenio es un constituyente esencial de un número de enzimas, algunos de los cuales tienen funciones antioxidantes (Raymond, 2002). Recientemente se ha demostrado que el selenio aumenta la capacidad antioxidante y la tolerancia al estrés en plantas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) y plantas de ballico (*Lolium perenne L.*) además en un estudio realizado aplicando selenio en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*), los resultados sugirieron que el Se es un antioxidante o que activa los mecanismos de protección, que pueden curar el estrés oxidativo en los cloroplastos (Seppanen *et al.*, 2003).

2.5.3 Importancia del potencial antioxidante en el ser humano

La mayor parte de las principales enfermedades que provocan la muerte de las personas o deterioran su calidad de vida están asociadas a los radicales libres, cada célula del cuerpo padece unos 10 000 impactos de radicales libres al día (Youngson, 2004).

Estudios epidemiológicos han sugerido que el consumo de tomate y de productos derivados del mismo reducen en riesgo de contraer enfermedades crónicas, tales como las cardiovasculares y el cáncer (Sesso *et al.*, 2003).

El tomate es un fruto rico en ácido ascórbico, α -tocoferol, Beta-carotenos, licopeno y otros antioxidantes. El ser humano está protegido del estrés

oxidativo gracias a la acción de estas sustancias antioxidantes que poseen diferentes funciones (Shi *et al.*, 2001)

En España se hizo un estudio de fuentes de ácido ascórbico, α -tocoferol y carotenoides específicos. Establecieron que el fruto de tomate es el principal en aportes de licopeno (71.6%) el segundo en fuente de ácido ascórbico (12%) y beta-carotenos (17.2%) y el tercero como fuente de α -tocoferol (6%). Sin embargo factores varietales y medioambientales pueden iniciar cambios desfavorables en la composición química. La variación de las condiciones climáticas entre las diferentes estaciones podría influir significativamente en los perfiles de composición en el tomate (Raffo *et al.*, 2006).

2.5.4 Importancia del ácido ascórbico (Vitamina C)

La vitamina C está presente en las frutas y verduras en forma de ácido ascórbico y ácido dehidroascórbico (Johnson, 2001).

Se ha demostrado que el ácido ascórbico es un aceptor de radicales muy efectivo frente al superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogeno (H_2O_2), hipoclorito (ClO), radicales hidroxilo (OH^-) (Yanishlieva y Maslarova, 2001).

El ácido ascórbico es un inhibidor de la oxidación de lípidos, regenera α -tocoferol y ofrece protección a todo tipo de cáncer; es un elemento indispensable en los procesos metabólicos del cuerpo humano; protege a las células del cerebro y medula espinal, ayuda al desarrollo de dientes y encías,

huesos, crecimiento, reparación del tejido conectivo normal, absorción de hierro, producción de colágeno, metabolización de grasas y cicatrización de heridas (Johnson, 2001).

En las plantas el ascorbato es el antioxidante cuantitativamente predominante en las células vegetales, se encuentra en todos los compartimentos subcelulares, incluido el apoplasto, en concentraciones que oscilan entre 2-25 mM. El ascorbato es oxidado por el oxígeno, el anión super óxido, el oxígeno singulete y el peróxido de hidrogeno para dar lugar al radical monodehidroascorbato, el cual se desproporciona en ascorbato o dehidroascorbato (Smirnoff, 2000).

Desempeña en las plantas un papel fundamental en la foto protección y la regulación de la fotosíntesis y preserva las actividades de enzimas que tienen iones metálicos de transición (Cu^{2+} , Fe^{2+}) como grupo prostético. El ascorbato es también un poderoso antioxidante secundario, ya que reduce la forma oxidada del α -tocoferol. Adicionalmente, es el reductor utilizado para la hidroxilación de residuos de prolina de la extensina, una proteína de la pared celular. También está implicado en la elongación de la raíz, el funcionamiento de los estomas y desempeña una función crítica asociada a los mecanismos a través de los cuales las plantas sensan los cambios medio ambientales y responden a ellos (Noctor y Foyer, 1998; Foyer y Noctor, 2005).

2.5.5 Importancia de la Glutación Peroxidasa (GSH-Px)

La glutación peroxidasa GSH-Px es una enzima selenio dependiente que desempeña un papel central en los procesos de oxido-reducción celulares, al catalizar las reacciones que ayudan a reducción del peróxido de hidrogeno (H_2O_2) a agua y alcohol, así como a los peróxidos de ácidos grasos (Hidroperóxidos orgánicos) utilizando como agente reductor al glutación reducido GSH. Los peróxidos son reducidos mediante la reacción general catalizada por la glutación peroxidasa (GSH-Px), en la cual el glutación reducido (GSH) actúa como donante de hidrogeno, subsecuente en la reacción el glutación oxidado se reduce de nuevo, es decir, es regenerado por reacciones posteriores, mediante una reacción en la que participan la glutación reductasa y un donante de hidrogeno ($NADPH+H^+$) (Mass, 1990) (Figura 2).

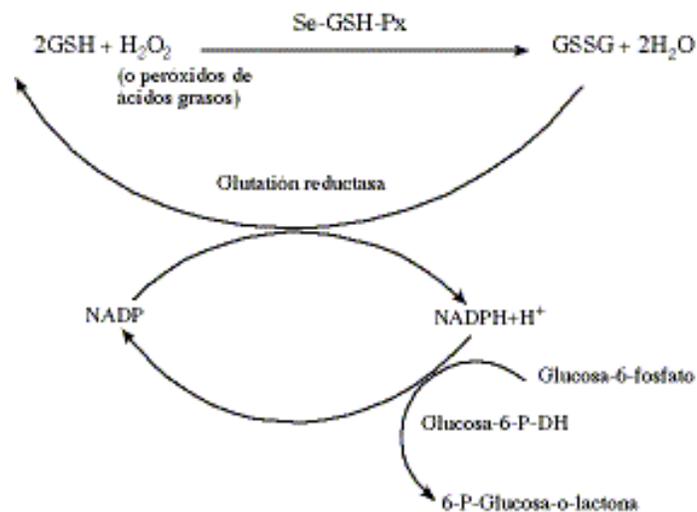


Figura 2. Reacciones en las que participa la glutación peroxidasa (GSH-Px).

Lo que comúnmente se le conoce como glutatión es el glutatión reducido (GSH). Este tripéptido que existe abundantemente en los cloroplastos es sintetizado en dos pasos, catalizados por la glutamilcisteína sintetasa (ECS) y la glutatión sintetasa, siendo el primero de ellos, el paso limitante de su biosíntesis en plantas (Ogawa, 2005). El glutatión se caracteriza por ser el compuesto tiólico no proteico y presenta una alta capacidad de donar electrones, el 90 % del glutatión se encuentra normalmente en su estado reducido. El glutatión oxidado puede de nuevo ser reducido a GSH por acción de la glutatión reductasa que utiliza NADPH como poder reductor (Li *et al.*, 2004).

Se ha encontrado que el glutatión está involucrado en diferentes procesos en las plantas, entre los que destacan la diferenciación, la muerte celular programada, la senescencia, la regulación del ciclo celular, la floración, la acumulación de pigmentos y la destoxificación de xenobióticos y metales pesados. Recientemente se le ha asignado un papel como regulador de crecimiento y como inductor de genes de defensa (Ogawa, 2005).

2.6 Reacciones Redox

Las reacciones redox son transformaciones en los cuales los elementos participantes intercambian electrones. Como en las reacciones ácido – base, en las reacciones redox siempre participan pares de compuestos, los que en conjunto se denominan sistema redox. Los dos componentes del sistema se

diferencian por el número de electrones que contienen y según el compuesto el componente más rico en electrones es la forma reducida y el compuesto más pobre en electrones es la forma oxidada. El compuesto reducido de un sistema (agente reductor) transfiere electrones a la forma oxidada (agente oxidante), con lo cual el primer compuesto se oxida y el segundo compuesto se reduce. Un sistema reductor determinado solo puede reducir algunos sistemas, de modo que todos los sistemas redox se pueden ordenar en las llamadas series redox (Koolman *et al.*, 2004).

El lugar que ocupa un sistema en la serie, se define por su potencial redox. El potencial redox E tiene una característica; puede ser más negativo o más positivo que un potencial de referencia definido arbitrariamente como igual a cero, además, E depende de las concentraciones de los reactantes y de las condiciones de la reacción, en las series redox los sistemas están ordenados según un potencial creciente. Las transferencias espontáneas de electrones solo son posibles cuando el potencial redox del donador es más negativo que el aceptor (Koolman *et al.*, 2004).

III MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización del experimento

El presente trabajo se llevó a cabo en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México durante la temporada agrícola del año 2013 en un invernadero del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. El cuál se encuentra localizado a una altura de 1743 msnm, entre los 25° 24´ de latitud norte y 100° 02´ de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

3.2 Material vegetal

Se utilizó como material experimental para la producción de plantas, semillas de tomate saladette (*Lycopersicon esculentum* L. Mill) de la variedad “Toro” de crecimiento determinado, obtenidas comercialmente (Hydro Environment, Tlalnepantla, Estado de México).

3.3 Preparación del área de invernadero

Se acondicionó el área donde se asentó la unidad experimental, implementándose actividades como; limpieza, nivelación del terreno, montaje

del sistema de tutoreo con cable de acero galvanizado e instalación de plástico negro calibre 200 como cubierta en el suelo.

Se utilizaron 100 macetas de plástico con capacidad de 20 litros, mismas que fueron rellenas con sustrato utilizando una mezcla de peat moss y perlita en una proporción 70:30 respectivamente.

El sistema de riego colocado consistió en manguera de 16 mm de ancho con 6 m de largo y perforaciones cada 30 cm de distancia, donde se inserto tubin y goteros para hacer llegar la solución nutritiva a las plantas. Se conto con tres bombas (AQUA, modelo 4221) con capacidad de 3500 L h⁻¹ y estas a la vez sumergidas en los toneles con capacidad de 200 L preparados con los tratamientos a aplicar.

Se realizaron pruebas previas de riego con el propósito de obtener el dato de gasto de solución por segundo y tomar una decisión de cuantos riegos se debería de aplicar al cultivo por día.

3.4 Siembra

La siembra de la semilla de tomate se realizó en el mes de abril de 2013 en charolas de poliestireno de 200 cavidades, monitoreando el crecimiento y el respectivo cuidado de la plántula durante un periodo de 30 a 40 días.

3.5 Trasplante

Previo al trasplante se seleccionaron las plántulas más uniformes en tamaño y desarrollo, se sumergió el cepellón en una solución enraizadora y se trasplantaron en las macetas de 20 L conteniendo la mezcla de sustrato peat moss y perlita en una proporción 70:30 respectivamente. El trasplante se realizó a los 35 días después de la siembra.

3.6 Manejo del cultivo

La nutrición del cultivo se llevó a cabo mediante la aplicación de la solución nutritiva universal Steiner (1961), a un valor de pH de 5.5 a 6.5, ajustando el pH con ácido fosfórico, con el objetivo de asegurar la disponibilidad de los elementos minerales en la solución nutritiva y mantener el ión selenito en su forma protonada. La concentración de la solución nutritiva se aplicó acorde a la etapa fenológica del cultivo.

Se llevó a cabo un control de plagas y enfermedades mediante aplicaciones preventivas de productos fitosanitarios.

El selenio se aplicó en forma de Selenito de Sodio (Na_2SeO_3) 99 % de pureza, (SIGMA ALDRICH). Los tratamientos aplicados se pueden observar en el cuadro 1.

Cuadro 1. Tratamientos aplicados en el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Mill) variedad Toro.

Tratamientos			
T1	Solución Steiner	+	0 mg L ⁻¹ de selenio
T2	Solución Steiner	+	2 mg L ⁻¹ de selenio
T3	Solución Steiner	+	5 mg L ⁻¹ de selenio

3.7 Nutrición del cultivo

La nutrición del cultivo se aplicó en el agua de riego en base a la solución universal Steiner. (Cuadro 2).

Cuadro 2. Requerimientos de fertilizantes para 200 L de agua de acuerdo con Steiner (1961).

Solución Steiner				
Macronutrientes	25%	50%	70%	100%
	(g)	(g)	(g)	(g)
Ca (NO ₃) ₂	53.5	107.0	149.8	214.0
KNO ₃	15.3	30.5	42.7	61.0
NaH ₂ PO ₄ ·H ₂ O	6.9	13.7	19.8	27.4
MgSO ₄ ·7H ₂ O	24.6	49.2	68.9	98.4
K ₂ SO ₄	17.6	35.2	49.3	70.4

Solución Steiner				
Micronutrientes	25%	50%	70%	100%
	(mg)	(mg)	(mg)	(mg)
H₃BO₃	141	282	395	564
MnSO₄·H₂O	108	215	301	430
ZnSO₄·7H₂O	20	40	55	79
CuSO₄·5H₂O	4	8	11	16
H₂MoO₄ (85%)	40	80	112	160
Fe quelatado	2500	5000	7000	10000

Se aplicó solución nutritiva desde el momento del trasplante por un periodo de 14 días a razón de 600 mL de solución diarios por maceta, esto con la finalidad de que las plantas se aclimataran y emitieran raíces.

A los 15 días después del trasplante, se iniciaron los tratamientos al aplicar el selenio adicionado en la solución nutritiva. Para el tratamiento 1 (T1) se aplicó solo SN (Solución nutritiva), para el tratamiento 2 (T2) se aplicó SN + 2 mg L⁻¹ de selenio (Na₂SeO₃) y para el tratamiento 3 (T3) se aplicó SN + 5 mg L⁻¹ de selenio (Na₂SeO₃) (Cuadro 1).

Los riegos aplicados a lo largo del experimento estuvieron en función de la demanda de agua del cultivo por etapa fenológica y considerando los factores climáticos presentados durante el experimento.

3.8 Análisis estadístico

En esta investigación, el diseño experimental utilizado fue completamente al azar con tres repeticiones.

Una vez tomados los datos de las variables evaluadas en el experimento, se procedió al ordenamiento de datos y se realizó un análisis de varianza y prueba de medias de Tukey, por medio del paquete estadístico Statistical Analysis System, versión 9.0 (SAS, 2002).

3.9 Variables evaluadas

3.9.1 Calidad de fruto

3.9.1.1 Peso de fruto

Se procedió a la cosecha de las muestras con madurez fisiológica en base al color del fruto usando como referencia la escala de Heuvelink (2005), posteriormente se pesaron cada una de las muestras, evaluando 27 réplicas para cada tratamiento, en una balanza analítica (Ohaus, modelo PA214), reportando el peso en gramos.

3.9.1.2 Diámetro polar y ecuatorial de fruto

De los frutos cosechados se midió el diámetro polar y ecuatorial con un vernier digital (Autotec, modelo Caliper digital 150mm), evaluando 27 réplicas

para cada tratamiento, reportando los valores de los diámetros en centímetros.

3.9.1.3 Firmeza

Se obtuvieron las muestras de los frutos con madurez fisiológica en base al color del fruto, usando como referencia la escala Heuvelink (2005), evaluando 27 réplicas para cada tratamiento. Se procedió a la medición de la firmeza con un penetrometro manual (McCormick, modelo F327), se tomo firmemente el fruto y se introdujo el penetrometro de un solo impulso hasta la marca delimitante de la puntilla de 8mm, se tomo la lectura y se reporto en Kg.cm^{-1} .

3.9.1.4 Sólidos solubles totales (Grados brix)

Se recolectaron las muestras de frutos con madurez fisiológica en base al color del fruto, usando como referencia la escala Heuvelink (2005), evaluando 27 réplicas para cada tratamiento. Se procedió a perforar cuidadosamente el fruto para obtener una gota de jugo el cual se colocó en refractómetro manual (Brixco, modelo 3090) 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 grados Brix.

3.9.1.5 Contenido de macro y micronutrientes

Se cosecharon frutos con madurez fisiológica en base al color del fruto, usando como referencia la escala Heuvelink (2005), evaluando 6 réplicas por cada tratamiento para realizar esta prueba, las muestras de tomate fresco se cortaron en rodajas, se colocaron en placas de aluminio y se disecaron colocándolos en una estufa de secado (Linderberg/Blue, modelo 601350C-1) por 48 horas, una vez obtenido el material vegetal disecado se macero en un mortero de porcelana, realizándose esta práctica con precaución para no contaminar las muestras de los diferentes tratamientos, se etiquetaron y guardaron en frascos de policarbonato (50mL).

Posteriormente se realizó una digestión ácida que constó de preparar primero una mezcla digestora; ácido nítrico (HNO_3) y ácido perclórico (HClO_4) en una proporción 3:1 respectivamente. Se pesó un gramo de la muestra en una balanza analítica (Ohaus, modelo PA214) y se colocó en un vaso de precipitado con capacidad de 50 mL, agregándole 40 mL de la mezcla digestora, las muestras se colocaron en una parrilla eléctrica a una temperatura de 100 °C, se aprecia el desprendimiento de humo del ácido sulfúrico, este procedimiento se llevó a cabo bajo una campana extractora, pasados los minutos se visualiza la muestra de color transparente, dejando un volumen final de 20 mL de la solución. Se sustrajo el vaso de precipitado de la parrilla dejándose enfriar, posteriormente se agregó agua des ionizada al vaso de precipitado para filtrarse a un matraz volumétrico con capacidad

de 100 mL con la ayuda de un papel filtro (Whatman) sin cenizas (Número 40). Se aforo la muestra de trabajo a 100 mL con agua des ionizada.

Las lecturas de los nutrientes cuantificados fueron (K, Ca, Mg, Fe, Zn). Se realizó la medición utilizando un equipo de absorción atómica, siguiendo el procedimiento de la AOAC (1980), con el espectrofotómetro UV-visible (Varian, modelo Series AA-1275). La lectura de selenio se realizó utilizando un espectrómetro de Inducción de Plasma (ICP THERMO JARELL ASH, Modelo IRIS Advantage), siguiendo el procedimiento 984.27 de la AOAC (2000).

El nitrógeno fue cuantificado por el método de Kjeldahl (AOAC, 1980). Para realizar esta prueba se desarrollaron tres pasos;

Digestión: Se pesaron 0.05 mg de fruto seco, previamente macerado en un matraz bola cuidando que la muestra no se pegara a las paredes del matraz, posteriormente se añadieron 4 mL de la mezcla digestora y se sometió la muestra a una digestión en el aparato de micro destilador Kjeldahl bajo una campana de extracción, la digestión se terminaba al tornarse la muestra en un color azul-verde claro.

Destilación: Se prendió el micro destilador, ajustando la velocidad de destilación a 5 mL por minuto, al mismo tiempo que se abre la llave de agua para tener H₂O circulando por el refrigerante. Se agregó la muestra a la cámara de ebullición por medio de un embudo, colocando un frasco Erlenmeyer con 30 mL de ácido bórico y dos gotas de indicador bajo la

salida de destilación, se añadieron 10 mL de la solución de NaOH a la cámara de ebullición lentamente. La prueba exige recuperar 60 mL de destilado lista para titular.

Titulación: El destilado se tituló con H_2SO_4 (0.025 N) finalizando hasta que la muestra se tornara en un color violeta, comparando cada muestra con el blanco de la prueba. Se finalizó con los cálculos; cada equivalente del H_2SO_4 usado corresponde a un equivalente de NH_3 o a un equivalente de N en la muestra original. El peso del N en mg está dado por miliequivalentes del ácido x 14 (el peso equivalente del N).

El fósforo se cuantificó por el método de colorimétrico del reactivo ácido aminonaftol sulfónico ANSA (Harris and Popat, 1954).

Para realizar la cuantificación del elemento fósforo 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 micro pipeta de la solución de ceniza que contenía 0.01 mg – 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 (Varian, modelo Series AA-1275), después de 20 minutos, previamente se ajustó el aparato a 100% de transmitancia y cero de absorbancia, 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 (Cuadro 3) y se ajustó este valor con la cantidad de muestra que se pesó.

Cuadro 3. Valores promedio para la curva estándar de fósforo.

ppm de Fósforo	Absorbancia	Ecuación
0	0	$y = 0.0084x - 0.002$
20	0.161	
40	0.335	
60	0.513	
80	0.667	
100	0.841	

3.9.2 Actividad Antioxidante

3.9.2.1 Ácido ascórbico (Vitamina C)

Para realizar la medición de ácido ascórbico (vitamina c) se procedió a obtener las muestras con madurez fisiológica en base al color del fruto, usando como referencia la escala Heuvelink (2005), evaluando 6 réplicas por cada tratamiento, se colocaron dentro de en bolsas de papel estraza y se trasladaron a laboratorio, se pesaron 10 gramos de las muestras frescas en una balanza analítica (Ohaus, modelo PA2214), las muestras se trituraron y

se depositaron en un mortero de porcelana, posteriormente se añadieron 10 mL de ácido clorhídrico al 2%, y se maceró por 10 minutos, el contenido del mortero se depositó sobre un embudo de filtración, se lavó el mortero tres veces con agua destilada, hasta que se retiró todo el sólido adherido a la paredes, el líquido filtrado se depositó dentro de un matraz volumétrico de 100 mL, y se continuo lavando el sólido hasta que se completó 100 mL con agua destilada. Se midió 10 mL de extracto de ácido ascórbico y se depositó en un matraz erlenmeyer de 125 mL, se tituló con solución de 2,6 diclorofenolindofenol (0.001N), hasta que apareció el primer tono rosa que persistió 30 segundos. Se repitió el proceso con un blanco (agua destilada). Reportando los resultados obtenidos en $\text{mg.AA}10\text{g}^{-1}$ (AOAC 1990).

3.9.2.2 Actividad enzimática Glutación Peroxidasa (GSH-Px)

La actividad de la enzima Glutación Peroxidasa se cuantificó por el método de Xue *et al.* (2001) modificado. Para realizar la medición de esta actividad enzimática se recolectaron muestras de frutos frescos recién cortados con madurez fisiológica en base al color del fruto, usando como referencia la escala Heuvelink (2005), evaluando 6 réplicas por cada tratamiento, después se colocó una muestra en un mortero donde se le agrego nitrógeno líquido para evitar su oxidación y se macero, se etiqueto y se almacenó el material vegetal. Posterior se realizaron extractos de tejido, para esto se tomaron 300 mg de tejido de fruto previamente macerados que se colocaron en un tubo

Eppendorf agregándole 1.5 mL de Buffer de Fosfatos (Fosfatos 0,1 M, pH 7), las muestras se llevaron a un sonicador (Bransonic, modelo 1510R–DTH) por un tiempo de 10 minutos, en seguida las muestras se colocaron en una centrifuga para obtener un sobrenadante del extracto, una vez obtenidas se guardaron en un ultra congelador (Sanyo, modelo ultralow).

Del sobrenadante se tomó una cantidad de 0.2 mL y se colocó en un tubo Eppendorf 1.5 mL, se adicionaron 0.4 mL de GSH (0.1 mM) y 0.2 mL de buffer de sodio y potasio (0.067 M). Después de pre-calentamiento de las mezclas en baño de agua a 25 °C durante 5 min, se añadieron 0.2 mL de H₂O₂ (1.3 mM) para iniciar la reacción. La reacción se mantuvo 10 minutos y fue detenida añadiendo 1 mL 1% de ácido tricloro acético, la mezcla se colocó en baño de hielo por 30 min y enseguida fue centrifugada por 10 minutos a 3000 rpm. Se tomaron 0.48 mL del sobrenadante y se colocaron dentro de una cubeta adicionando 2.2 mL Na₂HPO₄ (0.32 M) y 0.32 mL de 1.0 mM 5,5-ditio-bis (2-ácido nitrobenzoico) (DTNB) para el desarrollo del color. Se midió la absorbancia a una longitud de onda de 412 nm con un espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific Genesys 10S en 5 minutos de reposo. Se obtuvo una curva estándar con la enzima pura obtenida comercialmente del kit Glutathione Peroxidase (GPx, Assay Science cell research laboratories). Una Unidad de glutati6n peroxidasa se define como 1 mU de GSH-Px mL⁻¹ min⁻¹.

3.9.2.3 Potencial oxido reducción (ORP)

La tendencia a reducir u oxidar a otros elementos químicos se cuantifica por el potencial de reducción, también llamado potencial redox.

Para realizar esta prueba se recolectaron los frutos con madurez fisiológica en base al color del fruto, usando como referencia la escala Heuvelink (2005), evaluando 6 réplicas por cada tratamiento, se pesaron las muestras en una balanza analítica (Ohaus, modelo PA214), en seguida se preparó la solución Buffer de Fosfatos (Fosfatos 0,1 M, pH 7) que consta de dos soluciones; 1) Solución A (NaH_2PO_4 0,2 M): se disolvieron 27.6 g de $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en agua destilada, llevando el volumen final a 1 litro. 2) Solución B (Na_2HPO_4 0,2 M): se disolvieron 53.65 g de $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ en agua destilada, llevando el volumen final a 1 litro. Tomándose 195 mL de la solución A, 305 mL de la solución B y 500 mL de agua destilada.

En seguida se colocó la muestra en un mortero, agregándole 10mL de buffer de fosfatos preparado para macerar el fruto obteniendo un concentrado o jugo, se llevó la muestra al lector ORP donde se colocó el electrodo en el concentrado esperando a que la medición se estabilizara, se reportaron las lecturas en mV, se lavó el electrodo con agua desionizada y se secó repitiendo la operación para todas las muestras de los tratamientos.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Peso de fruto

El análisis de varianza aplicado a la variable de peso de fruto no mostró diferencias significativas entre los tratamientos, indicando que esta variable no fue afectada por las concentraciones de selenio utilizadas en este trabajo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Peso de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Tratamiento	Peso promedio de fruto (g)
Testigo	124.17 a
2 mg L ⁻¹ Se	128.10 a
5 mg L ⁻¹ Se	126.89 a

Medias con letras iguales no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$)

El tomate está clasificado como una especie no acumuladora de selenio (White *et al.*, 2004) por lo que se espera que más de 10 mg Se kg⁻¹ de suelo causen disminución en su crecimiento y metabolismo (Hartikainen *et al.*, 2000). En contraparte en especies sensibles a la concentración de selenio, como lechuga (*Lactuca sativa*), ocurre un incremento en la biomasa con 0.1

mg Se Kg⁻¹ de suelo, pero se llega a un efecto negativo con 1 mg Se Kg⁻¹ de suelo (Xue *et al.*, 2001).

En algunos estudios realizados en plantas rizomatas, la fertilización no mejoró significativamente la producción de biomasa en el primer año, pero sí lo hizo en los años siguientes, si los fertilizantes se aplicaron en varias ocasiones (Shaver, 1981; Koerselman y Meuleman, 1994). Estudios en raigrás (*Lolium perenne*) y lechuga (*Lactuca sativa*) muestran que el selenio a pesar de ser perjudicial para las plantas a altas concentraciones ≥ 10 mg Se kg⁻¹ de suelo y ≥ 1 mg Se kg⁻¹ de suelo, respectivamente (reducción de biomasa), puede ejercer un efecto benéfico a bajas concentraciones (Hartikainen *et al.*, 2000; Xue *et al.*, 2001). El selenio también ha demostrado promover el crecimiento de plantas sometidas a estrés oxidativo inducido por UV (Xue y Hartikainen, 2000) y mayor biomasa en condiciones de radiación ambiental en calabazas (*Cucurbita pepo*) a una concentración de 1.5 mg Se kg⁻¹ de suelo (Germ *et al.*, 2005).

4.2 Diámetro polar y diámetro ecuatorial de fruto

Los resultados para esta variable analizada (diámetro polar), no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, se observa una tendencia muy similar entre tratamientos. El diámetro ecuatorial tampoco se vio afectado o favorecido por algún tratamiento en específico, manifestando

valores promedio dentro de los parámetros normales para todos los tratamientos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Diámetro polar y ecuatorial de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Tratamiento	Diámetro polar (cm)	Diámetro ecuatorial (cm)
Testigo	6.33 a	5.91 a
2 mg L ⁻¹ Se	6.38 a	5.96 a
5 mg L ⁻¹ Se	6.24 a	5.93 a

Medias con letras iguales no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Se refiere a estos parámetros (diámetro polar y ecuatorial) como un factor importante, ya que reflejan el tamaño y la calidad del fruto, y propiamente los factores que contribuyen significativamente al incremento en el volumen de los frutos, son los reguladores de crecimiento responsables de la expansión celular (García *et al.*, 1997).

4.3 Firmeza

En el cuadro 6 se muestran los resultados para esta variable, en ellos se encontraron diferencias significativas para los tres tratamientos. Se muestra el efecto de los tratamientos, siendo mayor la firmeza del fruto cuando se aplicó 5 mg L⁻¹ de Se, seguido de 2 mg L⁻¹ de Se, distintos al testigo.

Cuadro 6. Firmeza del fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Tratamiento	Firmeza (kg.cm ⁻¹)
Testigo	2.91 c
2 mg L ⁻¹ Se	4.29 b
5 mg L ⁻¹ Se	4.53 a

Medias con letras iguales no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Cantwel, (2004) menciona que la mayor resistencia que ha manifestado el fruto de tomate es de 1.8 Kg.cm⁻¹, por lo que los valores de los tratamientos del presente trabajo se encuentran en un rango muy superior a lo normal, esto puede deberse a la adición de selenito de sodio (Na₂SeO₃) al cultivo.

Algunos autores sugieren la relación directa entre el contenido de sólidos solubles totales y la firmeza del fruto, a mayor concentración de éstos mayor es la firmeza (Prado, 2002).

La firmeza de los frutos está determinada por varios compuestos que integran la pared celular, entre los que destacan los pectatos de calcio y magnesio (Fry *et al.*, 1992; Salisbury y Ross, 1994). En el presente trabajo las aplicaciones de selenio, aunque sin diferencias estadísticamente significativas mostraron un ligero incremento en las concentraciones de los elementos calcio y magnesio, al adicionar 2 mg L⁻¹ Se. El calcio mejora dicho

parámetro de calidad (firmeza) al proporcionar mayor rigidez a la pared celular del fruto (Cooper y Bangerth, 1976; Marschner, 1995).

4.4 Sólidos solubles totales (Grados Brix)

Los resultados de sólidos solubles totales (Grados brix) mostraron diferencias significativas entre tratamientos, siendo estadísticamente 2 mg L⁻¹ y 5 mg L⁻¹ Se iguales, pero diferentes con referencia al testigo. En los tratamientos aplicados se encontraron valores superiores al testigo, por consecuente la dosis de selenito de sodio (Na₂SeO₃) aplicada en este trabajo afectó estadísticamente el contenido de sólidos solubles totales (Grados brix) de manera positiva (Cuadro 7).

Cuadro 7. Contenido de sólidos solubles totales (Grados brix) en frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Tratamiento	Sólidos Solubles Totales (% Brix)
Testigo	4.29 b
2 mg L ⁻¹ Se	5.07 a
5 mg L ⁻¹ Se	4.86 a

Medias con letras iguales no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Aguayo y Artes (2004) mencionan en investigaciones realizadas, que el rango del contenido de sólidos solubles totales del tomate oscila alrededor de

4 °Brix, por lo que los valores del testigo están en los parámetros indicados, 2 mg L⁻¹ y 5 mg L⁻¹ Se, muestran un ligero aumento, siendo 2 mg L⁻¹ Se, el que mostro un mayor incremento de contenido de sólidos solubles totales

Otros autores también reportan una media promedio de contenido de sólidos solubles totales igual a 4 °Brix en el fruto de tomate, lo que es considerado como un parámetro adecuado (Alemán *et al.*, 2010) y para definir esta variable contribuyen todos los factores agrologicos del entorno (Prado, 2002), en este caso considerando al elemento selenio como un inductor de contenido de sólidos solubles totales.

En estudios realizados en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*), se demostró que el selenio también tuvo efectos positivos sobre la acumulación de carbohidratos y en la concentración de 0.3 mg Se por Kg de suelo, se observó una mayor concentración de sólidos solubles en esta especie hortícola (Turakainen *et al.*, 2004).

4.5 Contenido de macro y micronutrientes

4.5.1 Micronutrientes

El análisis estadístico para la variable de micronutrientes no mostró diferencias significativas entre los tratamientos, indicando por lo tanto, que los niveles de selenio aplicados en los diferentes tratamientos no afectaron a los elementos presentes en el fruto (Cuadro 8). Estos datos son similares a

los obtenidos por Ríos (2008), quien observó que ni el selenito y selenato provocaron diferencias significativas entre las distintas dosis aplicadas de selenio, al no modificar las concentraciones de los elementos, reportando estos resultados para macro y micro nutrientes en plantas de lechuga (*Lactuca sativa*).

Cuadro 8. Contenido de micronutrientes en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Tratamiento	Micronutrientes (ppm)		
	Fe	Zn	Se
Testigo	42.00 a	15.66 a	11.58 a
2 mg L ⁻¹ Se	34.83 a	13.66 a	18.18 a
5 mg L ⁻¹ Se	30.50 a	12.16 a	11.33 a

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Para la cuantificación del selenio se puede observar una tendencia de aumento al aplicar 2 mg L⁻¹ Se en la concentración del elemento en el fruto, aunque no se muestran diferencias significativas en relación con el tratamiento testigo. Este resultado no significativo, pudiera explicarse por la forma en que el selenito se moviliza en la planta, primero en forma inorgánica de las raíces a los tallos y hojas, una vez allí se asimila en formas orgánicas que son movilizadas a los frutos y semillas (Avry, 1982; Avry 1993). Para la concentración del elemento selenio en el tratamiento testigo es posible que este valor relativamente alto y similar a los parámetros de los tratamientos

con selenio, resultara del contenido de selenio de 0.018 g L^{-1} que ocurre de forma natural en el agua de riego según Wang *et al.*, (1994). Está demostrado que ocurre transferencia de selenio del agua hacia los tejidos vegetales (White *et al.*, 2004).

Por otro lado se ha demostrado la acumulación del elemento en los diferentes órganos de la planta por tratamientos de selenio, Becvort-Azcurra *et al.*, (2012) reportaron que cuando se aplicó el elemento selenio por vía riego, las concentraciones del elemento con los valores más altos se encontraron en la raíz, seguida de tallos y hojas y al final los frutos.

La acumulación de selenio en los diferentes órganos de las plantas se determina por la forma química y la concentración del Se, factores tales como pH, salinidad, el contenido de CaCO_3 , la identidad y la concentración de iones competitivos así como la capacidad de la planta para absorber y metabolizar selenio (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

4.5.2 Macronutrientes

El contenido de macronutrientes, no mostró diferencias estadísticamente entre los tratamientos, al no modificar de manera significativa las concentraciones de los elementos presentes en el fruto de tomate, a excepción del elemento potasio (Cuadro 9).

Estos datos concuerdan con lo reportado por otros autores (Rios, 2008), en otras investigaciones, al trabajar con selenito y selenato aplicado en concentraciones similares, esto en plantas de lechuga (*Lactuca sativa*), donde reportó que el elemento selenio no provocó diferencias significativas en las concentraciones de los macro y micronutrientes presentes.

Cuadro 9. Contenido de macro nutrientes en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Tratamiento	Macronutrientes (%)				
	N	P	K	Ca	Mg
Testigo	1.87 a	0.56 a	1.50 a	0.31 a	0.02 a
2 mg L ⁻¹ Se	2.01 a	0.52 a	0.85 b	0.33 a	0.04 a
5 mg L ⁻¹ Se	1.96 a	0.49 a	0.97 ab	0.32 a	0.03 a

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Otros autores Lyons *et al.* (2008), reportaron resultados similares en un proyecto de investigación al trabajar con el elemento selenio en una concentración de 10 $\mu\text{g Kg}^{-1}$ Se, esto en plantas de nabo (*Brassica rapa*), al concluir que los minerales (macro y micronutrientes) analizados por ICP-OES se encontraron dentro de los límites normales, es decir el elemento selenio no provocó deficiencias o toxicidad de los elementos que fueran evidentes, concluyendo que no hubo diferencias significativas en las concentraciones de cualquier nutriente.

La aplicación del elemento selenio en el presente trabajo experimental solo logró modificar la concentración del elemento potasio de manera significativa, donde se observa que cuando se aplicó Se, la concentración del elemento se vió disminuida con respecto al testigo. Este resultado puede compararse con lo reportado por Hawrylak - Nowak (2008), aunque para este resultado no se explica la causa, al trabajar con diferentes dosis de fertilización de Se ($5 \mu\text{mol} - 100 \mu\text{mol.dm}^{-3}$) en el cultivo de maíz (*Zea mays*) concluyo que dentro de su análisis, el contenido de potasio reveló un aumento del 23 % en la presencia de $25 \mu\text{mol Se.dm}^{-3}$ mientras que la adición de $10 \mu\text{mol.Sedm}^{-3}$ en la solución nutritiva disminuyó el contenido del elemento en un 24 % en comparación con el tratamiento testigo.

Aunque cabe destacar que la influencia del selenio en las plantas depende en gran medida de su forma química y su concentración en la solución de nutrientes (Hartikainen *et al.*, 2000). Los niveles excesivamente altos de selenio pueden deteriorar la absorción de nutrientes y su transporte (Kahle, 1988). Los resultados encontrados en el presente trabajo fueron esperados debido a que la adición del Se en un cultivo por medio de la fertilización no debe modificar la absorción de otros elementos nutrientes en las plantas y por consecuencia no modificar el equilibrio homeostático de los elementos contenidos en los frutos. Lo anterior a diferencia de otras investigaciones que han encontrado diferentes efectos en sus cultivos mediante la aplicación de Se. Por citar un ejemplo, Saffaryazdi *et al.*, (2012) encontraron que la introducción del selenio en el medio interactuó de forma significativa con el

contenido de nutrientes, esto en plantas de espinaca (*Spinacia oleracea*), encontrando que en elementos tales como el calcio, se produjo un aumento del nutriente con una condición de 10 mg L^{-1} de Se en la solución con respecto al testigo, mientras que concentraciones más altas de selenio, redujeron significativamente la cantidad de calcio. Por su parte, el contenido de potasio se redujo drásticamente por la suplementación con selenio, mientras que a niveles más bajos del elemento no se reportaron diferencias significativas, reportando cierta similitud a los datos obtenidos en el presente trabajo.

La interacción entre el selenio y un elemento dado depende de las proporciones cuantitativas pudiendo causar efectos sinérgicos o antagónicos (Pyrzynska, 2000). El selenio puede modificar el consumo y la acumulación de minerales que son importantes para el metabolismo de las plantas (Kopsell *et al.*, 2000; Pazurkiewicz-Kocot *et al.*, 2003).

4.6 Ácido Ascórbico (Vitamina C)

El contenido de ácido ascórbico mostró diferencias significativas entre los tratamientos 2 mg L^{-1} y 5 mg L^{-1} Se con respecto al tratamiento testigo (Cuadro 10), los contenidos fueron $2.34 \text{ mm.AA } 10 \text{ g}^{-1}$ y $2.11 \text{ mm.AA } 10 \text{ g}^{-1}$ respectivamente, siendo valores ligeramente superiores a los encontrados según Liptay *et al.*, (2006), quien menciona que el contenido promedio de ácido ascórbico en el fruto de tomate es de $19 \text{ mm.AA } 100 \text{ g}^{-1}$.

Cuadro 10. Contenido de ácido ascórbico (Vitamina C) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Tratamiento	Ácido Ascórbico (mm.AA 10g ⁻¹)
Testigo	0.99 b
2 mg L ⁻¹ Se	2.34 a
5 mg L ⁻¹ Se	2.11 a

Medias con letras iguales no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Ramírez *et al.*, (2010) mencionan que compuestos inductores de tolerancia y también factores ambientales modifican positivamente la concentración de ácido ascórbico, en el presente trabajo la adición de selenito de sodio (Na₂SeO₃), logro modificar de manera positiva la concentración de ácido ascórbico.

Por su parte diferentes trabajos han demostrado que él Se induce la acumulación del ácido ascórbico a pesar de que el efecto del selenio está poco documentado (Lee y Park, 1998). Los resultados en este trabajo de investigación indican que la adición de selenio en las dos diferentes concentraciones (2 mg L⁻¹ y 5 mg L⁻¹ Se) aplicados al cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum*) provocó una síntesis de ácido ascórbico.

Santos, (2014) reportó en un trabajo de investigación que al realizar aplicaciones de 2 mg L⁻¹ Se, en solución nutritiva y 5 mg L⁻¹ Se, por aspersión en semillas y plántulas de melón (*Cucumis melo*), lechuga

(*Lactuca sativa*) y tomate (*Lycopersicon esculentum*) ambas formas de aplicación de selenio mostraron ser efectivas para modificar positivamente el estado antioxidante y el contenido ácido ascórbico.

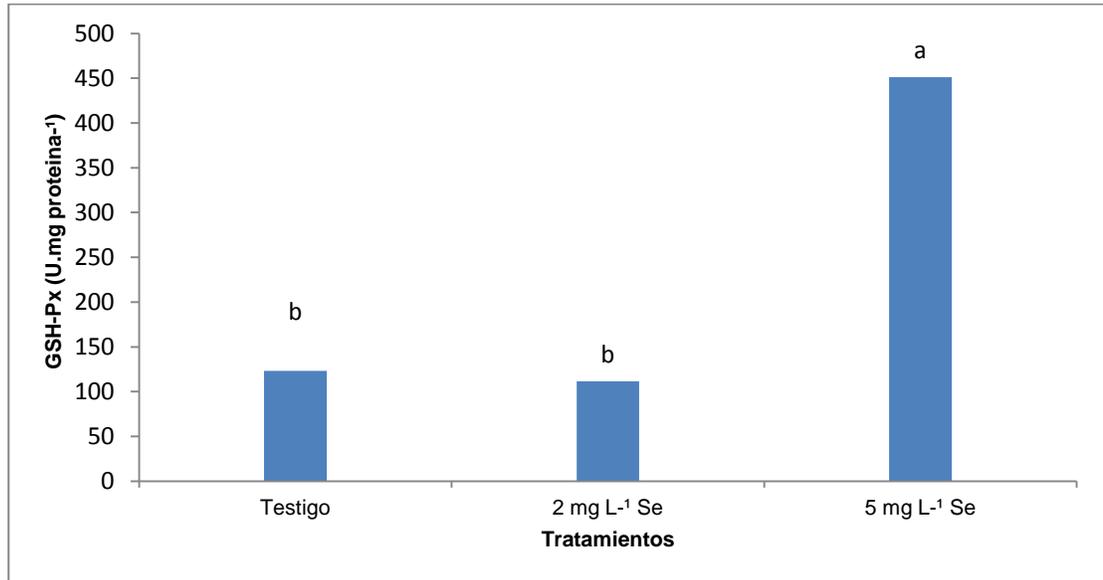
Duma *et al.* (2011), concluyeron en un trabajo experimental que el selenato de sodio, aumentó la concentración de ácido ascórbico más eficientemente en comparación con el selenito, pero como resultados concluyentes se observó el incremento de ácido ascórbico como resultado de tratamientos de selenio, esto en plantas de lechuga (*Lactuca sativa*).

4.7 Actividad enzimática Glutación Peroxidasa (GSH-Px)

Los resultados para variable GSH-Px mostró diferencias significativas entre tratamientos, siendo mayor la actividad enzimática de la glutatión peroxidasa (GSH-Px) cuando se aplicó niveles altos de selenito de sodio (Na_2SeO_3) (5 mg L^{-1} de Se) al cultivo.

En la figura 3 se pueden apreciar los resultados para la presente variable, el tratamiento 5 mg L^{-1} Se, mostró diferencias significativas respecto al tratamiento 2 mg L^{-1} Se y al tratamiento testigo, los cuales mantuvieron una tendencia muy similar en cuanto a parámetros estadísticos, mientras que 5 mg L^{-1} Se, aplicados al cultivo tuvieron un gran impacto en el incremento de manera significativa de la actividad enzimática Glutación Peroxidasa.

Figura 3. Impacto del selenio en la actividad enzimática Glutación Peroxidasa GSH-Px bajo dos tratamientos (2mg L⁻¹ y 5 mg L⁻¹ Se) y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).



Medias con letras iguales no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$).

Los resultados obtenidos para GSH-Px coinciden con varios estudios realizados con Se, en los cuales la aplicación de este elemento aumentaba la actividad enzimática de la GSH-Px (Hartikainen *et al.*, 2000; Xue *et al.*, 2001; Djanaguiraman *et al.*, 2005; Cartes *et al.*, 2005).

La actividad GSH-PX requiere de compuestos reducidos para su funcionamiento en este caso el glutati3n reducido GSH (Arora *et al.*, 2002). Los resultados indican que la aplicaci3n de selenio induce la s3ntesis y acumulaci3n de estos compuestos antioxidantes, esto nos sugiere que la actividad de la GSH-Px definida como una prote3na selenodependiente depender3a exclusivamente de la presencia del elemento selenio.

Xue *et al.* (2001) encontraron que la aplicación de selenio en plantas de lechuga (*Lactuca sativa*) eleva la actividad de las enzimas antioxidantes superóxido dismutasa y glutatión peroxidasa, incrementando la acumulación de tocoferol y disminuyendo la peroxidación de lípidos.

En un trabajo experimental en raigrás (*Lolium multiflorum*), Hartikainen *et al.*, (2000) asociaron el incremento de la actividad enzimática de GSH-Px al elemento selenio, en una primer lectura sin la adicción del elemento no se detectó GSH-Px, lo que indicaba que la concentración de Se fue demasiado baja para inducir una actividad enzimática lo suficientemente alta para ser monitoreada, sin embargo en una segunda lectura se observó una clara actividad de GSH-Px al inducir tratamientos de selenio. El Se actúa como un antioxidante en bajas concentraciones y en oposición como un pro oxidante a concentraciones superiores del elemento (Hartikainen *et al.*, 2000).

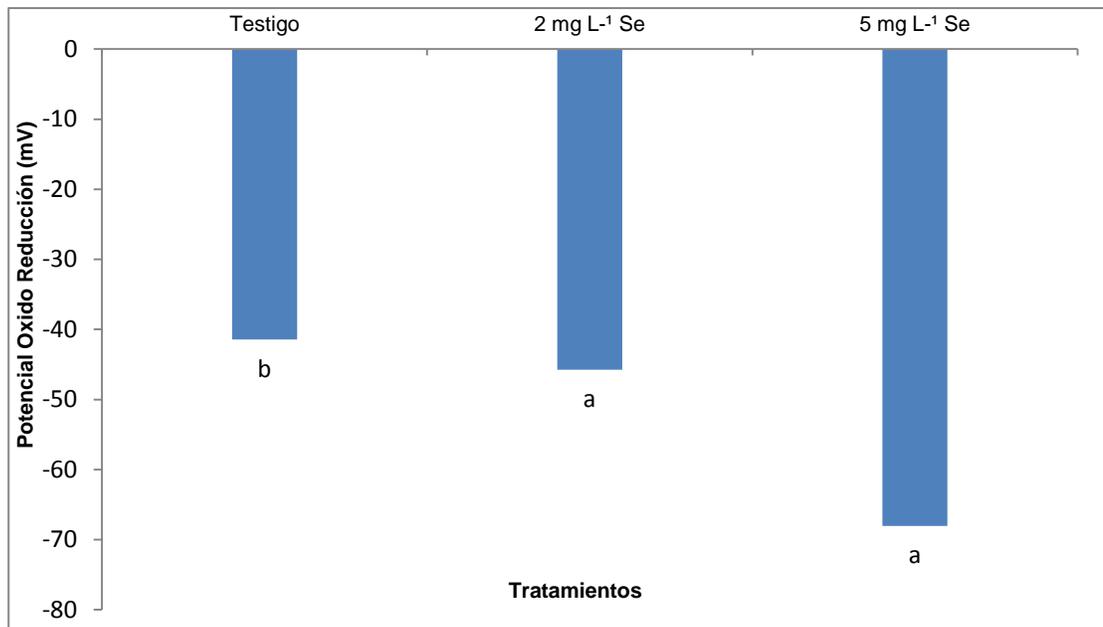
Se sugiere la dependencia directa de la GSH-Px con el elemento selenio, siendo confirmado para *Glycine max* (Xue *et al.*, 1993), *Hordeum vulgare* (Huang *et al.*, 1994) *Lactuca sativa* y *Lolium multiflorum* (Hartikainen *et al.*, 1997).

4.8 Potencial oxido reducción (ORP)

La variable potencial oxido reducción mostro diferencias significativas entre tratamientos. En los tratamientos donde se aplicó selenito de sodio (Na_2SeO_3) a 2 mg L^{-1} y 5 mg L^{-1} mostraron tener un efecto benéfico para esta

variable (Figura 4). Este aumento en dicha capacidad posiblemente tiene relación con una mayor actividad enzimática, la cual se tiene conocimiento, aumenta a ciertas concentraciones de selenio (Freeman *et al.*, 2010).

Figura 4. Caracterización de la variable potencial oxido reducción (ORP) bajo dos tratamientos de selenio (2mg L^{-1} y 5mg L^{-1} Se) y un testigo (0mg L^{-1} Se).



Medias con letras iguales no son significativamente diferentes según Tukey ($\alpha = 0.05$).

Los valores de ORP indican la capacidad antioxidante total, es decir, la capacidad de ceder electrones en comparación con un electrodo de hidrógeno. Se aprecia que la dinámica de ORP es negativa (Figura 9), el potencial redox es un valor relativo medido contra el punto cero del electrodo normal de hidrogeno u electrodo secundario de referencia, un valor positivo es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación, en

contraparte un valor negativo es indicativo de un ambiente reductor (Koolman *et al.*, 2004)

Este tipo de ensayo mide la habilidad general de la capacidad antioxidante total para reducir sustancias pro-oxidantes mediante el uso de diferentes radicales o iones metálicos como oxidantes, considerando que la capacidad antioxidante total no se refiere a un antioxidante o antioxidantes específicos, sino en general al potencial de cesión de electrones para inactivar radicales libres (Schleiser, *et al.*, 2002).

Becvort-Azcurra *et al.*, (2012) reportaron en un trabajo de investigación que aplicaciones superiores en 10 y 20 mg L⁻¹ Se, disminuyeron en un 25 % la capacidad antioxidante total del fruto, pudiendo ser el resultado de la acumulación excesiva de selenio en la planta ya que según Hawrylak - Nowak *et al.* (2008), el selenio en baja concentración en las plantas da lugar a un aumento de la capacidad antioxidante, mientras que en mayor concentración causa el efecto contrario.

En resumen, los resultados indican que la aplicación de selenio a bajas concentraciones induce un aumento en la capacidad antioxidante total del fruto, coincidiendo estos resultados con lo reportado por otros autores (Hartikainen *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2001; Xue *et al.*, 2001; Xue *et al.*, 2003; Lingan *et al.*, 2005).

V CONCLUSIONES

Las aplicaciones de selenio, no mostraron tener impacto en las variables, tales como peso, diámetro polar y diámetro ecuatorial del fruto, al no mostrar diferencias estadísticamente significativas. En oposición las variables; firmeza, contenido de sólidos solubles totales y ácido ascórbico, se modificaron de manera positiva al adicionar selenio.

El contenido de minerales no mostro diferencias significativas, indicando por lo tanto, que los niveles de selenio aplicados en los diferentes tratamientos no afectaron a los elementos presentes en el fruto, a excepción del potasio que se evidencio una disminución del elemento al adicionar Se con relación al testigo.

El potencial redox del fruto se vio modificado por la adición de selenio en bajas concentraciones del elemento.

La actividad enzimática glutatión Peroxidasa GSH-Px, mostro tener una relación directa con la aplicación del elemento selenio, al modificarse favorablemente cuando se aplicaron $5 \text{ mg L}^{-1} \text{ Se}$.

VI LITERATURA CITADA

A.O.A.C (1990). Official Methods of Analysis of AOAC 15th edition. Vol. II. Association of Official Analytical Chemist. Washington, D.C. USA. pp: 829-830.

A.O.A.C. (2000). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Arlington, Virginia USA.

ATSDR. (2009). Toxicological Profile for Selenium. Atlanta: US Department of Health and Human Services.

Aguayo, E. y Artes, F. (2004). Elaboración de tomate mínimamente procesado en fresco. Compendios de Horticultura. 15. Ediciones de Horticultura, S.L. Reus. España. pp. 16.

Alemán, B. M, Robledo, V. Benavides, M. A. Mendoza, V. R. Sandoval, R. (2010). Respuestas de la calidad de fruto de tomate a la aplicación de silicio. Memorias del XXII semana internacional de agronomía. Gómez Palacio, Durango, México.

Arora, A. Sairam, R. K. and Srivastava, G. C. (2002). Oxidative stress and antioxidative systems in plants. *Curr. Sci.* 82:1256-1258.

Arthur, J. R. (2003). Selenium supplementation, does soil supplement help and why? *Proceeding of nutrition Society.* 62:393-397.

Avello, M. Suwalsky, M. (2006a).“Human erythrocytes are affected in vitro by extracts of *Ugni molinae* leaves”, in *J. Chem Food Toxicol* (en prensa).

Avello, M. Suwalsky, M. (2006b). “The antioxidant capacity of *Ugni molinae* Turcz against in Vitro citotoxicity of HClO in human erythrocytes” in *J. Chem Food Toxicol* (en prensa).

Avry, M. P. (1982). Translocation of selenium in the bean plant (*Phaseolus vulgaris*) and the field bean (*Vicia faba*). *J. Physiol. Plant.* 56:299-302.

Avry, M. P. (1993). Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). *J. Exp. Bot.* 44:1083-1087.

Bañuelos, G. S. Ajwa, H. A. Mackey, M. (1997). Evaluation of different plant species used for phytoremediation of high soil selenium, *J. Environment. Quality* 26:639-646.

Becvort-Azurra, A. L. O. Fuentes-Lara, A. Benavides-Mendoza, H. Ramirez, V. Robledo-Torres y Rodriguez-Mendoza. (2012). Aplicación de selenio en tomate: Crecimiento, productividad y estado antioxidante del fruto. *J. Terra Latinoamericana* 30:291-301.

Benavides-Mendoza, A., H. Ramírez, V. Robledo-Torres, L.O. Fuentes-Lara. (2009). Antioxidantes en las plantas: algunos factores edáficos y ambientales que los modifican. En: A. Benavides-Mendoza (Compilador). *Temas Modernos de Nutrición Vegetal*, A.C., pp. 13-26. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Texcoco, México.

Berenguer, J. J. (2003). Manejo del cultivo de tomate en invernadero. En: Curso internacional de producción de hortalizas en invernadero (Castellanos, J. Z. y Muñoz, R. J. J. Edit). Celaya, Guanajuato, México. Pp 147-174.

Broadley, M. R., M. P. J. White, R. J. Bryson, M. C. Meacham, H. C. Bowen, S. E. Johnson, M. J. Hawkesford, S. P McGrath, F. J. Zhao, N. Breward, M. Harriman, and M. Tucker. (2006). Biofortification of UK food crops with selenium. *J. Proceed. Nutr. Soc.* 65:169-181.

Brown, T. A. and Shrift, A. (1981). Exclusion of selenium from proteins in selenium-tolerant *Astragalus* species, *Plant Physiol.* 67:1951-1953.

Brown, T. A. and Shrift, A. (1982). Selenium; toxicity and tolerance in higher plants. *Biol, Rev.* 57:59-84.

Burnell, J. N. Shrift, A. (1979). Sulphur metabolism in *Paracoccus denitrificans*. Purification, properties and regulation of serine transacetylase, O-acetylserine sulphhydrylase and beta-cystathionase. *Biochim Biophys Acta.*

Cantwell, M. (2004). Fresh market tomato statewide uniform variety trial report field and postharvest evaluations south Joaquin Valley. UCCE.

Cartes, P., L. Gianfera, and M. L. Mora (2005). Uptake of selenium and its antioxidative activity in ryegrass when applied a selenate and selenite forms. *J. Plant Soil.* 276:359-367.

Cartes, P., C. Shene, and M. L. Mora. (2006). Selenium distribution in ryegrass and its antioxidant role as affected by sulfur fertilization. *J. Plant Soil.* 285:187-195.

Céspedes-Cabrera, T. y D. Sánchez-Serrano. (2000). Algunos aspectos sobre el estrés oxidativo, el estado antioxidante y la terapia de suplementación. *Revista Cubana de Cardiología.* 14:55-60.

Combs, G. F. Jr. (2001). Selenium in global foodsystems. *British Journal of Nutrition.* 85:517-547.

Cooper, T. and F. Bangerth, 1976. The effects of Ca and Mg treatments on the physiology, chemical composition and bitter pit development of Cox orange apples. *J. Sci Hortic. (Amsterdam)* pp. 49-57.

COVECA, (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria) (2010). Monografía del tomate rojo. <http://faostat.fao.org>. Consulta de bases de datos de producción mundial y comercio internacional de Tomate. www.siap.sagarpa.gob.mx. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera SIAP, SIACON, Anuario Agrícola por Municipio SAGARPA 2005. Consulta de Indicadores de Producción Nacional de Tomate. www.economia-sniim.gob.mx. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. Consulta de precios de Tomate www.infoaserca.gob.mx. *Revista Claridades Agropecuarias* No. 62, Octubre 1998 <http://www.siea.sagarpa.gob.mx/InfOMer/analisis/antomate.html>.

Análisis respecto al comportamiento de la producción y consumo del jitomate mexicano así como de su participación en el comercio internacional.

Cruz-Jimenez, G. (2005). Toxicity and accumulation of selenium by plant. Species from Chihuahua desert. Tesis doctoral. The University of Texas at El Paso. El Paso, Texas, USA pp. 50-51.

Davis, C. (2002). Selenium enriched broccoli decreases intestinal tumorigenesis in multiple intestinal neoplasia mice . *J. Nutr.* 31:1802-1808.

De Kok, L. J. Kuiper, P. J. C. (1986). Effect of short-term dark incubation with sulfate, chloride and selenate on the glutathione content of spinach leaf discs. *Physiologia Plantarum*, 68:477–482.

Diplock, A. T. (1993). Indexes of selenium status in human population. *Am. J. Clin. Nutr.*, 57: 256-259.

Djanaguiraman, M. D. D. Devi, A. K. Shanker, A. Sheeba and U. Bangarusamy. (2005). Selenium an antioxidative protectant in soybean during senescence. *Plant Soil.* 272:77-86.

Duma, M. Alsina, I. Dubova, L. Stroska, L. Smiltina, Z. (2011). The effect of sodium selenite and selenate on the quality of lettuce. In Baltic Conference on Food Science and Technology, FoodBalt. University of Agriculture, Jelgava. (Latvia). 39-44.

Fan, R. W. M., The S. J., Hinton, D. E., Higashi, R. M. (2002). Selenium biotransformations in to proteinaceous forms by foodweb organisms of selenium-laden drainage waters in California. *J. Aquatic Toxicol.*, 57:65-84.

Foyer, C. and G. Noctor (2005). Oxidant and antioxidant signaling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *J. Plant Cell Environment.* 28:1056-1071.

Fordyce, F. (2005). Selenium deficiency and toxicity in the environment. In: Essentials of medical geology, Selinus, O., B. Alloway, J. Centeno, R, Finkelman, R. Fuge, U. Lindh and P Smedley (Eds.). *Elsevier*. Pp 373-415.

Freeman, J. L., M. Tamaoki, C. Stushnoff, F. Colin, Cappa, D., F. Sirine, M. Matthew, S. McGrath, H. Doug Van and E. A. H. Pilon-Smits. (2010). Molecular mechanish of selenium tolerance and hyperaccumulation in *Stanleya pinnata*. *J. Plant Physiology* 153:1630-1652.

Fry, S. C. R. Smith, K. F. Renwick, D. J. Martin, S. K. Hoolge, K. J. Matthews. (1992). Xyloglucan endotransglycosidase, a new wallloosening enzyme activity from plants. *Biochem. J.* 282:821-828.

Galiana-Balague, L., Adalid, A y Nuez F. (2008). Influencia del ambiente en la evaluación del contenido de vitamina C en germoplasma de *Lycopersicon*. Centro de conservación y mejora de la agrodiversidad valenciana (COMAV), Universidad Politécnica de Valencia. pp. 2.

García-Martínez, J. L. and P. Hedden. (1997). Gibberellins and fruit development., en: Tomas-Barberan, F.A. y R.J.Robins. (eds.). Phytochemistry of fruit and vegetables. OxfordSci. Publications, Heidelberg. Pp. 263-285.

Germ, M., Kreft. I. Osvald, J. (2005). Influence of UV-B exclusion and selenium treatment on photochemical efficiency of photosystem II, yield and respiratory potential in pumpkins (*Cucurbita pepo* L.). *J. Plant Physiology and Biochemistry* 43:445-448.

Gonzalez, M. M. Nadrid, R, and Arahuetes, R. M. (2000). Physiological changes in antioxidant defences in fetal and neonatal rat liver. *Reproduction Fertility and Development* 7:1375-1380.

Hartikainen, H., Ekholm, P., Piironen, V., Xue, T., Koivu, T. and Yli-Halla, M. (1997). Quality of ryegrass and lettuce yields as affected by selenium fertilization. *J. Agric. Food Sci. Finland* 6:381–387.

Hartikainen, H., T. Xue, and V. Piironen. (2000). Selenium as an antioxidant and pro-oxidant in ryegrass. *J. Plant Soil*, 225:193-200.

Hawrylak-Nowak, B. (2008). Effects of selenium on selected macronutrients in Maize plants. University of life Science in Lublin. *J. Chair of Physiology*. 13: 513-519.

Hasanuzzaman, M., M. A. Hossain, and M. Fujita. (2010). Selenium in higher plants: physiological role, antioxidant metabolism and abiotic stress tolerance. *J. Plant Sci.* 5:354-375.

Heuvelink, E. P. (2005). Tomatoes. Londres: CABI Publishing. Pp. 339.

Huang, K. X., Lauridsen, E. and Clausen, J. (1994). Selenium-containing peroxidases of germinating barley. *J. Biol. Trace Element Res.* 46:173–182.

INEGI (2001). (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). Banco de Información Electrónica. México. DF. Internet <http://www.inegi.gob.mx>.

Jackson, M. J., S. A. Dillon, C. S. Bromme, A. McArdle, C. A. Hart, and F. McArdle. (2004). Are there functional consequences of a reduction in selenium intake in UK subjects? *J. Proc. Nutr. Soc.* 63:513-517.

Johnson, I. T. (2001). Antioxidants and Antitumour Properties. In: Antioxidants in Food, Pokorny, J., N. Yanishlieva and M. Gordon (Eds.). Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp: 100-123.

Kabata - Pendias, A. Pendias, H., (2001). Trace elements in soils. 3 Ed. Boca Raton, London, New York, CRC Press. 413 pp.

Kader, A. A., Morris, L. L., Chen, P. (1978). Evaluation of two objective methods and a subjective rating scale for measuring tomato fruit firmness. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103:70-73.

Kahakachchi, C., Boakye, H. T., Uden, P. C., Tyson, J. F. (2004). Chromatographic speciation of anionic and neutral selenium compounds in Se-accumulating *Brassica juncea* (*Indian mustard*) and in selenized yeast. *J. Chromatogr. A*, 1054: 303-312.

Kahle, H. (1988). The effects of lead and cadmium on the growth and mineral balance of young beech (*Fagus Sylvatica* L.) in sand culture. *Dissertationes Botanicae* 127, Berlin J. Cramer.

Koerselman, W., Meuleman, A. F. M. (1994). The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *J Appl Ecol.* 33:1441–1450.

Koolman, Jan Roth, Klaus Heinrich, (2004). *Bioquímica: Texto y Atlas.* 3^{da} edición, Médica Panamericana pp. 492.

Kopsell, D. A., Randle, W. M., Mills, H. A. (2000). Nutrient accumulation in leaf tissue of rapidcycling *Brassica oleraceae* respond to increasing sodium selenato concentrations. *J. Plant Nutr.* 23: 927-935.

Kuznetsov. VV., Kholodova, VP., Kuznetsov, VIV, Yagodin, BA. (2003). Selenium regulates the water status of plants exposed to drought. *J. Doklady Biological Sciences* 390:266-268.

Lam, KW., Wang, L., Hong, BS., (1993). Treble D. Purification of phospholipid hydroxiperoxide glutathione peroxidase from bovine retina. *Curr Eye Res.*

Lee, G. P. and Park, K. W. (1998). Effect of selenium concentration in the nutrient solution on the growth and internal quality of endive. *Journal Korea Society Horticulture Science*. 39:391-396.

Lee, M. J., Lee, G. P. Park, K. W. (2001). Effect of selenium on growth and quality in hydroponically grown Korean Mint (*Agastache rugosa*). *Journal Korea Society Horticulture Science*. 42: 483-486.

Li, Y., G, Wei. and J. Chem. (2004). Glutathione: a review on biotechnological production. *J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 66:233-242.

Lingan, K., Mao, W., Dongling, B. (2005). Selenium modulates the activities of antioxidant enzymes, osmotic homeostasis and promotes the growth of sorrel seeding under salt stress. *Plant Growth Regulation*. 45:155-163.

Liptay, A., Papadopoulos, A. P., Bryan, H. and Gull, D. (2006). Seasonal variations in antioxidant components of cherry tomatoes, *Journal of food composition and analysis*. 19:11-19.

Lyons. G. H., Gene. Y., Soole. K., Stangoulis. J. C. R., Lui. F., Graham. R. D. (2008). Selenium increases seed production in Brassica. Plant and food Science, School Agriculture, Food and Wine, University of Adelaine, Waite Campus, Glen Osmond, *J. Plant Soil* 318:73-80.

Maiorino, M., Chu. F., Ursoni, F. (1991). GPx-PH is the 18 KDa seleno proteins expressed in human tumor cell lines. *J. Biol. Chem.*

Magos, L. and Berg, G. G. (1988). Selenium. in Biological Monitoring of Toxic Metals, T.W. Clarkson, L. Friberg, G.F. Nordberg y P.R. Soger, (eds.) Plenum Press, New York, NY, pp. 383-405.

Marschner, H. (1995). Mineral nutrition in higher plants. 1 ed. Academic Press. London U.K.

Marschner, H. (2002). Mineral nutrition in higher plants. 2 ed. Academic Press. London, UK.

Mass, J. (1990). Selenium deficiency in cattle. en: Proceeding XVI World Buiatrics Congres, Salvador, Brasil. pp. 3-13.

Mayland, H. F. (1994). Selenium in plant and animal nutrition. in Selenium in the Environment, W.T. Frankenberger, Jr. y S. Benson (eds.) Marcel-Dekker, Inc. New York, NY, pp. 29-45.

Mengel, K. and E. A. Kirby. (1987). Principles of plant nutrition. 2 ed. International Potash Institute. Bern. Switzerland.

Mikkelsen, R. L., Page, A. I., and Bingham, A. T., (1989), Factors affecting selenium accumulation by agricultural crops, *Soil Sci. soc. Am. Special Publications* 23, 65-94.

Miranda, H. M., y Castro, C. L. (2009). El estrés oxidativo en plantas. Unidad de Bioquímica y Biología Molecular.

Montes-Bayón, M., LeDuc, D. L., Terry, N., Caruso, J. (2002). Selenium speciation in wild-type and genetically modified Se accumulating plants with

HPLC separation and ICP-MS/ES-MS detection. *J Anal At Spectrom* 17:872–879.

Morales, F. J., Martínez, A. K. Velasco, A. C (2002). Nuevos brotes de begomovirus en Colombia. *Fitopatol. Colomb.* 26:75-79.

Murillo E., Lombo O. Tique M. y Méndez J. J. (2007). Potencial antioxidante de la Bauhinia KalbreyeriHarms (FABACEAE). *Información Tecnológica.* 18:65-74.

Nuez, F, (2001). El cultivo de tomate. Segunda edición Editorial Mundi Prensa. pp. 32-33, 53-55, 60.

Noctor G. and C. Foyer, (1998). Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annual Rev. Plant Physiol. Plant. Mol. Biol* 49:249-279.

Nuño Moreno, R., Ponce Medina, J. F., Hernandez Zavalza, C. y Machain Servín. G. M. (2007). Manual de producción de tomate rojo bajo condiciones de invernadero. Fundación produce. Mexicali. Baja California. México. pp 3-4.

Oldfield, J. E. (1995). Selenium: it's Uses in Agriculture, Nutrition and Health and the Environment, Selenium-Tellurium Development Association, Grimbergen, Belgium.

Owaga, K., (2005). Glutathione-associated regulation of plant growth and stress responses. *Antioxidant and Redox Signaling* 7:973-981.

Padmaja, K., Prasad, D. D. K., and Prasad, A. R. K., (1989). Effect of selenium on chlorophyll biosynthesis in mung bean seedlings, *Phytochemistry*. 28:3321-3324.

Pazurkiewicz-Kocot K., Galaz, W., Kita. (2003). The effect of selenium on the accumulation of some metals in *Zea mayz L.* plants treated with indole-3acetic acid. *J. Cell. Mell. Biol. Lett.* 8:97-103.

Pennanen, A., Xue, T., Hartikainen, H. (2002). Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. *Journal of Applied Botany* 76: 66-76.

Prado, J. L. (2002). Tipos y especificaciones de calidad en el cultivo del tomate. *Vida Rural*. 148:9-14.

Presser, T. S. (1994). Geologic origin and pathways of selenium from California Coast Ranges to the west-central San Joaquin Valley. in Selenium in the Environment, W.T. Frankenberger, Jr. y S. Benson, (eds.) Marcel Dekker, Inc. New York, NY, pp. 139-156.

Pyrzynska, K. (2000). Zwiqzki selenu w srodowisku naturalnym. *Wiad Chem.* 54:140-150.

Raffo, C. Leonardi, V. Fogliano, P. Ambrosino, M. Salucci, L. Gennaro, R. Bugianesi, F. Giuffrida, G. Quaglia (2006). Nutritional value of cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Cv. Naomi F1) harvested at different ripening stages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50:6550–6556.

Ramirez, H., C. E Rivera-Cruz, A. Benavidez-Mendoza, V. Robledo-Torres y G. Reyna-Sustaita. (2010). Proheaxiona-ca, una alternativa en la producción de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa Brot.*). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 16:139-146.

Rayman, M. P. (2002). The argument for increasing selenium intake. *Proceedings of the Nutrition Society* 61:203-215.

Rayman, M. P. (2005). Selenium in cancer prevention: a review of the evidence and mechanism of action. *Proceedings of the Nutrition Society* 64:527-542.

Rayman, M. P. (2008). Food-chain selenium and human health: emphasis on intake *British Journal of Nutrition.* 100:254-268.

Raymond, P. M. (2002). Selenium in cáncer prevention: A review of the evidence and mechanism of action. *J. Proceedings of the nutrit. Soc.* 64:527-542.

Reamer, D. C. Soller, W. H. (1980). Selenium in the atmosphere. In: *Proceedings of the symposium on selenium-tellurium in the environment.* Pittsburgh, P. A, Industrial Health Foundation. Pp. 54-66

Riquelme, F. (1995). Poscosecha. In: *El cultivo del tomate.* Nuez, F. (ed.) Edit. Mundi Prensa. Madrid, España. pp. 793.

Rios, J. J., Blasco B., Cervilla L. M., Rosales, M. A., Sanchez-Rodriguez E., Romero, L., Ruiz, J. M. (2008). Production and detoxification of h₂o₂ in lettuce plants exposed to selenium. *J. Annals of Applied Biology* 154:107-116.

Rodriguez, R. Tavares, R y Medina (2001). Cultivo moderno de tomate. Segunda edición. Mundi Prensa, Madrid, España. pp. 255.

Saldaña, C., Nina, J., Sánchez, G. (2003). Las plagas del cultivo de tomate industrial en el valle de Barranca. 33 Resúmenes. XLII Convención Nacional de Entomología. Taropoto, Sociedad Entomológica de Perú.

Saffaryazdi, A. Lahouti, M. Ganjeali, A Batav, H. (2012). Impact of selenium supplementation on growth and selenium accumulation on spinach (*Spinacia oleraceae L.*) Plants. Ferdowsi University of Marshall, Faculty of Science, Department of Biology, *J. Not Sci Biol* 95-100.

Salisbury, B. F., Ross, W. C. (1994). Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamericana, S. A. de C. V. México. pp:127-202.

Sahnoun, Z., Jamoissi, K., Zegal, K., M. (1997). Free radicals and antioxidants; Human physiology, pathology and therapeutics aspects, *Therapie*. 52:251-270.

Santos, M. E., (2014). Aplicación de selenio en semillas y plántulas de hortalizas para modificar el potencial redox. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. Pp.18-22.

Schleiser, H., Hawat, V., Bohm, V., Bitsch, R. (2002). Assesment of antioxidant by using different in vitro methods. *Free Radical Research*. 36:177-187.

Seppanen, M., Turakainen, M., Hartikainen, H. (2003). Selenium effects on oxidative stress in potato. *J. Plant and Sciense*. 165:311-319.

Sesso, H. D., Buring, J. E, Norkus, E. P., and Gaziano, J. M. (2003). Plasma lycopene, other carotenoids, and retinol and the risk of cardiovascular disease in women. *American Journal of Clinical Nutrition*. 79: 47-53.

Shardendu, S. N., Boulyga, S. F., Stengel, E. (2003). Phytoremediation of selenium by two helophyte species in subsurface flow constructed wetland. *J. Chemosphere* 50:967-973.

Shaver, G. R. (1981). Mineral nutrition and leaf longevity in an evergreen shrub, *Ledum palustre* ssp. *decumbens*. *Oecologia* 49:362–365.

Shekelle, P., Hardy, M. L., Coulter, I., Udani, J., Spar, M., Oda, K. (2003). Effect of the supplemental use of antioxidants vitamin C, vitamin E, and coenzyme Q10 for the prevention and treatment of cancer. *Evid Rep Technol Assess (Summ)* 75:1-3.

Shi, X. Dalal, N. S. Jain, A. C. (2001). Antioxidant behaviour of caffeine: Efficient scavenging of hydroxyl radicals *Food Chemistry and Toxicology*, Pp. 1-6.

SIAP (2012). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. <http://www.siap.gob.mx/index.php>.

Smirnoff, N., (2000). Ascorbic acid: metabolism and functions of a multifaceted molecule. *Curr. Opin. J. Plant Biol.* 3:229-235.

Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15:134-154.

Terry, N., Carlson, C., Raab, T. K., and Zayed, A. M., (1992). Selenium uptake and volatilization among crop species, *J. Environ. Quality* 21, 341-344.

Terry, N., A. M. Zayed, M. P. De Souza, and A. S. Tarun. (2000). Selenium in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 51:401-432.

Thomson, J., S. Elgar, and T. H. C. Herbers (2005). Reflection and tunneling of ocean waves observed at a submarine canyon, *Geophys. Res. Lett.*

Turakainen, M., Hartikainen, H., Seppänen, M. M. (2004). Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52: 5378-5382.

Turakainen, M., Hartikainen, H., Ekholm, P., Seppänen, M. M. (2006). Distribution of selenium in different biochemical fractions and raw darkening

degree of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers supplemented with selenate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54:8617-8622.

Valadez, L. A., (2001). Libro de Producción de hortalizas. Editorial Limusa. México.

Vallejo-Cabrera, F. A., E. I. Estrada-Sánchez. (2004). Producción de hortalizas de clima cálido. Universidad Nacional de Colombia, Colombia, pp. 27-52.

Vavilov, N., L. (1951). The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. Translated by K. Start. *Chron. Bot.* 13:1-366.

Villarreal, R. R. (1982). Origen y distribución de tomate. Primera edición en español. Costa Rica. pp. 66.

Wang, H., (1994). Reversible inhibition of ethylene action and interruption of petal senescence in carnation flowers by norbornadiene. *Plant Physiology* 89:434-438.

Wesburger, J. H. (2002). Lycopene and tomato products in health promotion. Seasonal variations in antioxidant components of cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* cv. *Naomi F1*), en: *Journal of Food Composition and Analysis.* 19:11-12.

Whanger, P. D. (2003). Metabolic pathways of selenium in plants and animals and their nutritional significance. In *Nutritional Biotechnology in the Feed and Food Industries*, pp. 51–58 [TP Lyons and KA Jacques,

editors]. Proceedings of Allteck's 19th Annual Symposium Nottingham: Nottingham University Press.

White, P. J., H. C. Browen, P. Parmaguru, M. Fritz W. P. Spraclen, R. E. Spiby. (2004). Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana* *Journal of Experimental Botany* 55:1927-1937.

Wu, L., Huang, Z. Z., and Burau, R. G., (1998), Selenium accumulation and selenium-salt co-tolerance in five grass species, *Crop Sci.* 28:517-522.

Xue, T., Hou, S., and Tan, J. (1993a) The antioxidative function of selenium in higher plants: I The inhibitive effect of selenium on lipid peroxidation and its enzymatic mechanism. *Chinese Sci. Bull.* 38:274–277 (in Chinese).

Xue, T., Hou, S., and Tan, J. (1993b). The antioxidative function of selenium in higher plants: II. Non-enzymatic mechanisms. *Chinese Sci. Bull.* 38:356–358. (in Chinese)

Xue, TL., Hartikainen, H. (2000). Association of antioxidative enzymes with the synergistic effect of selenium and UV irradiation in enhancing plant growth. *J. Agricultural and Food Science in Finland* 9:177-186.

Xue, T., H. Hartikainen and V. Piironen. (2001). Antioxidative and growth-promoting effect of selenium in senescing lettuce. *J. Plant Soil* 27:55-61.

Xue, H., Tong, K. L., Marck, C., Grosjean, H., Tze-Fei, J., (2003). Transfer RNA paralogs: evidence for genetic code-amino acid biosynthesis coevolution and an archaeal root of life. *Gene* 310:59–66.

Yanishlieva-Maslarova N. V. (2001). Inhibiting oxidation. In: *Antioxidants in Food Practical Applications*. J. Pokorny, N. Yanishlieva and M. Gordon (Ed.), Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, pp. 22-70.

Youngson, R. (2004). ¿Que son los radicales libres? En: *Antioxidantes y radicales libres*. Editorial Acribia, Madrid, España, 15-29.

Zhang, Y. Q., Roote, J., Brogna, S., Davis, A. W., Barbash, D. A., Nash, D., Ashburner, M. (1999). Stress sensitive B encodes an Adenine Nucleotide Translocase in *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 153: 891--903.

Zayed, A., Lytle, C. M. Terry, N. (1998). Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. *Plant*. 206:284-292.

VII APENDICE

Apéndice 1. Análisis de varianza para la variable peso de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	4	420.93658	105.23414	0.39	<0.8150
Error	76	20496.94084	269.69659		
Total	80	20917.87742			

R ² 0.020123	C.V 12.9931
-------------------------	-------------

Apéndice 2. Análisis de varianza para la variable diámetro polar de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	4	0.34344993	0.08586248	0.64	<0.6379
Error	76	10.24886639	0.13485351		
Total	80	10.59231633			

R ² 0.032424	C.V 5.80657
-------------------------	-------------

Apéndice 3. Análisis de varianza para la variable diámetro ecuatorial de frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se)

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	4	0.1851775	0.04629438	0.52	<0.7213
Error	76	6.76627133	0.08902989		
Total	80	6.95144884			
		R ² 0.026639	C.V 5.02296		

Apéndice 4. Análisis de varianza para la variable firmeza del fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	4	51.57302284	12.89325571	11.45	<0.0001
Error	76	8.56154778	0.11265194		
Total	80	60.13457062			
		R ² 0.857627	C.V 8.56876		

Apéndice 5. Análisis de varianza para la variable contenido de sólidos solubles totales (Grados brix) en frutos de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	4	10.15753086	2.53938272	12.97	<0.0001
Error	76	14.87604938	0.19573749		
Total	80	25.03358025			
			R ² 0.405756	C.V 9.33477	

Apéndice 6. Análisis de varianza para la variable de contenido de micronutrientes (Fe) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	854.777778	284.925926	3.41	<0.0475
Error	14	1170.333333	83.595238		
Total	17	2025.111111			
			R ² 0.422089	C.V 25.5550	

Apéndice 7. Análisis de varianza para la variable contenido de micronutrientes (Zn) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	301.5000000	100.500000	11.08	<0.0005
Error	14	127.000000	9.0714286		
Total	17	428.500000			
		R ² 0.703617	C.V 21.7726		

Apéndice 8. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (N) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	0.0800000	0.02765871	0.26	<0.8542
Error	14	1.49909123	0.10707794		
Total	17	1.58206736			
		R ² 0.052448	C.V 16.7790		

Apéndice 9. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (P) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	0.02094071	0.00698024	0.31	<0.8153
Error	14	0.31157594	0.02225542		
Total	17	0.33251665			
		R ² 0.062976	C.V 28.1532		

Apéndice 10. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (K) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	1.57421667	0.52473889	3.92	<0.0319
Error	14	1.87507778	0.13393413		
Total	17	3.44929444			
		R ² 0.456388	C.V 32.9867		

Apéndice 11. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (Ca) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	0.01067778	0.00355926	0.47	<0.7066
Error	14	0.10556667	0.00754048		
Total	17	0.11624444			
		R ² 0.091856	C.V 26.7644		

Apéndice 12. Análisis de varianza para la variable contenido de macronutrientes (Mg) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	0.00170833	0.00056944	1.66	<0.2202
Error	14	0.00479167	0.00034226		
Total	17	0.00650000			
		R ² 0.262821	C.V 50.4554		

Apéndice 13. Análisis de varianza para la variable contenido de ácido ascórbico (Vitamina C) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	8.11054933	2.70351644	89.41	<0.0001
Error	14	0.42333867	0.03023848		
Total	17	8.533888			
		R ² 0.950393	C.V 9.5615		

Apéndice 14. Análisis de varianza para la variable actividad enzimática glutatión peroxidasa (GSH-Px) en el fruto de tomate con aplicación de dos tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	357853.8878	119284.6293	12.55	<0.0022
Error	8	76067.8177	9508.4772		
Total	11	433921.7055			
		R ² 0.824697	C.V 42.6497		

Apéndice 15. Análisis de varianza para la variable potencial oxido reducción (ORP) en el fruto de tomate con aplicación de tratamientos de selenio (2 y 5 mg L⁻¹ Se) en la solución nutritiva y un testigo (0 mg L⁻¹ Se).

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Valor de F	Pr<F
Modelo	3	3111.097928	1037.032643	19.01	<0.0001
Error	14	763.9083	54.564879		
Total	17	3875.006228			
		R ² 0.802863	C.V -14.2778		