

# **ACUMULACIÓN DE SELENIO EN TOMATE Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO, PRODUCTIVIDAD Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DEL FRUTO**

ARMANDO ARIEL BECVORT AZCURRA

## **TESIS**

Presentada como requisito parcial para  
Obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN HORTICULTURA**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México  
Octubre de 2011



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO  
NARRO”**  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

**ACUMULACIÓN DE SELENIO EN TOMATE Y SU EFECTO EN  
EL CRECIMIENTO, PRODUCTIVIDAD Y CAPACIDAD  
ANTIOXIDANTE DEL FRUTO**

TESIS  
POR

**ARMANDO ARIEL BECVORT AZCURRA**

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como  
requisito parcial, para obtener al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN HORTICULTURA**

COMITÉ PARTICULAR

Asesor Principal:

  
Dr. Adalberto Benavides Mendoza

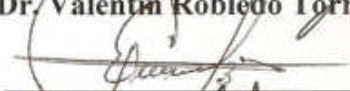
Asesor:

  
Dr. Homero Ramirez Rodriguez

Asesor:

  
Dr. Valentin Robledo Torres

Asesor:

  
Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo

  
Dr. Fernando Ruíz Zárate

Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Octubre de 2011.

## DEDICATORIA

**¡A Dios: Gracias Señor por todas tus bendiciones, por mi familia, por la salud, por el alimento, por la oportunidad de venir a estudiar a este hermoso país y permitirme alcanzar esta meta!**

A mis padres, Señora **Carmen Leonor Azcurra de Becvort** y Lic. **Walter Salvador Becvort Martínez**, por darme la vida, amor, sus sabios consejos, predicar con el ejemplo y su apoyo durante cada paso de mi vida. Gracias.

A mis Abuelos, Don **Genaro Azcurra Pintos**, **Josefina Cuevas de Azcurra** (Q.E.P.D.) y abuelita **Selmira Martínez**, por el amor, y la guía hacia el camino correcto que me otorgaron. Gracias.

A mis queridos hermanos, **Walter Adolfo Becvort Azcurra** y **David Humberto Becvort Azcurra**, por el amor fraternal, el apoyo incondicional desde la distancia, la unión que siempre tuvimos, el constante aliento para mejorar y sus sabios consejos. Gracias.

Por el apoyo brindado durante estos siete años de mi estadía en México, al Dr. **Alejandro Zárate Lupercio**, M.C. **Salvador Valencia Manzo**, Dr. **Miguel Capó Arteaga**, M. C. **Carlos Rojas**, Doña **Cuquis de Rojas**, M.C. **Martha Ochoa** y al Dr. **Adalberto Benavides Mendoza**. Gracias.

## AGRADECIMIENTOS

A mi “**Alma Terra Mater**”, la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**; noble institución que me formó como profesional y cuyo nombre llevaré siempre en alto.

Al Gobierno de México quien a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) me otorgó la beca para realizar mis estudios de postgrado.

Al programa de la Maestría en Ciencias en Horticultura y a la Academia de maestros bien organizada que lo conforma.

Al Dr. **Adalberto Benavides Mendoza** por todo el apoyo brindado, la asesoría oportuna, el tiempo que me dedicó y por ser mi ejemplo a seguir en ámbito laboral.

Al Dr. **Valentín Robledo Torres** y al Dr. **Homero Ramírez Rodríguez** por todo su apoyo y asesoría brindada.

Al Dr. **Mario Ernesto Vázquez Badillo** por su asesoría, el ejemplo tesonero demostrado y sus buenos consejos para la conclusión de este trabajo.

A la Maestra **Laura Olivia Fuentes Lara** por el apoyo y sus valiosas observaciones en el trabajo de laboratorio como también al T.L.Q. **Carlos Alberto Arévalo Sanmiguel**, por toda la dedicación, tiempo otorgado y consejos en la realización de los análisis en el **Laboratorio de Nutrición Animal** de la UAAAN.

Al Dr. **Alejandro Zárate Lupercio**, M.C. **Sergio Braham Sabag**, Dr. **Miguel Ángel Cappo Arteaga**, M.C. **Salvador Valencia Manzo**, Dr. **Mario Vázquez Badillo**, M.C. **Martha Ochoa**, M.C. **Hermila García**, Dr. **Alberto Sandoval Rangel**, Q. F. B. **Julia Medrano**, M. C. **Erika Rivas Martínez**, Ing. **Auri Gutiérrez**, M. C. **Isidro Morales**, M.C. **Elizabeth Zamora** y al señor **José Sosa Morales** (funcionario encargado del invernadero forestal): gracias por todo el apoyo que me han brindado para poder llegar a esta meta.

A mis amigos: **Jesús Aguilar Cerda**, **Carlos Yegros Díaz**, **Gilberto Romero**, **Juan Llamas**, **Oswaldo Turlan**, **Rosalino Sanabria**, **Víctor Basabe**, **Ricardo Villalba**, **Hugo Casco**, **Ariday Salinas**, **Jorge Morgado**, **Arnulfo Hernández**, **Emanuel Mora**, **Víctor Molinas**, **Maresa Aguirre**, **Beatriz Contreras**, **Lucia de la Rosa**, **Pilar Suaste**, **Gilberto García Albarrán** y **Guillermina Macchi**. Gracias por la amistad, por ayudarme a crecer como persona y por todo el apoyo brindado durante estos años.

A las personas que siempre me tendieron la mano y me ayudaron a crecer: **Sonia Decoud**, **Paola Penayo**, **Montserrat Vargas Negrete**, **Karina** y **Karen Rojas**, **Myriam Giménez Ávila**, **Cynthia Moncada** y **Doña Magdalena Puente de Rodríguez**. A los funcionarios del Departamento de Horticultura y de la Subdirección de Postgrado de la UAAAN: señoras **Ma. Guadalupe Ortiz**, **Ma. Guadalupe Rodríguez**, **Ana Ma. Aguirre Gámez**, **Yolanda Sánchez Valenciano**; señores **Juan Manuel Ramírez** y **Alfonso Delgado Pérez** (“el amigo”), por las buenas atenciones que he recibido de su parte y todas las facilidades otorgadas para la realización del trabajo de campo y conclusión de la tesis.

**COMPENDIO**

**ACUMULACIÓN DE SELENIO EN TOMATE Y SU EFECTO EN  
EL CRECIMIENTO, PRODUCTIVIDAD Y CAPACIDAD  
ANTIOXIDANTE DEL FRUTO**

Por

**ARMANDO ARIEL BECVORT AZCURRA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN HORTICULTURA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Octubre de 2011**

**Dr. Adalberto Benavides Mendoza –Asesor–**

***Palabras clave:*** *Lycopersicon esculentum*, antioxidantes, elementos traza, selenito de sodio.

El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la aplicación de selenito de sodio, en el riego y por aspersión foliar, sobre la acumulación de selenio en el fruto, tallos y hojas de tomate en invernadero. Se verificó el efecto sobre el crecimiento de la planta, el rendimiento y la capacidad antioxidante total (TAS) de los frutos. El experimento fue dividido en tres etapas: (1) aplicación de selenio en 0, 10 y 20 mg/L en la solución fertilizante en tres sustratos: suelo, peat moss y perlita; (2) aplicación de

selenio en 0, 2.5 y 5 mg/L en el riego en suelo y perlita; (3) aplicación de selenio en 0, 10 y 20 mg/L en aspersión foliar cada 20 días. El selenio en 10 y 20 mg/L en la solución nutritiva causó un efecto negativo en la biomasa, con acumulación de selenio en raíz, tallo y hojas  $>15 \mu\text{g/g}$ . En cambio el rendimiento de fruto fue mayor con 10 mg/L pero disminuyó fuertemente con 20 mg/L. Al aplicar selenio en el riego a 2.5 y 5 mg/L no se modificó el rendimiento ni la biomasa, con acumulación de selenio en el fruto  $>10 \mu\text{g/g}$ . La aplicación foliar de selenio permitió una acumulación de selenio en el fruto  $>10 \mu\text{g/g}$  conjuntamente con aumento en la biomasa pero sin aumentar la producción de fruto. La acumulación de selenio en frutos de plantas testigo llegó a  $6 \mu\text{g/g}$ , con un máximo de  $20.89 \mu\text{g/g}$  al aplicar 5 mg/L de selenio en el riego. La TAS del fruto disminuyó 25% en los tratamientos con 10 y 20 mg/L aplicados por el riego. En el resto de los tratamientos el efecto del selenio fue positivo elevándose la TAS en 36% al aplicar 20 mg/L de selenio por aspersión foliar y 38% con 5 mg/L en el riego.

**ABSTRACT**

**SELENIUM ACCUMULATION OF TOMATO AND ITS EFFECT  
ON THE PLANT GROWTH, YIELD AND FRUIT ANTIOXIDANT  
CAPACITY**

**By**

**ARMANDO ARIEL BECVORT AZCURRA**

**MASTER OF SCIENCES  
IN HORTICULTURE**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. October 2011**

**Dr. Adalberto Benavides Mendoza –Adviser–**

**Key words:** *Lycopersicon esculentum*, antioxidants, trace elements, sodium selenite.

The aim of this study was to determine the effect of sodium selenite application through irrigation water and foliar spray on the selenium accumulation in the fruit, stems and leaves of greenhouse tomato. It was verified the effect on plant growth, yield and total antioxidant status (TAS) of the fruits. The experiment was divided into three stages: (1) application of selenium at 0, 10 and 20 mg/L in the fertilizer solution using three substrates: soil, peat moss and perlite; (2) application of selenium at 0, 2.5 and



5 mg/L in the fertilizer in soil and perlite substrates; (3) application of selenium at 0, 10 and 20 mg/L as a foliar spray every 20 days. Selenium at 10 and 20 mg/L in the fertilizer solution caused a negative effect on biomass, accumulating selenium in root and shoot tissue  $>15 \mu\text{g/g}$ . The fruit yield was higher with 10 mg/L but decreased drastically with 20 mg/L. Applying the fertilizer solution with 2.5 and 5 mg/L of selenium did not change fruit yield or biomass, accumulating selenium in fruit  $>10 \mu\text{g/g}$ . Foliar application of selenium allowed an accumulation of selenium in fruit  $>10 \mu\text{g/g}$  together with an increase in shoot biomass without increasing fruit production. The concentration of selenium in fruits from control plants was  $6 \mu\text{g/g}$ , reaching  $20.89 \mu\text{g/g}$  by applying 5 mg/L of selenium in the fertilizer solution. TAS of fruit decreased 25% in the treatment of selenium with 10 and 20 mg/L applied by fertilizer solution. The rest of the selenium treatments increased TAS; specifically, in 36% when applied 20 mg/L of selenium foliar spray and 38% with 5 mg/L in fertilizer solution.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	<b>PÁGINA</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
HIPÓTESIS.....	3
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
<b>III. ARTÍCULO: ACUMULACIÓN DE SELENIO EN TOMATE Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO, PRODUCTIVIDAD Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DEL FRUTO.....</b>	<b>7</b>
RESUMEN.....	8
SUMMARY.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
CONCLUSIONES.....	31
AGRADECIMIENTOS.....	31
LITERATURA CITADA.....	32
<b>IV. CONCLUSIONES.....</b>	<b>37</b>
<b>V. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>38</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Cuadro 1.</b> Efecto de aplicaciones de selenio vía riego (etapas 1 y 2) en diferentes sustratos y vía foliar (etapa 3), sobre la acumulación de biomasa en la raíz (R), tallos y hojas (H) y frutos (F).....	18

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo del procedimiento experimental dividido en tres etapas.....	13
<b>Figura 2.</b> Efecto de la aplicación de los tratamientos en la concentración promedio de selenio en la raíz de las plantas de tomate.....	23
<b>Figura 3.</b> Efecto de la aplicación de los tratamientos en la concentración promedio de selenio en tallos y hojas de las plantas de tomate.....	25
<b>Figura 4.</b> Efecto de la aplicación de los tratamientos en la concentración de selenio en los frutos de tomate.....	27
<b>Figura 5.</b> Efecto de la aplicación de los tratamientos en la capacidad antioxidante total (TAS) de los frutos de tomate.....	29

## I. INTRODUCCIÓN

El selenio (Se) es un metaloide benéfico que se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre, sin bien en muy baja concentración. El selenio no se considera un elemento esencial para las plantas, si bien su presencia y biodisponibilidad es esencial desde el punto de vista de la salud de los organismos que consumen esas plantas. Se incluye en el Grupo 16 de la Tabla Periódica que también contiene al azufre y al telurio, elementos con los que asocia tanto en minerales como en el suelo y en los organismos. El selenio, al igual que el azufre tiene múltiples estados de oxidación y por ello muchas formas químicas. Sin embargo en las plantas se absorbe y transporta como selenito ( $\text{Se}^{4+}$ ) y selenato ( $\text{Se}^{6+}$ ) utilizando los mecanismos de transporte asociados con la absorción del azufre y el silicio. En el suelo la concentración relativa de selenito y selenato depende del pH y el potencial redox, predominando el selenito al aumentar la acidez o la cantidad de grupos reductores. Una vez absorbidos el selenito o selenato pueden permanecer en forma inorgánica, volatilizarse como metil-seleniuro o asimilarse en formas reducidas acopladas a seleno-aminoácidos y seleno-proteínas, moléculas con una elevada capacidad antioxidante y de destoxificación de xenobióticos.

La concentración de selenio en la mayoría de los suelos y fuentes de agua del mundo es muy baja, reflejándose esta situación en la escasa acumulación de selenio en las plantas. Entre estas existen diversas categorías de acuerdo a la capacidad de absorber y asimilar selenio. Casi todas las especies acumulan el selenio en sus tejidos en muy baja concentración, esta es la situación de las plantas utilizadas como hortalizas de fruto, hojas y raíz, como es el caso del tomate, lechuga y la zanahoria. Otras especies como las gramíneas de zonas templadas, acumuladoras naturales de silicio, así como algunas que

producen frutos y semillas secos, como algunas nueces, acumulan en sus estructuras reproductivas una mayor concentración de selenio. Algunas especies hortícolas en las familias de las liliáceas y las crucíferas son acumuladoras naturales de azufre, y asimilan selenio en gran cantidad cuando este se encuentra disponible en el suelo. Por último, existen especies llamadas hiperacumuladoras de selenio capaces de absorber, transportar, asimilar y metabolizar grandes cantidades de este metaloide. Esta última habilidad se relaciona con la capacidad de asimilar el selenio en aminoácidos no proteicos.

La transferencia del selenio del suelo y agua a los humanos se lleva a cabo por medio de los productos agrícolas y pecuarios, encontrándose que la cantidad de selenio en los alimentos es un reflejo del contenido de este elemento en los suelos. Diversos factores como el uso de nuevos fertilizantes fosfatados con bajo contenido de azufre y selenio, la apertura de zonas de cultivo en suelos menos fértiles y, en general, el cambio en las dietas sobre todo en los países más industrializados, ha originado una disminución en el aporte de selenio por la dieta. Por ello se encuentran en curso, una serie de esfuerzos por elevar la cantidad y la biodisponibilidad del selenio a través de la ingesta en los alimentos, sobre todo de índole hortícola.

## **OBJETIVO GENERAL**

Determinar el efecto de la acumulación de selenio en el tomate, determinando los cambios en el crecimiento, producción de fruto y capacidad antioxidante total de los frutos.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la magnitud de acumulación de selenio aplicado como selenito de sodio por medio de la solución nutritiva y por aspersión foliar.
- Comprobar el efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de selenio sobre la acumulación de este elemento.
- Documentar los cambios en el crecimiento, producción de frutos y capacidad antioxidante total de estos últimos en respuesta a la acumulación de selenio.

## **HIPÓTESIS**

Los aportes de selenito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ) por medio de la solución nutritiva utilizada en el riego y por medio de aspersiones foliares, permiten mayor acumulación de selenio en todos los tejidos de la planta, aumentando asimismo la capacidad antioxidante total.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

El selenio (Se) es un elemento del Grupo 16 de la tabla periódica que también incluye al azufre y al telurio. El Se al igual que el S tiene variedad en sus estados de oxidación como seleniuro ( $\text{Se}^{2-}$ ), selenio elemental ( $\text{Se}^0$ ), selenito ( $\text{Se}^{4+}$ ) y selenato ( $\text{Se}^{6+}$ ). Las formas oxidadas del selenio ( $\text{Se}^{4+}$  y  $\text{Se}^{6+}$ ) son absorbidas por las plantas debido a su elevada solubilidad, sin embargo el  $\text{Se}^0$  y el  $\text{Se}^{2-}$  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 y una media de 0.4 mg/kg, aunque pueden encontrarse concentraciones de  $\geq 1200$  mg Se  $\text{kg}^{-1}$ , en suelos denominados seleníferos. En algunas partes de México el contenido de selenio en el suelo es bajo llegando a 0.05 mg/kg (Ramírez-Bribiesca *et al.*, 2001). En el sureste de Coahuila un trabajo preliminar no publicado mostró un contenido de 1.5 mg  $\text{kg}^{-1}$  de selenio en un suelo para uso agrícola, el cual se considera adecuado para cultivos como *Lolium perenne* y *Lactuca sativa* (Hartikainen *et al.*, 2000; Xue *et al.*, 2001). Un nivel análogo de selenio de 0.8-1.8 mg/kg en sedimentos fue reportado en Sonora (García-Hernández, *et al.*, 2000).

El selenio ocurre naturalmente en el ambiente y puede ser liberado desde procesos tanto naturales como inducidos por la actividad humana para de allí incorporarse al suelo y agua (Fordyce, 2005; White *et al.*, 2004).

Cuando el selenio se encuentra en forma de selenato +6 parece ser movilizado a las células vegetales a través de un proceso de transporte primario acoplado a H<sup>+</sup>-ATPasas (Byrne *et al.*, 2010), posiblemente por medio de un transportador de sulfato (Terry *et al.*, 2000) o de silicio (Zhao *et al.*, 2010). La absorción de selenito +4 parece ocurrir por un mecanismo diferente a la del selenato (Terry *et al.* 2000), posiblemente a través de un transportador de fosfato (Zhao *et al.*, 2010). Una vez absorbido, el selenato tiende a detectarse en los tejidos radicales en forma inorgánica, mientras que el selenito parece formar rápidamente compuestos orgánicos (De Souza *et al.* 1998; Cartes, 2006). En general se considera que el selenio se relaciona con el metabolismo antioxidante (Rayman, 2008) y se sabe que el selenito, sobre el selenato, induce más efectivamente esta actividad (Cartes *et al.*, 2005). Diferentes autores mencionan la relación entre el selenio, el metabolismo antioxidante y la tolerancia al estrés en plantas (Hartikainen *et al.*, 2000; Peng *et al.*, 2002; Cartes *et al.*, 2005; Djanaguiraman *et al.*, 2005; Hasanuzzaman *et al.*, 2010).

Morris y Levander (1970) encontraron que la mayor parte de los frutos y vegetales creciendo en suelos no seleníferos mostraron concentraciones de selenio menores a 0.01 µg/g. El contenido bajo de selenio en frutos y vegetales parece ser la situación normal en muchos lugares (Euroola *et al.*, 1989; Combs, 2001; Fordyce *et al.*, 2005; Broadley *et al.*, 2006; Rayman, 2002, 2008).

Casi todos los cultivos, entre ellos el tomate, son del tipo denominado no acumulador de selenio, es decir, plantas para las cuales más de 25 µg de selenio por gramo de peso seco de raíces y hojas resulta en toxicidad (White *et al.*, 2004). La toxicidad puede manifestarse a través de estrés oxidativo considerando la habilidad pro-



oxidante del selenio o por sustitución competitiva del azufre en las proteínas (Hartikainen *et al.*, 2000).

La transferencia del selenio del suelo y agua a los humanos se lleva a cabo por medio de los productos agrícolas y pecuarios, encontrándose que la cantidad de selenio en los alimentos es un reflejo del contenido de este elemento en los suelos (Rayman, 2002; Hira *et al.*, 2003; Rayman, 2008). En humanos la ingesta puede variar desde 10  $\mu\text{g}$  por día en áreas con bajos contenido de selenio en los suelos, a unos 5000  $\mu\text{g}$  diarios en las zonas donde se tienen suelos seleníferos. El valor de referencia de consumo de selenio es de 60 a 75  $\mu\text{g}$  por día según los datos de 1980 del US Food and Nutrition Board (Broadley *et al.*, 2006), si bien puede elevarse a 300-600  $\mu\text{g}$  por día (Aaseth, 1993; Combs, 2001). En general, se considera que el contenido de Se en la dieta en muchos países es bajo (Combs, 2001; Rayman, 2002, 2008). En el caso de los países más industrializados la disminución en la ingesta de harinas y carnes puede asociarse con la disminución de la ingesta de selenio (Broadley *et al.*, 2006), lo cual permite considerar el posible beneficio de elevar el contenido de selenio en frutas y vegetales.

### **III. ARTÍCULO**

ACUMULACIÓN DE SELENIO EN TOMATE Y SU EFECTO EN EL  
CRECIMIENTO, PRODUCTIVIDAD Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE  
DEL FRUTO

**ACUMULACIÓN DE SELENIO EN TOMATE Y SU EFECTO EN  
EL CRECIMIENTO, PRODUCTIVIDAD Y CAPACIDAD  
ANTIOXIDANTE DEL FRUTO**

**Selenium Accumulation of Tomato and its Effect on the Plant Growth, Yield and  
Fruit Antioxidant Capacity**

**Armando Becvort-Azurra<sup>1</sup>, Laura Olivia Fuentes-Lara<sup>2</sup>, Adalberto Benavides-  
Mendoza<sup>1\*</sup>, Homero Ramírez<sup>1</sup>, Valentín Robledo-Torres<sup>1</sup>, María de las Nieves Rodríguez-  
Mendoza<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista,  
Saltillo, Coahuila, C.P. 25315, México.

<sup>2</sup>Departamento de Nutrición Animal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

<sup>3</sup>Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Carretera México-  
Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230.

\*Autor para correspondencia [abenmen@uaaan.mx](mailto:abenmen@uaaan.mx)

**RESUMEN**

El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la aplicación de selenito de sodio, en el riego y por aspersion foliar, sobre la acumulación de selenio en el fruto, tallos y hojas de tomate en invernadero. Se verificó el efecto sobre el crecimiento de la planta, el rendimiento y la capacidad antioxidante total (TAS) de los frutos. El experimento fue dividido en tres etapas: (1) aplicación de selenio en 0, 10 y 20 mg/L en la solución fertilizante en tres sustratos: suelo, peat

moss y perlita; (2) aplicación de selenio en 0, 2.5 y 5 mg/L en el riego en suelo y perlita; (3) aplicación de selenio en 0, 10 y 20 mg/L en aspersión foliar cada 20 días. El selenio en 10 y 20 mg/L en la solución nutritiva causó un efecto negativo en la biomasa, con acumulación de selenio en raíz, tallo y hojas  $>15 \mu\text{g/g}$ . En cambio el rendimiento de fruto fue mayor con 10 mg/L pero disminuyó fuertemente con 20 mg/L. Al aplicar selenio en el riego a 2.5 y 5 mg/L no se modificó el rendimiento ni la biomasa, con acumulación de selenio en el fruto  $>10 \mu\text{g/g}$ . La aplicación foliar de selenio permitió una acumulación de selenio en el fruto  $>10 \mu\text{g/g}$  conjuntamente con aumento en la biomasa pero sin aumentar la producción de fruto. La acumulación de selenio en frutos de plantas testigo llegó a  $6 \mu\text{g/g}$ , con un máximo de  $20.89 \mu\text{g/g}$  al aplicar 5 mg/L de selenio en el riego. La TAS del fruto disminuyó 25% en los tratamientos con 10 y 20 mg/L aplicados por el riego. En el resto de los tratamientos el efecto del selenio fue positivo elevándose la TAS en 36% al aplicar 20 mg/L de selenio por aspersión foliar y 38% con 5 mg/L en el riego.

**Palabras clave:** *Lycopersicon esculentum*, antioxidantes, elementos traza, selenito de sodio.

## SUMMARY

The aim of this study was to determine the effect of sodium selenite application through irrigation water and foliar spray on the selenium accumulation in the fruit, stems and leaves of greenhouse tomato. It was verified the effect on plant growth, yield and total antioxidant status (TAS) of the fruits. The experiment was divided into three stages: (1) application of selenium at 0, 10 and 20 mg/L in the fertilizer solution using three substrates: soil, peat moss and perlite; (2) application of selenium at 0, 2.5 and 5 mg/L in the fertilizer in soil and perlite substrates; (3) application of selenium at 0, 10 and 20 mg/L as a foliar spray every 20 days. Selenium at 10 and 20 mg/L in the fertilizer solution caused a negative effect on biomass, accumulating selenium in root and shoot tissue  $>15 \mu\text{g/g}$ . The fruit yield was

higher with 10 mg/L but decreased drastically with 20 mg/L. Applying the fertilizer solution with 2.5 and 5 mg/L of selenium did not change fruit yield or biomass, accumulating selenium in fruit  $>10 \mu\text{g/g}$ . Foliar application of selenium allowed an accumulation of selenium in fruit  $>10 \mu\text{g/g}$  together with an increase in shoot biomass without increasing fruit production. The concentration of selenium in fruits from control plants was  $6 \mu\text{g/g}$ , reaching  $20.89 \mu\text{g/g}$  by applying 5 mg/L of selenium in the fertilizer solution. TAS of fruit decreased 25% in the treatment of selenium with 10 and 20 mg/L applied by fertilizer solution. The rest of the selenium treatments increased TAS; specifically, in 36% when applied 20 mg/L of selenium foliar spray and 38% with 5 mg/L in fertilizer solution.

***Index words:*** *Lycopersicon esculentum*, *antioxidant s*, *trace elements*, *sodium selenite*.

## INTRODUCCIÓN

El selenio (Se) es un elemento del Grupo 16 de la tabla periódica que también incluye al azufre y al telurio. El Se al igual que el S tiene variedad en sus estados de oxidación como seleniuro ( $\text{Se}^{2-}$ ), selenio elemental ( $\text{Se}^0$ ), selenito ( $\text{Se}^{4+}$ ) y selenato ( $\text{Se}^{6+}$ ). Las formas oxidadas de este elemento ( $\text{Se}^{4+}$  y  $\text{Se}^{6+}$ ) son absorbidas por las plantas debido a su elevada solubilidad, sin embargo el  $\text{Se}^0$  y el  $\text{Se}^{2-}$  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 y una media de 0.4 mg/kg, aunque pueden encontrarse concentraciones de  $\geq 1200 \text{ mg Se kg}^{-1}$ , en suelos denominados seleníferos. En algunas partes de México el contenido en el suelo es bajo llegando a 0.05 mg/kg (Ramírez-Bribiesca *et al.*, 2001). En el sureste de Coahuila un trabajo preliminar no publicado mostró un contenido de  $1.5 \text{ mg kg}^{-1}$  de selenio en un suelo para uso agrícola, el cual se considera adecuado para cultivos como *Lolium perenne* y *Lactuca sativa* (Hartikainen *et al*, 2000;. Xue *et al*, 2001).

Un nivel análogo del elemento de 0.8-1.8 mg/kg en sedimentos fue reportado en Sonora (García-Hernández, *et al.*, 2000).

El selenio ocurre naturalmente en el ambiente y puede ser liberado desde procesos tanto naturales como inducidos por la actividad humana para de allí incorporarse al suelo y agua (Fordyce, 2005; White *et al.*, 2004).

Cuando el selenio se encuentra en forma de selenato +6 parece ser movilizado a las células vegetales a través de un proceso de transporte primario de tipo ABC acoplado a H<sup>+</sup>-ATPasas (Byrne *et al.*, 2010), posiblemente por medio de un transportador de sulfato (Terry *et al.*, 2000) o de silicio (Zhao *et al.*, 2010). La absorción de selenito +4 parece ocurrir por un mecanismo diferente a la del selenato (Terry *et al.* 2000), posiblemente a través de un transportador de fosfato (Zhao *et al.*, 2010). Una vez absorbido, el selenato tiende a detectarse en los tejidos radicales en forma inorgánica, mientras que el selenito parece formar rápidamente compuestos orgánicos (De Souza *et al.* 1998; Cartes, 2006).

En general se considera que el selenio se relaciona con el metabolismo antioxidante (Rayman, 2008) y se sabe que el selenito, sobre el selenato, induce más efectivamente esta actividad (Cartes *et al.*, 2005).

Morris y Levander (1970) encontraron que la mayor parte de los frutos y vegetales creciendo en suelos no seleníferos mostraron concentraciones de selenio menores a 0.01 µg/g. Este elemento se encuentra normalmente en baja concentración en frutos y vegetales (Euroola *et al.*, 1989; Combs, 2001; Fordyce *et al.*, 2005; Broadley *et al.*, 2006; Rayman, 2002, 2008).

El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la acumulación de selenio en el tomate determinando los cambios en el crecimiento, la producción de fruto y la capacidad antioxidante total de estos últimos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio constó de tres etapas (Figura 1) que se describen a continuación.

### **Etapas 1**

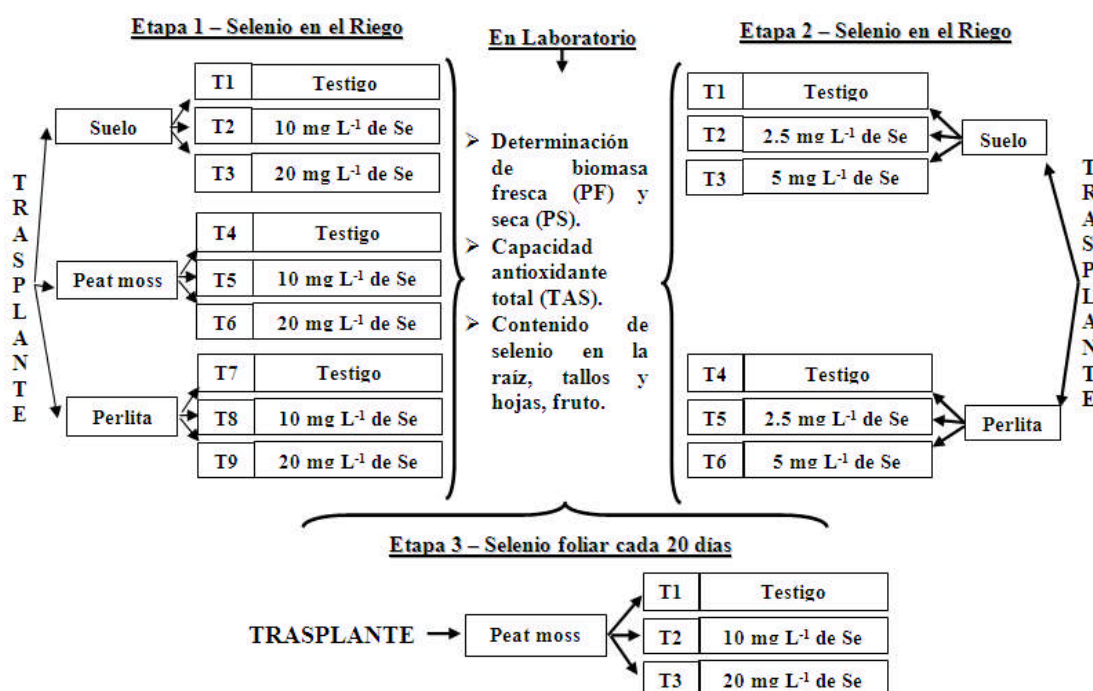
La primera etapa del trabajo fue realizado bajo invernadero en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México, siendo las coordenadas geográficas del sitio: 25° 21' 20'' latitud norte, 101° 01' 50'' longitud oeste y altitud de 1,776 m.s.n.m. Se utilizó como material experimental tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) de la variedad "Río Grande" (de la semillera EDENA) con hábito de crecimiento determinado. Las semillas fueron sembradas el 9 de abril de 2010 en dos charolas de poliestireno de 200 cavidades, utilizando como sustrato peat moss y perlita (75:25), las plántulas fueron trasplantadas a los 31 días después de la siembra (DDS) a macetas de polietileno de color negro de 20 L con tres tipos de sustrato: suelo agrícola, peat moss y perlita.

A las plantas en cada sustrato se les aplicaron tres tratamientos que consistieron en riego con solución nutritiva (Steiner, 1984) como testigo, riego con la misma solución, suplementada con 10 y 20 mg L<sup>-1</sup> de Se usando como fuente selenito de sodio (Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>). El total de tratamientos fue de nueve. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con arreglo factorial A x B, donde los factores fueron los sustratos (A) y las concentraciones de selenio (B), con 15 repeticiones. Los sistemas de riego para la aplicación de cada tratamiento de solución nutritiva y selenio fueron totalmente independientes para evitar la posibilidad de contaminación.

Las macetas fueron establecidas en un invernadero de tipo túnel, con cubierta rígida de policarbonato y ventilación activa a través de extractores y pared húmeda, utilizando un acomodo en hileras con separación de cuarenta centímetros entre plantas. La solución nutritiva se fue adaptando según las etapas de desarrollo del cultivo al 30, 50, 75 y 100%, a los 5 a 30, 31 a 40, 41 a 70, 71 a 100 DDS, respectivamente y se mantuvo el pH de la solución en 6.5, utilizando ácido sulfúrico. A los diez DDT, se aplicaron en promedio 0.5 L de solución por

maceta día<sup>-1</sup>, aumentando a 0.8 L día<sup>-1</sup> a los 30 DDT y llegando a 1.2 -1.8 L día<sup>-1</sup> después de los 71 DDT. La antesis se presentó a los 95 DDT y la cosecha de fruto finalizó a los 120 DDT cuando se alcanzó el tercer racimo.

Las plantas en suelo y en peat moss recibieron el mismo volumen de riego por planta. En el caso de las plantas en el sustrato perlita, por la característica baja retención de agua del mismo, recibieron mayor volumen de agua de riego por día, pero no mayor cantidad de fertilizantes. La fuente de selenio fue selenito de sodio grado reactivo (Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, Sigma-Aldrich). Este compuesto fue disuelto en agua destilada para obtener una solución madre colocada en un frasco ámbar de 3 L, de la cual se fue tomando el volumen necesario para adecuar la concentración de los tratamientos de 10 y 20 mg L<sup>-1</sup> de Se, los cuales se empezaron a aplicar a los 15 DDT. Cuando se presentaron plagas o patógenos se llevó a cabo la aplicación de imidacloprid, tiabendazol, metalaxil y captán, según lo recomendado por los fabricantes.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del procedimiento experimental dividido en tres etapas.



A los 120 DDT el experimento fue terminado. Se colectaron los frutos en bolsas de papel etiquetadas y se obtuvo el peso fresco de los frutos por planta. Antes de llegar al tiempo de la cosecha algunos frutos en la etapa de rayado fueron colectados al azar de cada tratamiento. Después de obtener su peso fresco fueron colocados en un congelador a temperatura de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  antes de ser usados en la determinación de la capacidad antioxidante total.

La raíz fue separada de los tallos y hojas, realizando un corte al ras del sustrato, después de pesar estas estructuras para determinar el peso fresco fueron colocadas en bolsas de papel e introducidas en una estufa de secado a una temperatura constante de  $60^{\circ}\text{C}$  hasta obtener peso seco constante. Para obtener el PS de frutos se seleccionaron al azar los obtenidos de diez repeticiones; éstos fueron cortados en rodajas finas y colocadas sobre bandejas de papel aluminio e introducidos a la estufa de secado a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hasta obtener peso constante. Una vez secas las muestras molidas en mortero de porcelana y luego colocadas en recipientes de policarbonato para su posterior análisis.

Previo a la determinación del selenio en los tejidos, las muestras fueron sometidas a digestión con ácido nítrico y perclórico (3:1), utilizando una plancha de calentamiento a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Posteriormente la solución fue filtrada y aforó a una solución de trabajo de 100 ml con agua desionizada. El análisis se realizó en el Laboratorio de Caracterización Química, del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), utilizando un Espectrómetro de Masa Inductivamente Acoplado a Plasma (ICP-MS) marca THERMO JARELL ASH, Modelo IRIS Advantage, siguiendo el procedimiento 984.27 de la AOAC (2000).

El análisis de la capacidad antioxidante total (TAS) se realizó en los frutos que fueron previamente congelados. El valor de TAS fue determinado usando el “Total Antioxidant Status Kit Assay” de Calbiochem®, el cual se basa en la técnica desarrollada por Miller *et al.* (1993) y consta de una solución buffer de fosfato (pH 7.2); cromógeno (Metmioglobina y ABTS® [catión radical 2,2-Azinobis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfonato)]); sustrato (peróxido de hidrógeno estabilizado) y como estándar se utilizó TROLOX (6-Hidroxi-2, 5, 7, 8-tetrametilcroman-2-

ácido carboxílico), este último es un análogo de la vitamina E. Para la preparación de la muestra se tomó al azar de cada tratamiento un fruto congelado que presentaba coloración de maduración intermedia, fue cortado en segmentos los cuales se pasaron a un mortero de porcelana previamente congelado. A la muestra se le agregó nitrógeno líquido para su molienda y una vez terminado se tomaron cinco gramos de la muestra molida, que posteriormente se mezcló en un tubo de vidrio con 10 ml de buffer de fosfato pH 7.2 para centrifugarse a 10,000 rpm por 10 minutos. Del sobrenadante de cada muestra se tomaron 20  $\mu$ L de cada muestra y se realizaron las lecturas de absorbancia en un espectrofotómetro a 600 nm. La concentración del estándar TROLOX utilizado fue 2.3 mM, de acuerdo al kit utilizado. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\text{TAS (mM)} = \frac{2.3 \text{ mM} \times (\Delta A \text{ del blanco} - \Delta A \text{ de la muestra})}{(\Delta A \text{ del blanco} - \Delta A \text{ del estandar})}$$

El análisis estadístico de los datos se realizó con el paquete estadístico Statistical Analysis System versión 6.12 (SAS, 1987) aplicándose un análisis de varianza con pruebas de separación de medias de Tukey ( $p=0.05$ ). Los gráficos fueron obtenidos con SigmaPlot@10.

## **Etapas 2**

La segunda etapa del trabajo fue parecida a la primera etapa, en cuanto a los procedimientos agronómicos y determinaciones realizadas. Las variantes fueron que el selenio se aplicó en menor concentración y que los sustratos no incluyeron al peat moss. Se usaron semillas de la misma variedad y lote, sembradas el 5 de agosto de 2010. Se trasplantaron en las condiciones, diseño y cuidados agronómicos similares a la etapa anterior, utilizando como sustrato suelo agrícola y agrolita. Los tratamientos de fertilización consistieron en riego con solución Steiner, como testigo y riego con la misma solución suplementada con 2.5 y 5  $\text{mg L}^{-1}$

de selenio aplicado como  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  totalizando seis tratamientos. El experimento fue cosechado a los 140 DDT.

### **Etapas 3**

En la tercera etapa se usaron semillas de la misma variedad y lote, y también se sembraron el 5 de agosto de 2010. Se trasplantaron en las condiciones, diseño y cuidados agronómicos similares a la etapa anterior, utilizando como único sustrato peat moss. La fertilización consistió en riego con solución Steiner, dosificado según los criterios utilizados para los tratamientos testigo de las etapas anteriores. El selenio fue aplicado como aspersión foliar. Se aplicaron tres tratamientos, los cuales consistieron en aspersiones con agua destilada como tratamiento control y soluciones de 10 y 20  $\text{mg L}^{-1}$  de selenio en forma de  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  cada 20 días. El experimento fue cosechado a los 140 DDT. Las determinaciones de laboratorio realizadas en esta etapa fueron similares a las descritas en las dos etapas anteriores.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Crecimiento y Productividad**

En el Cuadro 1 se presentan los resultados de acumulación de peso fresco y de biomasa seca de la raíz, hojas y tallo y frutos de las plantas tratadas con diferentes concentraciones de selenio vía riego (etapa 1 y 2) y vía foliar (etapa 3). Dentro de cada etapa las diferencias entre sustratos y la interacción estadística selenio x sustrato no fueron significativas.

Para las tres etapas del experimento la concentración de materia seca en la raíz y en las hojas y tallos no se vio modificada ni por la concentración de selenio ni por su forma de aplicación. Sin embargo, en el fruto si fue posible observar un efecto negativo del selenio al aplicarlo por el riego en los sustratos peat moss y perlita, no ocurriendo así al usar suelo como sustrato. En cambio, cuando se empleó la aspersión foliar, el selenio ejerció un efecto positivo sobre el contenido de materia seca del fruto.

**Etapa uno.** La aplicación de selenio en alta concentración tuvo un efecto negativo sobre el peso de la raíz y de tallos y hojas, sobre todo en el sustrato perlita en donde las plantas tratadas mostraron de forma constante hojas cloróticas. 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<sup>-1</sup> de suelo causen disminución en su crecimiento y metabolismo (Hartikainen *et al.*, 2000), aparentemente por el efecto prooxidante que ejerce el selenio en alta concentración, existiendo poca información acerca de las respuestas de las especies de cultivo hortícola a las concentraciones de selenio (Hasanuzzaman *et al.*, 2010). En especies sensibles a la concentración de selenio, como la lechuga, ocurre un incremento en la biomasa con 0.1 mg Se kg<sup>-1</sup> suelo, pero se llega a un efecto negativo con 1 mg Se kg<sup>-1</sup> (Xue *et al.*, 2001).

Por otra parte, no todas las respuestas de la planta fueron negativas, tanto el peso fresco como la biomasa seca del fruto de las plantas en suelo y peat moss se elevaron significativamente al aplicar 10 mg/L de selenio; disminuyendo a valores iguales a los del testigo con la aplicación de 20 mg/L. Por su parte, en las plantas creciendo en perlita la producción de fruto se vio muy disminuida con 10 mg/L de selenio y fue nula al aplicar la concentración de 20 mg/L. Este efecto negativo del selenio en sustratos inertes fue descrito por Turakainen *et al.* (2004) quienes encontraron que el límite de tolerancia al selenio disminuye sensiblemente en un sustrato de arena silíceo llegando solo hasta 0.3 mg kg<sup>-1</sup> de arena. Estos resultados parecen indicar algún tipo de efecto de amortiguamiento del suelo y del peat moss, que pudiera deberse a la formación de complejos orgánicos de selenio o por el secuestro del elemento en la biomasa microbiana (Bolan y Duraisamy, 2003; White *et al.*, 2004).

**Cuadro 1. Efecto de aplicaciones de selenio vía riego (etapas 1 y 2) en diferentes sustratos y vía foliar (etapa 3), sobre la acumulación de biomasa en la raíz (R), tallos y hojas (H) y frutos (F).**

Tratamiento	PFR	PSR	MSR	PFH	PSH	MSH	PFF	PSF	MSF
Sustrato+Se (mg/L)	- g planta <sup>-1</sup> - -	%	%	- - g planta <sup>-1</sup> - -	%	%	- - g planta <sup>-1</sup> - -	%	%
<b>Etapa 1 (0, 10 y 20 mg/L de selenio por el riego)</b>									
Suelo+0	387 a <sup>†</sup>	48.3 a	12.5 a	705 b	102 b	13.0 a	989 cd	60 c	6.07 a
Suelo+10	309 bc	36.4 bc	11.8 a	670 b	99 b	14.0 a	1606 a	80 a	6.09 a
Suelo+20	311 bc	39.5 ab	12.7 a	575 c	85 c	13.0 a	1038 cd	52 d	6.23 a
Peat-moss+0	395 a	44.2 ab	11.2 a	804 a	117 a	13.0 a	1083 c	62 c	5.77 b
Peat-moss+10	250 cd	29.3 cd	11.7 a	687 b	100 b	14.0 a	1442 b	72 b	5.72 b
Peat-moss+20	226 d	24.4 d	10.8 a	495 d	72 d	13.0 a	968 d	48 d	5.73 b
Perlita+0.	382 ab	46.2 a	12.1 a	449 d	64 d	14.0 a	1067 cd	60 c	5.62 b
Perlita+10	102 e	12.13 e	11.9 a	211 e	30 e	13.0 a	199 e	11 e	5.67 b
Perlita+20	73 e	8.4 e	11.5 a	145 f	21 f	14.0 a	‡	‡	‡
<b>Etapa 2 (0, 2.5 y 5 mg/L de selenio por el riego)</b>									
Suelo+0	416 b	54.0 b	13.0 a	1964 a	280 a	14.20 a	2852 a	175 ab	6.14 ab
Suelo+2.5	408 b	54.3 b	13.3 a	2049 a	292 a	14.30 a	2744 a	167 ab	6.08 ab
Suelo+5	374 c	50.1 b	13.1 a	1405 b	188 b	13.40 ab	2425 a	150 b	6.19 ab
Perlita+0	488 a	60.5 a	12.4 ab	1509 b	204 b	13.60 ab	2929 a	186 a	6.32 a
Perlita+2.5	477 a	60.1 a	12.6 ab	1013 c	129 c	12.70 b	2871 a	167 ab	5.81 b
Perlita+5	155 d	18.7 c	12.1 b	430 d	58 d	13.5 ab	938 b	54 c	5.83 b
<b>Etapa 3 (0, 10 y 20 mg/L de selenio foliar)</b>									
Peat-moss+0	455 b	47 a	10.4 a	2126 c	294 b	13.90 a	2997 a	172 b	5.70 c

Peat-moss+10	535 a	55 a	10.2 a	2624 b	366 a	13.98 a	2840 a	178 b	6.2 b
Peat-moss+20	510 ab	53 a	10.3 a	2885 a	402 a	13.97 a	3148 a	217 a	6.9 a

† Literales distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ‡ No produjeron frutos. PFR: peso fresco de raíz; PSR: peso seco de raíz; MSR: materia seca de raíz; PFH: peso fresco de tallos y hojas; PSH: peso seco de tallos y hojas; MSH: materia seca de tallos y hojas; PFF: peso fresco de frutos; PSF: peso seco de frutos; MSF: materia seca de frutos.

Los resultados de la etapa uno mostraron el efecto del selenio al aplicarlo en alta concentración. Para la realización de la etapa dos se consideraron cantidades menores de aplicación de selenio.

**Etapa dos.** No se observó diferencia para el peso fresco y la biomasa seca de la raíz entre el testigo y el tratamiento con menor concentración de selenio (Cuadro 1). Sin embargo, al aplicar 5 mg/L de Se, la masa radical disminuyó significativamente, siendo mayor el efecto al usar perlita como sustrato. En el peso fresco y la biomasa seca de tallos y hojas se observó de nuevo no diferencia entre el testigo y la aplicación de 2.5 mg L<sup>-1</sup>, ocurriendo disminución en la biomasa al aplicar 5 mg L<sup>-1</sup>. Al usar la perlita como sustrato la aplicación de selenio causó efecto negativo en ambas concentraciones. De nuevo fue tangible el aparente efecto amortiguador del suelo sobre la biodisponibilidad del selenio (Bolan y Duraisamy, 2003; White *et al.*, 2004) que puede apreciarse en las Figuras 2 y 3 que muestran la acumulación de selenio en la raíz y en los tallos y hojas. Es claro que el órgano que acumula mayor cantidad de selenio es la raíz y, posiblemente, los efectos negativos de la gran acumulación de selenio se manifestaran sobre todo en esa estructura. La mayor sensibilidad de la raíz al selenio fue reportada para *Solanum tuberosum* por Turakainen *et al.* (2004).

Sobre la producción de fruto el selenio no ejerció ningún efecto al aplicarlo al suelo, mientras que en la perlita la concentración de 5 mg/L causó fuerte reducción. Al comparar la etapa experimental uno con la etapa dos es posible ver una mejora en la respuesta de la planta al disminuir la concentración de selenio en la solución. Como se verificará con los datos de contenido de selenio (Figura 4), la concentración en los frutos es prácticamente la misma tanto en la etapa uno como en la dos, pero en esta última disminuyó sensiblemente la concentración del elemento en las raíces, tallos y hojas. Es difícil explicar este resultado considerando la poca información acerca de la absorción y transporte de selenito en la planta, salvo que parece ocurrir por medio de los transportadores de fosfato (Broadley *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2010) y que se mueve, como ión selenito o como selenio asimilado en forma orgánica (Zayed *et al.*, 1998), vía xilema de las raíces a los tallos y hojas, para de allí redistribuirse a toda la planta en forma de seleno-aminoácidos (Arvy, 1982). Esta aparente tendencia del tomate de acumular mayor cantidad de selenio en raíces, tallos y hojas, y en menor medida en los frutos, fue también descrita por Grattan *et al.* (1987).

**Etapa tres.** La aplicación foliar de selenio en concentraciones de 10 y 20 mg L<sup>-1</sup> no modificó la biomasa de la raíz (Cuadro 1). El efecto del selenio fue positivo para tallos y hojas así como para el peso seco y contenido de materia seca de los frutos. El efecto positivo de la aspersion foliar con sales de selenio sobre el rendimiento de fruto fueron reportados también para *Triticum aestivum* (Genlin y Hongmei, 2009), *Cucurbita pepo* (Germ *et al.*, 2005), así como para el crecimiento de la planta en *Lolium perenne* (Hartikainen *et al.*, 2000) y de la raíz tuberosa en *Daucus carota* (Kápolna *et al.*, 2009)

Hasanuzzaman *et al.* (2010) mencionan que aunque existe amplia evidencia de los efectos positivos del Se aplicado como aspersion foliar acuosa, la concentración adecuada para fomentar efectos positivos en las diferentes especies debe determinarse para cada especie particular. Ello debido a que inclusive entre las especies de cultivo no acumuladoras el espectro

de tolerancia de acumulación de selenio va de 2 a 330  $\mu\text{g g}^{-1}$  de peso seco (Terry *et al.*, 2000). En el caso del tomate para este experimento las aspersiones con 10 y 20  $\text{mg L}^{-1}$  fueron efectivas en el sentido de no afectar negativamente la biomasa de la planta ni la producción de fruto, permitiendo sin embargo la acumulación de selenio en tallos, hojas y frutos en niveles equivalentes a los obtenidos con la aplicación de selenio en la solución nutritiva. Kápolna *et al.* (2009) encontraron también que la aspersión foliar de *Daucus carota* con 10  $\text{mg L}^{-1}$  dio buen resultado para que la planta acumulara selenio sin afectar la productividad.

### **Concentración de Selenio en los Tejidos del Tomate**

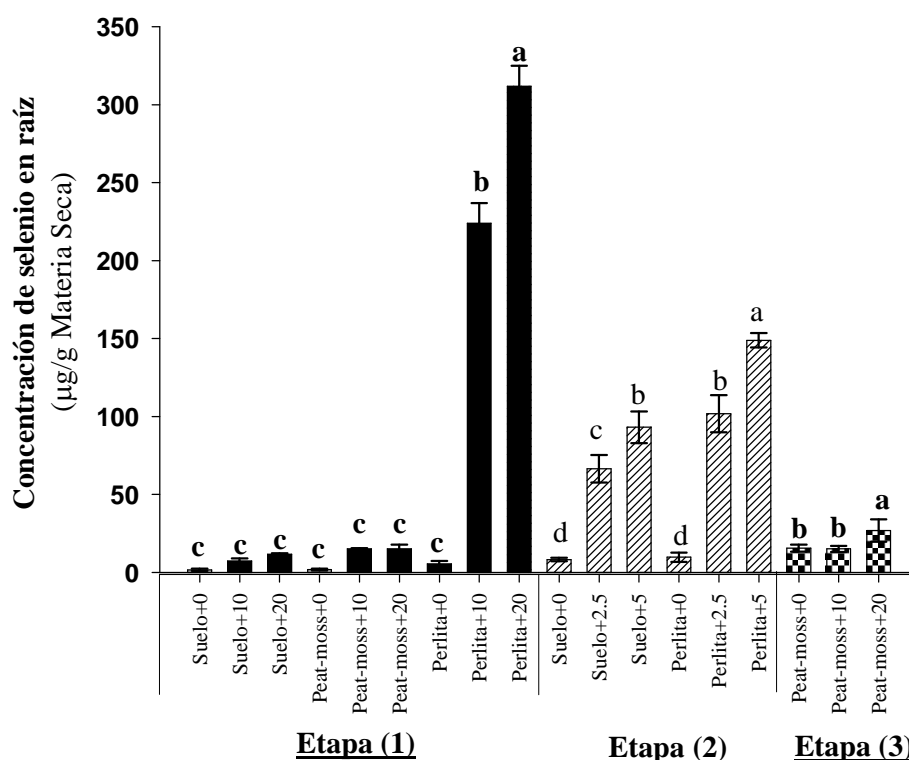
Al revisar los resultados de concentración de selenio en los diversos órganos vegetales es posible verificar que cuando el elemento se aplicó en el riego los valores más altos se encuentran en la raíz, seguida de tallos y hojas y al final los frutos. Este resultado que coincide con el reportado por Grattan *et al.* (1987) 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 (Arvy, 1982, 1993). En cambio, al aplicarse por aspersión foliar, la concentración en raíces, tallos y hojas tiende a igualarse, mostrando por otra parte concentraciones más bajas en los frutos. Puede suponerse que posterior a la aspersión con selenito este fue incorporado a los tallos y hojas, incorporándose tal vez en formas orgánicas, tal como lo describe Arvy (1982), que se redistribuyeron a otras partes de la planta como la raíz y posteriormente los frutos. A continuación se presentan los resultados para cada grupo de estructuras.

**Raíz.** En el tratamiento testigo de la etapa uno se halló una concentración máxima de selenio de 2.61  $\mu\text{g g}^{-1}$  de peso seco de raíz, en el suelo o peat moss y de 7.21 en la perlita, valores que se consideran en la parte baja del rango de concentraciones de selenio de 2 a 330  $\mu\text{g g}^{-1}$  para una especie no acumuladora (Terry *et al.*, 2000). Al aumentar la concentración de selenito en la



solución nutritiva aplicada en el suelo y el peat moss, la concentración de selenio en la raíz creció de forma lineal ( $r=0.83$ ,  $p\leq 0.01$ ) hasta alcanzar un valor máximo de  $18.32 \mu\text{g g}^{-1}$ . Esta respuesta lineal fue también reportada para la lechuga por Simojoki *et al.* (2003) y ocurre según los autores mientras se mantiene baja la biodisponibilidad del selenio en el sustrato. En cambio, en el sustrato de perlita el tratamiento de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de selenio causó una acumulación promedio de  $223 \mu\text{g g}^{-1}$ , mientras que en el tratamiento de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  se observó un promedio de  $311.77 \mu\text{g g}^{-1}$  (Figura 2), estos valores se ubicaron en el extremo alto del mencionado espectro de concentración de selenio para especies no acumuladoras. Estas diferencias en la concentración de selenio en las raíces de las plantas creciendo en los diferentes sustratos, posiblemente resultaron del amortiguamiento en la biodisponibilidad de selenio originado por los componentes del suelo y del peat moss (Bolan y Duraisamy, 2003; White *et al.*, 2004) y que se encuentra ausente en los sustratos inertes (Turakainen *et al.*, 2004).

Durante la etapa dos hubo mayor acumulación de selenio en la raíz de las plantas en suelo, en comparación con la etapa uno, además de que no se observó una acumulación muy diferente del elemento en los tallos y hojas al comparar las dos etapas. La acumulación final de selenio en los tejidos radicales responde por una parte a la concentración externa (Pezzarossa *et al.*, 1999; Simojoki *et al.*, 2003) y, por otro lado, a la velocidad con que el selenio es movilizado rápidamente en forma orgánica, o más lentamente en forma inorgánica hacia otras estructuras de la planta (Zayed *et al.*, 1998). Es posible que en la etapa uno el selenito se acumulara en gran cantidad en la raíz en forma inorgánica de menor movilidad, mientras que en la etapa dos la menor concentración de selenito en la solución nutritiva permitiera su absorción y rápida asimilación en forma orgánica para su transporte.



**Figura 2.** Efecto de la aplicación de los tratamientos en la concentración promedio de Se en la raíz de las plantas de tomate. Literales distintas en la misma etapa experimental indican diferencias significativas, según Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Las etapas uno y dos se refieren a la aplicación de selenio en el riego en concentraciones de 0, 10 y 20 así como de 0, 2.5 y 5  $\text{mg L}^{-1}$ . La etapa uno se realizó en tres sustratos: suelo, peat moss y perlita. La etapa tres fue llevada a cabo aplicando 10 y 20  $\text{mg L}^{-1}$  de selenio por aspersión foliar.

El sustrato perlita presentó de nuevo la mayor acumulación de selenio en la raíz, pero en mucha menor medida que lo visto en la etapa uno. Este resultado, en conjunto con lo reportado en la literatura (Pezzarossa *et al.*, 1999; Simojoki *et al.*, 2003) indica que la acumulación de selenio en la raíz responde a la concentración externa del elemento. Para el caso de la etapa tres, el selenito como aspersión foliar en tres ocasiones, el tratamiento de 20  $\text{mg L}^{-1}$  dio lugar a una diferencia significativa al aumentar la concentración en la raíz de 15.58 a 26.90  $\mu\text{g g}^{-1}$  de peso

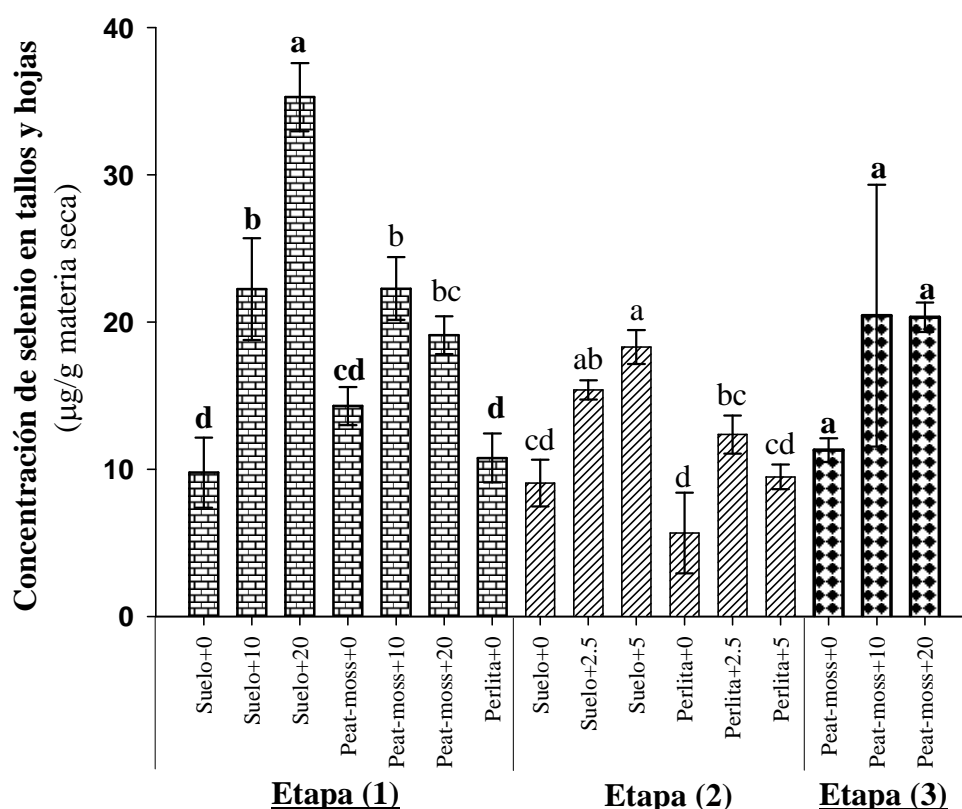
seco. Kápolna *et al.* (2009) lograron elevar la concentración radical de selenio de 0.045 a 2.0  $\mu\text{g g}^{-1}$  de peso seco al realizar una sola aplicación de 100  $\text{mg L}^{-1}$  de selenio por aspersión foliar. Estos resultados confirman lo encontrado por Smrkolj *et al.* (2006) quienes indicaron la necesidad de llevar a cabo aspersiones repetidas si el objetivo es la acumulación de selenio.

**Tallos y hojas.** En el tratamiento testigo de la etapa uno se halló una concentración máxima de selenio de 15.74  $\mu\text{g g}^{-1}$  de peso seco en plantas en suelo o peat moss y de 12.64 en perlita. En el suelo y el peat moss la concentración de selenio en los tallos y hojas creció de forma lineal ( $r=0.76$ ,  $p\leq 0.01$ ) al aumentar el selenio en la solución, hasta alcanzar un valor máximo de 37.56  $\mu\text{g g}^{-1}$  (Figura 3). Los valores obtenidos son mayores al límite en condiciones naturales de 25  $\mu\text{g g}^{-1}$  de peso seco reportado para tallos y hojas en especies no acumuladoras (White *et al.*, 2004), pero se sabe que la concentración depende de forma compleja de varios factores como la propia concentración de selenio en el sustrato, así como el tipo de sustrato, la presencia de materia orgánica y la actividad microbiológica, la concentración de sulfato en la solución del suelo, entre otras condiciones que mencionan White *et al.* (2004).

Por otra parte, el hecho de que las hojas y tallos acumulen menos selenio que las raíces del tomate fue reportado también por Pezzarossa *et al.* (1999). Esa acumulación preferencial ocurre también en otras especies (Arvy, 1982, 1993; Grattan *et al.*, 1987; Zayed *et al.*, 1998; Simijoki *et al.*, 2003). Las plantas que crecieron en perlita en la etapa uno, a pesar de que no mostraron una concentración muy alta de selenio en los tallos y hojas, según el criterio de Terry *et al.* (2000), presentaron sin embargo clorosis, necrosis foliar extensa, bajo crecimiento y muerte prematura, posiblemente a causa de la gran cantidad de selenio acumulado en la raíz. Efectos similares, en forma de clorosis, poco crecimiento y marchitamiento fueron reportados por Kápolna *et al.* (2009) en plantas de zanahoria al aplicarles alta concentración de selenio.

Durante la etapa dos se observaron diferencias significativas entre los tratamientos de aplicación de selenito y el testigo, pero sin alcanzar valores de acumulación mayores a 20  $\mu\text{g/g}$

de peso seco. En este caso la respuesta conjunta de acumulación de selenio en la raíz y el tallo y las hojas es más parecida a la reportada por Simojoki (2003), misma que no fue posible apreciar en la etapa uno al aplicar mayor concentración de selenito resultando en la extensa acumulación de selenio en la raíz. En la etapa tres, aplicando el selenio por aspersión foliar, no se encontraron diferencias entre tratamientos.

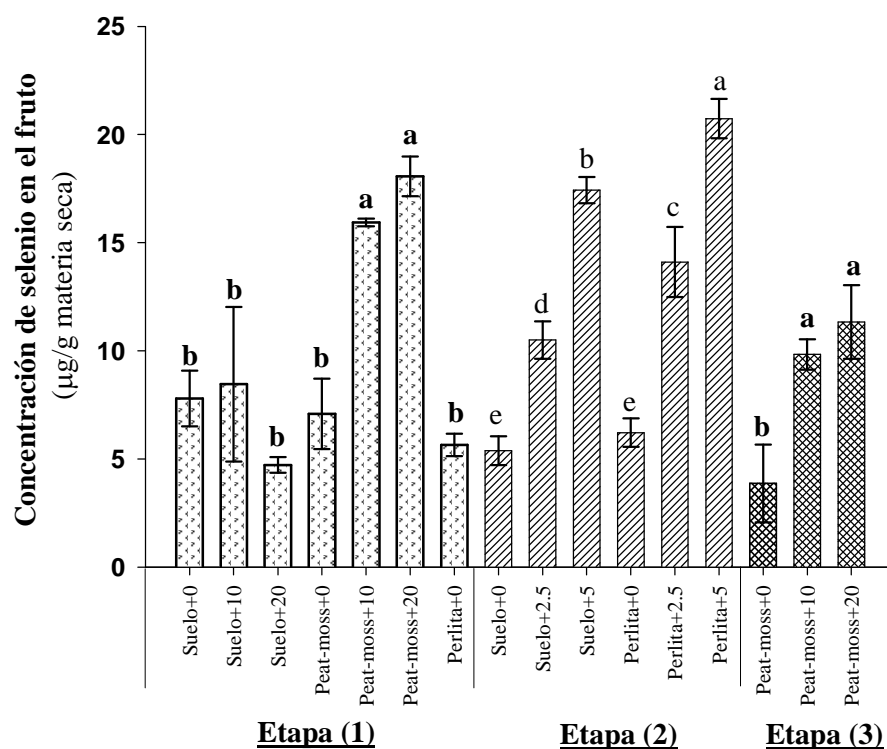


**Figura 3.** Efecto de la aplicación de los tratamientos en la concentración promedio de Se en tallos y hojas de las plantas de tomate. Literales distintas en la misma etapa experimental indican diferencias significativas, según Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Las etapas uno y dos se refieren a la aplicación de selenio en el riego en concentraciones de 0, 10 y 20 así como de 0, 2.5 y 5 mg/L. La etapa uno se realizó en tres sustratos: suelo, peat moss y perlita. La etapa tres fue llevada a cabo aplicando 10 y 20 mg/L de selenio por aspersión foliar.

**Fruto.** En el tratamiento testigo de la etapa uno se halló una concentración máxima de selenio en el fruto de  $9.07 \mu\text{g g}^{-1}$  de peso seco de fruto, en suelo o peat moss y de 6.17 en perlita. Estos valores en el fruto de las plantas testigo son altos si se considera la concentración de  $4.5 \mu\text{g g}^{-1}$  obtenida por Grattan *et al.* (1987) en California al usar aguas residuales con alta concentración de selenio para el riego así como la de  $0.03 \mu\text{g/g}$  reportada por Eurola *et al.* (1989) en tomate abonado con fertilizantes enriquecidos con selenio en Finlandia. Es posible que esos valores relativamente altos en los frutos de las plantas testigo resultaran del contenido de selenio de  $0.018 \mu\text{g L}^{-1}$  que ocurre de forma natural en el agua de riego del sitio experimental, considerándose este valor adecuado para agua (Wang *et al.*, 1994). Está demostrado que ocurre transferencia de selenio del agua hacia los tejidos vegetales (White *et al.*, 2004).

Tanto la concentración de selenio en la solución como la encontrada en la raíz, tallos y hojas, no mostraron correlación con el selenio en el fruto, resultado análogo a lo reportado por Golubkina *et al.* (2003). Una posible explicación de este hecho es que el flujo de selenio de las hojas y tallos a los frutos ocurre por el floema posteriormente a la asimilación del selenio en compuestos orgánicos (Arvy, 1982), situación que se suma a la compleja distribución no diferencial que se presenta entre la raíz y los tallos y hojas (Arvy, 1982, 1993; Grattan *et al.*, 1987; Zayed *et al.*, 1998; Pezzarossa *et al.*, 1999; Simijoki *et al.*, 2003). Esto hace que incluso en las mismas condiciones de aplicación de selenio diferentes especies hortícolas respondan de distinta manera frente a las aplicaciones de selenio (Grattan *et al.*, 1987). Los valores máximos para los frutos de las plantas tratadas con selenio en suelo y peat moss fueron 12.02 y 18.99  $\mu\text{g/g}$ , respectivamente.

Los promedios de contenido de selenio en el fruto para los testigos y los tratamientos con selenio mostraron diferencias significativas (Figura 4), sobre todo en la etapa dos, indicando la factibilidad del enriquecimiento con selenio del fruto de tomate en invernadero. Un resultado parecido fue reportado por Grattan *et al.* (1987) en tomate en campo abierto usando aguas residuales para riego.



**Figura 4.** Efecto de la aplicación de los tratamientos en la concentración de Se en los frutos de tomate. Literales distintas en la misma etapa experimental indican diferencias significativas, según Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Las etapas uno y dos se refieren a la aplicación de selenio en el riego en concentraciones de 0, 10 y 20 así como de 0, 2.5 y 5 mg/L. La etapa uno se realizó en tres sustratos: suelo, peat moss y perlita. La etapa tres fue llevada a cabo aplicando 10 y 20 mg/L de selenio por aspersión foliar.

Durante la etapa dos se observó una mayor acumulación de selenio en el fruto de las plantas desarrolladas en perlita tratadas con 5 mg/L de selenio (Figura 4), sin embargo este fue el tratamiento en la etapa dos con el menor rendimiento de fruto. De nuevo fue posible observar, ahora para los frutos, la tendencia ya descrita para las raíces, tallos y hojas de que el sustrato perlita dio lugar a mayor acumulación de selenio.

En la etapa tres los dos tratamientos de aspersión de selenio presentaron mayor acumulación de selenio en el fruto en comparación con el tratamiento testigo (Figura 4). Los

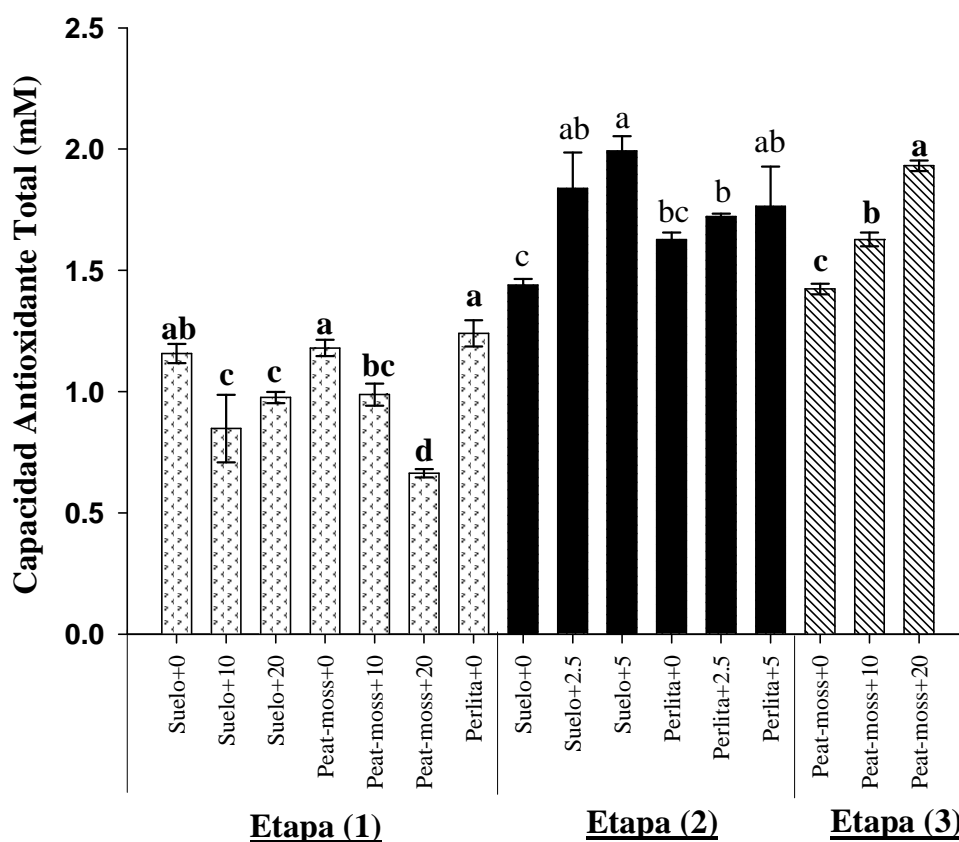
resultados coinciden con lo reportado por Golubkina *et al.* (2003) en tomate y por Smrkoj *et al.* (2006) en *Pisum sativum* quienes encontraron que la acumulación de selenio en los frutos fue dependiente del número de aspersiones realizadas.

Cabe mencionar que la concentración promedio de selenio en los testigos de las tres etapas fue de 6.00  $\mu\text{g/g}$  de peso seco, nivel muy lejos de la toxicidad y equivalente en términos de consumo en la dieta a 34.2  $\mu\text{g}$  de selenio por 100 g de fruto fresco. En cambio, el máximo valor de concentración de selenio (20.89  $\mu\text{g}$  de selenio por gramo de peso seco), encontrado en el tratamiento de 5 mg/L por el riego en perlita, equivale a un consumo de 121.8  $\mu\text{g}$  de selenio por cada 100 gramos de fruto fresco, valor por arriba del de referencia para el año 1980 del US Food and Nutrition Board (Broadley *et al.*, 2006) pero apenas un tercio por debajo de los niveles de ingesta recomendados en la actualidad (Aaseth, 1993; Combs, 2001).

### **Capacidad Antioxidante Total (TAS) del Fruto**

Los resultados de la aplicación de la técnica desarrollada Miller *et al.* (1993) indican las cantidades milimolares de grupos reductores que inactivan el radical sintético ABTS<sup>•+</sup> usando como estándar un análogo de la vitamina E, indicando la capacidad de eliminación de radicales libres (Becker *et al.*, 2004). La técnica es especialmente adecuada para verificar el efecto del selenio por ligarse con la actividad antioxidante esperada de los compuestos orgánicos que contienen selenio (Walter *et al.*, 1972).

En la etapa uno la aplicación de selenio por el riego en 10 y 20 mg/L disminuyó en un promedio de 25% la capacidad antioxidante del fruto (Figura 5). Este resultado pudiera ser resultado de la acumulación excesiva de selenio en los tejidos vegetativos de la planta ya que, según reportan Nowak *et al.* (2004), el selenio en baja concentración en las plantas da lugar a un aumento en la capacidad antioxidante, mientras que en mayor concentración causa el efecto contrario.



**Figura 5.** Efecto de la aplicación de los tratamientos en la capacidad antioxidante total (TAS) de los frutos de tomate. Literales distintas en la misma etapa experimental indican diferencias significativas, según Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Las etapas uno y dos se refieren a la aplicación de selenio en el riego en concentraciones de 0, 10 y 20 así como de 0, 2.5 y 5 mg/L. La etapa uno se realizó en tres sustratos: suelo, peat moss y perlita. La etapa tres fue llevada a cabo aplicando 10 y 20 mg/L de selenio por aspersión foliar.

Puede suponerse que la disminución en la capacidad antioxidante resulta del carácter pro-oxidante del selenio cuando este se encuentra en gran concentración en los tejidos fotosintéticos (Hartikainen *et al.*, 2000) los cuales aportan más del 90% de los fotosintatos para los frutos. Considerando que la TAS no se refiere a un antioxidante o antioxidantes específicos,



sino en general al potencial de cesión de electrones para inactivar radicales libres del total de compuestos en la muestra, no es posible saber si el efecto observado de la aplicación de selenio se refirió en específico a compuestos orgánicos que contienen selenio como la glutatión peroxidasa (Combs, 2001) o seleno-aminoácidos (Walter *et al.*, 1972) o bien si también afectó actividades más generales como la producción de antioxidantes en los cloroplastos (Pennanen *et al.*, 2002).

En las etapas dos y tres, al realizar las aplicaciones de selenio en menor concentración por el riego, o bien por aspersión foliar, fue posible observar un efecto positivo sobre la capacidad antioxidante total (Figura 5). Este resultado de elevar la capacidad antioxidante en los tejidos vegetales al aplicar selenio en concentraciones bajas fue también obtenido por otros autores como Hartikainen *et al.* (2000), Xue *et al.* (2001), Pennanen *et al.* (2002), Nowak *et al.* (2004) y por Turakainen (2007).

La hipótesis que se maneja en la literatura es que la inducción de antioxidantes ocurre por el efecto prooxidante del selenio que, cuando se encuentra en baja concentración, induce la expresión del metabolismo redox que regula la eliminación de los radicales libres celulares (Hasanuzzaman *et al.*, 2010), sobre todo en el ámbito de la peroxidación de membranas y proteínas integrales (Xue y Hartikainen, 2000; Djanaguiraman *et al.*, 2005; Cartes *et al.*, 2005).

Algunos estudios transcriptómicos y genómicos (Van Hoewyk *et al.*, 2008; Byrne *et al.*, 2010) realizados no indicaron si la hipótesis mencionada se ajustaba a lo observado, si bien indicaron claramente que el selenio funciona como un inductor de tolerancia promoviendo el metabolismo antioxidante (Van Hoewyk *et al.*, 2008; Hugouvieux *et al.*, 2009). Entretanto no se desarrollen estudios específicos para el metabolismo redox (Hesketh y Méplan, 2011) el mecanismo exacto de la inducción de la capacidad antioxidante por parte del selenio seguirá sin entenderse plenamente.

## **CONCLUSIONES**

La aplicación de selenito de sodio por medio del riego y por aspersión foliar dio lugar a la acumulación de selenio en la raíz, tallos y hojas y fruto de tomate.

El crecimiento de la planta y la producción de fruto fueron afectados negativamente por la concentración alta de selenio en los tejidos vegetales. En cambio la baja concentración de selenio permitió mantener o aumentar la biomasa y la producción de fruto.

La capacidad antioxidante del fruto se incrementó al acumular selenio en baja concentración. El aporte en mayor cantidad disminuyó el potencial antioxidante.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a los Laboratorios de Nutrición Animal y de Fisiología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, al T.L.Q. Carlos Arévalo Sanmiguel y Q.F.B. Julia Medrano Macías por el apoyo para la realización de los análisis TAS y la preparación de muestras para la cuantificación de selenio. También al L.C.Q. Luis Enrique Reyes Vielma y al L.C.Q. Jesús Alejandro Espinoza Muñoz del Laboratorio de Caracterización Química del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, por el apoyo para la cuantificación de selenio de las diferentes partes vegetativas de las plantas.

**LITERATURA CITADA**

- AOAC. 2000. Official Official Methods of Analysis, 17th ed. Association of Official Analytical Chemist. Gaithersburg, MD, USA.
- Aaseth J. 1993. Optimum selenium levels in animal products for human consumption. Norwegian J. Agric. Sci. 11: 121-126.
- Arvy, M.P. 1982. Translocation of selenium in the bean plant (*Phaseolus vulgaris*) and the field bean (*Vicia faba*). Physiol. Plant. 56:299-302.
- Arvy, M.P. 1993. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). J. Exp. Bot. 44:1083-1087.
- Becker E.M., Nissen L.R. and Skibsted L.H. 2004. Antioxidant evaluation protocols: food quality or health effects. European Food Res. Tech. 219:561-571.
- Bolan N. S. and V.P. Duraisamy. 2003. Role of inorganic and organic soil amendments on immobilisation and phytoavailability of heavy metals: a review involving specific case studies. Austr. J. Soil Res. 41:533-555.
- Broadley, M. R., P. J. White, R. J. Bryson, M. C. Meacham, H. C. Bowen, S. E. Johnson, M. J. Hawkesford, S. P. Mc Grath, F. J. Zhao, N. Breward, M. Harriman and M. Tucker. 2006. Biofortification of UK food crops with selenium. Proceedings of the Nutrition Society 65: 169-181.
- Byrne, S.L., K. Durandean, I. Nagy and S. Barth. 2010. Identification of ABC transporters from *Lolium perenne* L. that are regulated by toxic levels of selenium. Planta 231:901-911.
- 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. Plant Soil 276: 359-367.
- Cartes P., Shene C. and Mora M., 2006. Selenium distribution in ryegrass and its antioxidant role as affected by sulfur fertilization. Plant Soil. 285:187-195
- Combs, G.F. Jr. 2001. Selenium in global food systems. Br. J. Nutr. 85:517-547.

- De Souza, M. P., E. A. H. Pilon-Smits, C. M. Lytle, S. Hwang and J. Tai. 1998. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard. *Plant Physiol.* 117: 1487-1494.
- 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.
- Eurola, M, P. Ekholm, M. Ylinen, P. Koivistoinen and P. Varo. 1989. Effects of selenium fertilization on the selenium content of selected Finnish fruits and vegetables. *Acta Agric. Scand.* 39:345-350.
- Fordyce, F. 2005. Selenium deficiency and toxicity in the environment. pp. 373-415. *In:* O. Selinus, B. Alloway, J. Centeno, R. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh and P Smedley (Eds.). *Essentials of Medical Geology*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Garcia-Hernández, J., E.P. Glenn, J. Artiola and D.J. Baumgartner. 2000. Bioaccumulation of selenium (Se) in the Cienega de Santa Clara Wetland, Sonora, Mexico. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 46:298-304.
- Genlin, L. and G. Hongmei. 2009. Effects of spraying NaSeO<sub>3</sub> on yield of wheat. *Chin. Agric. Sci. Bull.* DOI: CNKI:SUN:ZNTB.0.2009-18-060.
- Germ, M., I. Kreft and J. Osvald. 2005. Influence of UV-B exclusion and selenium treatment on photochemical efficiency of photosystem II, yield and respiratory potential in pumpkins (*Cucurbita pepo* L.). *Plant Physiol. Biochem.* 43:445-448.
- Golubkina, N.A., A.A. Zhumaev and G.B. Dem'yanova-Roi. 2003. Pattern of selenium distribution in tomato *Lycopersicum esculentum* Mill. *Biol. Bull.* 30:468-471.
- Grattan, S.R., C. Shennan, D.M. May, J.P. Mitchell and R.G. Burau. 1987. Use of drainage water for irrigation of melons and tomatoes. *California Agric.* September-October:27-28.
- 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.

- Hartikainen, H., T. Xue and V. Piironen. 2000. Selenium as an antioxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant Soil* 225: 193-200.
- Hesketh, J. and C. Méplán. 2011. Transcriptomics and functional genetic polymorphisms as biomarkers of micronutrient function: focus on selenium as an exemplar. *Proc. Nutrition Soc.* doi:10.1017/S0029665111000115.
- Hugouvieux, V., C. Dutilleul, A. Jourdain, F. Reynaud, V. Lopez and J. Bourguignon. 2009. *Arabidopsis* putative selenium-binding protein 1 expression is tightly linked to cellular sulfur demand and can reduce sensitivity to stresses requiring glutathione for tolerance. *Plant Physiol.* 151:768-781.
- Kápolna, E., P.R. Hillestrom, K.H. Laursen, S. Husted and E.H. Larsen. 2009. Effect of foliar application of selenium on its uptake and speciation in carrot. *Food Chem.* 115: 1357-1363.
- Miller, N. J., C. Rice-Evans, M. J. Davies, V. Gopinathan and A. Milner. 1993. A novel method for measuring antioxidant capacity and its applications to monitoring the antioxidant status in premature neonates. *Clinical Science* 84:407-412.
- Morris, V.C. and O.A. Levander. 1970. Selenium content of foods. *J. Nutr.* 100:1383-1388.
- Nowak, J., K. Kaklewski and M. Ligocki. 2004. Influence of selenium on oxidoreductive enzymes activity in soil and in plants. *Soil Biol. Biochem.* 36:1553-1558.
- Pennanen, A., T. Xue and H. Hartikainen. 2002. Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. *J. Appl. Bot.* 76: 66-76.
- Pezzarossa, B., D. Piccotino, C. Shennan and F. Malorgio. 1999. Uptake and distribution of selenium in tomato plants as affected by genotype and sulphate supply. *J. Plant Nutr.* 22:1613-1635.
- Ramírez-Bribiesca, J.E., J.L. Tórtora, M. Huerta, A. Aguirre and L.M. Hernández. 2001., Diagnosis of selenium status in grazing dairy goats on the Mexican plateau. *Small Ruminant Res.* 41:81-85.

- Rayman, M. P. 2002. The argument for increasing selenium intake. *Proceedings of the Nutrition Society* 61: 203-215.
- Rayman, M. P. 2008. Food-chain selenium and human health: emphasis on intake. *Brit. J. Nutr.* 100: 254–268.
- Simojoki, A. 2003. Allocation of added selenium in lettuce and its impact on root. *Agric. Food Sci. Finland* 12: 155-164.
- Smrkoj, P., M. Germ, I. Kreft and V. Stibilj. 2006. Respiratory potential and Se compounds in pea (*Pisum sativum* L.) plants grown from Se-enriched seeds. *J. Exp. Bot.* 57: 3595-3600.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. *Proceedings 6th International Congress on Soils Culture*. Wageningen. The Netherlands: 633-650.
- 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.
- Turakainen, M., H. Hartikainen and M. M. Seppanen. 2004. Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch. *J. Agric. Food Chem.* 52: 5378-5382.
- Van Hoewyk, D., H. Takahashi, E. Inoue, A. Hess, M. Tamaoki, E.A.H. Pilon-Smits. 2008. Transcriptome analyses give insights into selenium-stress responses and selenium tolerance mechanisms in *Arabidopsis*. *Physiol. Plant.* 132:236-253.
- Walter, R., I.L. Schwartz and J. Roy. 1972. Can selenoamino acids act as reversible biological antioxidants. *Ann. New York Acad. Sci.* 192:175-180.
- White P. J., H.C. Bowen, P. Parmaguru, M. Fritz, W.P. Spracklen and R.E. Spiby. 2004. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. *J. Exp. Bot.* 55:1927–1937.
- Xue, T. and H. Hartikainen, 2000. Association of antioxidative enzymes with synergistic effect of selenium and UV irradiation in enhancing plant growth. *Agric. Food Sci. Finland*, 9: 177-186.

- Xue, T., H. Hartikainen and V. Piironen. 2001. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium in senescing lettuce. *Plant Soil* 27: 55-61.
- Zayed, A. C.M. Lytle and N. Terry. 1998. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. *Planta* 206:284-292.
- Zhao, X.Q., N. Mitani, N. Yamaji, R.F. Shen, J.F. Ma. 2010. Involvement of silicon influx transporter OsNIP2;1 in selenite uptake in rice. *Plant Physiol.* 153:1871-1877.

#### **IV. CONCLUSIONES**

La aplicación de selenito de sodio por medio del riego y por aspersión foliar dio lugar a la acumulación de selenio en la raíz, tallos y hojas y fruto de tomate.

El crecimiento de la planta y la producción de fruto fueron afectados negativamente por la concentración alta de selenio en los tejidos vegetales. En cambio la baja concentración de selenio permitió mantener o aumentar la biomasa y la producción de fruto.

La capacidad antioxidante del fruto se incrementó al acumular selenio en baja concentración. El aporte en mayor cantidad disminuyó el potencial antioxidante.



## V. LITERATURA CITADA

- Aaseth J. 1993. Optimum selenium levels in animal products for human consumption. Norwegian J. Agric. Sci. 11: 121-126.
- Broadley, M. R., P. J. White, R. J. Bryson, M. C. Meacham, H. C. Bowen, S. E. Johnson, M. J. Hawkesford, S. P. Mc Grath, F. J. Zhao, N. Breward, M. Harriman and M. Tucker. 2006. Biofortification of UK food crops with selenium. Proceedings of the Nutrition Society 65: 169-181.
- Byrne, S.L., K. Durandea, I. Nagy and S. Barth. 2010. Identification of ABC transporters from *Lolium perenne* L. that are regulated by toxic levels of selenium. Planta 231:901-911.
- Cartes P., C. Shene and M. Mora. 2006. Selenium distribution in ryegrass and its antioxidant role as affected by sulfur fertilization. Plant Soil. 285:187-195.
- 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. Plant Soil, 276: 359-367. doi: 10.1007/s11104-005-5691-9.
- Combs G. F. Jr., 2001. Selenium in global food systems. Br J Nutr 85, 517-547 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11348568>).
- De Souza, M. P., E. A. H. Pilon-Smits, C. M. Lytle, S. Hwang and J. Tai. 1998. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard. Plant Physiol., 117: 1487-1494. doi: 10.1104/pp.117.4.1487.
- 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.
- Eurola, M, P. Ekholm, M. Ylinen, P. Koivistoinen and P. Varo. 1989. Effects of selenium fertilization on the selenium content of selected Finnish fruits and vegetables. Acta Agric. Scand. 39:345-350.

- 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, Elsevier, pp: 373-415.
- Garcia-Hernández, J., E.P. Glenn, J. Artiola and D.J. Baumgartner. 2000. Bioaccumulation of selenium (Se) in the Cienega de Santa Clara Wetland, Sonora, Mexico. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 46:298-304.
- Hartikainen, H., T. Xue and V. Piironen. 2000. Selenium as an antioxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant Soil*, 225: 193-200. doi: 10.1023/A:1026512921026.
- 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.
- Hira C. K., Kulprakash P., and Dhillon K. S. 2003. Dietary selenium intake by men and women in high and low selenium areas of Punjab. *Public Health Nutrition*: 7(1), 39–43.
- Morris, V.C. and O.A. Levander. 1970. Selenium content of foods. *J. Nutr.* 100:1383-1388.
- Peng, X. L., Y. Y. Liu and S. G. Luo. 2002. Effects of selenium on lipid peroxidation and oxidizing ability of rice roots under ferrous stress. *J. Northeast Agric. Univ.*, 19: 9-15.
- Ramírez-Bribiesca, J.E., J.L. Tórtora, M. Huerta, A. Aguirre and L.M. Hernández. 2001., Diagnosis of selenium status in grazing dairy goats on the Mexican plateau. *Small Ruminant Res.* 41:81-85.
- Rayman M. P. 2008. Food-chain selenium and human health: emphasis on intake. *British Journal of Nutrition.* 100: 254–268.
- Rayman, M. P. 2002. The argument for increasing selenium intake. *Proceedings of the Nutrition Society* 61: 203-215.
- 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.* 51:401–32

- White P. J., H. C. Bowen, P. Parmaguru, M. Fritz, W. P. Spracklen, R. E. Spiby. 2004. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany* 55: 1927–1937.
- Xue, T., H. Hartikainen and V. Piironen. 2001. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium in senescing lettuce. *Plant Soil* 27: 55-61.
- Zhao, X.Q., N. Mitani, N. Yamaji, R.F. Shen, J.F. Ma. 2010. Involvement of silicon influx transporter OsNIP2;1 in selenite uptake in rice. *Plant Physiol.* 153:1871-1877.