Aplicación de selenio en cultivos agrícolas. Revisión bibliográfica

A.M. Garduño-Zepeda y C. Márquez-Quiroz*

Posgrado en Ciencias Agroalimentarias. División Académica de Ciencias Agropecuarias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Teapa km 25 R/A La Huasteca 2ª sección, Villahermosa, Centro, Tabasco, México, C.P. 86280

Resumen

La biofortificación agronómica y genética de cultivos agrícolas con selenio son estrategias prometedoras para mejorar la calidad nutracéutica de la parte comestible del cultivo. Por lo anterior, la presente revisión tiene como objetivo documentar la importancia del selenio en el desarrollo y producción de los cultivos agrícolas; así como su efecto antioxidante. En este sentido se realizaron diferentes revisiones de los temas relacionados con la presencia de selenio en el medio ambiente, suelo y planta, dando énfasis en la concentración, la forma de absorción y el metabolismo del elemento; asimismo la importancia de la biofortificación agronómica y genética de los cultivos agrícolas. Estudios realizados demostraron que el selenio estimula la síntesis de proteínas, aminoácidos, compuestos secundarios de nitrógeno, compuestos fenólicos, de igual manera, incrementa la actividad antioxidante, y se asocia con la prolongación de la vida útil de productos hortofrutícolas. La biofortificación con selenio en los cultivos agrícolas se está convirtiendo cada vez más en una solución para mejorar la problemática de deficiencia del oligoelemento en la población humana, así como para incrementar el contenido de compuestos bioactivos.

Palabras clave: Actividad antioxidante, ATP sulforilasa, biofortificación, elemento benéfico, selenato de sodio, selenito de sodio.

Abstract
Use of selenium in crop production. Review

The agronomic and genetic biofortification of crops with selenium are novel strategies to improve the nutraceutical quality of staple crops. This review focuses on assessing the importance of Selenium in the development and crop production; as well as its effect in the antioxidant activity. In this regard, different revisions of the themes related to the presence of Selenium in the environment, soil and plant were carried out, emphasizing the concentration, the form of absorption and the metabolism of the element; additionally, the importance of agronomic and genetic biofortification in agricultural crops. Studies have shown that Selenium stimulates the synthesis of proteins, amino acids, nitrogen secondary compounds, phenolic compounds, likewise increases antioxidant activity, and it is associated with the prolongation of the shelf life of horticultural products. Biofortification with Selenium in agricultural crops is increasingly becoming a solution to improve the problem of trace element deficiency in the human population as well as to increase the content of bioactive compounds.

Keywords: Antioxidant activity, ATP sulfurylase, biofortification, benefic element, sodium selenate, sodium selenite.

* Autor para correspondencia: cesar_quiroz23@hotmail.com

https://doi.org/10.12706/itea.2018.019

Introducción

El Selenio (Se) es un elemento traza escaso en la corteza terrestre, se recicla con facilidad en la atmosfera y se encuentra distribuido en todas partes de la tierra. Su presencia y concentración en el suelo está determinada por el pH, condiciones de óxido-reducción, solubilidad de sales, interacciones biológicas y reacciones cinéticas (Trejo-Téllez *et al.*, 2012). La cantidad del elemento en el suelo puede ser clasificada con base a los niveles encontrados en plantas que no lo acumulan, pero que creen en dicho suelo, o bien de acuerdo al nivel de Se en el propio suelo (Davis *et al.*, 2002). La concentración promedio de Se en la mayoría de los suelos es inferior a 0,2 mg kg^{-1} (Alloway, 2013), mientras que los suelos con contenidos mayores de 2 mg kg^{-1} se clasifican como seleniferos (Trejo-Téllez *et al.*, 2012). Para las plantas el selenio se considera no esencial si bien, se han encontrado ciertos efectos beneficiosos en pequeñas cantidades: estimulando el crecimiento, aumentando la tolerancia frente al estrés biótico y abiótico, y prolongando la vida útil y calidad de los productos hortofrutícolas (Hermosillo-Cereceres *et al.*, 2014; Puccinelli *et al.*, 2017). Aunado a lo anterior, se ha demostrado que la adición de 50 µM de selenato decrementa los niveles de glutatión en plantas de *Arabidopsis thaliana* (Hugouvieux *et al.*, 2009), e induce la formación de selenocisteína (Van Hoewyk, 2013).

La absorción de Se por las plantas depende de la forma y concentración en que se encuentre el oligoelemento, y composición fisicoquímica y propiedades del suelo (White, 2016). En este sentido, las plantas se clasifican de acuerdo a su capacidad de acumular Se en: acumuladoras, semi-acumuladoras y no acumuladoras (Trejo-Téllez *et al.*, 2012). No obstante, la mayoría de los cultivos alimentarios son plantas no acumuladoras, por consiguiente, la biofortificación agronómica o genética con Se es una estrategia prometedora para mejorar la calidad nutracéutica de la parte comestible del cultivo (Schiavon y Pilon-Smits, 2017b; Cabrera-De la Fuente *et al.*, 2018).

La carencia de Se en los alimentos provoca deficiencias y patologías en el ser humano, afectando a más de un billón de habitantes en todo el mundo (Nothstein *et al.*, 2016), ya que este elemento es indispensable como cofactor de diversas enzimas, interviene en la síntesis de hormonas en la tiroides, en la síntesis del ADN, en el funcionamiento muscular, entre otros (Puccinelli *et al.*, 2017; Das *et al.*, 2018). En este sentido la presente revisión tiene como objetivo remarcar el comportamiento del Se en el sistema suelo-planta, y documentar los beneficios del elemento en los cultivos agrícolas para incrementar la calidad nutracéutica de estos.

Selenio en la naturaleza

El Se puede existir en cinco estados de oxidación: selenuro (2^-), selenio elemental (0), thioselenato (2^+), selenito (4^+) y selenato (6^+). La presencia y la concentración del Se está determinada por diversos factores tales como el pH, condiciones de óxido-reducción, solubilidad de sus sales, interacciones biológicas y reacciones cinéticas (Trejo-Téllez *et al.*, 2012).

El Se fue descubierto en el año 1817 por el químico sueco Jöns Jacob von Berzelius al evaluar la influencia de la forma inorgánica del elemento sobre los organismos vivos (Kieliszek y Blazejak, 2016). Es un oligoelemento no metal y número atómico 34, localizado en el cuarto período de la tabla periódica en el grupo de los calcógenos. En el orden de abundancia de los elementos, ocupa el sexagésimo noveno lugar, es un elemento bastante escaso ya que su contenido en la corteza terrestre oscila de 0,01 a 2 mg kg^{-1} (Gupta y Gupta, 2017). De los 88 elementos, este

ocupa el septuagésimo en abundancia. Además, es un metaloide natural que se recicla fácilmente dentro de la litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera (Paikaray, 2016), de igual manera está presente en el suelo, rocas, agua, aire, plantas, tejido animal y cuerpo humano. Las erupciones volcánicas se consideran la principal fuente de Se para la atmósfera, seguida de emisiones industriales como la energía térmica y quema de carbón doméstico (Paikaray, 2016). La biometilación por microorganismos y la descomposición de plantas acumuladoras, peces e insectos también contribuyen a que existan fracciones volátiles de Se, como los dimetilselenuros (DMSe, $(CH_3)_2Se$), dimetildiselenuros (DMDSe, $(CH_3)_2Se_2$), ácido selenhídrico (H_2Se), y dióxido de selenio (SeO_2) (Figura 1) (Schiavon y

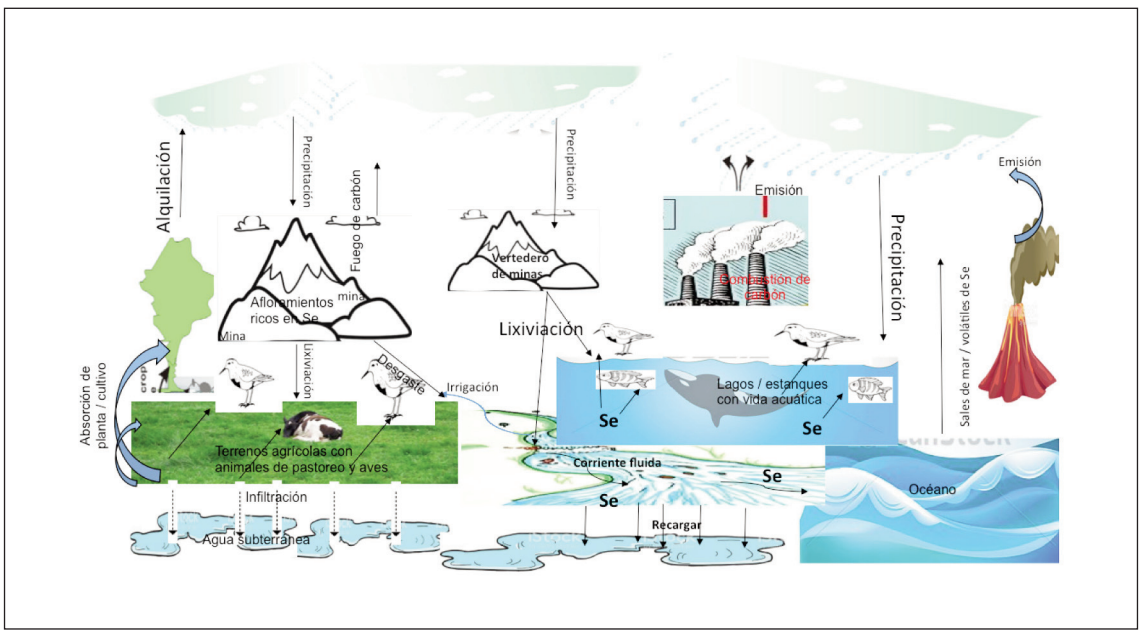


Figura 1. Diagrama esquemático que muestra el ciclo del Se en la pedosfera, hidrosfera, atmosfera, sistema litosfera y biosfera [Adaptado de Paikaray (2016)].
Figure 1. Schematic diagram showing the Se cycle in the pedosphere, hydrosphere, atmosphere, lithosphere and biosphere system [Adapted from Paikary (2016)].

Pilon-Smits, 2017a). Una parte del Se se volatiliza de los vegetales y esto contribuye a la acumulación en suelo y agua a través de la sedimentación de partículas atmosféricas o precipitación (Paikaray, 2016). La deficiencia de Se es un problema importante en los suelos de origen volcánico (López *et al.*, 2012). El contenido de Se en las rocas ígneas es en promedio de 0,09 mg kg^{-1}, en tanto que, en rocas sedimentarias el contenido no supera los 0,1 mg kg^{-1} (Christophersen *et al.*, 2013). Por otra parte, el contenido de Se en rocas fosfáticas, pizarras y carbón es de 300, 600 y 6500 mg kg^{-1}, respectivamente (Fordyce, 2013).

La lixiviación o disolución de residuos de minas sulfhídricas generan contenidos elevados de Se en el medio ambiente (hasta 1200 mg

kg^{-1}) (McNeal y Balistrieri, 1989). Después de la liberación iónica, el Se se moviliza en medios acuosos como ácido selenioso (H_2SeO_3) o ácido selénico (H_2SeO_4) y/o se escapa a la atmósfera en forma gaseosa. Posteriormente, entra en la cadena alimentaria a través de cultivos, vidas acuáticas y la inhalación (Elrashidi *et al.*, 1989).

La concentración de Se en los suelos agrícolas oscila entre 0,005 y 3,5 mg kg^{-1}, con un promedio general de 0,2 mg kg^{-1} (Alloway, 2013); por lo contrario, en suelos seleníferos su concentración fluctúa de 5 a 1200 mg kg^{-1} (Kaur *et al.*, 2014). La persistencia y forma predominante de este oligoelemento en el suelo está determinada por su geología, condiciones climáticas (Figura 2), vegetación, pH y presencia de microorganismos (Fordyce, 2013; Jones *et al.*, 2017).

De manera similar al azufre (S), el Se puede existir en cinco estados de oxidación, estas formas de oxidación determinan su solubilidad y su disponibilidad (Trejo-Téllez *et al.*, 2012). El Se orgánico (Se^{2-}), selenito (Se^{4+}) y

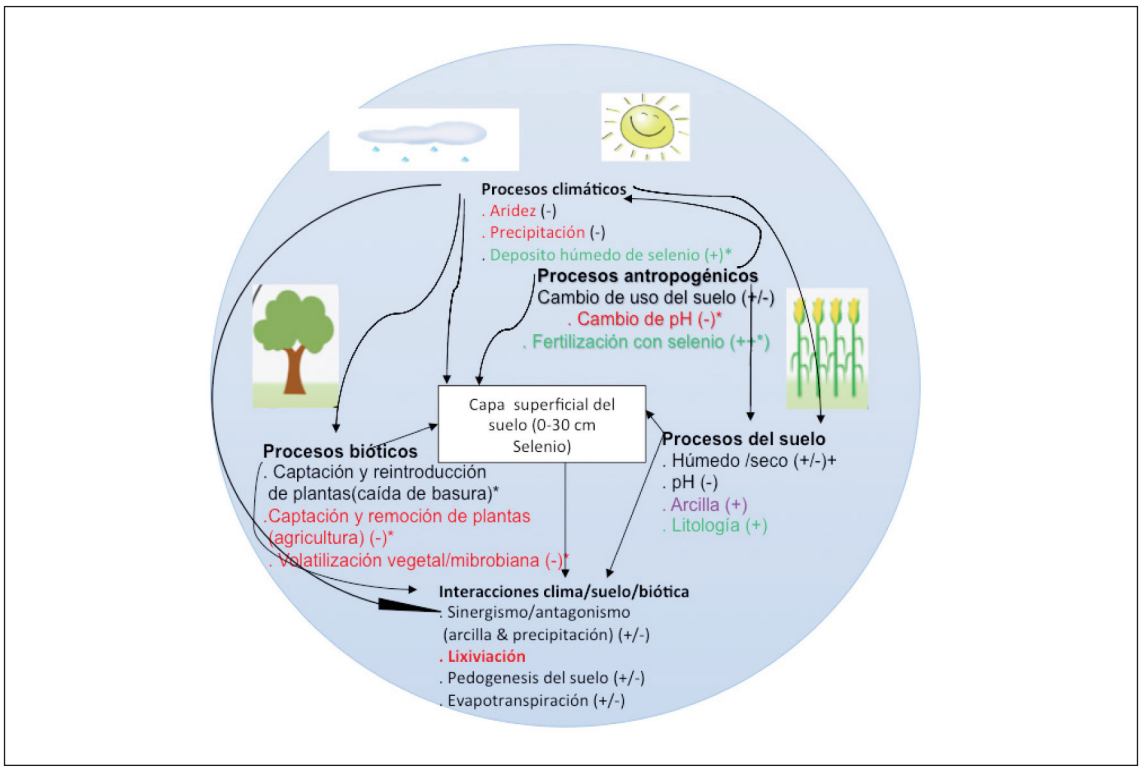


Figura 2. Resumen de los procesos que rigen la concentraciones de Se en el suelo y procesos dominantes.

El texto coloreado en rojo, verde y azul indican procesos que afectan pérdidas de suelo, retención y fuentes/suministros, respectivamente. Los factores responsables (+) o disminuciones (–) en el suelo, así como los procesos no examinados [Adaptado de Jones *et al.* (2017)].

Figure 2. Summary of the processes that govern Se concentrations in the soil and dominant processes.

selenato (Se^{6+}) son solubles en agua, y a su vez son las formas más disponibles para la planta (Trejo-Téllez *et al.*, 2012). El selenito está presente principalmente en suelos óxicos, en tanto que, el selenato está presente en suelos de humedales anóxicos (Perrone *et al.*, 2015). Al respecto, Spadoni *et al*. (2007) mencionan que el selenito es menos móvil que el selenato, y sobre todo que pueden tener interacción con otros elementos trazas en el suelo (Fe y Mn), lo que limita la disponibilidad del elemento.

Por otra parte, la deficiencia de Se en los suelos está presente en 40 países de diversas partes de África, América, Asia, Europa y Oceanía (Pilon-Smits, 2015); en tanto que, los suelos seleniferos se extienden principalmente en países como EE.UU, Canadá, Colombia, Venezuela, Australia, India, Irlanda, China y Rusia (Fordyce, 2013; Perrone *et al.*, 2015).

Selenio en las plantas

El Se es un elemento no esencial para las plantas superiores; sin embargo, se considera un elemento benéfico en cantidades traza. El contenido de Se en las plantas es generalmente determinado por la cantidad biodisponible de Se en los suelos y factores de absorción de las plantas (White, 2016). Aunado a lo anterior, las plantas también absorben el Se del agua y puede acumularlo en sus tejidos y volatilizarlo (Trejo-Téllez *et al.*, 2012).

Las plantas absorben el Se del suelo como selenato (SeO_4^{2-}) o selenito (SeO_3^{2-}); de manera que, la absorción del selenito es por un proceso activo parcialmente mediado por los transportadores de fosfato y acuaporinas (Li *et al.*, 2008), en cambio, el selenato es absorbido por medio de transportadores de sulfatos en la membrana plasmática (Terry *et al.*, 2000). El selenato es tomado por la planta de una manera preferente sobre el selenito o compuestos orgánicos de Se, y es acumulado tanto en raíces como compuestos orgánicos; mientras que el selenito tiende a acumularse en los tallos en forma de compuestos orgánicos (Li *et al.*, 2008).

Las plantas difieren en su capacidad de acumulación de este elemento en sus tejidos, con base en esto se han clasificado en tres grupos: a) no acumuladoras, b) semi-acumuladoras y c) acumuladoras; de manera que la concentración de Se que pueden acumular algunas plantas pertenecientes a los tres grupos es de < 50 mg kg^{-1}, entre 50 a 100 mg kg^{-1}, y de 100 a 1000 mg kg^{-1}, respectivamente (Tabla 1) (Trejo-Téllez *et al.*, 2012; Perrone *et al.*, 2015). Por consiguiente, las especies no acu-

Tabla 1. Concentración de Se en algunos cultivos agrícolas
Table 1. Se concentration in some agricultural crops

Género	Se (mg kg^{-1})	Clasificación	Referencia
Astragalus, *Aster*, *Bertholletia*, *Lecythis*, *Stanleya*, *Oonopsis*, *Xylorhiza*	100 – 1000	Acumuladoras	(Broadley *et al.*, 2006; White *et al.*, 2007)
Astragalus, *Aster*, *Atriplex*, *Brassica*, *Camandra*, *Grayia*, *Castilleja*, *Grindelia*, *Gutierrezia*, *Machaeranthera*, *Mentzelia*, *Sideranthus*	50 – 100	Semi-acumuladoras	(White *et al.*, 2007)
Bromopsis, *Sorghum*, *Medicago*, *Solanum*, *Panicum*	< 50	No acumuladoras	(White *et al.*, 2007)

muladoras contienen altas concentraciones de selenometionina (SeMet), selenocisteína (SeCys) y selenonio; mientras que las acumuladoras contienen cantidades mínimas de selenometionina y grandes cantidades de selenito ($NaSeO_3$) y selenato de sodio ($NaSeO_4$) (Trejo-Téllez *et al.*, 2012).

Los niveles tóxicos de Se en las plantas causan la generación de radicales superóxido, la sustitución del S en proteínas por Se, la sustitución de aminoácidos, cisteína (Cys) y metionina (Met), por seleno aminoácidos (SeCys y SeMet) durante la síntesis de proteínas y la inhibición de la metilación, lo que significa que el Se actúa como un pro-oxidante (Sors *et al.*, 2005).

Metabolismo del selenio en las plantas

Existe gran semejanza en el comportamiento químico de compuestos orgánicos de Se y su contraparte con el S, sin embargo los compuestos orgánicos de Se tienen diferente estabilidad, propiedades y reacción (Back, 2011). El selenito es absorbido por la planta por medio de transportadores de fosfatos y acuaporinas, por el contrario, el selenato es absorbido por la planta por medio de transportadores de sulfatos (Li, *et al.*, 2008), ambos procesos de absorción son por transporte activo (Schiavon y Pilon-Smits, 2017a).

Una vez que el selenato es absorbido por las plantas es transportado a los plastidios o puede permanecer en el citoplasma (Figura 3), donde es asimilado por la vía de asimilación del S (Terry *et al.*, 2000; Van Hoewyk *et al.*, 2008). En esta ruta de asimilación el selenato es activado por la ATP sulfurilasa (ATPS) para formar adenosin 5'fosfoselenato (APSe), que se reduce a selenito en presencia de adenosin 5'fosfosulfato (APS) reductasa y posteriormente a seleniuro a través de una vía no enzimática en presencia de glutatión (Schiavon y Pilon-Smits, 2017b). El seleniuro se asimila en SeCis y SeMet, estos seleno aminoácidos se incorporan a las proteínas de forma no específica y pueden causar toxicidad a la planta (Schiavon y Pilon-Smits, 2017b). Los seleno aminoácidos también pueden ser eliminados mediante la volatilización al convertirse en dimetilselenuros (Ellis y Salt, 2003), siendo el principal producto de la fitovolatilización. En las plantas acumuladoras, la SeCis es metilada y se convierte en dimetildiselenuros para ser volatilizado (Terry *et al.*, 2000); asimismo, otro mecanismo de detoxificación de Se es a través de la formación de Se elemental (Gonzalez-Morales *et al.*, 2017).

Cuando los seleno aminoácidos se incorporan inadvertidamente en proteínas, en sustitución de cisteína y metionina, la función de la proteína se afecta, y por lo tanto puede existir una toxicidad (Malagoli *et al.*, 2015). La mayoría de las plantas pueden metabolizar SeMet en dimetilselenuros, que puede ayudar a evitar la toxicidad (Terry *et al.*, 2000). Otro mecanismo potencial de destoxificación de Se en las plantas es la conversión de SeCys a selenio elemental y alanina (Van Hoewyk *et al.*, 2008). Tanto la volatilización y el desglose de SeCys son inespecíficos, utilizando enzimas que funcionan en el metabolismo del S (Terry *et al.*, 2000; Van Hoewyk *et al.*, 2008). Algunas plantas pueden ser capaces de discriminar entre los análogos Se y S, estas plantas pueden, por ejemplo, metilar SeCys en metil-SeCys, que sirve como mecanismo eficaz de desintoxicación de Se ya que el metil-SeCys no se incorpora en proteínas (Malagoli *et al.*, 2015). Este proceso de metilación está mediado por la enzima SeCys metiltransferasa (SMT). Los taxones vegetales más conocidos que contienen esta enzima son las denominadas plantas acumuladoras de Se, sin embargo, también se ha encontrado SMT en el brócoli (*Brassica oleracea* L.), y metil-SeCys en especies de *Allium* (Gonzalez-Morales *et al.,* 2017*)*.

Por otra parte, se ha reportado que la adición de Se incrementa el crecimiento de los vege-

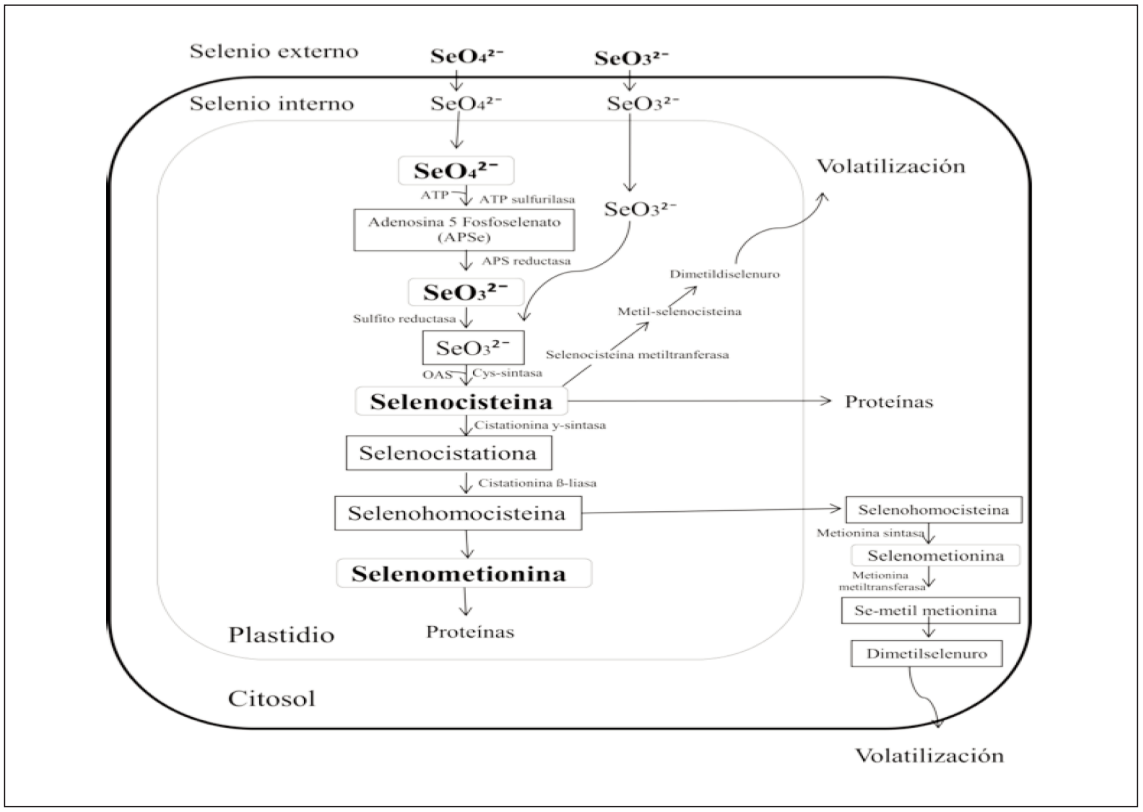


Figura 3. Esquema simplificado de la ruta de asimilación-eliminación de Se en las plantas [Adaptado de Sors *et al.* (2005) y Terry *et al.* (2000)].
Figure 3. Simplified scheme of the Se assimilation–elimination route in plants [Adapted from Sors et al. *(2005) and Terry* et al. *(2000)].*

tales y la acumulación de carbohidratos en el cloroplasto (Mozafariyan *et al.*, 2017); además, en un estudio realizado en *Arabidopsis thaliana* se encontró que el ácido jasmónico y el etileno reguló una respuesta de defensa a la acumulación de Se (Van Hoewyk *et al.*, 2008).

Efectos de aplicaciones de Se a las plantas

La biofortificación agronómica es una técnica rápida que se emplea para incrementar la concentración del oligoelemento en la parte comestible del cultivo, mediante el uso de fertilizantes. En tanto que la biofortificación genética de plantas se lleva a cabo por técnicas tradicionales de fitomejoramiento o ingeniería genética, y busca reducir el contenido de antinutrientes, e incrementar la concentración del microelemento (Hotz, 2013).

Durante la última década, los estudios de biofortificación agronómica con Se se incrementaron debido a que este elemento es importante tanto en animales como en humanos (Tabla 2), y su deficiencia se relaciona con la disfunción del sistema inmunitario, la distrofia muscular, la osteocondropatía, la cardiomiopatía, la enfermedad de Keshan, el funcionamiento del sistema de defensa, pro-

Tabla 2. Efecto de la aplicación de Se en algunos cultivos agrícolas
Table 2. Effect of Se application on some agricultural crops

Cultivo	Resultado	Referencia
Mostaza de la India (*Brassica juncea* L.)	La adición de 20 µM de selenato de sodio promovió un efecto protector contra ataques de herbívoros y hongos.	(Hanson *et al.*, 2003)
	La aplicación de selenito y selenato (100 µM) indujo la nitración de la proteína tirosina.	(Molnár *et al.*, 2018)
Toronjil (*Melissa officinalis* L.)	La aplicación foliar de selenato de sodio (1 mg L^{-1}) incrementó el crecimiento vegetativo y reproductivo, además estimuló el sistema antioxidante de la planta.	(Habibi y Alizade, 2017)
Frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)	La doble aplicación foliar de 10 mg Se L^{-1} incrementó en 233% el contenido de Se en la semilla de frijol.	(Smrkolj *et al.*, 2007)
	La adición de 40 µM de selenito de sodio favoreció el incremento de biomasa y mejoró la concentración de Se en la semilla.	(Hermosillo-Cereceres *et al.*, 2013)
	La biofortificación con 5 µM de selenato de sodio no modificó el contenido nutrimental del frijol.	(de Figueiredo *et al.*, 2017)
	La adición de 40 µM de selenito de sodio y 20 µM de selenato de sodio favoreció el incremento de las concentraciones de Ca.	(Hermosillo-Cereceres *et al.*, 2011)
	La adición de 20 µM de selenito de sodio incrementó la actividad enzimática de la superoxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidada.	(Hermosillo-Cereceres *et al.*, 2014)
Rábano (*Raphanus sativus* L.)	La aplicación foliar de selenato (5 mg $planta^{-1}$) provoco la metabolización de Se-metil-seleniocisteina y glucorafanin.	(Schiavon *et al.*, 2016)
Heliconia (*Heliconia* sp.)	Incrementó la concentración de K y Mn en hojas, y Mn en tallos.	(Cuacua-Temiz *et al.*, 2017)
Lenteja (*Lens culinaris* L.)	La concentración de Se osciló entre 425 y 673 µg kg^{-1}, de la cual, el 70% estuvo en forma de SeMe.	(Thavarajah *et al.*, 2008)
	La adición de selenato incrementó en 44% el porcentaje de nitrógeno derivado del aire, y en 108% el contenido de Se en la semilla, en comparación con el testigo.	(Ekanayake *et al.*, 2017)

Tabla 2. Efecto de la aplicación de Se en algunos cultivos agrícolas (continuación)
Table 2. Effect of Se application on some agricultural crops (continuation)

Cultivo	Resultado	Referencia
Zanahoria (*Daucus carota* L.)	La adición de selenato de sodio provocó un incremento en el contenido de seleniometionina en comparación con la aplicación de selenito de sodio.	(Smole *et al.*, 2016)
Lechuga (*Lactuca sativa* L.)	Modificó el potencial óxido-reducción e incrementó la actividad enzimática catalasa, sin causar modificaciones en el contenido mineral y la biomasa.	(López-Gutiérrez *et al.*, 2015)
	La adición de selenato mejoró la acumulación de Se en las hojas, en tanto que la biodisponibilidad fue de 70%. El 33,3% del selenito se transformó en metabolitos orgánicos, mientras que el 20% del selenato se convirtió en especies orgánicas de Se.	(do Nascimento da Silva *et al.*, 2017)
Maíz (*Zea mays* L.), Soya (*Glycine max* L.), Col (*Brassica oleracea* L.)	Se incrementó el contenido de Se en partes comestibles.	(Mao *et al.*, 2014)
Brócoli (*Brassica oleracea* itálica)	La adición de Se incrementó el contenido de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante.	(Bachiega *et al.*, 2016)
Maíz	La aplicación de 5 µM L^{-1} estimuló el crecimiento vegetativo y la elongación radical.	(Hawrylak-Nowak, 2008)
Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)	La adición de 1 mg L^{-1} de Se en tratamientos precosecha, redujo la peroxidación lipídica, incrementó el contenido de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos.	(Zhu *et al.*, 2016)
	La adición de 1 mg L^{-1} de Se en tratamientos precosecha, retardó la maduración del fruto, redujo la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO), y reprimió la expresión de los genes 1-aminociclopropano-ácido-1-carboxilico (ACC) sintasa, y ACC oxidasa.	(Zhu *et al.*, 2017b)
	La adición de 5 µM incrementó la actividad enzimática catalasa, el contenido de carotenos y el volumen del sistema radical.	(Mozafariyan *et al.*, 2017)

Tabla 2. Efecto de la aplicación de Se en algunos cultivos agrícolas (continuación)
Table 2. Effect of Se application on some agricultural crops (continuation)

Cultivo	Resultado	Referencia
Lechuga, tomate y melón (*Cucumis melo* L.)	Modificó el estado antioxidante y el contenido de vitamina C en los tres cultivos, con ligeros cambios en la biomasa y área foliar.	(de los Santos-Vázquez *et al.*, 2016)
Trigo (*Triticum aestivum* L.)	La aplicación de selenato y selenito (5 µM) promovió la producción de materia seca en el tallo y raíz.	(Boldrin *et al.*, 2016)
	La adición de Se de forma foliar incrementó el contenido del elemento en el grano, con valores que oscilaron entre 0,02 a 0,31 mg kg^{-1}.	(Wang *et al.*, 2017)
Uva de mesa (*Vitis vinifera* L.)	La aplicación foliar de Se en forma de aminoácidos incrementó el contenido del elemento, los valores oscilaron entre 19,4 y 34,9 µg kg^{-1}.	(Zhu *et al.*, 2017a)
Girasol (*Helianthus annuus* L.)	La adición de selenato de sodio (5 mg kg^{-1}) disminuyó el efecto causado por el estrés salino, mejoró la actividad enzimática de la glutatión peroxidasa, e incluso se decrementó el contenido de malondialdehido.	(Habibi, 2017)
	La adición de 5 mg kg^{-1} de selenato de sodio redujo el daño por estrés salino e incrementó la actividad antioxidante.	(Habibi, 2017)
Canola (*Brassica napus* L.).	La adición de 5 µM de selenometionina y seleniocisteína modificó la tasa de absorción de Se en comparación con la adición de selenito y selenato de sodio.	(Kikkert y Berkelaar, 2013)

blemas de capacidad productiva de los rumiantes y el daño en las membranas de los glóbulos rojos (Back, 2011; García-Bañuelos *et al.*, 2011; López *et al.*, 2012).

Los principales estudios se han realizado en cultivos de interés (Becvort-Azcurra *et al.*, 2012; Castillo-Godina *et al.*, 2013; Hermosillo-Cereceres *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2014; Bañuelos *et al.*, 2015; Castillo-Godina *et al.*, 2016) puesto que constituyen una fuente de proteínas, fibra dietética, carbohidratos, vitaminas, fitoquímicos y nutrimentos esenciales en la dieta humana (Murphy *et al.*, 2018). De igual manera se ha estudiado el efecto de la biofortificación con Se en *Brachiaria brizanta*; al respecto, Ramos *et al*. (2012) mencionan que la adición de 0,5 mg kg^{-1} de selenato de sodio favoreció la concentración del elemento en los brotes, redujo la peroxidación de lípidos y activó el sistema antioxidante en el pasto Mulato.

En algunas especies agrícolas la aplicación foliar de selenito o selenato mejoró la asimilación del compuesto y estimuló el crecimiento (El-Ramady *et al.*, 2016). Incluso, la adición exógena de Se en plantas regula el contenido de agua bajo condiciones de sequía, promueve el crecimiento, aumenta la tolerancia al estrés oxidativo inducido por radiación UV, activa mecanismos antioxidantes y reduce los procesos de senescencia (Cuacua-Temiz *et al.*, 2017). En condiciones de estrés salino, el Se puede detonar el mecanismo antioxidante (superóxido dismutasa, peroxidasa de guayacol y catalasa) (KeLing *et al.*, 2013).

También se emplea la adición de Se a germinados para incrementar el contenido de compuestos bioactivos. Ávila *et al.* (2014) mencionan que se incrementó significativamente la síntesis de selenocisteína y glucosinolatos en los germinados de *Brassica* spp. biofortificados. Posteriormente Funes-Collado *et al*. (2013), biofortificaron germinados de lenteja, alfalfa (*Medicago sativa* L.) y soya (*Glycine max* L.) con selenito y selenato de sodio, reportando que el contenido de Se en los germinados está en función del contenido de Se de la dosis usada. Arscott y Goldman (2012) aplicaron selenato de sodio en germinados de brócoli (*Brassica oleracea* L.), frijol chino (*Vigna radiata* L. Wilczek) y cebolla (*Allium cepa* L.). Encontrando que a bajas dosis de selenato (127 μM L^{-1}) se incrementaba el contenido de Se en los germinados sin afectar el crecimiento de los mismos. En estudios recientes con germinados de brócoli y mostaza (*Brassica alba* L. Rabenh), Bachiega *et al*. (2016) y Bodnar y Koniecza (2016), encontraron que el contenido de Se se incrementó significativamente, sin embargo solo los germinados biofortificados con selenito de sodio fueron capaces de convertir el Se inorgánico en seleno aminoácidos (selenometilselenocisteína y selenometionina). Por otra parte, Tyszka-Czochara *et al.* (2016) encontraron que al biofortificar geminados de amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) con Se, se incrementó el contenido de betanina.

En lo referente a la biofortificación genética, Kumar *et al*. (2016) han documentado aspectos relevantes en el cultivo de lenteja (*Lens culinaris* Medik.), principalmente se busca reducir el contenido de fitoquímicos antinutricionales e incrementar el contenido de proteína cruda, microelementos, carbohidratos prebióticos, folatos y vitamina B9. Por otra parte, Lyons *et al*. (2005b) y Lyons *et al*. (2005a) evaluaron accesiones silvestres, comerciales y poblaciones de trigo cultivados en México y Australia, encontrando que el *Aegilops tauschii* y el centeno (*Secale cereale* L.) almacenaron 42 y 35% más Se en el grano en comparación con los otros cereales bajo condiciones de campo e hidroponía, respectivamente. Zhao *et al.* (2009) evaluaron 150 líneas de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) y 25 líneas de trigo duro (*Triticum durum* L.), trigo farro (*Triticum dicoccum* L), trigo espelta (*Triticum spelta* L.) y trigo escaña (*Triti-*

cum monococcum L.), encontrando que no hubo significancia en la concentración de Se en el grano de los trigos harineros y duros; sin embargo, en los trigos farro, escaña y espelta la concentración de Se en el grano fue mayor. Asimismo, Thavarajah *et al*. (2008; 2017) estudiaron el potencial genético de genotipos de lentejas cultivados en diferentes localidades, encontrando que la interacción genotipo y ambiente modificaron en hasta 58,3% la concentración de Se en la semilla. Hasta cierto punto, la movilidad de los oligoelementos, desde el suelo hasta la semilla, está en función de los procesos fisiológicos, los genes que se expresen y el ambiente de crecimiento (Waters y Sankaran, 2011), por lo que para establecer un programa de biofortificación genética es necesario conocer adecuadamente las condiciones de crecimiento de cada cultivo. Al respecto, Watson *et al*. (2018) proponen el uso de cámaras de crecimiento para optimizar el tiempo de obtención de plantas mejoradas.

Al mismo tiempo, El Mehdawi *et al*. (2018) y Schiavon *et al*. (2015) estudiaron la expresión de transportadores de sulfato/selenato (SULTR) y cuatro enzimas APS en Brasicáceas acumuladoras y no acumuladoras, encontrando que la alta concentración de S no obstaculizó los transportadores SULTR1;2 y SULTR2; 1, y las enzimas APS1, 2 y 4 en *Stanleya pinnata*, en comparación con *Brasica juncea*. Por otra parte, Pilon-Smits y LeDuc (2009) mencionan que la sobre expresión de la APS en *B. Juncea* puede incrementar la reducción del selenato, y hasta duplicar la acumulación de Se en tallos y raíces. Lo anterior puede incrementar la tolerancia, acumulación y posteriormente la volatilización de Se en plantas transgénicas, que incluso tengan la capacidad de fitorremediar suelos contaminados con el oligoelemento (Bañuelos *et al*., 2005).

Asimismo, otra área de interés es la inducción de la actividad enzimática de la glutatión peroxidasa al adicionar Se (0,1 a 10 mg kg^{-1}) en plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.*)* y ryegrass (*Lolium perenne* L.) (Hartikainen, 2005); por el contrario, al adicionar más de 30 mg kg^{-1}, el Se puede actuar como pro-oxidante (Hartikainen *et al*., 2000). Al respecto, Molnár *et al*. (2018) mencionan que la adición de selenito y selenato (100 µM) provocó la nitración de la proteína tirosina, la cual puede ser usada como un indicador de toxicidad por Se en plantas de *Brassica juncea*.

Conclusiones

Esta revisión resalta el efecto que tiene el Se, en cantidades traza, en el sistema suelo-planta. La mayoría de los cultivos agrícolas, en especial las frutas y hortalizas contienen cantidades mínimas de Se por lo que se requiere hacer aplicaciones exógenas de compuestos inorgánicos de Se. La biofortificación con Se estimula la síntesis de proteínas, aminoácidos, compuestos secundarios de nitrógeno, compuestos fenólicos, de igual manera, incrementa la actividad antioxidante y prolonga la vida útil de productos hortofrutícolas. La biofortificación con Se en los cultivos agrícolas se está convirtiendo cada vez más en una solución para mejorar la problemática de deficiencia del oligoelemento en la población humana, así como para incrementar el contenido de compuestos bioactivos. Además, se requieren más estudios acerca de la sobre expresión de transportadores de sulfato/selenato y la enzima ATPS1 en plantas hiperacumuladoras y no hiperacumuladoras, mediante el uso de marcadores moleculares.

Agradecimientos

Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP), proyecto UJAT-PTC-252.

Bibliografía

Alloway BJ (2013). Bioavailability of elements in soil. En: Essentials of medical geology: Revised edition (Eds. Selinus O), pp. 351-373. Dordrecht. Springer Netherlands.

Arscott S, Goldman I (2012). Biomass effects and selenium accumulation in sprouts of three vegetable species grown in selenium-enriched conditions. Hortscience 47: 497-502.

Ávila FW, Yang Y, Faquin V, Ramos SJ, Guilherme LRG, Thannhauser TW, Li L (2014). Impact of selenium supply on Se-methylselenocysteine and glucosinolate accumulation in selenium-biofortified brassica sprouts. Food Chemistry 165: 578-586.

Back TG (2011). Selenium: Organoselenium chemistry. En: Encyclopedia of inorganic and bioinorganic chemistry (Eds. John Wiley & Sons, Ltd.)

Bachiega P, Salgado JM, de Carvalho JE, Ruiz ALTG, Schwarz K, Tezotto T, Morzelle MC (2016). Antioxidant and antiproliferative activities in different maturation stages of broccoli (*Brassica oleracea* italica) biofortified with selenium. Food Chemistry 190: 771-776.

Bañuelos G, Terry N, LeDuc DL, Pilon-Smits EAH, Mackey B (2005). Field trial of transgenic Indian mustard plants shows enhanced phytoremediation of selenium-contaminated sediment. Environmental Science & Technology 39: 1771-1777.

Bañuelos GS, Arroyo I, Pickering IJ, Yang SI, Freeman JL (2015). Selenium biofortification of broccoli and carrots grown in soil amended with Se-enriched hyperaccumulator stanleya pinnata. Food Chemistry 166: 603-608.

Becvort-Azcurra A, Fuentes-Lara LO, Benavides-Mendoza A, Ramírez H, Robledo-Torres V, Rodríguez-Mendoza MN (2012). Aplicación de selenio en tomate: Crecimiento, productividad y estado antioxidante del fruto. Terra Latinoamericana 30: 291-301.

Bodnar M, Konieczka P (2016). Evaluation of candidate reference material obtained from selenium-enriched sprouts for the purpose of selenium speciation analysis. LWT - Food Science and Technology 70: 286-295.

Boldrin PF, de Figueiredo MA, Yang Y, Luo H, Giri S, Hart JJ, Faquin V, Guilherme LRG, Thannhauser TW, Li L (2016). Selenium promotes sulfur accumulation and plant growth in wheat (*Triticum aestivum*). Physiologia Plantarum 158: 80-91.

Broadley MR, White PJ, Bryson RJ, Meacham MC, Bowen HC, Johnson SE, Hawkesford MJ, McGrath SP, Zhao F-J, Breward N, Harriman M, Tucker M (2006). Biofortification of UK food crops with selenium. Proceedings of the Nutrition Society 65: 169-181.

Cabrera-De la Fuente M, González-Morales S, Juárez-Maldonado A, Leija-Martínez P, Benavides-Mendoza A (2018). Chapter 4 – plant nutrition and agronomic management to obtain crops with better nutritional and nutraceutical quality. En: Therapeutic foods (Eds. Holban AM, Grumezescu AM), pp. 99-140. Academic Press.

Castillo-Godina R, Foroughbakhch-Pournavab R, Benavides-Mendoza A (2013). Efecto del selenio sobre la cuantificación de ácido ascórbico en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Planta 8: 21-23.

Castillo-Godina RG, Foroughbakhch-Pournavab R, Benavides-Mendoza A (2016). Effect of selenium on elemental concentration and antioxidant enzymatic activity of tomato plants. Journal of Agricultural Science and Technology 18: 233-244.

Cuacua-Temiz C, Trejo-Téllez LI, Velasco-Velasco J, Gómez-Merino FC (2017). Efecto de los elementos benéficos Al, Co, Se y Si en la nutrición de heliconias (*Heliconia* sp.). Agroproductividad 10: 62-68.

Christophersen OA, Lyons G, Haug A, Steinnes E (2013). Selenium. En: Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (Eds. Alloway BJ), pp. 429-463. Dordrecht. Springer Netherlands.

Das A, Laha S, Mandal S, Pal S, Siddiqui MW (2018). Chapter 14 – Preharvest biofortification of horticultural crops. En: Preharvest modulation of postharvest fruit and vegetable quality (Eds. Siddiqui MW), pp. 381-434. Academic Press.

Davis JG, Steffens TJ, Engle TE, Mallow KL, Cotton SE (2002). Diagnosing selenium toxicity. Natural resources series. Colorado State University. Cooperative Extension. Fact Sheet 6.109.

de Figueiredo MA, Boldrin PF, Hart JJ, de Andrade MJB, Guilherme LRG, Glahn RP, Li L (2017). Zinc and selenium accumulation and their effect on iron bioavailability in common bean seeds. Plant Physiology and Biochemistry 111: 193-202.

de los Santos-Vázquez M, Benavides-Mendoza A, Ruiz-Torres NA, Cabrera-de la Fuente M, Morelos-Moreno Á (2016). Sodium selenite treatment of vegetable seeds and seedlings and the effect on antioxidant status. Emirates Journal of Food and Agriculture 28: 589-593.

do Nascimento da Silva E, Aureli F, D'Amato M, Raggi A, Cadore S, Cubadda F (2017). Selenium bioaccessibility and speciation in selenium-enriched lettuce: Investigation of the selenocompounds liberated after *in vitro* simulated human digestion using two-dimensional HPLC-ICP-MS. Journal of Agricultural and Food Chemistry 65: 3031-3038.

Ekanayake LJ, Thavarajah D, McGee R, Thavarajah P (2017). Will selenium fertilization improve biological nitrogen fixation in lentils? Journal of Plant Nutrition 40: 2392-2401.

El-Ramady H, Abdalla N, Taha HS, Alshaal T, El-Henawy A, Faizy SEDA, Shams MS, Youssef SM, Shalaby T, Bayoumi Y, Elhawat N, Shehata S, Sztrik A, Prokisch J, Fári M, Domokos-Szabolcsy É, Pilon-Smits EA, Selmar D, Haneklaus S, Schnug E (2016). Selenium and nano-selenium in plant nutrition. Environmental Chemistry Letters 14: 123-147.

El Mehdawi AF, Jiang Y, Guignardi ZS, Esmat A, Pilon M, Pilon-Smits EAH, Schiavon M (2018). Influence of sulfate supply on selenium uptake dynamics and expression of sulfate/selenate transporters in selenium hyperaccumulator and nonhyperaccumulator brassicaceae. New Phytologist 217: 194-205.

Elrashidi MA, Adriano DC, Lindsay WL (1989). Solubility, speciation, and transformations of selenium in soils. En: Selenium in agriculture and the environment (Eds. Jacobs LW), pp. 51-63. Madison, WI. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.

Ellis DR, Salt DE (2003). Plants, selenium and human health. Current Opinion in Plant Biology 6: 273-279.

Fordyce FM (2013). Selenium deficiency and toxicity in the environment. En: Essentials of medical geology: Revised edition (Eds. Selinus O), pp. 375-416. Dordrecht. Springer Netherlands.

Funes-Collado V, Morell-Garcia A, Rubio R, López-Sánchez JF (2013). Study of selenocompounds from selenium-enriched culture of edible sprouts. Food Chemistry 141: 3738-3743.

García-Bañuelos ML, Hermosillo-Cereceres MA, Sánchez E (2011). The importance of selenium biofortification in food crops. Current Nutrition & Food Science 7: 181-190.

González-Morales S, Pérez-Labrada F, García-Enciso EL, Leija-Martínez P, Medrano-Macías J, Dávila-Rangel IE, Juarez-Maldonado A, Rivas-Martínez EN, Benavides-Mendoza A (2017). Selenium and sulfur to produce *Allium* functional crops. Molecules 22: 558.

Gupta M, Gupta S (2017). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. Frontiers in Plant Science 7: 2074.

Habibi G (2017). Physiological, photochemical and ionic responses of sunflower seedlings to exogenous selenium supply under salt stress. Acta Physiologiae Plantarum 39: 213.

Habibi G, Alizade Z (2017). Selenium in lemon balm plants: Productivity, phytotoxicity and drought alleviation. Journal of Plant Nutrition 40: 1557-1568.

Hanson B, Garifullina GF, Lindblom SD, Wangeline A, Ackley A, Kramer K, Norton AP, Lawrence CB, Pilon-Smits EAH (2003). Selenium accumulation protects *Brassica juncea* from invertebrate herbivory and fungal infection. New Phytologist 159: 461-469.

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

Hartikainen H (2005). Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 18: 309-318.

Hawrylak-Nowak B (2008). Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants. Journal of Elementology 13: 513-519.

Hermosillo-Cereceres MA, Sánchez-Chávez E, Balandran-Quintana RR, Mendoza-Wilson AM, Guevara-Aguilar A, Muñoz-Márquez E, García-Bañuelos ML (2011). Ionome variation in bean plant growth under different Se forms and application rates. Journal of Food Agriculture and Environment 9: 374-378.

Hermosillo-Cereceres MA, Sánchez-Chávez E, Guevara-Aguilar A, Muñoz-Márquez E (2013). Biofortification and distribution patterns of selenium in bean: Response to selenate and selenite. Journal of Food Agriculture and Environment 11: 421-426.

Hermosillo-Cereceres MA, Sánchez E, Muñoz-Márquez E, Guevara-Aguilar A, García-Bañuelos M, Ojeda-Barrios D (2014). Impact of selenium fertilization on the activity of detoxifying enzymes of H_2O_2 in bean plants. Phyton-International Journal of Experimental Botany 83: 347-352.

Hotz C (2013). Biofortification. En: Encyclopedia of human nutrition (third edition) (Ed. Benjamin C), pp. 175-181. Waltham. Academic Press.

Hugouvieux V, Dutilleul C, Jourdain A, Reynaud F, Lopez V, Bourguignon J (2009). Arabidopsis putative selenium-binding protein1 expression is tightly linked to cellular sulfur demand and can reduce sensitivity to stresses requiring glutathione for tolerance. Plant Physiol 151: 768-781.

Jones GD, Droz B, Greve P, Gottschalk P, Poffet D, McGrath SP, Seneviratne SI, Smith P, Winkel LHE (2017). Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 114: 2848-2853.

Kaur N, Sharma S, Kaur S, Nayyar H (2014). Selenium in agriculture: A nutrient or contaminant for crops? Archives of Agronomy and Soil Science 60: 1593-1624.

KeLing H, Ling Z, JiTao W, Yang Y (2013). Influence of selenium on growth, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activity in melon (*Cucumis melo* L.) seedlings under salt stress. Acta Societatis Botanicorum Poloniae 82: 193-197.

Kieliszek M, Blazejak S (2016). Current knowledge on the importance of selenium in food for living organisms: A review. Molecules 21: 609.

Kikkert J, Berkelaar E (2013). Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 65: 458-465.

Kumar J, Gupta DS, Kumar S, Gupta S, Singh NP (2016). Current knowledge on genetic biofortification in lentil. Journal of Agricultural and Food Chemistry 64: 6383-6396.

Li H-F, McGrath SP, Zhao F-J (2008). Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. New Phytologist 178: 92-102.

López-Gutiérrez ML, Benavides-Mendoza A, Ortega-Ortíz H, Valdez-Aguilar LA, Cabrera-De La Fuente M, Sandoval-Rangel A (2015). Selenio y su efecto en el estado antioxidante y la composición mineral de la lechuga. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub Esp 12: 2257-2262.

López R, Revilla A, Tórtora J (2012). La deficiencia de selenio. Ciencia y Desarrollo. Disponible en: http://www.cyd.conacyt.gob.mx/261/articulos/deficiencia-del-selenio.html

Lyons G, Ortiz-Monasterio I, Stangoulis J, Graham R (2005a). Selenium concentration in wheat grain: Is there sufficient genotypic variation to use in breeding? Plant and Soil 269: 369-380.

Lyons GH, Judson GJ, Ortiz-Monasterio I, Genc Y, Stangoulis JCR, Graham RD (2005b). Selenium in Australia: Selenium status and biofortification of wheat for better health. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 19: 75-82.

Malagoli M, Schiavon M, Dall'Acqua S, Pilon-Smits EAH (2015). Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. Frontiers in Plant Science 6: 280.

Mao H, Wang J, Wang Z, Zan Y, Lyons G, Zou C (2014). Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 14: 459-470.

McNeal JM, Balistrieri LS (1989). Geochemistry and occurrence of selenium: An overview. En: Selenium in agriculture and the environment (Eds. Jacobs LW), pp. 1-13. Madison, WI. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.

Molnár Á, Feigl G, Trifán V, Ördög A, Szőllősi R, Erdei L, Kolbert Z (2018). The intensity of tyrosine nitration is associated with selenite and selenate toxicity in *Brassica juncea* L. Ecotoxicology and Environmental Safety 147: 93-101.

Mozafariyan M, Pessarakli M, Saghafi K (2017). Effects of selenium on some morphological and physiological traits of tomato plants grown under hydroponic condition. Journal of Plant Nutrition 40: 139-144.

Murphy KJ, Marques-Lopes I, Sánchez-Tainta A (2018). Chapter 7 – Cereals and legumes. En: The prevention of cardiovascular disease through the Mediterranean diet (Eds. Sánchez-Villegas A, Sanchez-Taínta A), pp. 111-132. Academic Press.

Nothstein AK, Eiche E, Riemann M, Nick P, Winkel LHE, Göttlicher J, Steininger R, Brendel R, von Brasch M, Konrad G, Neumann T (2016). Tracking se assimilation and speciation through the rice plant–nutrient competition, toxicity and distribution. Plos One 11: e0152081.

Paikaray S (2016). Origin, mobilization and distribution of selenium in a soil/water/air system: A global perspective with special reference to the Indian scenario. CLEAN – Soil, Air, Water 44: 474-487.

Perrone D, Monteiro M, Nunes JC (2015). Chapter 1 the chemistry of selenium. En: Selenium: Chemistry, analysis, function and effects (Ed. Preedy VR), pp. 3-15. The Royal Society of Chemistry.

Pilon-Smits EAH, LeDuc DL (2009). Phytoremediation of selenium using transgenic plants. Current Opinion in Biotechnology 20: 207-212.

Pilon-Smits EAH (2015). Selenium in plants. En: Progress in botany: Vol. 76 (Eds. Lüttge U y Beyschlag W), pp. 93-107. Cham. Springer International Publishing.

Puccinelli M, Malorgio F, Pezzarossa B (2017). Selenium enrichment of horticultural crops. Molecules 22: 933.

Ramos SJ, Ávila FW, Boldrin PF, Pereira FJ, Castro EM, Faquin V, Reis AR, Guilherme LRG (2012). Response of brachiaria grass to selenium forms applied in tropical soil. Plant Soil and Environment 58: 521-527.

Schiavon M, Pilon M, Malagoli M, Pilon-Smits EAH (2015). Exploring the importance of sulfate transporters and ATP sulphurylases for selenium hyperaccumulation–a comparison of *Stanleya pinnata* and *Brassica juncea* (brassicaceae). Frontiers in Plant Science 6.

Schiavon M, Berto C, Malagoli M, Trentin A, Sambo P, Dall'Acqua S, Pilon-Smits EAH (2016). Selenium biofortification in radish enhances nutritional quality via accumulation of methyl-selenocysteine and promotion of transcripts and metabolites related to glucosinolates, phenolics, and amino acids. Frontiers in Plant Science 7: 1371.

Schiavon M, Pilon-Smits EAH (2017a). The fascinating facets of plant selenium accumulation – biochemistry, physiology, evolution and ecology. New Phytologist 213: 1582-1596.

Schiavon M, Pilon-Smits EAH (2017b). Selenium biofortification and phytoremediation phytotechnologies: A review. Journal of Environmental Quality 46: 10-19.

Smole S, Skoczylas L, Ledwozyw-Smolen I, Rakoczy R, Kopec A, Piatkowska E, Biezanowska-Kopec R, Koronowicz A, Kapusta-Duch J (2016). Biofortification of carrot (*Daucus carota* L.) with iodine and selenium in a field experiment. Frontiers in Plant Science 7: 730.

Smrkolj P, Osvald M, Osvald J, Stibilj V (2007). Selenium uptake and species distribution in selenium-enriched bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds obtained by two different cultivations. European Food Research and Technology 225: 233-237.

Sors TG, Ellis DR, Salt DE (2005). Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. Photosynthesis Research 86: 373-389.

Spadoni M, Voltaggio M, Carcea M, Coni E, Raggi A, Cubadda F (2007). Bioaccessible selenium in Italian agricultural soils: Comparison of the biogeochemical approach with a regression model based on geochemical and pedoclimatic variables. Science of the Total Environment 376: 160-177.

Terry N, Zayed AM, de Souza MP, Tarun AS (2000). Selenium in higher plants. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 51: 401-432.

Thavarajah D, Ruszkowski J, Vandenberg A (2008). High potential for selenium biofortification of lentils (*Lens culinaris* L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry 56: 10747-10753.

Thavarajah D, Abare A, Mapa I, Coyne C, Thavarajah P, Kumar S (2017). Selecting lentil accessions for global selenium biofortification. Plants 6: 34.

Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alcántar-González G (2012). Elementos benéficos. En: Nutrición de cultivos (Eds. Alcántar-González G y Trejo-Téllez LI), pp. 49-91. México. Colegio de Postgraduados.

Tyszka-Czochara M, Pasko P, Zagrodzki P, Gajdzik E, Wietecha-Posluszny R, Gorinstein S (2016). Selenium supplementation of amaranth sprouts influences betacyanin content and improves anti-inflammatory properties via NF B in Murine RAW 264.7 macrophages. Biological Trace Element Research 169: 320-330.

Van Hoewyk D, Takahashi H, Inoue E, Hess A, Tamaoki M, Pilon-Smits EAH (2008). Transcriptome analyses give insights into selenium-stress responses and selenium tolerance mechanisms in Arabidopsis. Physiologia Plantarum 132: 236-253.

Van Hoewyk D (2013). A tale of two toxicities: Malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants. Annals of Botany 112: 965-972.

Wang Q, Yu Y, Li J, Wan Y, Huang Q, Guo Y, Li H (2017). Effects of different forms of selenium fertilizers on Se accumulation, distribution, and residual effect in winter wheat–summer maize rotation system. Journal of Agricultural and Food Chemistry 65: 1116-1123.

Waters BM, Sankaran RP (2011). Moving micronutrients from the soil to the seeds: Genes and physiological processes from a biofortification perspective. Plant Science 180: 562-574.

Watson A, Ghosh S, Williams MJ, Cuddy WS, Simmonds J, Rey M-D, Asyraf Md Hatta M, Hinchliffe A, Steed A, Reynolds D, Adamski NM, Breakspear A, Korolev A, Rayner T, Dixon LE, Riaz A, Martin W, Ryan M, Edwards D, Batley J, Raman H, Carter J, Rogers C, Domoney C, Moore G, Harwood W, Nicholson P, Dieters MJ, DeLacy IH, Zhou J, Uauy C, Boden SA, Park RF, Wulff BBH, Hickey LT (2018). Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. Nature Plants 4: 23-29.

White PJ, Bowen HC, Marshall B, Broadley MR (2007). Extraordinarily high leaf selenium to sulfur ratios define 'Se-accumulator' plants. Annals of Botany 100: 111-118.

White PJ (2016). Selenium accumulation by plants. Annals of Botany 117: 217-235.

Zhao FJ, Su YH, Dunham SJ, Rakszegi M, Bedo Z, McGrath SP, Shewry PR (2009). Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin. Journal of Cereal Science 49: 290-295.

Zhu Z, Chen Y, Zhang X, Li M (2016). Effect of foliar treatment of sodium selenate on postharvest decay and quality of tomato fruits. Scientia Horticulturae 198: 304-310.

Zhu S, Liang Y, Gao D, An X, Kong F (2017a). Spraying foliar selenium fertilizer on quality of table grape (*Vitis vinifera* L.) from different source varieties. Scientia Horticulturae 218: 87-94.

Zhu Z, Chen Y, Shi G, Zhang X (2017b). Selenium delays tomato fruit ripening by inhibiting ethylene biosynthesis and enhancing the antioxidant defense system. Food Chemistry 219: 179-184.

(Aceptado para publicación el 18 de abril de 2018)