

Suelos y nutrición humana -énfasis en I, Se, Zn y Fe-

Soil and human nutrition – emphasis on I, Se, Zn and Fe-

Julia Medrano Macías¹, Iris del Carmen Morales Espinoza², Adalberto Benavides Mendoza^{1*}

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo, México.

²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Ciencias del Suelo, Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo, México.

*Autor de correspondencia: adalberto.benavides@uaaan.edu.mx

RESUMEN

Los suelos desempeñan un papel crucial en la nutrición humana, ya que son la principal fuente de nutrientes esenciales, mediante los productos vegetales que consumimos. La presencia y disponibilidad de los nutrientes están directamente relacionados con las características fisicoquímicas del suelo. A nivel mundial, los déficits de yodo, zinc, selenio y hierro son reconocidos como problemas de salud pública que afectan a un porcentaje sustancial de la población. Sin embargo, existe poca disponibilidad de estudios que aborden y describan la concentración y disponibilidad de estos elementos en los suelos y en las plantas. Sorprendentemente, incluso en nuestro país, no contamos con estudios básicos como el mapeo regional de la presencia y biodisponibilidad del yodo, selenio, zinc y hierro en los suelos y agua agrícola. Esta falta de información representa un desafío para comprender la situación nutricional y abordar de manera adecuada estas deficiencias en nuestra población, para así poder tomar medidas de prevención mediante la biofortificación y la mejora de la calidad de los suelos agrícolas.

Palabras clave: Elementos esenciales, biofortificación, cultivos, irrigación, mejoramiento.

ABSTRACT

Soils play a crucial role in human nutrition since they are the primary source of essential nutrients through our plant products. The presence and availability of nutrients are directly related to the physicochemical characteristics of the soil. Globally, deficiencies in iodine, zinc, selenium, and iron are recognized as public health problems affecting a substantial percentage of the population. However, there is limited availability of studies that address and describe the concentration and availability of these elements in water, soils, and food. Surprisingly, even in our country, we lack basic studies such as regional mapping of the presence and bioavailability of iodine, selenium, zinc, and iron in agricultural soils and water. This lack of information poses a challenge to understanding the nutritional situation and adequately addressing these deficiencies in our population, to implement prevention measures through biofortification and improving the quality of agricultural soils.

Keywords: Essential elements, biofortification, crops, irrigation, improvement.

INTRODUCCIÓN

Los elementos esenciales que consumimos tienen su origen principal en las plantas, animales y otros organismos que forman parte de nuestra alimentación. En el caso de los animales herbívoros obtienen los nutrientes a partir de la biomasa vegetal que consumen, y los carnívoros de otros tejidos animales. Tanto la composición mineral

de las plantas como la de los tejidos animales reflejan la composición del suelo sobre el que subsisten, así como los factores fisicoquímicos que facilitan o restringen el acceso a los nutrientes (Ademi *et al.*, 2021). Los agrónomos aplican diferentes técnicas de manejo de los suelos y los cultivos que permiten que estos eleven la concentración de nutrientes en la cosecha. Estas técnicas de biofortificación son útiles para mejorar la calidad nutricional y asegurar que la pobla-

ción disponga de alimentos que la aporten todos los nutrientes necesarios.

Los suelos calcáreos cubren alrededor de un tercio del planeta y se encuentran principalmente en regiones semiáridas o áridas con menos de 500 mm de lluvia al año. Se estima que un 30-50% de la superficie de México corresponde a suelos calcáreos. Un suelo calcáreo tiene un pH alto, entre 7 y 9, y contiene bastante carbonato libre (Xu *et al.*, 2022), lo cuál impide la movilización y disponibilidad de nutrientes. Lo anteriormente descrito pone un problema de salud pública, en donde el consumo deficiente de elementos esenciales como yodo, zinc, hierro y selenio provoca malnutrición mineral a nivel global y nacional.

Y a pesar de esta problemática de salud pública, existen muy pocos estudios en donde de manera sistemática se hallan mapeado la concentración y disponibilidad de estos elementos en el suelo, en el agua, y el abastecimiento hacia los cultivos agrícolas. El mapeo de los nutrientes en los suelos y aguas nacionales es un requisito para la planificación de la biofortificación de cultivos con diferentes nutrientes, y debe formar parte de la estrategia de seguridad alimentaria de cualquier país.

En México los esfuerzos de mapeo geológico han estado dirigidos a la búsqueda de minerales con valor comercial para la minería y energéticos. Por lo que por inicio de cuentas el establecimiento de un mapa geoquímico nacional que incluya entre otros elementos al yodo, el zinc, el selenio y el hierro serían de gran ayuda para determinar los lugares más críticos e iniciar con alternativas de abastecimiento de los nutrientes por medio de la biofortificación.

El presente manuscrito aporta información acerca de la importancia de los nutrientes yodo, selenio, zinc y hierro en la salud humana y la relación en el consumo de estos a consecuencia del contenido en el suelo y las plantas. Del mismo modo, se señalan los factores del manejo agronómico que mejoran la disponibilidad y absorción por parte de las plantas.

YODO

Yodo y salud humana

El yodo es esencial para los humanos, participando en la síntesis de hormonas tiroideas, el crecimiento de las estructuras del cuerpo y la función neuronal en etapas de gestación (Köhrle, 2015); se ha demostrado recientemente funciones adicionales asociadas con la

carcinogénesis y su tratamiento en diversas líneas celulares, mostrando que el yodo es capaz de actuar de dos formas: como antioxidante y como antiproliferativo de células malignas (Anguiano & Aceves, 2016). En bajas concentraciones el yodo puede neutralizar directamente radicales hidroxilo (HO•) y en su forma oxidada (I₂) compite con las especies reactivas del oxígeno (ROS) disminuyendo significativamente la lipoperoxidación que causa daños celulares. En altas concentraciones, el yodo actúa como un oxidante moderado, disipando el potencial de membrana mitocondrial y promoviendo la apoptosis y eliminación de células que inducen cáncer (Aranda *et al.*, 2013). Desafortunadamente, se estima que 2000 millones de personas viven con una ingesta insuficiente de este elemento (Mottiar, 2013), provocando los denominados desórdenes por deficiencia de yodo (DDY) (Weng *et al.*, 2008). Los requerimientos diarios de yodo, de acuerdo con las Recommended Dietary Allowances (RDA) (Andersson *et al.*, 2012), son: 90 µg Infantes (0-59 meses), 120 µg Niños (6-12 años), 150 µg Adultos (Mayores de 12 años) y 200 µg en embarazo y lactancia.

Se han realizado numerosos intentos para mitigar el déficit en el consumo del yodo, principalmente mediante la yodatización universal de la sal de mesa desde la década de 1920 (de Caffarelli, 1997; Zimmermann, 2009; Charlton *et al.*, 2013). Sin embargo, a través de los años se ha demostrado que esta técnica por sí sola es insuficiente para asegurar el requerimiento total de yodo (de Benoist *et al.*, 2008). Por otra parte, el consumo de yodo en formas orgánicas se considera más adecuado (Li *et al.*, 2018), ya que también se han evidenciado casos de bocio endémico asociado al exceso en el consumo de yodo inorgánico como el utilizado para la yodatización de la sal de mesa (Zhao *et al.*, 2000).

Debido a lo anterior, se hace necesario aumentar la disponibilidad para la población de yodo en formas orgánicas con el uso de técnicas como la biofortificación de los cultivos. Si estos programas de biofortificación logran implementarse en los cultivos básicos como el maíz, frijol, papa y hortalizas de consumo general como el tomate, cebolla y el chile, se lograría un gran avance en conseguir un consumo adecuado de yodo, ya sea como complemento o como alternativa a la yodatización de la sal de mesa.

Fuentes de yodo en la dieta. Las mejores fuentes de yodo son los pescados, los mariscos, las algas y la sal marina; esta última contiene 76 µg de yoduro/g, el contenido de yoduro del agua de mar es de 50 a

60 µg/l (Hetzl, 2002). El pan puede contener yodato como mejorador de la masa y los productos lácteos pueden contener yodo procedente de antisépticos para las ubres. El contenido de yodo no suplementado en los alimentos se correlaciona estrechamente con la concentración en el suelo. El agua potable contiene menos de 2 µg/l en zonas con deficiencia de yodo.

Yodo en el suelo

La concentración del yodo disponible en el suelo está influenciada por la distancia al océano y el material madre. Las áreas montañosas, valles y llanuras interiores de los continentes tienden a mostrar bajas concentraciones de yodo (Ashworth, 2009). El comportamiento geoquímico del yodo lo hace único entre los elementos; a diferencia de la mayoría de los elementos en el suelo, el yodo no proviene principalmente del desgaste de la litosfera (Fuge & Johnson, 2015). Las concentraciones de yodo en el suelo varían ampliamente, desde <0.1 hasta 150 mg kg⁻¹, siendo generalmente más bajas en zonas alejadas del océano.

Adicionalmente, los factores edáficos que afectan la disponibilidad y absorción del yodo en el suelo son: la cantidad de materia orgánica y a la capacidad de las sustancias húmicas para complejar o adsorber el yodo, un proceso que aparentemente está mediado por microorganismos (Shetaya *et al.*, 2012). Se ha informado también, una posible relación negativa entre el contenido de arcillas en el suelo y la absorción de yodo por las plantas (Whitehead, 1984; Moreda-Piñeiro *et al.*, 2011). Se ha reportado que en el suelo el balance de las especies químicas del yodo en condiciones de pH ácido (<7) está inclinado a la formación de yoduros (I⁻), que presentan una mayor adsorción con los cationes del suelo, lo cual se traduce a una mayor conservación del yodo en el suelo (Dai *et al.*, 2006). Por el contrario, en condiciones de basicidad (pH >7), como ocurre en los suelos calcáreos, la forma predominante es el yodato (IO³⁻), encontrándose que la des-adsorción o pérdida del IO³⁻ en el suelo es llevado a cabo de manera mucho más rápida que la del I⁻ (Dai *et al.*, 2009). Respecto al potencial redox, se sigue la misma tendencia; los suelos reductores con buenos niveles de materia orgánica tienden a conservar el yodo, los suelos oxidados (como los calcáreos) lo pierden con mayor facilidad. Otro factor importante en la movilización (adsorción, des adsorción y volatilización) del yodo en el suelo es la presencia de microorganismos. Investigaciones han encontrado que una amplia variedad de bacterias tanto terrestres como marinas son

capaces de llevar a cabo reacciones de metilación del yoduro (CH₃I), proceso que causaría la pérdida por volatilización del yodo. Algunas bacterias capaces de llevar a cabo este proceso son *Atteromonas macleodii*, *Vibrio splencfidus*, *Rhizobium* sp. y *Metlplosinus trichosporium* (Amachi, 2008). En conclusión, la distribución irregular del yodo en el suelo es debido a su ciclogeoquímico, aunado a las propiedades físicas químicas y biológicas de este provocando una baja concentración en plantas y por lo tanto en el consumo humano.

Yodo en plantas

La concentración de yodo encontrada en plantas terrestres va desde 0.1 hasta 1 mg kg⁻¹, pudiendo alcanzar 3 mg kg⁻¹ ó más. No se conoce una función metabólica del yodo en estos organismos (Kabata-Pendias & Pendias, 2011; Kirkby, 2011), pero es catalogado como un bioestimulante y nutriente benéfico (Halka *et al.*, 2019).

A la fecha, existe poca información acerca del mecanismo por el cual yodo es absorbido, metabolizado y acumulado por las plantas, pero diversos estudios han evidenciado que luego de la aplicación de yodo al suelo, cultivos como arroz, maíz, trigo, espinaca y tomate incrementan la concentración de este nutriente en las partes comestibles (Kiferle *et al.*, 2013; Cakmak *et al.*, 2017; Smoleń *et al.*, 2017).

Se ha observado que el yodo captado en forma reducida (yoduro, I⁻) es absorbido con mayor rapidez que el yodato (IO₃) por lo tanto la planta alcanza el punto de toxicidad a menores concentraciones de I⁻ (Leyva *et al.*, 2011). También se sabe que la mayor parte del yoduro absorbido por las plantas es retenido en la raíz y una cantidad menor es transportada a los tallos y hojas (Humphrey *et al.*, 2019). Por lo anterior, se ha sugerido que para propósitos de biofortificación se utilice el yodato preferentemente sobre el yoduro.

Nuestros propios estudios desarrollados desde el 2007 en la UAAAN sobre la fertilización con yodo en México, revelaron la posibilidad de obtener tejidos vegetales comestibles como tomate, melón, lechuga entre otros, con niveles de yodo de hasta 156 mg kg⁻¹ abasteciendo el consumo diario requerido en humanos. Estos resultados son indicativos sólidos de la viabilidad de la biofortificación con yodo para lograr una reducción sustancial en la ingesta insuficiente de este elemento.

ZINC

Zinc y salud humana

En la célula, al igual que otros metales de transición, el Zn en forma iónica libre (Zn^{2+}) se mantiene en muy baja concentración en el citoplasma, ubicándose principalmente en ligandos orgánicos (proteínas, aminoácidos, lípidos o nucleótidos) o compartimentalizado en organelos como la vacuola, cloroplastos y mitocondrias (Stanton *et al.*, 2022). A pesar que el Zn es considerado como esencial en las plantas, es muy recurrente en nuestro país encontrar niveles bajos en los tejidos comestibles de los cultivos, lo cual lleva a un consumo deficiente. La cantidad diaria recomendada de consumo de zinc, de acuerdo con Instituto de medicina de USA, es para hombres 11 mg/día, para mujeres 8 mg/día y un máximo tolerable de 40 mg/día (Ruz *et al.*, 2019).

Por lado, se sabe que el déficit de zinc se asocia con la inducción de estrés oxidativo y, por otro, se ha observado que las aplicaciones continuas de este en los organismos son inductoras de compuestos antioxidantes; el efecto positivo del zinc es siempre indirecto (Marreiro *et al.*, 2017). Dicho lo anterior se tiene una necesidad de desarrollar tecnologías eficientes para añadirse en diferentes sistemas, como en suelos y en agua para incrementar su contenido en plantas y disminuir la ingesta insuficiente en humanos.

Gran parte de la concentración del zinc celular se encuentra en las metaloenzimas y cumple muchas funciones fisiológicas y de regulación (Chasapis *et al.*, 2020). Por ello, la carencia o déficit de este elemento se asocia con múltiples problemas metabólicos cuyo síndrome es complejo y difícil de reconocer.

Desde los años 1950's se reconocía cierta importancia del zinc como nutrimento en los humanos. Sin embargo, un consumo deficiente debido no se consideraba un factor importante para la salud. Después de la primera descripción de un síndrome asociado a la deficiencia severa de zinc en 1961 (Rosado, 1998; Hambidge, 2000) el zinc ha recibido creciente atención y se le considera, junto con la deficiencia de vitamina A, como uno de los más serios problemas de salud pública alimentaria a nivel mundial. Por ello, es común la fortificación de alimentos con sulfato u óxido de zinc.

El problema es especialmente crítico en regiones en donde se conjugan el no aporte de zinc con los fertilizantes, el bajo contenido o biodisponibilidad natural de zinc en el suelo (como ocurre en los suelos calcáreos) y la dieta basada en cereales. Los cultivos producidos en las condiciones descritas muestran

de forma inherente valores bajos de zinc, lo cual se refleja, desafortunadamente, en la población que los consume (Cakmak, 2009). Otros factores como el elevado contenido de ácido fítico en las semillas, concentraciones elevadas de calcio y fibra disminuyen la biodisponibilidad del zinc en las semillas de gramíneas como el maíz y el trigo (Zou *et al.*, 2019), añadiendo una dimensión adicional de complejidad al problema de las restricciones edáficas.

En México, la deficiencia de zinc no parece mostrarse en niveles severos, sin embargo, es posible que un porcentaje significativo de la población padezca deficiencias que pueden calificarse de medianas a leves. Es, sin embargo, un punto que merece atención ya que incluso deficiencias leves se asocian con retrasos en crecimiento y disfunciones fisiológicas (Gupta *et al.*, 2020). Al igual que ocurre con el yodo y el selenio, la carencia de información acerca de la disponibilidad de zinc en suelos y aguas, los contenidos en las cosechas, y las ingestas y biodisponibilidad del zinc en la alimentación de la población mexicana es un tema crítico.

Fuentes de zinc en la dieta. El zinc se puede encontrar en una amplia variedad de alimentos. Las ostras son la fuente más abundante de este elemento. Sin embargo, las principales fuentes de ingesta de zinc son la carne (res, ternera, cerdo y cordero) y productos cárnicos, cereales y granos, así como la leche y otros productos lácteos. Otras fuentes importantes son el pescado, verduras, nueces (Olza *et al.*, 2017).

Zinc en suelos

El contenido de zinc en los suelos depende de manera natural de la intemperización de la roca madre del suelo. El contenido promedio de zinc en las rocas es de 70-80 mg Zn kg⁻¹. El contenido promedio de zinc en los suelos, por otro lado, se encuentra entre 50-66 mg kg⁻¹, encontrándose en los suelos agrícolas un rango de variación de 10 a 300 mg Zn kg⁻¹ suelo (Noulas *et al.*, 2018). Este se distribuye en tres fracciones que son: (a) soluble en agua y que incluye al Zn^{2+} y los complejos orgánicos solubles que las plantas pueden absorber fácilmente; (b) adsorbido en complejos de intercambio coloidales que incluyen arcillas, compuestos húmicos e hidróxidos de Al y Fe, que las plantas pueden absorber solamente después de que el zinc pase a la fracción soluble; (c) complejos insolubles y minerales de zinc no disponibles para los cultivos. Aproximadamente el 90% del Zn en el suelo se encuentra en esta última fracción no accesible a las

plantas (Imseng *et al.*, 2019).

Un factor determinante para la distribución del Zn en las diferentes fracciones es el pH del suelo. Al elevarse el pH es mayor la tendencia del Zn a permanecer ligado a los sitios de intercambio, lo cuál causa poco zinc soluble; al disminuir el pH hay mayor facilidad de desplazamiento del Zn de los sitios de intercambio y como resultado mayor facilidad de encontrar Zn^{2+} soluble. Lo anterior es dependiente de la cantidad de materia orgánica soluble, ya que al aumentar el contenido de esta se obtendrán muchas especies químicas de ligandos orgánicos solubles de Zn (Bevis, 2015).

Igualmente el pH del medio de crecimiento modifica la inducción de proteínas de transporte del Zn^{2+} , encontrándose que la actividad se incrementa sustancialmente al disminuir el pH (Laurent *et al.*, 2020). Es posible entonces que la actividad de extrusión de protones y ácidos orgánicos que normalmente realiza la planta para solubilizar nutrientes del suelo sea un factor que promueva la absorción del zinc, tanto directamente modificando la solubilidad y disponibilidad del zinc como indirectamente incrementando la densidad de canales de transporte que aumentan la absorción de este elemento.

Otros factores edáficos asociados con la baja transferencia de Zn del suelo a las plantas, además de los mencionados pH y pobreza intrínseca de zinc en las fracciones solubles, son la presencia en la solución del suelo o en formas lábiles de fosfatos o bicarbonatos de calcio, magnesio o sodio, así como el exceso de materia orgánica (Verma *et al.*, 2020).

Zinc en plantas

El zinc es absorbido de la solución del suelo principalmente en su forma iónica libre Zn^{2+} , aunque también ocurre una absorción significativa en forma de ligandos orgánicos solubles de zinc. La actividad de absorción se asocia primordialmente a los pelos radicales en donde los sistemas de bombeo de protones dependientes de la hidrólisis de ATP generan los potenciales electroquímicos necesarios para el transporte.

Una vez asimilado en la epidermis el zinc es transportado a las células del cortex y de la médula de la raíz por la vía simplástica y apoplástica. El transporte simplástico depende de la energización de canales de la membrana plasmática y del tonoplasto. El transporte apoplástico ocurre a través de regiones en donde la banda de Caspari no se encuentra totalmente formada, en ese caso el flujo de zinc se ve regulado

por el intercambio de cationes de las paredes celulares y por el flujo de masas asociado al transporte de agua (Gupta *et al.*, 2016). Tanto el transporte apoplástico como el simplástico contribuyen al flujo de zinc de la raíz a las partes aéreas. El contenido promedio de zinc en los tejidos que se considera adecuado para los cultivos cae en el rango de 15 a 50 mg kg^{-1} (Marreiro *et al.*, 2017)

La deficiencia de zinc es la más común de los elementos traza, particularmente en suelos con pH alto (Mattiello *et al.*, 2015). Los cereales como el maíz, son particularmente susceptibles a desarrollar deficiencias de zinc, seguido por el trigo cuando se cultiva en suelos calcáreos y el arroz en sistema de inundación. Y debido a su importancia nutricional tanto en México como el mundo, se recomienda la biofortificación con zinc de este cultivo, debido al gran impacto positivo que ha evidenciado sobre el estatus de este nutriente. Para mayor información puede consultarse a Maqbool & Beshir, 2019, quienes hacen una amplia revisión acerca de los avances y retos correspondientes a este tema.

SELENIO

Selenio y salud humana

El selenio es crucial para la salud humana como componente de las selenoproteínas, que cumplen funciones tanto estructurales como enzimáticas (Esmaili *et al.*, 2013). Entre sus roles más conocidos se encuentra el de nutriente antioxidante (Dimkovikj & Van Hoewyk, 2014) y catalizador en la producción de la hormona tiroidea activa (Rayman & Duntas, 2019). Cada vez hay más evidencia de que la deficiencia de selenio puede tener efectos adversos en la salud, y el aumento en la dieta puede brindar protección adicional contra diversas enfermedades (Rayman, 2020). Las selenoproteínas desempeñan un papel clave en varios aspectos del metabolismo celular, incluida la enzima glutatión peroxidasa (GPX), que depende del selenio y es esencial para proteger las células y tejidos del daño oxidativo causado por los radicales libres (Xia *et al.*, 2010). Además, la deficiencia de selenio afecta negativamente la función inmunológica, y existe evidencia de que la suplementación con selenio mejora la respuesta inmunológica en humanos, siendo un nutriente clave en la lucha contra ciertas infecciones virales como la influenza, el VIH/SIDA y el COVID (Zhang *et al.*, 2020).

Fuentes de selenio en la dieta. Los alimentos con ma-

yor contenido de selenio son los mariscos, carne roja (especialmente órganos como hígado y riñones), ciertos cereales como el trigo cultivado en suelos con selenio disponible, vegetales como ajo, cebolla y brócoli, así como hongos, huevos y productos lácteos de animales que consumen forraje o suplementos de selenio (Schomburg, 2017). Se ha establecido que la recomendación diaria de consumo es entre 50 y 60 µg por día, y actualmente se sabe que la mayoría de la población no cubre esta porción diaria principalmente debido a la baja biodisponibilidad en los suelos agrícolas (García Márquez *et al.*, 2020).

El selenio en los suelos

Las concentraciones de selenio en suelos son generalmente bajas, oscilando entre 0.01 y 2.0 mg por kilogramo (mg Se/kg), con un promedio de alrededor de 0.4 mg Se/kg. Sin embargo, existen suelos conocidos como seleníferos en los cuales las concentraciones pueden superar los 1200 mg Se/kg. Estos suelos se encuentran en extensas llanuras en lugares como Estados Unidos, Canadá, América del Sur, China y Rusia. La presencia elevada de selenio en los suelos se asocia con tipos de rocas como sedimentarias, areniscas, calizas y suelos ricos en carbón (Ademi *et al.*, 2021). Además, el selenio también puede incorporarse a los suelos mediante la deposición atmosférica, derivada de actividades volcánicas, erosión de rocas, aerosoles marinos y la liberación de compuestos orgánicos volátiles (Feinberg *et al.*, 2020). Las contribuciones antropogénicas de selenio a los suelos provienen de la quema de combustibles fósiles, procesamiento de metales, uso de fertilizantes, cal y estiércol, así como la eliminación de lodos y aguas residuales.

El selenio proveniente de la quema de combustibles fósiles y el procesamiento de metales se deposita principalmente en el suelo a través del agua de lluvia, que contiene cantidades pequeñas de selenio en el rango de 0.00001-0.001 mg de selenio por litro (mg Se/L). El selenio también puede incorporarse al suelo mediante el uso de fertilizantes y agua de riego para el cultivo. Por ejemplo, el fertilizante (NH₄)₂SO₄ (sulfato amónico) puede contener hasta 36 mg Se/kg, mientras que la roca fosfórica y el superfosfato simple pueden tener contenidos de hasta 55 y 25 mg Se/kg, respectivamente (Kushwaha *et al.*, 2022). Sin embargo, el superfosfato simple ha sido en su mayoría reemplazado por superfosfato triple, que generalmente contiene menos de 4 mg Se/kg, contribuyendo así a una disminución de las aportaciones de selenio al suelo en varias regiones del

mundo (He *et al.*, 2018).

El selenio en las plantas

Se han encontrado todas las formas de selenio en hojas, tallos y raíces de diversas plantas (Hartikainen, 2005). Por lo general, en plantas cultivadas que crecen en suelos no seleníferos, las concentraciones de selenio varían entre 0.01 y 1 mg por kg de peso seco de biomasa vegetal (Feng *et al.*, 2013)

El selenio es metabolizado en las plantas a través de la vía de absorción y asimilación del azufre. La distribución y acumulación del selenio en las plantas dependerá de la especie química y la concentración del elemento suministrado a través de las raíces o foliarmente, así como de la naturaleza y concentración de otras sustancias en la solución (Pilon-Smits & Quinn, 2018). En el corto plazo, cuando se suministra como selenato, la mayor parte del selenio se mantiene en forma inorgánica, mientras que al aplicarse como selenito, tiende a acumularse en forma orgánica (Puccinelli *et al.*, 2017). En términos de inducir la capacidad antioxidante, (Tavakoli *et al.*, 2020) demostraron que el selenito es más eficaz en la inducción de la actividad de la enzima glutatión peroxidasa.

Desde 2009, nuestro equipo de trabajo en la UAAAN ha estado llevando a cabo el proyecto denominado "Enriquecimiento pre y pos cosecha de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) con selenio y su efecto en la calidad nutricional y potencial antioxidante". El propósito de este proyecto es evaluar la viabilidad de enriquecer los frutos de tomate con selenio, utilizando selenato o selenito de sodio como tratamiento de semilla, en la solución nutritiva, vía foliar y en aplicaciones poscosecha. Tres tipos de sustratos (suelo, turba canadiense y perlita) se utilizan para el cultivo de plantas, con el fin de analizar su influencia en la disponibilidad de selenio.

Hasta la fecha, las conclusiones obtenidas en el estudio indican que el uso de sustratos inertes provoca una rápida toxicidad con niveles de selenio de 10 a 20 mg/L, como selenato de sodio (Na²SeO₄) selenito de sodio (Na²SeO₃) en la solución nutritiva. Sin embargo, aportes de 2 a 5 mg/L en suelo y turba canadiense aumentan el tamaño y calidad de los frutos, además de permitir la biofortificación de los frutos con selenio. En cuanto a las aplicaciones foliares, estas resultan especialmente efectivas cuando se usan concentraciones de 1 a 5 mg/L y se aplican una vez por mes durante el crecimiento del cultivo o en una única aspersión realizada 3-5 días antes de la cosecha.

HIERRO

Hierro y salud humana

El hierro, un elemento esencial para los humanos, y su ingesta diaria recomendada es en niños 7-9 mg/día, mujeres 10-18 mg/día y hombres 10-15 mg/día, desempeña un rol fundamental en diversos procesos metabólicos al formar parte de enzimas y complejos moleculares. Sus funciones primordiales incluyen el transporte de oxígeno a través de la hemoglobina, la participación en la síntesis de ADN como componente de la enzima ribonucleótido reductasa, y la facilitación del transporte de electrones al tener la capacidad de aceptar y donar electrones (Toxqui *et al.*, 2010; Ward & Cloonan, 2019).

El papel del hierro en el funcionamiento del sistema nervioso es de gran importancia. Parece estar involucrado en la síntesis, degradación y almacenamiento de neurotransmisores como serotonina, dopamina y ácido gamma-aminobutírico (GABA). La distribución del GABA y la dopamina coincide en gran medida con la distribución de este mineral, sugiriendo una posible participación del hierro en las funciones dopaminérgicas y gabaminérgicas (Shah *et al.*, 2021). El recambio de hierro en el cerebro es un proceso len-

to, lo que dificulta la corrección de deficiencias que se producen en etapas tempranas de la vida, las cuales tienden a persistir. Además, el hierro es esencial para la mielinización, siendo el oligodendrocito, la célula responsable de la producción de mielina, la principal portadora de hierro en el cerebro. Además, se ha vinculado la influencia de este mineral en el hipocampo y áreas relacionadas con la memoria. De hecho, algunas enfermedades degenerativas cerebrales como el Parkinson o la demencia parecen estar asociadas a alteraciones en el metabolismo del hierro (McCann *et al.*, 2020).

Otros aspectos menos estudiados relacionan la deficiencia de hierro con afecciones hepáticas como la colestiasis. Es probable que la 7-alfa-hidroxisilasa de colesterol, una enzima dependiente de hierro y vinculada al sistema de citocromos 11, esté implicada en estas alteraciones, ya que participa en la conversión del colesterol en ácido cólico (Mehta *et al.*, 2019).

Más de un tercio de la población global sufre de insuficiencia de hierro (Fe), siendo los grupos más afectados las mujeres en edad reproductiva y los niños (Juárez *et al.*, 2007). Investigaciones recientes que vinculan la deficiencia de hierro con un desarrollo cognitivo deficiente resaltan la importancia de esta cuestión. Las plantas constituyen la principal fuente

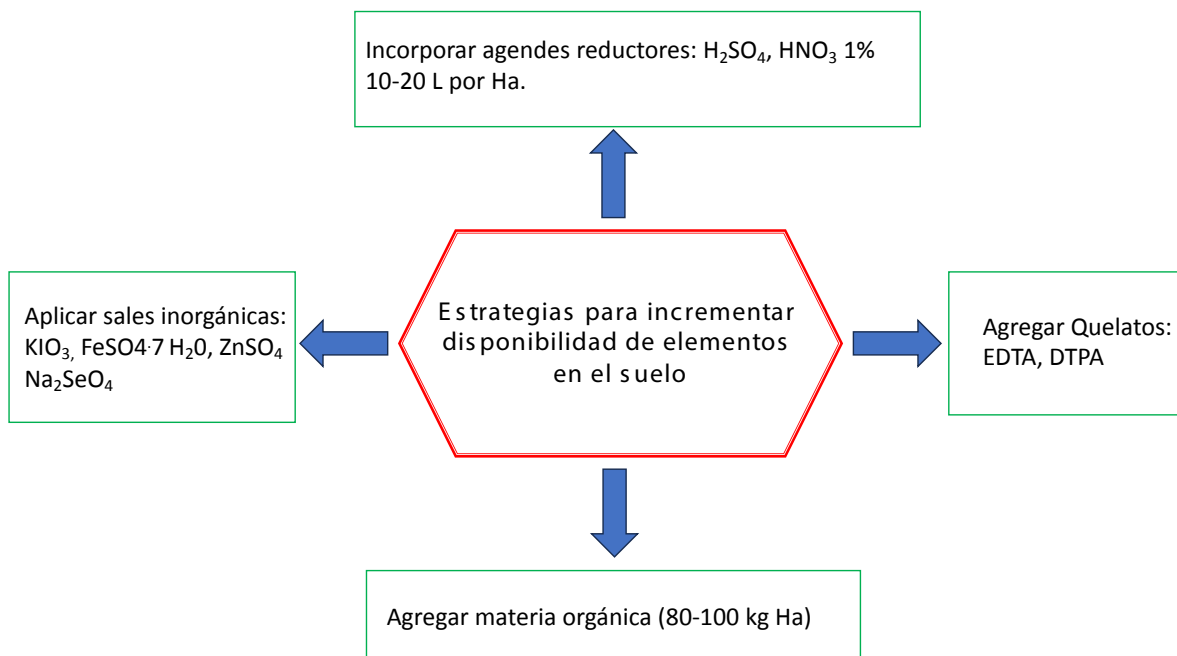


Figura 1. Estrategias recomendadas para lograr un incremento en la disponibilidad de los elementos I, Se, Zn y Fe.

de hierro en la mayoría de las dietas, lo que hace esencial garantizar el consumo de vegetales con niveles adecuados de hierro. Esto se convierte en un componente fundamental de las estrategias para mejorar la nutrición humana (Shah *et al.*, 2021). Este punto adquiere aún más relevancia en el contexto de sistemas de producción agrícola ubicados en áreas con suelos calcáreos, donde es más probable que las cosechas muestren niveles subóptimos de hierro.

Fuentes de hierro en la dieta: Los alimentos con mayor contenido de hierro hemo incluyen las carnes magras y los mariscos. Las fuentes dietéticas de hierro no hemo incluyen nueces, frijoles, verduras y productos de cereales enriquecidos. En los Estados Unidos, aproximadamente la mitad del hierro dietético proviene del pan, los cereales y otros productos derivados de cereales. La leche materna contiene hierro altamente biodisponible, pero en cantidades que no son suficientes para satisfacer las necesidades de los bebés mayores de 4 a 6 meses. También el trigo y otras harinas están fortificadas son fuentes importantes de este elemento (Charlebois & Pantopoulos, 2023).

Hierro en suelo

Las concentraciones de hierro en los suelos oscilan entre 0,2% y 55% (20.000 a 550.000 mg/kg) y las concentraciones pueden variar significativamente, incluso dentro de áreas localizadas, debido a los tipos de suelo y la presencia de otras fuentes. Mientras en agua dulce no sobrepasa 1 mg L⁻¹.

El Fe se presenta en dos estados de oxidación: el Fe⁺³ o férrico y el Fe⁺² o ferroso, incorporándose en las estructuras minerales cristalinas que forman los suelos como los silicatos ferromagnéticos, olivino, augita, hornblenda y biotita. A partir de la meteorización de estos minerales primarios por efecto del clima, las precipitaciones y la acción de los organismos vivos se libera el Fe en forma soluble. Sin embargo, casi todo este Fe soluble no se encuentra fácilmente disponible para los cultivos, ya que puede unirse a minerales secundarios como sulfuros, carbonatos, minerales de arcilla, óxidos e hidróxidos de diversas composiciones, o ser usados por microorganismos y unirse a distintos compuestos orgánicos (Xing & Liu, 2011)

En presencia de O₂ el Fe⁺² es oxidado rápidamente a Fe⁺³, el cual es poco soluble en agua y en donde precipita como óxidos de Fe. Por lo tanto, en nuestra atmósfera rica en O₂, la forma termodinámicamente más estable del hierro es también la de más difícil acceso para los organismos, por tal motivo la deficien-

cia de hierro es un problema común a prácticamente todas las especies de seres vivos (Zhang *et al.*, 2019).

Hierro en plantas

El contenido típico de hierro en el tejido vegetativo de hortalizas oscila entre 50 y 300 mg kg⁻¹ (ppm) en términos de materia seca. En términos de requerimientos para un cultivo estándar durante la temporada de crecimiento, se ha sugerido que se necesitan de 5 a 10 kg de hierro por hectárea. A pesar de que muchos suelos contienen cantidades significativas de Fe(III), esta forma iónica presenta una limitada solubilidad (Zhang *et al.*, 2019)

La concentración mínima de Fe(III) en la solución acuosa del suelo, necesaria para un crecimiento adecuado en varios cultivos, se ha reportado en alrededor de 10⁻⁹ molar. Incluso en condiciones estándar con un pH de 7, la concentración de Fe derivada de Fe(OH)³ es de aproximadamente 2x10⁻¹⁸ molar. Por lo tanto, las plantas deben poseer mecanismos efectivos para solubilizar el Fe(III) presente en los óxidos e hidróxidos de hierro.

En plantas y otros organismos, una considerable cantidad del hierro (Fe) presente se halla ligado a moléculas de porfirina, principalmente en los citocromos, mientras en animales y hongos en las moléculas hemo como la hemoglobina. Estos desempeñan un rol crucial en los sistemas fotosintético y respiratorio, dada su capacidad redox, la cual surge de la habilidad del Fe para experimentar una oxidación reversible de Fe(II) a Fe(III). Esta característica se emplea en situaciones que demandan reacciones redox veloces mediante transferencia de electrones, es decir, reacciones que no implican la transferencia de H⁺ ni la formación/ruptura de enlaces covalentes (Kobayashi *et al.*, 2019).

La mayor parte del Fe activo en las plantas participa en reacciones redox presentes en cloroplastos, mitocondrias y peroxisomas. Además, el hierro también interviene en diversos sistemas enzimáticos, en algunos de los cuales no está vinculado a un grupo prostético ni, incluso, se encuentra estructuralmente asociado a la enzima. Aunque su papel exacto es poco definido, se presume que desempeña una función significativa (Zhang *et al.*, 2019).

Actualmente, se han reportado alrededor de 7000 especies vegetales disponibles para consumo humano, sin embargo, solo tres cultivos, denominados cultivos básicos, proveen ³/₄ partes de las calorías requeridas al ser humano, estas son el trigo, el maíz y el arroz

(Hirschi, 2009). Las cuales son pobres en contenido de microelementos esenciales para humanos como el hierro, por lo que diferentes estrategias de biofortificación han sido empleadas como las agronómicas que incluye aplicación exógena de Fe vía foliar o directo al riego, las transgénicas, en donde se ha logrado la reducción de antinutrientes, sobreexpresión de factores de transcripción Fe/Zn, sobreexpresión de enzimas para la síntesis de nicotianamina, expresión de genes específicos del endosperma. También técnicas de variación natural génica ha sido ampliamente probadas con el fin de incrementar el contenido de este elemento en las plantas de consumo humano y reducir dicha deficiencia. (Dixit *et al.*, 2018; Stangoulis & Knez, 2022)

CONCLUSIONES

Se analizó el estado del arte actual relacionado con el contenido y disponibilidad elemental del I, Se, Zn y Fe en el suelo, las plantas y la repercusión en la nutrición humana; para poder aportar recomendaciones como la biofortificación de cultivos y mejoramientos de suelos para lograr un incremento en la ingesta en humanos. Se muestra un breve resumen en la Figura 1.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, y al Departamento de Horticultura por la facilitación de instalaciones para llevar a cabo las líneas de investigación mencionadas.

LITERATURA CITADA

ADEMI A., Singh BR., Bernhoft A., Bytyqi H. 2021. Concentration of selenium and other minerals and their relationship in soils and fodder plants in Kosovo. *Angew. Chemie Int. Ed.*:5–24.

AMACHI S. 2008. Microbial Contribution to Global Iodine Cycling: Volatilization, Accumulation, Reduction, Oxidation, and Sorption of Iodine. *Microbes Environ.* 23:269–276.

ANDERSSON M., Karumbunathan V., Zimmermann MB. 2012. Global iodine status in 2011 and trends over the past decade. *J. Nutr.* 142:744–50.

ANGUIANO B., Aceves C. 2016. Iodine in Mammary and Prostate Pathologies. *Curr. Chem. Biol.* 5:177–182.

ARANDA N., Sosa S., Delgado G., Aceves C., Anguiano B. 2013. Uptake and antitumoral effects of iodine and 6-iodolactone in differentiated and undifferentiated human

prostate cancer cell lines. *Prostate* 73:31–41.

ASHWORTH DJ. 2009. Transfers of Iodine in the Soil-Plant-Air System: Solid-Liquid Partitioning, Migration, Plant Uptake and Volatilization. *Compr. Handb. Iodine*:107–118.

de Benoist B., McLean E., Andersson M., Rogers L. 2008. Iodine Deficiency in 2007: Global Progress since 2003. *Food Nutr. Bull.* 29:195–202.

BEVIS LEM. 2015. Soil-to-Human Mineral Transmission with an Emphasis on Zinc, Selenium, and Iodine. *Springer Sci. Rev.* 3:77–96.

de Caffarelli E. 1997. Iodine. Consequences of a deficiency, of excessive iodine, and value of systematic supplementation. *J. gynecologie, Obs. Biol. la Reprod.* 26:90–94.

ÇAKMAK I., Prom-u-thai C., Guilherme LRG., Rashid A., Hora KH., Yazici A., Savasli E., Kalayci M., Tutus Y., Phuphong P., Rizwan M., Martins FAD., Dinali GS., Ozturk L. 2017. Iodine biofortification of wheat, rice and maize through fertilizer strategy. *Plant Soil* 418:319–335.

CHARLEBOIS E., Pantopoulos K. 2023. Nutritional Aspects of Iron in Health and Disease. *Nutrients* 15.

CHARLTON KE., Jooste PL., Steyn K., Levitt NS., Ghosh A. 2013. A lowered salt intake does not compromise iodine status in Cape Town, South Africa, where salt iodization is mandatory. *Nutrition* 29:630–4.

CHASAPIS CT., Ntoupa PSA., Spiliopoulou CA., Stefanidou ME. 2020. Recent aspects of the effects of zinc on human health. *Arch. Toxicol.* 94:1443–1460.

DAI JL., Zhang M., Hu QH., Huang YZ., Wang RQ., Zhu YG. 2009. Adsorption and desorption of iodine by various Chinese soils: II. Iodide and iodate. *Geoderma* 153:130–135.

Dai JL., Zhu YG., Huang YZ., Zhang M., Song JL. 2006. Availability of iodide and iodate to spinach (*Spinacia oleracea* L.) in relation to total iodine in soil solution. *Plant Soil* 289:301–308.

DIMKOVIKJ A., Van Hoewyk D. 2014. Selenite activates the alternative oxidase pathway and alters primary metabolism in Brassica napus roots: Evidence of a mitochondrial stress response. *BMC Plant Biol.* 14:1–15.

DIXIT S., Shukla R., Sharma YK. 2018. Biofortification of plant nutrients: Present scenario. *Plant Nutr. Abiotic Stress Toler.*:119–136.

ESMAEILI S., Fazelifard RS., Ahmadzadeh S., Shokouhi M. 2013. The influence of Selenium on human health. *KAUMS J. (FEYZ)* 16:779–780.

FEINBERG A., Maliki M., Stenke A., Sudret B., Peter T., Winkel LHE. 2020. Mapping the drivers of uncertainty in atmospheric selenium deposition with global sensitivity analysis. *Atmos. Chem. Phys.* 20:1363–1390.

FENG R., Wei C., Tu S. 2013. The roles of selenium in pro-

- protecting plants against abiotic stresses. *Environ. Exp. Bot.* 87:58–68.
- FUGE R., Johnson CC. 2015. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review. *Appl. Geochemistry* 63:282–302.
- GARCÍA MÁRQUEZ V., Morelos Moreno Á., Benavides Mendoza A., Medrano Macías J. 2020. Ionic selenium and nanoselenium as biofortifiers and stimulators of plant metabolism. *Agronomy* 10.
- GUPTA S., Brazier AKM., Lowe NM. 2020. Zinc deficiency in low- and middle-income countries: prevalence and approaches for mitigation. *J. Hum. Nutr. Diet.* 33:624–643.
- GUPTA N., Ram H., Kumar B. 2016. Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 15:89–109.
- HALKA M., Smoleń S., Ledwożyw-Smoleń I., Sady W. 2019. Comparison of Effects of Potassium Iodide and Iodosalicylates on the Antioxidant Potential and Iodine Accumulation in Young Tomato Plants. *J. Plant Growth Regul.*
- HARTIKAINEN H. 2005. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 18:309–318.
- HE Y., Xiang Y., Zhou Y., Yang Y., Zhang J., Huang H., Shang C., Luo L., Gao J., Tang L. 2018. Selenium contamination, consequences and remediation techniques in water and soils: A review. *Environ. Res.* 164:288–301.
- HETZEL BS. 2002. Eliminating iodine deficiency disorders - The role of the international council in the global partnership. *Bull. World Health Organ.* 80:410–413.
- HIRSCHI KD. 2009. Nutrient biofortification of food crops. *Annu. Rev. Nutr.* 29:401–421.
- HUMPHREY OS., Young SD., Bailey EH., Crout NMJ., Ander EL., Hamilton EM., Watts MJ. 2019. Iodine uptake, storage and translocation mechanisms in spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Environ. Geochem. Health* 0123456789.
- IMSENG M., Wiggerhauser M., Müller M., Keller A., Frossard E., Wilcke W., Bigalke M. 2019. The Fate of Zn in Agricultural Soils: A Stable Isotope Approach to Anthropogenic Impact, Soil Formation, and Soil-Plant Cycling. *Environ. Sci. Technol.* 53:4140–4149.
- JUÁREZ M., Cerdán M., Sanchez A. 2007. Hierro en el sistema suelo-planta. *Química del Sist. Suelo Planta*:1–32.
- KABATA-PENDIAS A., Pendias H. 2011. *Trace elements in Soils and Plants*.
- KIFERLE C., Gonzali S., Holwerda HT., Ibaceta RR., Perata P. 2013. Tomato fruits: a good target for iodine biofortification. *Front. Plant Sci.* 4:205.
- KIRKBY E. 2011. *Introduction, Definition and Classification of Nutrients*. Elsevier Ltd.
- KOBAYASHI T., Nozoye T., Nishiwa N. 2019. Iron Transport and Its Regulation in Plants Takanori. *Free Radic. Biol. Med.* 133:11–20.
- KÖHRLE J. 2015. Selenium and the thyroid. *Curr. Opin. Endocrinol. Diabetes Obes.* 22:392–401.
- KUSHWAHA A., Goswami L., Lee J., Sonne C., Brown RJC., Kim KH. 2022. Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 52:2383–2420.
- LAURENT C., Bravin MN., Crouzet O., Pelosi C., Tillard E., Lecomte P., Lamy I. 2020. Increased soil pH and dissolved organic matter after a decade of organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability despite contamination. *Sci. Total Environ.* 709:135927.
- LEYVA R., Sánchez-Rodríguez E., Ríos JJ., Rubio-Wilhelmi MM., Romero L., Ruiz JM., Blasco B. 2011. Beneficial effects of exogenous iodine in lettuce plants subjected to salinity stress. *Plant Sci.* 181:195–202.
- LI R., Li DW., Yan AL., Hong CL., Liu HP., Pan LH., Song MY., Dai ZX., Ye ML., Weng HX. 2018. The bioaccessibility of iodine in the biofortified vegetables throughout cooking and simulated digestion. *J. Food Sci. Technol.* 55:366–375.
- MAQBOOL MA., Beshir AR. 2019. Zinc biofortification of maize (*Zea mays* L.): *Status and challenges*. *Plant Breed.* 138:1–28.
- MARREIRO D DO N., Cruz KJC., Morais JBS., Beserra JB., Severo JS., Soares de Oliveira AR. 2017. Zinc and oxidative stress: Current mechanisms. *Antioxidants* 6.
- MATTIELLO EM., Ruiz HA., Neves JCL., Ventrella MC., Araújo WL. 2015. Zinc deficiency affects physiological and anatomical characteristics in maize leaves. *J. Plant Physiol.* 183:138–143.
- MCCANN S., Amadó MP., Moore SE. 2020. The role of iron in brain development: A systematic review. *Nutrients* 12:1–23.
- MEHTA KJ., Je Farnaud S., Sharp PA. 2019. Iron and liver fibrosis: Mechanistic and clinical aspects. *World J. Gastroenterol.* 25:521–538.
- MOREDA-PIÑEIRO A., Romarís-Hortas V., Bermejo-Barreira P. 2011. A review on iodine speciation for environmental, biological and nutrition fields. *J. Anal. At. Spectrom.* 26:2107.
- MOTTIAR Y. 2013. Iodine biofortification through plant biotechnology. *Nutrition* 29:1431.
- NOULAS C., Tziouvalekas M., Karyotis T. 2018. Zinc in soils, water and food crops. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 49:252–260.
- OLZA J., Aranceta-Bartrina J., González-Gross M., Ortega RM., Serra-Majem L., Varela-Moreiras G., Gil Á. 2017. Reported dietary intake and food sources of zinc, selenium, and vitamins a, e and c in the spanish population:

- Findings from the anibes study. *Nutrients* 9.
- PILON-SMITS EA., Quinn CF. 2018. Selenium metabolism in plants. In: *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*. 225-241.
- PUCCINELLI M., Malorgio F., Rosellini I., Pezzarossa B. 2017. Uptake and partitioning of selenium in basil (*Ocimum basilicum* L.) plants grown in hydroponics. *Sci. Hort. (Amsterdam)*. 225:271-276.
- RAYMAN MP. 2020. Selenium intake, status, and health: a complex relationship. *Hormones* 19:9-14.
- RAYMAN MP., Duntas LH. 2019. Selenium Deficiency and Thyroid Disease. *Thyroid Its Dis*. 4:109-126.
- RUZ M., Carrasco F., Rojas P., Basfi-fer K., Hernández MC., Pérez A. 2019. Nutritional Effects of Zinc on Metabolic Syndrome and Type 2 Diabetes: Mechanisms and Main Findings in Human Studies. *Biol. Trace Elem. Res*. 188:177-188.
- SCHOMBURG L. 2017. Dietary selenium and human health. *Nutrients* 9.
- SHAH HE., Bhawnani N., Ethirajulu A., Alkasabera A., Onyali CB., Anim-Koranteng C., Mostafa JA. 2021. Iron Deficiency-Induced Changes in the Hippocampus, Corpus Striatum, and Monoamines Levels That Lead to Anxiety, Depression, Sleep Disorders, and Psychotic Disorders. *Cureus* 13:6-13.
- SHETAYA WH., Young SD., Watts MJ., Ander EL., Bailey EH. 2012. Iodine dynamics in soils. *Geochim. Cosmochim. Acta* 77:457-473.
- SMOLEŃ S., Ledwożyw-Smoleń I., Sady W. 2017. Iodine biofortification of spinach by soil fertigation with additional application of humic and fulvic acids. *New Zeal. J. Crop Hort. Sci*. 45:233-250.
- STANGOULIS JCR., Knez M. 2022. Biofortification of major crop plants with iron and zinc - achievements and future directions. *Plant Soil* 474:57-76.
- STANTON C., Sanders D., Krämer U., Podar D. 2022. Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. *Mol. Plant* 15:65-85.
- TAVAKOLI S., Enteshari S., Yousefifard M. 2020. Investigation of the effect of selenium on growth, antioxidant capacity and secondary metabolites in *Melissa officinalis*. *Iran. J. Plant Physiol*. 10:3125-3134.
- TOXQUI L., De Piero A., Courtois V., Bastida S., Sánchez-Muniz FJ., Vaquero MP. 2010. Deficiencia y sobrecarga de hierro; implicaciones en el estado oxidativo y la salud cardiovascular. *Nutr. Hosp*. 25:350-365.
- VERMA M., Singh A., Dwivedi DH., Arora NK. 2020. Zinc and phosphate solubilizing *Rhizobium radiobacter* (LB2) for enhancing quality and yield of loose leaf lettuce in saline soil. *Environ. Sustain*. 3:209-218.
- WARD DM., Cloonan SM. 2019. Mitochondrial Iron in Human Health and Disease. *Annu. Rev. Physiol*. 81:453-482.
- WENG HX., Weng JK., Yan AL., Hong CL., Yong W Bin., Qin YC. 2008. Increment of iodine content in vegetable plants by applying iodized fertilizer and the residual characteristics of iodine in soil. *Biol. Trace Elem. Res*. 123:218-228.
- WHITEHEAD DC. 1984. The distribution and transformations of iodine in the environment. *Environ. Int*. 10:321-339.
- XIA Y., Hill KE., Li P., Xu J., Zhou D., Motley AK., Wang L., Byrne DW., Burk RF. 2010. Optimization of selenoprotein P and other plasma selenium biomarkers for the assessment of the selenium nutritional requirement: A placebo-controlled, double-blind study of selenomethionine supplementation in selenium-deficient Chinese subjects. *Am. J. Clin. Nutr*. 92:525-531.
- Xing W., Liu G. 2011. Iron biogeochemistry and its environmental impacts in freshwater lakes. *Fresenius Environ. Bull*. 20:1339-1345.
- XU LJ., Wang X zhi., Wang R., Zhu C qi., Liu X peng. 2022. Physical and mechanical properties of calcareous soils: A review. *Mar. Georesources Geotechnol*. 40:751-766.
- ZHANG J., Will ET., Bennett K., Saad R., Rayman MP. 2020. Association between regional selenium status and reported outcome of COVID-19 cases in China. *Am J Clin Nutr*:1-3.
- ZHANG X., Zhang D., Sun W., Wang T. 2019. The adaptive mechanism of plants to iron deficiency via iron uptake, transport, and homeostasis. *Int. J. Mol. Sci*. 20.
- ZHAO J., Wang P., Shang L., Sullivan KM., Haar F Van Der., Maberly G. 2000. Endemic Goiter Associated With High Iodine Intake. 90:1999-2001.
- ZIMMERMANN MB. 2009. Iodine deficiency in pregnancy and the effects of maternal iodine supplementation on the offspring: a review. *Am. J. Clin. Nutr*. 89:668S-72S.
- ZOU C., Du Y., Rashid A., Ram H., Savasli E., Pieterse PJ., Ortiz-Monasterio I., Yazici A., Kaur C., Mahmood K., Singh S., Le Roux MR., Kuang W., Onder O., Kalayci M., Cakmak I. 2019. Simultaneous Biofortification of Wheat with Zinc, Iodine, Selenium, and Iron through Foliar Treatment of a Micronutrient Cocktail in Six Countries. *J. Agric. Food Chem*. 67:8096-8106.