



# Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias  
Agropecuarias

Universidad Nacional de  
Trujillo



## REVIEW

### Agronomic biofortification, nourishing plants to nourish people: A review of strategies and results

Biofortificación agronómica, nutrir plantas para nutrir personas: Una revisión de estrategias y resultados

Pedro Gutierrez-Vilchez<sup>1, 2</sup> ; Maria Elisa Araújo de Melo<sup>1</sup> ; Paula Muniz Costa<sup>1</sup> ; Ruby Vega-Ravello<sup>2</sup> ; Guilherme Lopes<sup>1</sup> ; Luiz Roberto Guimarães Guilherme<sup>\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento Académico de Suelos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

\* Corresponding author: [guilherm@ufia.br](mailto:guilherm@ufia.br) (L. R. G. Guilherme).

Received: 7 May 2026. Accepted: 24 August 2026. Published: 7 September 2026.

#### Abstract

Agronomic biofortification is a key strategy to increase the micronutrient content of staple crops and ensure global food and nutritional security. This review aims to synthesize recent advances in the use of fertilization, microorganisms, and other technologies to enhance the concentration of micronutrients such as zinc, iron, selenium, and iodine in grains and vegetables, complemented by a bibliometric analysis of global research trends on this topic. The results of the bibliometric mapping show the evolution of scientific production, while the literature reviewed indicates that applying micronutrients to crops through foliar or soil fertilization, seed priming, and other responsible agricultural practices may enhance micronutrient availability in food without adversely affecting crop yield. However, the response to agronomic biofortification largely depends on the crop species, since crops such as potato and wheat differ in their capacity to absorb and translocate micronutrients, which requires adjusting the dose, timing of application, and the most suitable nutrient source for each species. In conclusion, agronomic biofortification is a viable alternative to help meet part of the nutritional requirements for micronutrients and thus contribute to combating malnutrition. Nonetheless, important knowledge gaps remain regarding the actual extent to which these micronutrients are utilized by humans, that is, their bioaccessibility and bioavailability, highlighting the need for further studies linking agricultural production with human nutrition.

**Keywords:** micronutrients; food security; bioavailability; malnutrition; soil fertility.

#### Resumen

La biofortificación agronómica es una estrategia clave para incrementar el contenido de microelementos en los cultivos básicos y asegurar la seguridad alimentaria y nutricional a nivel mundial. Esta revisión tiene como objetivo sintetizar los avances recientes en el uso de la fertilización, el empleo de microorganismos y otras tecnologías para aumentar los contenidos de microelementos como zinc, hierro, selenio y yodo en granos y hortalizas, complementado con un análisis bibliométrico de las tendencias globales de investigación en este tópico. Los resultados del mapeo bibliométrico muestran la evolución de la producción científica, mientras que la literatura analizada indica que las aplicaciones de micronutrientes a los cultivos, mediante fertilización foliar o edáfica, el acondicionamiento de semillas y otras prácticas agrícolas responsables pueden incrementar la disponibilidad de micronutrientes en los alimentos sin afectar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la respuesta a la biofortificación agronómica depende en gran medida del cultivo, ya que especies como la papa y el trigo difieren en su capacidad de absorción y translocación de micronutrientes, lo que exige ajustar la dosis, el momento de aplicación y la fuente más adecuada para cada especie. En conclusión, la biofortificación agronómica es una alternativa viable para cubrir parte del requerimiento nutricional de micronutrientes y así contribuir a mitigar la desnutrición y las deficiencias de micronutrientes a nivel poblacional. No obstante, aún persisten vacíos importantes respecto al grado real de aprovechamiento de estos micronutrientes por el ser humano, es decir, su bioaccesibilidad y biodisponibilidad, por lo que se requieren más estudios que vinculen la producción agrícola con la nutrición humana.

**Palabras clave:** micronutrientes; seguridad alimentaria; biodisponibilidad; malnutrición; fertilidad del suelo.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.50>

#### Cite this article:

Gutierrez-Vilchez, P., De Melo, M. E. A., Costa, P. M., Vega-Ravello, R., Lopes, G., & Guilherme, L. R. G. (2026). Biofortificación agronómica, nutrir plantas para nutrir personas: Una revisión de estrategias y resultados. *Scientia Agropecuaria*, 17(3), 743-763.

## 1. Introducción

En la actualidad, se estima que la población mundial superó los 8.3 mil millones de personas en 2024 (ONU, 2024), y se prevé que la población mundial alcance entre 8.6 y 9.8 mil millones en 2030 y 2050, respectivamente (Sheoran et al., 2022). Esto supone un reto sin precedentes para incrementar la producción de alimentos, además de la amenaza que representa el cambio climático para la actividad agrícola (Molotoks et al., 2021). Asimismo, la presión mundial por acceder a una dieta que satisfaga las necesidades mínimas para una vida saludable es cada día mayor (Umesha et al., 2018).

Una dieta saludable no solo depende de la cantidad, sino también de la calidad de los alimentos. Esta contiene cantidades adecuadas de macronutrientes, incluyendo proteínas, grasas y carbohidratos, y de micronutrientes esenciales, como vitaminas y minerales (Savarino et al., 2021). En síntesis, se apunta hacia la seguridad alimentaria, cuyo objetivo es asegurar que cada individuo cuente con acceso físico, social y económico a alimentos en cantidad y calidad adecuada (tanto inocuos como nutritivos). Esto busca satisfacer sus necesidades metabólicas y preferencias culinarias para promover un estilo de vida activo y saludable (Lange et al., 2017) (Figura 1).

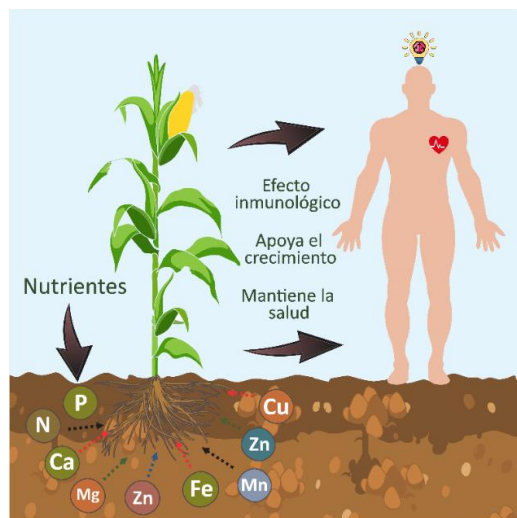


Figura 1. Importancia de los nutrientes en la nutrición humana.

La llamada “hambre oculta” es la carencia de micronutrientes, que no solo afecta el desarrollo físico y cognitivo, sino que, en poblaciones vulnerables, puede provocar la muerte (Weffort & Lamounier, 2024). Aproximadamente 2 mil millones de personas padecen esta carencia (Muthayya et al., 2013). Además, se sabe que la gestación y los primeros dos años de vida son fundamentales para el desarrollo humano y que la carencia de

micronutrientes desencadena secuelas que limitan las posibilidades de desarrollo a nivel económico, social y personal (Panzeri et al., 2024).

En las últimas décadas se ha promovido la biofortificación, una estrategia para incrementar los niveles de nutrientes en los alimentos vegetales (Mishra et al., 2022). Es una manera sencilla de aportar nutrientes a la dieta humana, aumentando su disponibilidad y contribuyendo a combatir la desnutrición en las poblaciones más vulnerables. La biofortificación se ha logrado mediante el mejoramiento genético de las plantas (biofortificación genética) (Dhanyalakshmi et al., 2024) o mediante la aplicación de nutrientes al suelo o directamente a las hojas (biofortificación agronómica) (Teklu et al., 2023a). En este contexto, esta revisión busca recopilar y analizar las ventajas de la biofortificación agronómica para la nutrición y la salud humanas. También se describen los diferentes manejos y usos de los fertilizantes para mejorar la eficiencia y contribuir al mejor aprovechamiento de los micronutrientes por parte de los cultivos.

## 2. Desnutrición y hambre oculta

Se define a la malnutrición como una condición fisiológica anómala provocada por un consumo deficiente, desproporcionado o excesivo de macro y micronutrientes. Este concepto abarca tanto a la desnutrición (manifestada en el retraso del crecimiento, la emaciación infantil y el déficit de vitaminas y minerales) como al sobrepeso y la obesidad (FAO et al., 2024). Por lo tanto, erradicar esta problemática resulta crucial para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 2 (Hambre cero), el ODS 3 (Salud y bienestar) y el ODS 10 (Reducción de las desigualdades) (FAO et al., 2024).

El “hambre oculta” se refiere a deficiencias de micronutrientes que no necesariamente se reflejan en las mediciones antropométricas y, por lo tanto, permanecen ocultas (Elizabeth & Koshy, 2024; Oh et al., 2021). Las deficiencias de hierro, zinc, yodo y vitamina A son las más generalizadas y graves (Caulfield et al., 2006), mientras que las deficiencias de folatos, vitamina D, tiamina (B1) y selenio son menores, pero constituyen una preocupación creciente (Council for Agricultural Science and Technology (CAST), 2020). Sus efectos pueden ser importantes y provocar un deterioro del crecimiento físico, una función cognitiva deficiente, problemas de aprendizaje, enfermedades crónicas, baja productividad e incluso la muerte (Tabla 1). La deficiencia de micronutrientes suele ser intergeneracional debido a su prevalencia entre los adolescentes, especialmente entre las niñas; a menudo se

transmite a la siguiente generación (Elizabeth & Koshy, 2024). Los reportes de la última década advierten que la subnutrición por déficit de energía alimentaria afecta a 868 millones de personas, lo que representa el 12.5% de los habitantes del planeta; aun así, estas estadísticas muestran solo una fracción del verdadero alcance de la malnutrición global (FAO, 2013). A la par de esto, las estimaciones indican que el retraso del crecimiento afecta al 26% de los niños a nivel internacional (FAO, 2013; OMS, 2023; Sharma et al., 2016). Un análisis mundial reciente estima que la mitad de los niños en edad preescolar se ven afectados por al menos 1 de los 3 micronutrientes (Zn, Fe, Vit. A) (Stevens et al., 2022). Las estimaciones indican que la malnutrición le cuesta a la economía mundial unos 3.5 billones de dólares cada año, mientras que los perjuicios económicos de la desnutrición y las carencias de micronutrientes se sitúan entre los 1.4 y 2.1 billones de dólares (FAO, 2013). Además, la mayor carga asistencial para los servicios sanitarios globales proviene de la desnutrición en madres e hijos (FAO et al., 2024).

3. Estrategias de intervención nutricional para combatir el hambre oculta

Ante el problema de la baja ingesta de micronutrientes en la dieta humana, se han establecido procedimientos para aumentar su ingesta en la población afectada, como: i) alimentos fortificados, ii) suplementos alimenticios y iii) biofortificación. Sin embargo, los dos primeros programas requieren infraestructura, poder adquisitivo, acceso al mercado, centros sanitarios y financiación ininterrumpida, los cuales presentan sus propias limitaciones (Das & Green, 2016).

3.1. Fortificación y suplementación

La fortificación de alimentos a gran escala, también conocida como fortificación industrial o masiva, consiste en adicionar una o más vitaminas y/o minerales a los alimentos básicos durante su procesamiento (Kabeer et al., 2024). A partir de los primeros éxitos de la yodación de la sal en la disminución de la incidencia del bocio, se extendió este método de enriquecimiento de los alimentos, replicándose en la leche (vitamina D), la harina y el pan (vitamina B y hierro), así como en otros alimentos básicos y condimentos (Mkambula et al., 2022). Los suplementos alimenticios consisten en comprimidos, cápsulas, jarabes y gotas para suplir las necesidades básicas de micronutrientes (Tam et al., 2020). Aunque eficaz, esta estrategia presenta diversos retos, entre los que destacan la sostenibilidad y el cumplimiento, debido a su enfoque medicinal (Ofori et al., 2022). La suplementación ofrece una solución directa a las deficiencias de micronutrientes en contextos específicos en los que pueden diagnosticarse y gestionarse eficazmente (Lowe, 2021). Algunas desventajas de esta metodología son: i) el desafío de llegar a zonas rurales, ii) la falta de conocimiento de las madres, iii) la percepción de estreñimiento del niño, iv) el olvido de incorporarlo a la dieta y v) la posible mayor ingesta (Lichtenstein & Russell, 2005). Además, los suplementos suelen emplear sales inorgánicas simples, menos bioaccesibles y/o biodisponibles que las formas orgánicas, por lo que deben utilizar formulaciones optimizadas, como microencapsulación, liposomas o nanoemulsiones, para proteger el nutriente de la degradación ácida del estómago y mejorar su liberación en el intestino (Nicolescu et al., 2023).

Tabla 1  
Funciones y requerimientos diarios de Fe, Zn, Se y I en humanos

| Micro-nutrientes | Funciones                                                                                                                                                                                                                         | Requerimiento nutricional diario <sup>a, f, g</sup>  |                                                     |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                  |                                                                                                                                                                                                                                   | Hombres adultos                                      | Mujeres adultas                                     |
| Hierro (Fe)      | Desempeña un papel central en procesos metabólicos que involucran el transporte y almacenamiento de oxígeno, así como el metabolismo oxidativo y el crecimiento celular. <sup>a</sup>                                             | 9.1 – 27.4 mg/día (según biodisponibilidad 15% – 5%) | 19.6–58.8 mg/día (según biodisponibilidad 15% – 5%) |
| Zinc (Zn)        | Es fundamental para el crecimiento, el desarrollo, la síntesis de proteínas, la cicatrización de heridas y el mantenimiento de la salud en diversos sistemas del cuerpo, como el inmunitario, el nervioso y el óseo. <sup>b</sup> | 4.2 – 14 mg/día (según biodisponibilidad alta–baja)  | 3.0–9.8 mg/día (según biodisponibilidad alta–baja)  |
| Selenio (Se)     | Cumple un papel central en las selenoproteínas, que son cruciales para la función antioxidante, el equilibrio hormonal, la inmunidad, la fertilidad masculina y la posible prevención del cáncer. <sup>c</sup>                    | 55 – 70 µg/día                                       | 55 - 70 µg/día                                      |
| Yodo (I)         | Es esencial para la producción de hormonas tiroideas, las cuales regulan el metabolismo, el crecimiento y el desarrollo neurológico fetal. <sup>d</sup>                                                                           | 150 µg/día                                           | 150 µg/día                                          |

Nota: <sup>a</sup> Abbaspour et al., 2014; <sup>b</sup> Chasapis et al., 2020; <sup>c</sup> Schiavon et al., 2020; <sup>d</sup> Eveleigh et al., 2023; <sup>e</sup> WHO & FAO, 2005; <sup>f</sup> Berger et al., 2024; <sup>g</sup> Padovani et al., 2006.

### 3.2. La biofortificación como alternativa sostenible

La biofortificación es un método para incrementar los niveles de nutrientes en los alimentos vegetales (Mishra et al., 2022). Esta mayor cantidad de nutrientes se logra mediante el mejoramiento genético de las plantas (biofortificación genética) (Dhanyalakshmi et al., 2024) o mediante la aplicación de nutrientes al suelo o directamente a las hojas, la impregnación de soluciones en las semillas o el uso de microorganismos solubilizadores de nutrientes en el suelo (biofortificación agronómica) (Teklu et al., 2023a).

La biofortificación presenta dos beneficios comparativos clave: su viabilidad económica a largo plazo y su potencial para llegar de manera efectiva a las comunidades rurales más vulnerables (Bouis & Saltzman, 2017). Aunque la ingesta de alimentos básicos biofortificados no cubre el requerimiento diario total de minerales y vitaminas, como en el caso de los suplementos dietéticos o los alimentos fortificados industrialmente, la biofortificación puede contribuir de forma natural a la ingesta diaria de micronutrientes a lo largo de la vida de los consumidores (Bouis, 2018).

### 3.3. Biofortificación agronómica

La biofortificación agronómica es una técnica cuyo objetivo es incrementar el contenido de nutrientes esenciales y beneficiosos mediante prácticas de manejo agrícola, con la aplicación de fertilizantes enriquecidos o de micronutrientes específicos, proporcionando alimentos más nutritivos a la población (Bhardwaj et al., 2022; Cakmak & Kutman, 2018). Este enfoque representa una alternativa sumamente viable para incrementar la densidad de micronutrientes en las porciones consumibles de las plantas sin afectar la productividad agrícola; asimismo, se destaca por su viabilidad económica en la mitigación del hambre oculta a nivel global (Szerement et al., 2022).

La absorción de nutrientes del suelo por la planta y la acumulación de minerales en la parte comestible de los cultivos alimentarios determinan el éxito de la biofortificación (Teklu et al., 2023a). Además, la biodisponibilidad de los minerales de los cultivos biofortificados en el organismo influye en la eficacia de los programas de biofortificación. El arroz, el trigo, el maíz, el sorgo, el mijo, la papa y las legumbres han sido los principales cultivos biofortificados porque forman parte de las dietas en todo el mundo, especialmente entre los grupos vulnerables a las deficiencias de micronutrientes (Saltzman et al., 2013). La biofortificación agronómica ofrece un medio viable para llegar a las poblaciones desnutridas con acceso limitado a dietas diversas,

suplementos y alimentos fortificados comercialmente (Bhardwaj et al., 2022).

En comparación con la biofortificación genética, la principal ventaja de esta técnica radica en su capacidad de aplicarse a diferentes cultivos, sin necesidad de modificaciones genéticas específicas para cada especie (Bhardwaj et al., 2022). Además, la biofortificación agronómica se centra en enriquecer el entorno de cultivo con los nutrientes deseados (Szerement et al., 2022). Esto significa que las dosis de fertilizantes y los métodos de aplicación se pueden adaptar fácilmente de un cultivo a otro, por lo que representa una estrategia más rápida para enriquecer la diversidad de cultivos alimenticios (Szerement et al., 2022).

Sin embargo, es importante resaltar que existen factores que pueden influir en la eficiencia de la biofortificación agronómica, como el tipo de suelo y sus interacciones con los minerales, el clima, la variedad de cultivo, el método de aplicación de fertilizantes (foliar o por vía del suelo) y la dosis de fertilizante (Cakmak, 2008; Shahane & Shivay, 2022; Sow & Ranjan, 2021).

## 4. Principales nutrientes y elementos de interés en la biofortificación

El hierro (Fe) es un micronutriente esencial para las plantas y los seres humanos y constituye un componente de varias macromoléculas importantes, incluidas las involucradas en la respiración, la fotosíntesis, la síntesis de ADN y el metabolismo (Consentino et al., 2023). Las plantas obtienen Fe del suelo, donde existe en estado iónico ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) o férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (Lemanceau et al., 2009). Aunque el Fe es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, está poco disponible en el suelo porque se une rápidamente a las partículas del suelo y forma complejos insolubles en condiciones de pH neutro o alcalino (Di Gioia et al., 2019). La disponibilidad de este micronutriente en el suelo es mayor en condiciones de pH ácido (más bajo) y con una disminución del potencial redox del suelo (Lemanceau et al., 2009). Debido a factores que restringen la biodisponibilidad del Fe en el suelo, otras formas de aplicación, como la foliar y el osmocondicionamiento de semillas, han sido alternativas utilizadas en la biofortificación agronómica (Lata-Tenesaca et al., 2023; Nahim-Granados et al., 2019) (Tabla 2).

El zinc (Zn) es un elemento esencial para todos los organismos, pero se considera un micronutriente limitante del rendimiento en varios sistemas de producción (Szerement et al., 2022). Este elemento está involucrado en la síntesis de proteínas vegeta-

les, la activación enzimática, las reacciones de oxidación y el metabolismo de carbohidratos (Mousavi et al., 2013). Las características del suelo, como el pH, la materia orgánica y la interacción con otros nutrientes, influyen en la disponibilidad de Zn para la planta (Hafeez et al., 2013). El pH constituye el factor químico del suelo más determinante en la regulación de la solubilidad del Zn dentro de la solución del suelo. Al incrementarse el pH, disminuye la concentración de  $\text{Zn}^{2+}$  en el suelo (Oliveira et al., 2023). Se sabe que un contenido adecuado de Zn aumenta la productividad de los cultivos (Szerement et al., 2022). Sin embargo, este micronutriente puede ser tóxico en exceso. En el ser humano, este elemento cumple varias funciones fisiológicas.

Interactúa con una gran cantidad de enzimas y otras proteínas del cuerpo y desempeña funciones estructurales, funcionales y reguladoras críticas (Kreżel & Maret, 2016). La deficiencia de Zn se asocia con varios problemas fisiológicos, incluidos retraso en el crecimiento y en el desarrollo cerebral, mayor susceptibilidad a enfermedades infecciosas y reducción del rendimiento físico y de la productividad laboral (Krebs et al., 2014; Terrin et al., 2015).

El selenio (Se) es un elemento esencial para los humanos, mientras que en las plantas solo se observan efectos beneficiosos (Galić et al., 2021). La mayoría de los suelos tienen concentraciones de Se entre 0.01 y 2.0  $\text{mg kg}^{-1}$  (White, 2018) con un promedio mundial de 0.4  $\text{mg kg}^{-1}$  (Natasha et al., 2018). En el suelo, existen diferentes formas de Se, entre ellas el seleniuro ( $\text{S}^{2-}$ ), el selenato ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ), el selenito ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ), el selenio elemental ( $\text{Se}^0$ ) y el seleniuro orgánico, de los cuales el selenato, parcialmente el selenito y el seleniuro orgánico están disponibles para la absorción por las plantas (Zhao et al., 2010). Sin embargo, las plantas absorben selenio principalmente como selenato, debido a su mayor solubilidad, el cual es translocado a los cloroplastos, donde sigue la vía de asimilación del azufre (Izydorczyk et al., 2021). Las plantas son la principal fuente suplementaria de Se para los humanos, ya que este elemento participa en los mecanismos de respuesta antioxidante del organismo, en la desintoxicación

de metales pesados y en la regulación de los sistemas reproductivo e inmunológico, además de garantizar el funcionamiento de la glándula tiroides (Schiavon et al., 2020). En los seres humanos, la absorción de Se de productos de origen vegetal es más fácil que la de Se de productos de origen animal (D'Amato et al., 2020; Schiavon et al., 2020). En este sentido, mejorar la acumulación de Se en diferentes cultivos alimentarios mediante la biofortificación puede proporcionar una suplementación adicional de Se en la dieta humana (Broadley et al., 2006; Oztekin & Buyuktuncer, 2024). En las plantas, Se actúa principalmente en mecanismos fisiológicos con la regulación de especies reactivas de oxígeno y antioxidantes, inhibición de la absorción y translocación de elementos potencialmente tóxicos, reconstrucción de la membrana celular y de la estructura del cloroplasto y recuperación del sistema fotosintético (Pilon-Smits, 2019). Los principales factores que determinan la absorción y acumulación de Se en las plantas incluyen las propiedades del suelo, como el pH, el contenido de arcilla, la mineralogía del suelo y la concentración de aniones competitivos (Mikkelsen et al., 1989; Pilon-Smits, 2019). Además, la absorción de Se por la planta puede verse inhibida por la presencia simultánea de un alto contenido de materia orgánica, hidróxidos de Fe y minerales arcillosos, que pueden adsorber o retener Se (White, 2018). Los cereales como el arroz, el trigo, el maíz y la cebada son las principales fuentes suplementarias de Se en la dieta occidental (Galić et al., 2021; Narwal et al., 2020), pudiendo emplearse pseudocereales como la quinoa (Vega-Ravello et al., 2023).

Al igual que el Se, el yodo (I) es un elemento esencial para los humanos y beneficioso para las plantas (Oztekin & Buyuktuncer, 2024). En los humanos, este elemento es importante para la producción de hormonas tiroideas que regulan el metabolismo general, incluida la homeostasis energética, el crecimiento, el desarrollo y la temperatura corporal (Duborská et al., 2020; Oztekin & Buyuktuncer, 2024). La deficiencia de I puede provocar hipotiroidismo, cretinismo, retraso del desarrollo, hipotiroidismo neonatal y aborto fetal (Caulfield et al., 2006).

**Tabla 2**

Concentración promedio de Fe, Zn, Se y I en suelo y planta

| Micronutrientes | Concentraciones<br>en suelo <sup>a</sup> | Concentración crítica<br>en suelo <sup>b</sup> | Concentraciones promedio en hojas <sup>c,d,e</sup> |
|-----------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                 | -----mg kg <sup>-1</sup> -----           |                                                |                                                    |
| Hierro (Fe)     | 50 – 250                                 | 4.8                                            | 50 –150                                            |
| Zinc (Zn)       | 0.5 – 5                                  | 0.8                                            | 15 – 50                                            |
| Selenio (Se)    | 0.01 – 2.0                               | nd                                             | 0.01 – 0.02                                        |
| Yodo (I)        | 0.1 – 150                                | nd                                             | 3                                                  |

Nota: nd: no disponible. <sup>a</sup> Kabata-Pendias (2011). <sup>b</sup> Prom-u-thai et al. (2020). <sup>c</sup> Bell & Dell (2008). <sup>d</sup> White (2018). <sup>e</sup> Zhang et al. (2023)

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se recomienda reducir el consumo diario de sal a menos de 5 g día<sup>-1</sup>. Esta meta fue establecida en los Objetivos de Salud Global 2025 para prevenir la hipertensión y las enfermedades cardiovasculares (Santos et al., 2021). En este contexto, se ha incrementado el número de estudios sobre la biofortificación agronómica de plantas con yodo (Consentino et al., 2023; Liu et al., 2021; Vetési et al., 2022), como estrategia para compensar la disminución de la ingesta de yodo debido al menor consumo de sal (Oztekin & Buyuktuncer, 2024). Aunque no se considera esencial para el crecimiento de las plantas, estas tienen la capacidad de absorberlo del suelo. Este elemento en el suelo puede presentarse en formas inorgánicas, como yoduro (I<sup>-</sup>) y yodato (IO<sub>3</sub><sup>-</sup>), así como en forma orgánica (Lawson et al., 2015). Las plantas pueden absorber I del suelo a través de las raíces, de la atmósfera a través de las hojas o mediante fertilización foliar (Krzepiłko et al., 2019). Su absorción por las raíces se ve afectada por la composición del suelo, la textura, el pH y las condiciones redox, que controlan la especiación y la movilidad del I en el suelo (Oztekin & Buyuktuncer, 2024). Los estudios indican que los sistemas hidropónicos suelen ser más eficientes en la aplicación de I que los sistemas de suelo (Krzepiłko et al., 2019; Puccinelli et al., 2021a). Esto ocurre porque, en presencia de materia orgánica y otros minerales, el I puede interactuar, reduciendo su movilidad o compitiendo por la absorción radicular. En este contexto, los métodos de aplicación hidropónica demuestran una mayor eficiencia en comparación con las aplicaciones al suelo y foliares (Puccinelli et al., 2021a). Para mejorar la técnica de fertilización foliar con este elemento, los estudios recomiendan el uso de surfactantes (Magor et al., 2023). La biofortificación agronómica con I se ha orientado a las hortalizas de hoja, debido a la mayor acumulación de este elemento en el tejido vegetal, como en el caso de la lechuga, la espinaca, el repollo y el apio (Puccinelli et al., 2021b). Otros estudios muestran que algunas frutas, como los tomates y las fresas, y tubérculos, como las papas, también pueden almacenar cantidades de I en sus partes comestibles (Dobosy et al., 2020; Mageshen et al., 2023; Medrano-Macías et al., 2021). Sin embargo, en el caso de cereales como el arroz, aún no se han observado resultados significativos de acumulación de I en los granos (Krzepiłko et al., 2021). Esta limitación en la acumulación de I en los cereales puede estar relacionada con la baja movilidad de este elemento a través del floema y con las altas tasas de volatilización, aunque se requieren más estudios para comprender mejor este mecanismo.

## 5. Estrategias para la biofortificación agronómica

Existen diferentes estrategias que pueden utilizarse en la biofortificación agronómica, entre ellas la fertilización del suelo, la fertilización foliar, el osmoacondicionamiento de semillas y el uso de microorganismos (Figura 2 y Tabla 3).



**Figura 2.** Diferentes técnicas de aplicación de la biofortificación agronómica.

### 5.1. Fertilización al suelo

La aplicación de micronutrientes mediante fertilizantes para el suelo es una técnica convencional, pero menos eficiente, ya que estos elementos tienden a unirse a las partículas del suelo, volviéndose no disponibles para su absorción por las plantas (Bhardwaj et al., 2022). Este es uno de los factores que hacen que la aplicación al suelo se considere menos eficiente que la foliar (Cakmak, 2008; Velu et al., 2014). Por lo tanto, para implementar con éxito la biofortificación agronómica, es necesario comprender cómo los micronutrientes están disponibles en el suelo y cómo son absorbidos por las plantas, lo que asegura la eficiencia de esta técnica (Dhaliwal et al., 2022).

Varios factores pueden interferir con la eficiencia de absorción de micronutrientes en el suelo; entre ellos destacan las propiedades del suelo, como el pH y la textura (Bhardwaj et al., 2022). Los suelos ácidos tienden a tener una mayor disponibilidad de Fe y Zn, mientras que las plantas que crecen en suelos alcalinos presentan deficiencias de estos nutrientes (Havlin et al., 2017).

**Tabla 3**  
Estudios en biofortificación agronómica con Fe, Zn, Se, I, Vit C y Vit A en diversos cultivos

| Nutriente/elemento | Cultivo                                                           | Tipo de experimento | Tipo de aplicación      | Fuente                                                                       | Dosis                                        | Resultado                     | Referencia                       |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Fe                 | Mijo ( <i>Finger millet</i> )                                     | Campo               | Al suelo                | FeSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 4 kg Fe ha <sup>-1</sup>                     | Incremento en 17.8%           | (Teklu et al., 2023b)            |
| Fe                 | Lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> )                                 | Hidroponía          | Solución nutritiva      | Quelato HBED                                                                 | 2 mmol Fe L <sup>-1</sup>                    | Incremento en 190%            | (Buturi et al., 2022)            |
| Fe                 | Arroz ( <i>Oryza sativa</i> )                                     | Campo               | Hidratación de semillas | FeSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 0.5 % Fe por 12 horas                        | Incremento en 31%             | (Zulfikar et al., 2022)          |
| Fe                 | Garbanzo ( <i>Cicer arietinum</i> )                               | Campo               | Al suelo                | Quelato EDDHA                                                                | 1.8 kg Fe ha <sup>-1</sup>                   | Incremento en 11%             | (Jahan & Tar'an, 2023)           |
| Fe                 | Germinados de Brócoli ( <i>Brassica oleracea</i> L. var. italica) | Hidroponía          | Solución nutritiva      | Nano fertilizante de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + biofertilizante        | 200 mg Fe L <sup>-1</sup>                    | Incremento en 161.57%         | (Guardiola-Márquez et al., 2023) |
| Fe                 | Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )                                | Campo               | Foliar                  | FeSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 2% p/v                                       | Incremento en 16%             | (Jalal et al., 2020)             |
| Zn                 | Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> )                                 | Macetas             | Foliar                  | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 0.1 % p/v                                    | Incremento entre 22% a 60%    | (Zevallos et al., 2024)          |
| Zn                 | Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> )                                 | Campo               | Foliar                  | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 5 kg Zn ha <sup>-1</sup>                     | Incremento en 40%             | (Gutierrez-Vilchez et al., 2026) |
| Zn                 | Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )                                | Campo               | Foliar                  | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 0.5 % p/v                                    | Incremento en 39.6%           | (Ram et al., 2024)               |
| Zn                 | Cebolla ( <i>Allium cepa</i> )                                    | Macetas             | Al suelo                | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 10 kg Zn ha <sup>-1</sup>                    | Incremento en 26.9%           | (Malathi et al., 2024)           |
| Zn                 | Maíz ( <i>Zea mays</i> )                                          | Campo               | Foliar                  | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 3.4 kg Zn ha <sup>-1</sup>                   | Incremento entre 100% a 110%  | (Cheah et al., 2022)             |
| Zn                 | Maíz ( <i>Zea mays</i> )                                          | Campo               | Semillas revestidas     | Azospirillum brasilense                                                      | 200 ml para 24 kg de semilla                 | Incremento entre 37% y 42%    | (Jalal et al., 2022)             |
| Zn                 | Garbanzo ( <i>Cicer arietinum</i> )                               | Campo               | Foliar                  | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 0.5 % p/v                                    | Incremento en 49.58%          | (Pal et al., 2021)               |
| Zn                 | Maíz ( <i>Zea mays</i> )                                          | Campo               | Suelo                   | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O + micorrizas + bacterias solubilizadoras | 11 kg Zn ha <sup>-1</sup>                    | Incremento en 21.7%           | (Suganya et al., 2020)           |
| Zn                 | Frijol ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )                              | Campo               | Foliar                  | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 1.5 kg Zn ha <sup>-1</sup>                   | Incremento en 133%            | (Kachinski et al., 2022)         |
| Zn                 | Lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> )                                 | Macetas             | Al suelo                | ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                                          | 30 mg Zn kg <sup>-1</sup>                    | Incremento en 23 veces        | (de Almeida et al., 2020)        |
| Se                 | Cereza ( <i>Prunus avium</i> )                                    | Campo               | Foliar                  | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                                             | 60 g Se ha <sup>-1</sup> + CaCl <sub>2</sub> | Incremento en 15.5 veces      | (Wójcik, 2024)                   |
| Se                 | Brócoli ( <i>Brassica oleracea</i> L. var. italica)               | Campo               | Foliar                  | Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>                                             | 100 g Se ha <sup>-1</sup>                    | Incremento en 24.2 veces      | (Muñoz et al., 2021)             |
| Se                 | Germinados de cebollita china ( <i>Allium fistulosum</i> )        | Hidroponía          | Solución nutritiva      | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                                             | 5 mg Se L <sup>-1</sup>                      | Incremento en 507 veces       | (Newman et al., 2021)            |
| Se                 | Arroz ( <i>Oryza sativa</i> )                                     | Campo               | Foliar                  | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                                             | 4.5 mg Se L <sup>-1</sup>                    | Incremento en 4 veces         | (Prom-u-thai et al., 2020)       |
| Se                 | Soja ( <i>Glycine max</i> )                                       | Campo               | Foliar                  | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                                             | 30 g Se ha <sup>-1</sup>                     | Incremento en 53 veces        | (Lončarić et al., 2024)          |
| Se                 | Colinabo ( <i>Brassica oleracea</i> L. var. gongylodes)           | Campo               | Foliar                  | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                                             | 41.79 mg Se L <sup>-1</sup>                  | Incremento en 57.63 veces     | (Antoshkina et al., 2021)        |
| Se                 | Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> )                            | Campo               | Foliar                  | Fertilizante multinutriente                                                  | 15 g Se ha <sup>-1</sup>                     | Incremento en 63%             | (Morais et al., 2024)            |
| I                  | Zanahoria ( <i>Daucus carota</i> )                                | Macetas             | Fertirrigación          | KI                                                                           | 0.1 y 0.5 mg I L <sup>-1</sup>               | Incremento de 230 a 308 veces | (Dobosy et al., 2020)            |
| I                  | Melón ( <i>Cucumis melo</i> )                                     | Macetas             | Foliar                  | KI                                                                           | 2.5 mg I L <sup>-1</sup>                     | Incremento en 155%            | (Andrade-Sifuentes et al., 2024) |
| I                  | Germinados de Cilantro ( <i>Coriandrum sativum</i> )              | Hidroponía          | Solución nutritiva      | KI                                                                           | 1.32 mg I L <sup>-1</sup>                    | Incremento en 105.2%          | (Ciriello et al., 2023)          |
| I                  | Centeno ( <i>Secale cereale</i> )                                 | Campo               | Al suelo                | KIO <sub>3</sub>                                                             | 5 mg I kg <sup>-1</sup>                      | Incremento en 10.87 veces     | (Krzepitko et al., 2022)         |
| I                  | Rabanito ( <i>Raphanus sativus</i> )                              | Hidroponía          | Solución nutritiva      | KI                                                                           | 1.15 mg I kg semilla <sup>-1</sup>           | Incremento en 2730 veces      | (Krzepitko et al., 2021)         |
| I                  | Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> )                            | Hidroponía          | Foliar                  | KIO <sub>3</sub>                                                             | 127 mg I L <sup>-1</sup>                     | Incremento en 44.6%           | (Somma et al., 2024)             |
| Vit. C             | Espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> )                             | Campo               | Foliar                  | Extracto de alga Ecklonia maxima                                             | 3 mL L <sup>-1</sup>                         | Incremento en 56%             | (La Bella et al., 2021)          |
| Vit. C             | Berro ( <i>Nasturtium officinale</i> )                            | Hidroponía          | Foliar                  | K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                                              | 2.52 g Si L <sup>-1</sup>                    | Incremento en 83%             | (Garcia Neto et al., 2022)       |
| Vit. C             | Germinados de Arúgula ( <i>Eruca sativa</i> )                     | Hidroponía          | Solución nutritiva      | Ácido ascórbico                                                              | 0.25%                                        | Incremento en 200%            | (Kathi et al., 2022)             |
| Vit. C             | Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> )                            | Hidroponía          | Foliar                  | K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                                              | 0.2 g Si L <sup>-1</sup>                     | Incremento en 22%             | (dos Santos et al., 2022)        |
| Vit. A             | Germinados de Pakchoi ( <i>Brassica rapa</i> subsp. narinosa)     | Hidroponía          | Solución nutritiva      | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                                             | 1.26 mg de Se L <sup>-1</sup>                | Incremento en 70%             | (Pannico et al., 2020)           |

Además, la presencia de otros nutrientes en el suelo puede afectar la absorción de micronutrientes; por ejemplo, altas concentraciones de fósforo pueden reducir la absorción de Zn (Szerement et al., 2022). Otros desafíos de la aplicación al suelo incluyen la necesidad de dosis más altas de fertilizantes, lo que incrementa el costo de la biofortificación agronómica (Teklu et al., 2023a). Además, estas altas dosis de micronutrientes pueden provocar contaminación ambiental a largo plazo, debido a la acumulación de nutrientes no utilizados en el suelo (Wang et al., 2022).

La aplicación de Zn al suelo resultó en aumentos de las concentraciones de Zn en granos de maíz, arroz y trigo de 23, 7 y 19%, respectivamente, mientras que la aplicación foliar obtuvo aumentos de 30, 25 y 63%, respectivamente (Joy et al., 2015). Los autores sugirieron que la fijación de Zn en el suelo hace que las aplicaciones foliares resulten más económicas y eficientes que las aplicaciones al suelo.

Por otro lado, otros estudios muestran que la aplicación de Zn al suelo tiene efectos residuales en cultivos posteriores, lo cual no se observa con la aplicación foliar (Takkar & Collin, 1993; Teklu et al., 2023b). En la investigación de Narwal et al. (2010), la adición de Zn al suelo para el cultivo de trigo tuvo un efecto significativo durante varios años y resultó más efectiva y económica a largo plazo que la aplicación foliar. En general, varios estudios demuestran el éxito de la biofortificación mediante la aplicación de fertilizantes con micronutrientes al suelo (Botoman et al., 2022; Teklu et al., 2023b).

## 5.2. Fertilización foliar

La aplicación foliar se utiliza a menudo cuando los nutrientes no están disponibles en el suelo o no se trasladan al órgano de interés de la planta. Este método consiste básicamente en aplicar una solución nutritiva sobre las hojas de las plantas y es especialmente efectivo para micronutrientes y elementos beneficiosos, debido a las pequeñas cantidades requeridas (Jha & Warkentin, 2020). Por su practicidad y eficiencia, la aplicación foliar es la estrategia más utilizada en la biofortificación con micronutrientes (Bhardwaj et al., 2022). Sin embargo, su eficacia puede incrementarse cuando se combina con la aplicación al suelo (de Valença et al., 2017). Los estudios muestran que, a corto plazo, las aplicaciones foliares de Zn son más efectivas que las aplicaciones al suelo para aumentar las concentraciones de Zn en los granos de trigo (Phattarakul et al., 2012; Zia et al., 2020). Por ejemplo, la aplicación foliar de Zn en arroz y trigo es una práctica agronómica eficaz para aumentar la concentración de Zn en los granos hasta un 66%, mientras que la aplica-

ción al suelo no tiene efecto alguno (Cakmak et al., 2010; Phattarakul et al., 2012).

Varios factores influyen en la eficiencia de la aplicación foliar, tanto externa como interna a la planta, entre ellos destacan: el tipo de fertilizante utilizado, la concentración de la solución, las condiciones climáticas (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa), la morfología de las hojas y la etapa de desarrollo de las plantas (Fernández et al., 2013). Después de la aplicación sobre el follaje, los nutrientes penetran en la cutícula y son transportados a través de los plasmodesmos hasta los sitios de actividad. Sin embargo, la baja movilidad de ciertos elementos dentro de la planta puede limitar la eficiencia de esta técnica, lo que ha motivado estudios sobre distintas vías y formas de aplicación. Por ejemplo, Lawson et al. (2015) demostraron que la aplicación foliar de I en lechuga fue más eficiente que la vía de suelo. En el caso del arroz, Phattarakul et al. (2012) y Zou et al. (2012) observaron que la aplicación foliar, sola o combinada con la aplicación al suelo, fue más efectiva para hacer disponible el Zn que la aplicación exclusivamente al suelo. La fuente de Zn más utilizada es el sulfato de zinc (Ofori et al., 2022), aunque Ghasemi et al. (2013) demostraron que el uso de aminoácidos que contienen zinc es más eficiente para aumentar los niveles de hierro y zinc en los granos de trigo que el sulfato de zinc tradicional.

Por lo tanto, la aplicación foliar es una herramienta crucial para la biofortificación de micronutrientes; sin embargo, es esencial considerar los diversos factores que pueden interferir en la eficiencia del proceso, garantizando así una biofortificación más efectiva y de alta calidad (Shivay & Prasad, 2016).

## 5.3. Uso de microorganismos

En suelos con bajo contenido de agua, alto pH y bajos niveles de materia orgánica, la disponibilidad de micronutrientes se reduce significativamente. En este contexto, la integración de microorganismos en la biofortificación agronómica resulta fundamental, ya que desempeñan un papel crucial en el ciclo biogeoquímico de los nutrientes del suelo (Nazaries et al., 2013). La microbiota del suelo tiene la capacidad de convertir elementos no disponibles en formas biodisponibles, facilitando su absorción por las plantas y modulando transportadores específicos para optimizar dicha captación (Verma et al., 2021).

Estos procesos son impulsados por la diversidad microbiana y metabólica del suelo, lo que implica la producción de sideróforos, hormonas, ácidos orgánicos y otros compuestos que promueven, directa o indirectamente, el crecimiento y la fortificación de

las plantas (Bhardwaj et al., 2022). La producción de sideróforos, por ejemplo, forma quelatos con micronutrientes en formas no disponibles, lo que facilita su absorción. En el caso del Fe, el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) es quelado por sideróforos, lo que lo vuelve accesible para las plantas, que de otra manera solo absorberían el Fe en forma ferrosa ( $\text{Fe}^{2+}$ ) (Desai & Archana, 2011).

La importancia de los sideróforos en la nutrición de las plantas es ampliamente reconocida. Rasouli-Sadaghiani et al. (2014) encontraron que diferentes microorganismos producen sideróforos distintos y que las *Pseudomonas* exhibieron la mayor eficiencia en la absorción de Fe en plantas de trigo en comparación con otros géneros. De manera similar, Gopalakrishnan et al. (2016) reportaron que la inoculación de varias especies bacterianas en semillas de frijol gandul y garbanzo resultó en una mayor productividad y en aumentos de los niveles de Fe, Zn, Cu, Mn y Ca en los granos, en comparación con las semillas no inoculadas.

Durán et al. (2013) destacaron que la inoculación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), solas o en combinación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA), aumentó la concentración de Se en los granos de trigo. Yasin et al. (2015) observaron resultados similares y documentaron un mayor crecimiento y productividad en plantas de trigo, además de incrementos en los niveles de Se y Fe en los granos tras la inoculación con PGPR. Por lo tanto, la biofortificación agronómica mediada por microorganismos es un enfoque ecológico, económico y sostenible, que aporta beneficios adicionales al sistema de producción de cultivos (Verma et al., 2021).

#### 5.4. Osmocondicionamiento de semillas

Esta técnica de acondicionamiento, o seed priming, consiste en sumergir las semillas en soluciones nutritivas durante un período preestablecido antes de la siembra. Esta práctica ha cobrado relevancia debido a la complejidad de la dinámica de los micronutrientes en el suelo, que a menudo se traduce en una distribución deficiente de estos (Farooq et al., 2019). Debido a que es una técnica de bajo costo y de operación sencilla, el acondicionamiento es ampliamente aceptado, especialmente entre los pequeños agricultores (Harris, 2006).

El acondicionamiento de semillas mejora significativamente la germinación, el desarrollo del cultivo y la calidad del producto final. Los estudios muestran que esta técnica estimula el crecimiento del sistema radicular y aumenta la tolerancia de las plantas al estrés biótico y abiótico (Cheikh et al., 2018; Harris, 2006; Raj & Raj, 2019). Además, Farooq et al. (2019)

observaron que, además de mejorar el desempeño agrícola, el priming puede incrementar los niveles de micronutrientes en granos, como en el caso del trigo y los garbanzos, que mostraron incrementos de 12% y 29% en los niveles de Zn, respectivamente. Sundaria et al. (2019) demostraron que el uso de nanopartículas de Fe en el acondicionamiento de semillas puede aumentar los niveles de Fe en los granos de trigo hasta en un 45%. Además, la técnica se asocia con una mayor productividad general y varios autores reportan mejoras significativas en los rendimientos agrícolas (Farooq et al., 2019).

La técnica de acondicionamiento de semillas puede superar la eficiencia de la aplicación de nutrientes en el suelo al reducir la interacción entre los elementos y el suelo, así como las reacciones químicas que disminuyen la disponibilidad de micronutrientes para las plantas. Choukri et al. (2022) demostraron que el acondicionamiento de las semillas de maíz con Zn resultó en una mayor productividad y un mayor contenido de Zn en los granos en comparación con la aplicación directa del elemento al suelo. Además, el acondicionamiento muestra resultados aún más significativos cuando se combina con otras prácticas agrícolas. Subramanyam et al. (2019) informaron que la integración del osmocondicionamiento con la fertilización foliar aumentó los niveles de Se en los granos de arroz hasta tres veces, lo que ilustra cómo la combinación de estrategias puede amplificar los beneficios nutricionales y agronómicos.

El acondicionamiento de semillas es un método eficiente y asequible capaz de generar mejoras sustanciales en la producción agrícola y en los niveles de nutrientes de los granos. Sin embargo, para lograr buenos resultados se deben considerar varios factores, entre ellos la especie de planta, el genotipo, la duración del acondicionamiento y el potencial osmótico de la solución utilizada (Rhaman et al., 2020). La técnica ha demostrado ser eficaz en diversas condiciones, con resultados consistentes en el aumento de la eficiencia agrícola y de la calidad nutricional de los alimentos (Amir et al., 2024; Atique-ur-Rehman et al., 2012).

#### 6. Interacciones nutricionales y efectos sinérgicos

La interacción entre nutrientes durante la biofortificación es un fenómeno complejo, influido por diversos factores, desde las características del suelo hasta los mecanismos de absorción de las plantas (Xie et al., 2019). En este contexto, la interacción entre diferentes nutrientes puede afectar significativamente la absorción y la acumulación de nutrientes en las plantas (Teklu et al., 2023a) (Figura 3).

Entre los principales mecanismos involucrados en la interacción entre nutrientes se encuentra la competencia por sitios de absorción, en la que nutrientes con propiedades químicas similares compiten por los mismos sitios de absorción en las raíces de las plantas (Broadley et al., 2012; Xie et al., 2019). Esta competencia puede inhibir la absorción de un nutriente por otro, lo que produce un efecto antagónico. Además, el pH del suelo es un factor crucial que influye en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Havlin et al., 2017).

El azufre (S) y el selenio (Se) presentan muchas similitudes químicas, ya que pertenecen al mismo grupo de la tabla periódica (Zhou et al., 2020). El Se, en forma de selenato, es estructuralmente similar al sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), por lo que es absorbido por los transportadores de S presentes en la membrana plasmática de la raíz (Terry et al., 2000). Los estudios muestran que las plantas absorben y asimilan Se y S por vías idénticas (Nie et al., 2020; Reis et al., 2018).

La interacción entre S y Se en las plantas es compleja, ya que comparten los mismos transportadores durante la absorción de ambos elementos. A menudo se establece una competencia en la absorción de estos nutrientes (Zhou et al., 2020).

Mackowiak & Amacher (2008) demostraron que la aplicación de fertilizantes a base de S redujo la absorción de Se en plantas como la alfalfa y el trigo. Los estudios también han informado de que los altos niveles de P en el suelo pueden afectar negativamente la absorción de Zn y Fe por los cultivos (Watts-Williams et al., 2013). Esto se debe a que niveles elevados de P pueden perjudicar la colonización de las raíces por hongos micorrízicos

arbusculares, responsables de la simbiosis con las plantas, lo que aumenta la superficie de las raíces y facilita la absorción de nutrientes, incluidos Zn y Fe (Havlin et al., 2017).

La deficiencia de P en el suelo se asocia con una mayor acumulación de Zn, mientras que la deficiencia de Zn conduce a una mayor acumulación de P en las plantas (Bouain et al., 2014; Ova et al., 2015). Asimismo, la deficiencia de Fe estimula la absorción de P en las raíces (Briat et al., 2015; Nafady & Elgharably, 2018).

Existen otros casos de interacción entre nutrientes, como el papel del nitrógeno en la regulación de la biodisponibilidad y la acumulación de Se (Zhou et al., 2020) y la interacción del Se con elementos potencialmente tóxicos, como arsénico, mercurio y cadmio (Dang et al., 2019).

En la biofortificación agronómica es usual aplicar más de un nutriente objetivo, comúnmente en forma foliar. La solución que contiene dos o más nutrientes se denomina cóctel de micronutrientes. Se ha reportado que la aplicación conjunta de Zn y Se aumentó la proporción de Se orgánico al 96.7%, superior a la obtenida con la aplicación de Se por sí sola (Li et al., 2026).

## 7. Bioaccesibilidad y biodisponibilidad de nutrientes a partir de alimentos biofortificados agronómicamente

Para evaluar si los nutrientes minerales que ingieren las poblaciones se aprovechan realmente y combaten el problema del hambre oculta, debe verificarse su aprovechamiento real por el organismo humano mediante estudios de bioaccesibilidad y/o biodisponibilidad (Figura 4).

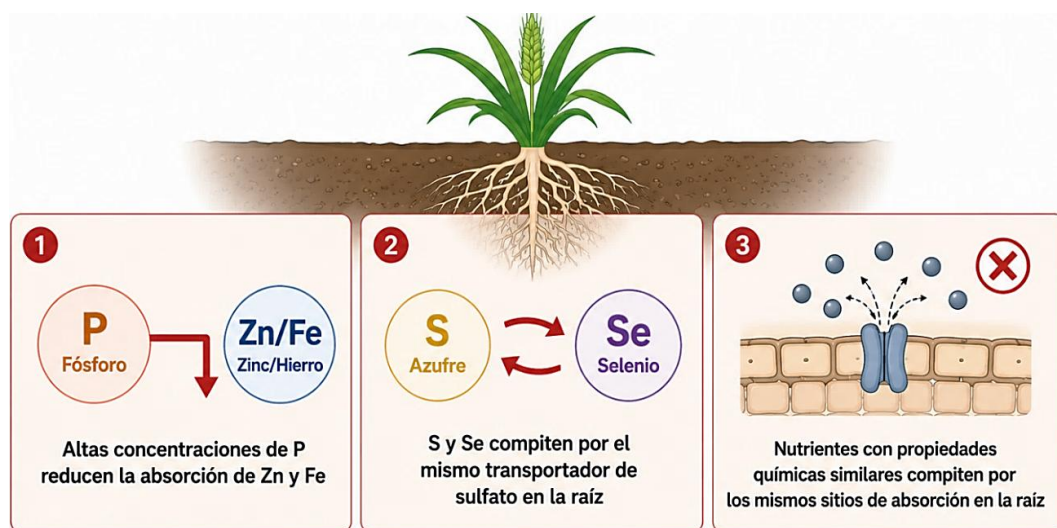


Figura 3. Principales interacciones entre nutrientes en el suelo.

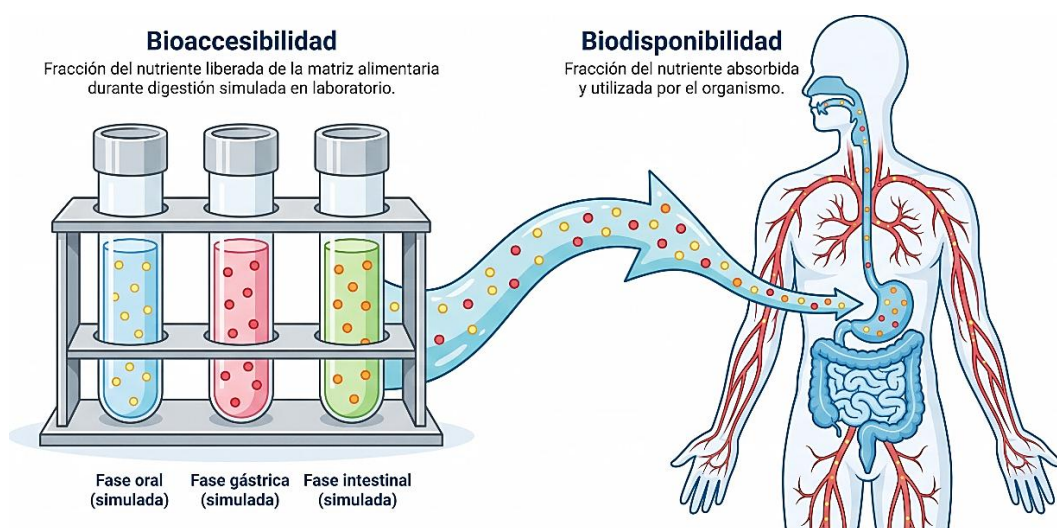


Figura 4. Evaluación de la bioaccesibilidad simulada y biodisponibilidad in vivo de nutrientes.

Estudios de bioaccesibilidad que emplean métodos in vitro, simulan la liberación del nutriente en el sistema digestivo, de modo que esté listo para su asimilación; por lo tanto, esta evaluación se considera indispensable para que el nutriente sea biodisponible (Nicolescu et al., 2023). Los estudios de biodisponibilidad que emplean métodos in vivo evalúan la fracción del nutriente ingerido que es absorbida y utilizada por el organismo vivo (Huey et al., 2022). Otro tipo de estudios que, de cierta forma, se correlacionan con la bioaccesibilidad/biodisponibilidad y que pueden ayudar en la previsión y/o entendimiento de la cantidad real que será aprovechada por el organismo humano son los estudios de especiación de las formas de los elementos clave que son acumuladas en las partes comestibles de las plantas después de la aplicación de las estrategias de biofortificación. Por ejemplo, se sabe que formas orgánicas de selenio son más bioaccesibles/biodisponibles que las formas inorgánicas (D'Amato et al., 2020). Por lo tanto, conocer la especiación y la distribución porcentual del Se que se encuentra en formas proteicas (selenometionina, selenocisteína y otras) es importante en este contexto.

Los alimentos biofortificados agrónicamente presentan resultados positivos para bioaccesibilidad y biodisponibilidad, por ejemplo, la aplicación foliar conjunta de Se y Zn en trigo aumentó el contenido de selenometionina que se absorbe directamente en el intestino con mayor biodisponibilidad que el selenio inorgánico (Li et al., 2026), de igual manera la aplicación foliar de Se, obtiene que entre 70% y 100% del selenio total en los granos de trigo, se encuentra en forma de selenometionina (Galinha et al., 2014). También la aplicación de Se al suelo in-

crementó la bioaccesibilidad de Se en granos de trigo (Santos et al., 2024), mientras que, en el arroz, la fracción bioaccesible fue de  $61 \pm 5\%$ , siendo el arroz que recibió fertilización foliar mejor que la fertilización al suelo (de Lima et al., 2023). La biofortificación agronómica con selenio garantiza una ingesta segura y eficaz al cumplir con los requerimientos nutricionales según su bioaccesibilidad y una biodisponibilidad relativa del 62.29% (Farooq et al., 2025).

Para zinc se encontró que aplicaciones combinadas de Zn al suelo y foliar incrementaron la biodisponibilidad neta estimada en el arroz cocido en un 52.2%, debido a un aumento de la concentración de Zn en el grano y una reducción del ácido fítico de hasta 30.4% (Saha et al., 2017), mientras que para maíz se estimó un incremento de 52% bajo un sistema de aplicación foliar y al suelo de Zn al cultivo (Imran & Rehim, 2017).

## 8. Efecto en la resistencia de plantas contra estreses

La fertilización con microelementos también ha demostrado otras ventajas en los cultivos, como la mitigación de los estreses abióticos (Figura 5). Por ejemplo, la aplicación de Zn, Cu, Mn o Fe puede activar la enzima antioxidante SOD, que actúa en la primera línea de defensa frente a las especies reactivas del oxígeno (ROS) (Tavanti et al., 2021). El Se ha mostrado poder activar mecanismos antioxidantes bajo estrés salino, incrementando la actividad de la catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX) y contenido de glutatión (Alvan et al., 2025). Por su parte, el yodo ha demostrado incrementar la actividad de CAT (Medrano-Macías et al., 2021).

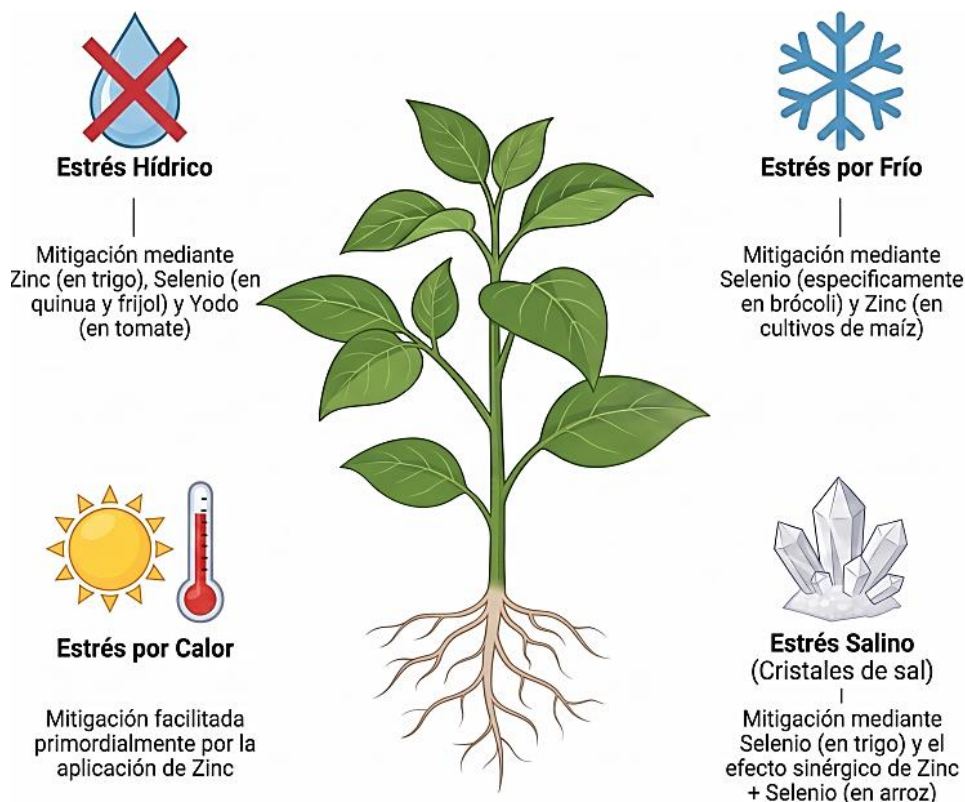


Figura 5. Microelementos en la mitigación de estreses abióticos en plantas.

Existe abundante evidencia sobre el doble beneficio de la aplicación de microelementos, los cuales no solo permiten la biofortificación de los cultivos, sino que también mitigan diversos tipos de estrés, siendo algunos aliviando el estrés hídrico con la aplicación de Zn en el cultivo de trigo (Anwar et al., 2021), selenio en quinua (Vega-Ravello et al., 2023), en frijol (Ravello et al., 2021), yodo en tomate (Lima et al., 2023), en el estrés por frío con la aplicación de Se en brócoli (Quispe et al., 2025), zinc en maíz (Bradáčová et al., 2016), en el estrés por calor aplicando Zn (Sarwar et al., 2025), en el estrés salino mediante el uso de Se en trigo (Elkelish et al., 2019) y Zn y Se en arroz (Mishra et al., 2025).

## 9. Análisis bibliométrico

Se realizó un análisis bibliométrico (con base en Scopus), ingresando los siguientes parámetros de búsqueda: ("agronomic biofortification" OR (biofortification AND (foliar OR fertilization OR fertilizer OR micronutrient application OR seed priming))). El resultado arrojó 574 publicaciones relacionadas con las palabras de búsqueda. La producción científica desde 2006 hasta 2026 se distribuye en artículos originales en 83.45%, mientras que los artículos de revisión representaron un 16.55%. Además, las publicaciones fueron en su mayoría en

idioma inglés (98.25%), lo que evidencia una reducida participación en otros idiomas.

Las palabras clave más frecuentes (Figura 6a) estuvieron asociadas con biofortificación agronómica y biofortificación, con más de 140 menciones cada una. Con relación a los nutrientes, el zinc y selenio/selenato sobresalen respecto del hierro, mientras que el cultivo más relacionado fue el trigo. Términos como malnutrición y hambre oculta indican que la biofortificación está solucionando un problema de salud pública desde el manejo agronómico. Tal como se observa en la Figura 6b, la producción científica creció de forma sostenida en el tiempo, aumentando un 7000% en dos décadas, lo que confirma la madurez del campo de estudio y demuestra que la biofortificación ha pasado de ser una propuesta teórica a consolidarse como una herramienta necesaria para la seguridad alimentaria. El aumento en las publicaciones se debe a la búsqueda de soluciones para mitigar el hambre oculta en un contexto internacional afectado por diversos factores climáticos y económicos.

Al evaluar los artículos, se muestra que existe un enfoque agronómico hacia la aplicación de nutrientes como hierro, zinc, selenio (Figura 7)). En contraste, se observa poca información sobre estudios en biodisponibilidad y bioaccesibilidad, que brinda un conocimiento más nutricional.

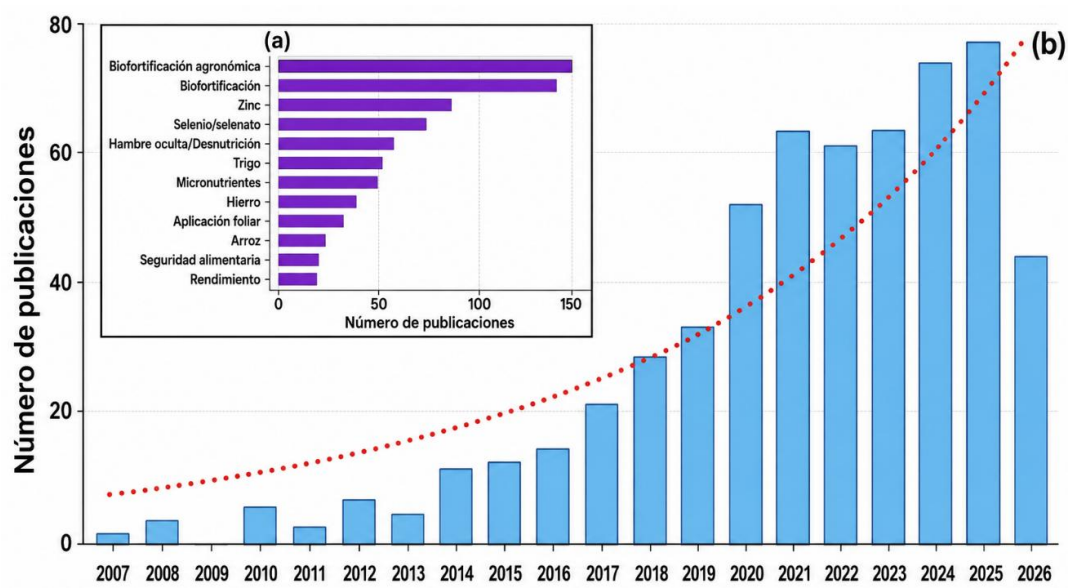


Figura 6. Número de publicaciones científicas desde 2006 hasta 2026 en biofortificación. (a) Información obtenida de la base de datos de Scopus usando la ecuación: ("agronomic biofortification" OR (biofortification AND (foliar OR fertilization OR fertilizer OR micronutrient application OR seed priming))). (b) Evolución anual de la producción científica y tasa de crecimiento de publicaciones de Scopus en el periodo analizado.

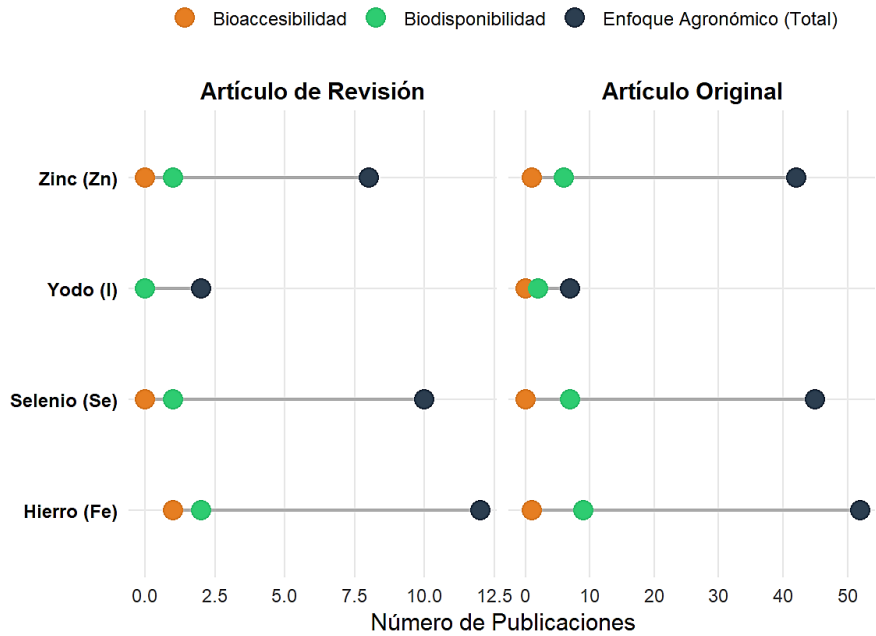


Figura 7. Análisis comparativo de los enfoques de investigación (agronómico, biodisponibilidad y bioaccesibilidad) en los artículos originales y de revisión publicados por tipo de micronutriente.

Estos resultados sugieren que la investigación se ha concentrado principalmente en incrementar la concentración de micronutrientes en los cultivos, mientras que los aspectos vinculados al aprovechamiento nutricional de dichos micronutrientes por el organismo humano han recibido menor atención. Un punto importante para analizar es el término "biodisponibilidad" que aparece en los artículos científicos. Este término también es usado, en

la ciencia del suelo, para indicar la capacidad del sistema suelo – planta para suministrar y absorber el nutriente (Comerford, 2005), diferente de la definición que se le dio en el punto 7 de la presente revisión, entonces en el análisis realizado a la base de datos, se encontraron más trabajos sobre biodisponibilidad que sobre bioaccesibilidad. En realidad, hacer pruebas de biodisponibilidad (*in vivo*) es más complicado que realizar ensayos de bioaccesibilidad.

La red de coocurrencia de palabras clave evidencia tres dominios temáticos complementarios (**Figura 8**). El agrupamiento rojo representa el núcleo de intervención agronómica: reúne fertilización foliar, fertilización con zinc, osmoacondicionamiento de semillas y nanopartículas, además de los cultivos de trigo y arroz y de los elementos de selenio y yodo. Su composición revela una línea de investigación orientada a escoger la fuente y la vía de aplicación, con énfasis en tecnologías capaces de aumentar la concentración de micronutrientes en las partes comestibles de las plantas.

El agrupamiento verde conecta nutrición mineral de plantas y el desempeño productivo. Zinc y hierro aparecen asociados al maíz, nitrógeno, aplicación foliar, rendimiento y rendimiento de granos. Esa proximidad indica que parte importante de la literatura evalúa simultáneamente dos objetivos: elevar la densidad mineral y preservar o aumentar la productividad. La presencia de ácido fítico en la interfase con otros grupos también apunta para una pregunta crítica: mayor concentración total del mineral no implica, necesariamente, mayor fracción nutricionalmente aprovechable.

El agrupamiento azul corresponde a la intervención agrícola para la nutrición y salud pública. Biofortificación, nutrientes, seguridad alimentaria, hambre oculta, malnutrición, calidad de granos y biodisponibilidad forman ese dominio.

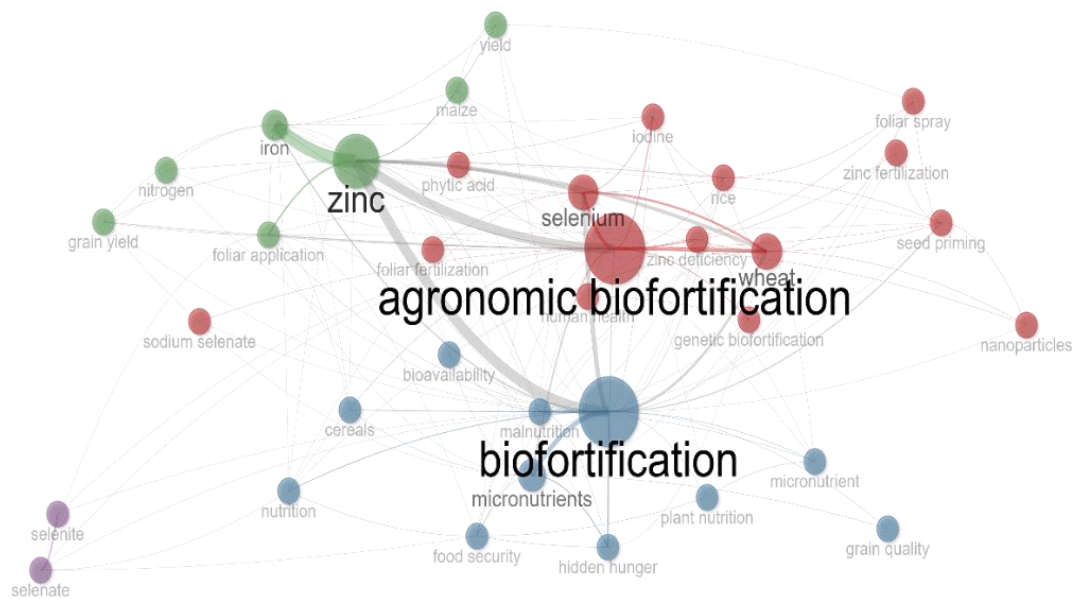
La posición central de "biofortification" y sus conexiones con el núcleo agronómico muestran que el campo se organiza alrededor de una cadena lógica – manejo, enriquecimiento del alimento y beneficio nutricional. No obstante, la menor frecuencia de

términos ligados a la bioaccesibilidad, biodisponibilidad y resultados en humanos sugieren que la comprobación de la eficacia nutricional aún es menos desarrollada que la optimización agronómica. Por último, un pequeño subgrupo morado, formado por selenato y selenito, destaca la especiación química del selenio. Su posición periférica, aunque conectada al resto de la red, sugiere una especiación poco integrada a los estudios de biodisponibilidad y salud humana. En conjunto, el mapa revela que el principal avance futuro no depende únicamente de elevar la concentración total de micronutrientes, sino de vincular los estudios agronómicos con aquellos sobre especiación, estabilidad después del procesamiento, bioaccesibilidad, absorción y efecto nutricional.

## 10. Desafíos actuales y futuros

La biofortificación agronómica ha demostrado ser una herramienta eficaz para mitigar o combatir el "hambre oculta", pero su implementación a escala global enfrenta retos significativos que van más allá del incremento de minerales en la planta.

- El cierre de la brecha entre la nutrición humana y la agricultura. El principal desafío futuro es cambiar el concepto de centrar la agricultura exclusivamente en la productividad y avanzar hacia una perspectiva que incluya la calidad nutricional de los alimentos. Actualmente, la mayor parte de las investigaciones se orienta a elevar la concentración total de microelementos, pero existe poca información sobre la bioaccesibilidad y biodisponibilidad real de estos elementos en el organismo humano.



**Figura 8.** Red de coocurrencia de palabras clave de los autores y mapeo espectral de clústeres temáticos mediante el análisis de asociación bibliométrica.

- b) Superación de limitantes fisiológicas y especificidad técnica. La respuesta a la biofortificación es altamente dependiente de la interacción entre el cultivo y las condiciones edafoclimáticas, lo que exige el desarrollo de protocolos que ajusten las dosis, fuente, localización y momento de aplicación, según la planta, el clima y el suelo. Existen barreras fisiológicas difíciles de vencer como la baja movilidad de los nutrientes en el floema, lo que impide su mayor acumulación en los órganos de reserva como granos o tubérculos.
- c) Sostenibilidad ambiental y viabilidad económica. Emplear altas dosis de fertilizantes que contienen estos micronutrientes puede generar riesgo de contaminación ambiental a largo plazo por la acumulación de nutrientes no utilizados por las plantas. Por ello, es importante orientarse hacia métodos más sostenibles y de bajo costo, haciendo uso de biofertilizantes, empleo de microorganismos benéficos que ayuden a hacer más eficiente el uso de nutrientes para las plantas.
- d) Estandarización y políticas de salud pública. El éxito de esta estrategia depende de la creación de protocolos estandarizados y validados regionalmente. Se requiere un enfoque multidisciplinar, en el que la población, la academia, el sector agrícola y los sistemas de salud se articulen para asegurar que la biofortificación agronómica no solo sea un éxito en el campo, sino que sea una política pública sostenible que garantice la seguridad alimentaria de todas las poblaciones.

## 11. Conclusiones

La biofortificación agronómica se consolida como una estrategia viable y de rápida implementación para aumentar las concentraciones de hierro, zinc, selenio y yodo en las partes comestibles de los cultivos básicos. La eficiencia del proceso depende de la interacción entre cultivo, genotipo, suelo y clima. Estrategias como la fertilización foliar, fertilización al suelo, el osmocondicionamiento de semillas y el uso de biofertilizantes microbianos destacan como herramientas de bajo costo y alta eficiencia para los agricultores.

Las evidencias sustentan que la biofortificación agronómica constituye una estrategia complementaria para la seguridad alimentaria y nutricional, sobre todo donde las dietas diversificadas, suplementos y alimentos fortificados tienen alcance limitado.

## Contribución de los autores

**P. P. Gutierrez-Vilchez:** Conceptualization, Investigation, Visualization, Writing – original draft. Writing – review & editing. **M. E. A. Melo:** Conceptualization, Investigation, Writing – original draft; Writing – review & editing. **P. M. Costa:** Conceptualization, Investigation, Writing – original draft. Writing – review & editing. **R. Vega-Ravello:** Conceptualization, Investigation, Writing – review & editing. **G. Lopes:** Conceptualization, Supervision, Writing – review & editing. **L. R. G. Guilherme:** Conceptualization, Supervision, Project administration, Writing – review & editing.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001. Asimismo, agradecen el apoyo del Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) en Segurança de Solo e Alimento, financiado por el Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil, mediante la Subvención N.º 406577/2022-6.

## ORCID

P. Gutierrez-Vilchez  <https://orcid.org/0000-0002-2604-0882>  
 M. E. A. de Melo  <https://orcid.org/0000-0001-5157-1645>  
 P. M. Costa  <https://orcid.org/0000-0003-1117-5175>  
 R. Vega-Ravello  <https://orcid.org/0000-0002-7185-5677>  
 G. Lopes  <https://orcid.org/0000-0002-7898-798X>  
 L. R. G. Guilherme  <https://orcid.org/0000-0002-5387-6028>

## References

- Abbaspour, N., Hurrell, R., & Kelishadi, R. (2014). Review on iron and its importance for human health. *Journal of Research in Medical Sciences*, 19(2), 164-174.
- Alvan, H. A., Jabbarzadeh, Z., Fard, J. R., & Noruzi, P. (2025). Selenium foliar application alleviates salinity stress in sweet william (*Dianthus barbatus* L.) by enhancing growth and reducing oxidative damage. *Scientific Reports*, 15, 5570. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89463-6>
- Amir, M., Prasad, D., Khan, F. A., Khan, A., Ahamd, B., & Astha. (2024). Seed priming: An overview of techniques, mechanisms, and applications. *Plant Science Today*, 11(1), 553-563. <https://doi.org/10.14719/pst.2828>
- Andrade-Sifuentes, A., Gaucin-Delgado, J. M., Fortis-Hernandez, M., Ojeda-Barrios, D. L., Rodríguez-Ortiz, J. C., Sánchez-Chavez, E., & Preciado-Rangel, P. (2024). Iodine biofortification improves yield and bioactive compounds in melon fruits. *Horticultura Brasileira*, 42. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-2024-e275325>
- Antoshkina, M., Golubkina, N., Sekara, A., Tallarita, A., & Caruso, G. (2021). Effects of selenium application on biochemical characteristics and biofortification level of kohlrabi (*Brassica oleracea* L. var. gongylodes) produce. *Frontiers in Bioscience - Landmark*, 26(9), 533-542. <https://doi.org/10.52586/4965>
- Anwar, S., Khalilzadeh, R., Khan, S., Zaib-un-Nisa, Bashir, R., Pirzad, A., & Malik, A. (2021). Mitigation of Drought Stress and Yield Improvement in Wheat by Zinc Foliar Spray Relates to Enhanced Water Use Efficiency and Zinc Contents. *International Journal of Plant Production*, 15(3), 377-389. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00136-6>
- Atique-ur-Rehman, Farooq, M., Cheema, Z. A., & Wahid, A. (2012). Seed priming with boron improves growth and yield of fine grain aromatic rice. *Plant Growth Regulation*, 68(2), 189-201. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9706-2>
- Bell, R. W., & Dell, B. (2008). Micronutrients for sustainable food, feed, fibre and bioenergy production. International Fertilizer Industry Association. IFA, Paris, France.
- Berger, M. M., Shenkin, A., Dizdar, O. S., Amrein, K., Augsburg, M., Biesalski, H.-K., Bischoff, S. C., Casaer, M. P., Gundogan, K., Lepp, H.-L., de Man, A. M. E., Muscogiuri, G., Pietka, M., Pironi, L., Rezzi, S., Schweinlin, A., & Cuerda, C. (2024). ESPEN practical short

- m micronutrient guideline. *Clinical Nutrition*, 43(3), 825–857. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2024.01.030>
- Bhardwaj, A. K., Chejara, S., Malik, K., Kumar, R., Kumar, A., & Yadav, R. K. (2022). Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055278>
- Botoman, L., Chimungu, J. G., Bailey, E. H., Munthali, M. W., Ander, E. L., Mossa, A. W., Young, S. D., Broadley, M. R., Lark, R. M., & Nalivata, P. C. (2022). Agronomic biofortification increases grain zinc concentration of maize grown under contrasting soil types in Malawi. *Plant Direct*, 6(11). <https://doi.org/10.1002/pld3.458>
- Bouain, N., Kisko, M., Rouached, A., Dauzat, M., Lacombe, B., Belgaroui, N., Ghnaya, T., Davidian, J. C., Berthomieu, P., Abdely, C., & Rouached, H. (2014). Phosphate/zinc interaction analysis in two lettuce varieties reveals contrasting effects on biomass, photosynthesis, and dynamics of Pi transport. *BioMed Research International*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/548254>
- Bouis, H. (2018). Reducing Mineral and Vitamin Deficiencies through Biofortification: Progress Under HarvestPlus. In H. Biesalski & R. Birner (Eds.), *Hidden Hunger: Strategies to Improve Nutrition Quality*. (Vol. 118, pp. 112–122). <https://doi.org/10.1159/000484342>
- Bouis, H. E., & Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12(January), 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>
- Bradáčová, K., Weber, N. F., Morad-Talab, N., Asim, M., Imran, M., Weinmann, M., & Neumann, G. (2016). Micronutrients (Zn/Mn), seaweed extracts, and plant growth-promoting bacteria as cold-stress protectants in maize. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0069-1>
- Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. In *Trends in Plant Science* (Vol. 20, Number 1, pp. 33–40). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005>
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). Function of Nutrients: Micronutrients. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (Third Edit, pp. 191–250). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.X0001-5>
- Broadley, M. R., White, P. J., Bryson, R. J., Meacham, M. C., Bowen, H. C., Johnson, S. E., Hawkesford, M. J., McGrath, S. P., Zhao, F.-J., Breward, N., Harriman, M., & Tucker, M. (2006). Biofortification of UK food crops with selenium. *Proceedings of the Nutrition Society*, 65(02), 169–181. <https://doi.org/10.1079/PNS2006490>
- Buturi, C. V., Sabatino, L., Mauro, R. P., Navarro-León, E., Blasco, B., Leonardi, C., & Giuffrida, F. (2022). Iron Biofortification of Greenhouse Soilless Lettuce: An Effective Agronomic Tool to Improve the Dietary Mineral Intake. *Agronomy*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy12081793>
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302(1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11004-007-9466-3>
- Cakmak, I., Kalayci, M., Kaya, Y., Torun, A. A., Aydin, N., Wang, Y., Arisoy, Z., Erdem, H., Yazici, A., Gokmen, O., Ozturk, L., & Horst, W. J. (2010). Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(16), 9092–9102. <https://doi.org/10.1021/jf101197h>
- Cakmak, I., & Kutman, U. B. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>
- Caulfield, L. E., Richard, S. A., Rivera, J. A., Musgrove, P., & Black, R. E. (2006). Stunting, Wasting, and Micronutrient Deficiency Disorders. In D. T. Jamison, J. G. Breman, & A. R. Measham (Eds.), *Disease Control Priorities in Developing Countries* (Second edition). The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- Chasapis, C. T., Ntoupas, P. S. A., Spiliopoulou, C. A., & Stefanidou, M. E. (2020). Recent aspects of the effects of zinc on human health. *Archives of Toxicology*, 94(5), 1443–1460. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02702-9>
- Cheah, Z. X., Harper, S. M., O'Hare, T. J., Kopitke, P. M., & Bell, M. J. (2022). Improved agronomic biofortification of sweetcorn achieved using foliar rather than soil Zn applications. *Cereal Chemistry*, 99(4), 819–829. <https://doi.org/10.1002/cche.10539>
- Cheikh, O., Elaoud, A., Amor, H. Ben, & Hozayn, M. (2018). Effect of permanent magnetic field on the properties of static water and germination of cucumber seeds. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 6(01). <https://doi.org/10.14741/ijmcr.v6i01.10916>
- Choukri, M., Abouabdillah, A., Bouabid, R., Abd-Elkader, O. H., Pacioglou, O., Boufahja, F., & Bourioug, M. (2022). Zn application through seed priming improves productivity and grain nutritional quality of silage corn. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(12). <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103456>
- Ciriello, M., Formisano, L., El-Nakhel, C., Zarrelli, A., Giordano, M., De Pascale, S., Kyriacou, M., & Roupahel, Y. (2023). Iodine biofortification of four microgreens species and its implications for mineral composition and potential contribution to the recommended dietary intake of iodine. *Scientia Horticulturae*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112229>
- Comerford, N. B. (2005). Soil factors affecting nutrient bioavailability. In H. BassiriRad (Ed.), *Nutrient acquisition by plants* (Ecological Studies, Vol. 181, pp. 1–14). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-27675-0\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-27675-0_1)
- Consentino, B. B., Ciriello, M., Sabatino, L., Vultaggio, L., Baldassano, S., Vasto, S., Roupahel, Y., La Bella, S., & De Pascale, S. (2023). Current Acquaintance on Agronomic Biofortification to Modulate the Yield and Functional Value of Vegetable Crops: A Review. In *Horticulturae*, 9, 2. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020219>
- Council for Agricultural Science and Technology (CAST). (2020). *Food Biofortification-Reaping the Benefits of Science to Overcome Hidden Hunger. Series on The Need for Agricultural Innovation to Sustainably Feed the World by 2050*.
- D'Amato, R., Regni, L., Falcinelli, B., Mattioli, S., Benincasa, P., Dal Bosco, A., Pacheco, P., Proietti, P., Troni, E., Santi, C., & Businelli, D. (2020). Current Knowledge on Selenium Biofortification to Improve the Nutraceutical Profile of Food: A Comprehensive Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(14), 4075–4097. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00172>
- Dang, F., Li, Z., & Zhong, H. (2019). Methylmercury and selenium interactions: Mechanisms and implications for soil remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(19), 1737–1768. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1583051>
- Das, S., & Green, A. (2016). Zinc in Crops and Human Health. In U. Singh, C. S. Praharaj, S. S. Singh, & N. P. Singh (Eds.), *Biofortification of Food Crops* (pp. 31–40). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8_3)
- de Almeida, H., Carmona, V. M. V., Inocêncio, M. F., Furtini Neto, A. E., Cecilio Filho, A. B., & Mauad, M. (2020). Soil type and zinc doses in agronomic biofortification of lettuce genotypes. *Agronomy*, 10(1), 2–10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010125>
- de Lima, A. B., de Andrade Vilalta, T., Lessa, J. H. de L., Lopes, G., Guilherme, L. R. G., & Guerra, M. B. B. (2023). Selenium bioaccessibility in rice grains biofortified via soil or foliar application of inorganic Se. *Journal of Food Composition and Analysis*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105652>
- de Valença, A. W., Bake, A., Brouwer, I. D., & Giller, K. E. (2017). Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global Food Security*, 12, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.12.001>
- Desai, A., & Archana, G. (2011). Role of Siderophores in Crop Improvement. In D. K. Maheshwari (Ed.), *Bacteria in Agrobiology: Plant Nutrient Management* (pp. 109–139). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-21061-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21061-7_6)
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Verma, V., Kaur, M., Shivay, Y. S., Nisar, S., Gaber, A., Brestic, M., Barek, V., Skalicky, M., Ondrisk, P., & Hossain, A. (2022). Biofortification—A Frontier Novel Approach to Enrich Micronutrients in Field Crops to Encounter the Nutritional Security. *Molecules*, 27(4), 1340. <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>

- Dhanyalakshmi, K. H., Mohan, R., Behera, S., Jha, U. C., Moharana, D., Behera, A., Thomas, S., Soumya, P. R., Sah, R. P., & Beena, R. (2024). Next Generation Nutrition: Genomic and Molecular Breeding Innovations for Iron and Zinc Biofortification in Rice. *Rice Science*, 31(5), 526–544. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2024.04.008>
- Di Gioia, F., Petropoulos, S. A., Ozores-Hampton, M., Morgan, K., & Rosskopf, E. N. (2019). Zinc and iron agronomic biofortification of Brassicaceae microgreens. *Agronomy*, 9(11), 677. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110677>
- Dobosy, P., Endrédi, A., Sandil, S., Vetési, V., Rékási, M., Takács, T., & Zárny, G. (2020). Biofortification of Potato and Carrot With Iodine by Applying Different Soils and Irrigation With Iodine-Containing Water. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.593047>
- dos Santos, M. M. M., da Silva, G. P., Prado, R. de M., Pinsetta Junior, J. S., Mattiuz, B. H., & Braun, H. (2022). Biofortification of tomato with stabilized alkaline silicate and silicic acid, nanosilica, and potassium silicate via leaf increased ascorbic acid content and fruit firmness. *Journal of Plant Nutrition*, 45(6), 896–903. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1994599>
- Duborská, E., Urik, M., & Šeda, M. (2020). Iodine biofortification of vegetables could improve iodine supplementation status. *Agronomy*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy10101574>
- Durán, P., Acuña, J. J., Jorquera, M. A., Azcón, R., Borie, F., Cornejo, P., & Mora, M. L. (2013). Enhanced selenium content in wheat grain by co-inoculation of selenobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi: A preliminary study as a potential Se biofortification strategy. *Journal of Cereal Science*, 57(3), 275–280. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.11.012>
- Elizabeth, G. J., & Koshy, G. (2024). Micronutrient Hunger or Hidden Hunger Among Infants and Young Children on Healthy Diets. In H. Szajewska, J. Neu, R. Shamir, G. Wong, & A. Prentice (Eds.), *Shaping the Future with Nutrition* (Vol. 100, pp. 111–124). <https://doi.org/10.1159/000540141>
- Elkelish, A. A., Soliman, M., Alhaithloul, H. A., & El-Esawi, M. A. (2019). Selenium protects wheat seedlings against salt stress-mediated oxidative damage by up-regulating antioxidants and osmolytes metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry*, 137, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.02.004>
- Eveleigh, E. R., Coneyworth, L., & Welham, S. J. M. (2023). Systematic review and meta-analysis of iodine nutrition in modern vegan and vegetarian diets. *British Journal of Nutrition*, 30(9), 1580–1594. <https://doi.org/10.1017/S000711452300051X>
- FAO. (2013). The state of food and agriculture, 2013. In *Lancet* (Vol. 2, Number 7929). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61761-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61761-2)
- FAO, FIDA, OMS, PMA, & UNICEF. (2024). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024: Financiación para acabar con el hambre, la inseguridad alimentaria y la malnutrición en todas sus formas*. FAO; IFAD; WHO; WFP; UNICEF; <https://doi.org/10.4060/cd1254es>
- Farooq, M. R., Zhang, Z., Yin, X., Chen, Y., Yuan, L., Liu, X., Ye, T., & Li, M. (2025). Effective agronomic biofortification of rice with selenium: Ensuring dietary intake through relative bioavailability and bioaccessible fractions. *Food Research International*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117361>
- Farooq, M., Usman, M., Nadeem, F., Rehman, H. U., Wahid, A., Basra, S. M. A., & Siddique, K. H. M. (2019). Seed priming in field crops: Potential benefits, adoption and challenges. *Crop and Pasture Science*, 70(9), 731–771. <https://doi.org/10.1071/CP18604>
- Fernández, V., Sotiropoulos, T., & Brown, P. (2013). *Foliar Fertilization Scientific Principles and Field Practices* (First edition). International Fertilizer Industry Association. [www.fertilizer.org](http://www.fertilizer.org)
- Galić, L., Vinković, T., Ravnjak, B., & Lončarić, Z. (2021). Agronomic biofortification of significant cereal crops with selenium—a review. *Agronomy*, 11(5), 1015. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051015>
- Galinha, C., Sánchez-Martínez, M., Pacheco, A. M. G., Freitas, M. do C., Coutinho, J., Maças, B., Almeida, A. S., Pérez-Corona, M. T., Madrid, Y., & Wolterbeek, H. T. (2014). Characterization of selenium-enriched wheat by agronomic biofortification. *Journal of Food Science and Technology*, 52(7), 4236–4245. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1503-7>
- García Neto, J., Prado, R. de M., de Souza Júnior, J. P., Silva, S. L. O., Farias, T. P., & de Souza, J. Z. (2022). Silicon leaf spraying increases biofortification production, ascorbate content and decreases water loss post-harvest from land cress and chicory leaves. *Journal of Plant Nutrition*, 45(8), 1283–1290. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.2003390>
- Ghasemi, S., Khoshgoftarmanesh, A. H., Afyuni, M., & Hadadzadeh, H. (2013). The effectiveness of foliar applications of synthesized zinc-amino acid chelates in comparison with zinc sulfate to increase yield and grain nutritional quality of wheat. *European Journal of Agronomy*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.012>
- Gopalakrishnan, S., Vadlamudi, S., Samineni, S., & Sameer Kumar, C. V. (2016). Plant growth-promotion and biofortification of chickpea and pigeonpea through inoculation of biocontrol potential bacteria, isolated from organic soils. *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3590-6>
- Guardiola-Márquez, C. E., García-Sánchez, C. V., Sánchez-Arellano, Ó. A., Bojorquez-Rodríguez, E. M., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2023). Biofortification of Broccoli Microgreens (*Brassica oleracea* var. *italica*) with Glucosinolates, Zinc, and Iron through the Combined Application of Bio- and Nanofertilizers. *Foods*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/foods12203826>
- Gutierrez-Vilchez, P. P., Quispe-Poma, M., Acuña, M., Egusquiza, R., & Vega-Ravello, R. (2026). Agronomic biofortification of potato through Zn foliar and soil fertilization. *Soil Science Annual*, 77(2), 221698. <https://doi.org/10.37501/soilsa/221698>
- Hafeez, B., Khanif, Y. M., & Saleem, M. (2013). Role of Zinc in Plant Nutrition—A Review. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(2), 374–391. [www.sciencedomain.org](http://www.sciencedomain.org)
- Harris, D. (2006). Development and Testing of “On-Farm” Seed Priming. *Advances in Agronomy*, 90, 129–178. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)90004-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)90004-2)
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., Nelson, W. R., & Nelson, W. L. (2017). *Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to Nutrient Management* (Eighth ed.). Pearson.
- Huey, S. L., Mehta, N. H., Konieczynski, E. M., Bhargava, A., Friesen, V. M., Krisher, J. T., Mbaya, M. N. N., Monterrosa, E., Nyangaresi, A. M., Boy, E., & Mehta, S. (2022). Bioaccessibility and bioavailability of biofortified food and food products: Current evidence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(14), 4500–4522. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2142762>
- Imran, M., & Rehman, A. (2017). Zinc fertilization approaches for agronomic biofortification and estimated human bioavailability of zinc in maize grain. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(1), 106–116. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1185660>
- Izydorczyk, G., Ligas, B., Mikula, K., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., & Chojnacka, K. (2021). Biofortification of edible plants with selenium and iodine – A systematic literature review. *Science of the Total Environment*, 754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141983>
- Jahan, T. A., & Tar'an, B. (2023). Agronomic Approach to Iron Biofortification in Chickpea. *Agronomy*, 13(12), 2894. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122894>
- Jalal, A., da Silva Oliveira, C. E., Fernandes, H. B., Galindo, F. S., da Silva, E. C., Fernandes, G. C., Nogueira, T. A. R., de Carvalho, P. H. G., Balbino, V. R., de Lima, B. H., & Filho, M. C. M. T. (2022). Diazotrophic Bacteria Is an Alternative Strategy for Increasing Grain Biofortification, Yield and Zinc Use Efficiency of Maize. *Plants*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/plants11091125>
- Jalal, A., Shah, S., Carvalho Minhoto Teixeira Filho, M., Khan, A., Shah, T., Ilyas, M., & Leonel Rosa, P. A. (2020). Agro-Biofortification of Zinc and Iron in Wheat Grains. *Gesunde Pflanzen*, 72(3), 227–236. <https://doi.org/10.1007/s10343-020-00505-7>
- Jha, A. B., & Warkentin, T. D. (2020). Biofortification of pulse crops: Status and future perspectives. *Plants*, 9(1), 73. <https://doi.org/10.3390/plants9010073>
- Joy, E. J. M., Stein, A. J., Young, S. D., Ander, E. L., Watts, M. J., & Broadley, M. R. (2015). Zinc-enriched fertilisers as a potential public

- health intervention in Africa. *Plant and Soil*, 389(1–2), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2430-8>
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants. In *CRC Press* (Fourth Ed.). <https://doi.org/10.1201/b10158-25>
- Kabeer, S., Mary, S. J., Govindarajan, N., Essa, M. M., & Qoronfleh, M. W. (2024). Traditional weaning foods and processing methods with fortification for sustainable development of infants to combat zero hunger: a review. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-06065-2>
- Kachinski, W. D., Ávila, F. W., dos Reis, A. R., Muller, M. M. L., Mendes, M. C., & Petranski, P. H. (2022). Agronomic biofortification increases concentrations of zinc and storage proteins in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grains. *Food Research International*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111105>
- Kathi, S., Laza, H., Singh, S., Thompson, L., Li, W., & Simpson, C. (2022). Increasing vitamin C through agronomic biofortification of arugula microgreens. *Scientific Reports*, 12(1), 13093. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17030-4>
- Krebs, N. F., Miller, L. V., & Michael Hambidge, K. (2014). Zinc deficiency in infants and children: A review of its complex and synergistic interactions. *Paediatrics and International Child Health*, 34(4), 279–288. <https://doi.org/10.1179/2046905514Y.00000000151>
- Krężel, A., & Maret, W. (2016). The biological inorganic chemistry of zinc ions. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 611, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.010>
- Krzepiako, A., Kościak, B., Skowrońska, M., Kuśmier, S., Walczak, J., & Prazak, R. (2022). Quality of Rye Plants (*Secale cereale*) as Affected by Agronomic Biofortification with Iodine. *Plants*, 12(1), 100. <https://doi.org/10.3390/plants12010100>
- Krzepiako, A., Prazak, R., Skwaryło-Bednarz, B., & Molas, J. (2019). Agronomic biofortification as a means of enriching plant foodstuffs with iodine. *Acta Agrobotica*, 72(2). <https://doi.org/10.5586/aa.1766>
- Krzepiako, A., Świącilo, A., & Zych-Wężyk, I. (2021). The antioxidant properties and biological quality of radish seedlings biofortified with iodine. *Agronomy*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy11102011>
- La Bella, S., Consentino, B. B., Roupheal, Y., Ntatsi, G., De Pasquale, C., Iapichino, G., & Sabatino, L. (2021). Impact of ecklonia maxima seaweed extract and mo foliar treatments on biofortification, spinach yield, quality and nue. *Plants*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/plants1006139>
- Lange, O., Mehra, D., de Pee, S., & Bloem, M. W. (2017). Integrated Approaches to Health and Nutrition: Role of Communities. In S. de Pee, D. Taren, & M. Bloem (Eds.), *Nutrition and Health in a Developing World* (pp. 625–645). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43739-2\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43739-2_28)
- Lata-Tenesaca, L. F., de Mello Prado, R., Ajila-Celi, G. E., da Silva, D. L., Junior, J. S. P., & Mattiuz, B. H. (2023). Iron biofortification in quinoa: Effect of iron application methods on nutritional quality, anti-nutrient composition, and grain productivity. *Food Chemistry*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134573>
- Lawson, P. G., Daum, D., Czauderna, R., Meuser, H., & Härtling, J. W. (2015). Soil versus foliar iodine fertilization as a biofortification strategy for field-grown vegetables. *Frontiers in Plant Science*, 6(JUNE), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00450>
- Lemanceau, P., Bauer, P., Kraemer, S., & Briat, J. F. (2009). Iron dynamics in the rhizosphere as a case study for analyzing interactions between soils, plants and microbes. *Plant and Soil*, 321(1–2), 513–535. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0039-5>
- Li, Y., Gou, Y., Lin, T., Shi, J., & Tian, X. (2026). Foliar ZnSe co-biofortification in wheat grains: Proteomic insights into nutritional enhancement and molecular responses. *Food Chemistry*, 498, 147152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147152>
- Lichtenstein, A., & Russell, R. (2005). Essential Nutrients: Food or Supplements? Where Should the Emphasis Be? *JAMA*, 294(3), 351. [www.jama.com](http://www.jama.com)
- Lima, J. de S., Andrade, O. V. S., Morais, E. G. de, Machado, G. G. L., Santos, L. C. dos, Andrade, E. S. de, Benevenute, P. A. N., Martins, G. S., Nascimento, V. L., Marchiori, P. E. R., Lopes, G., Vilas Boas, E. V. de B., & Guilherme, L. R. G. (2023). KI Increases Tomato Fruit Quality and Water Deficit Tolerance by Improving Antioxidant Enzyme Activity and Amino Acid Accumulation: A Priming Effect or Relief during Stress? *Plants*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/plants12234023>
- Liu, Y., Huang, S., Jiang, Z., Wang, Y., & Zhang, Z. (2021). Selenium Biofortification Modulates Plant Growth, Microelement and Heavy Metal Concentrations, Selenium Uptake, and Accumulation in Black-Grained Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.748523>
- Lončarić, Z., Varga, I., Nemet, F., Perić, K., Jović, J., Zebec, V., Ivezić, V., Iljkić, D., Galić, L., & Sudarić, A. (2024). Efficiency of biofortification with Zn and Se in soybean: yield and overall mineral content in plant. *Applied Sciences*, 14. <https://doi.org/10.3390/app142311349>
- Lowe, N. M. (2021). The global challenge of hidden hunger: Perspectives from the field. *Proceedings of the Nutrition Society*, 80(3), 283–289. <https://doi.org/10.1017/S0029665121000902>
- Mackowiak, C. L., & Amacher, M. C. (2008). Soil Sulfur Amendments Suppress Selenium Uptake by Alfalfa and Western Wheatgrass. *Journal of Environmental Quality*, 37(3), 772–779. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0157>
- Mageshen, V. R., Santhy, P., Latha, M. R., Meena, S., Aswitha, K., Anbarasan, S., Krithika, C., & Maimaran, G. (2023). Impact of Iodine Biofortification on Tomato Bioaccessibility through Cooking, Soaking and Simulated Digestion. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 43(2), 268–274. <https://doi.org/10.18805/ajdr-2132>
- Magor, E., Wilson, M. D., Wong, H., Cresswell, T., Sánchez-Palacios, J. T., Bell, R. W., & Penrose, B. (2023). Selected adjuvants increase the efficacy of foliar biofortification of iodine in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) grain. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1246945>
- Malathi, P., Keerthana, R., & Sellamuthu, K. M. (2024). Sources and Levels of Zinc Fertilization on Soil Zinc Availability and Zinc Uptake by Small Onion (*Allium cepa* L. var. aggregatum). *Asian Research Journal of Agriculture*, 17(4), 1032–1044. <https://doi.org/10.9734/arja/2024/v17i4617>
- Medrano-Macías, J., López Calzontzitz, M. G., Rivas Martínez, E. N., Narváez Ortiz, W. A., Benavides Mendoza, A., & Martínez Lagunes, P. (2021). Enhancement to salt stress tolerance in strawberry plants by iodine products application. *Agronomy*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy11030602>
- Mikkelsen, R. L., Page, A. L., & Bingham, F. T. (1989). Factors Affecting Selenium Accumulation by Agricultural Crops. In L. W. Jacobs (Ed.), *Selenium in Agriculture and the Environment* (pp. 65–94). Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- Mishra, G. P., Dikshit, H. K., Priti, Kukreja, B., Aski, M., Yadava, D. K., Sarker, A., & Kumar, S. (2022). Historical Overview of Biofortification in Crop Plants and Its Implications. In S. Kumar, H. K. Dikshit, G. P. Mishra, & A. Singh (Eds.), *Biofortification of Staple Crops* (1st ed., pp. 31–61). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3280-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3280-8_2)
- Mishra, M., Afzal, S., Yadav, R., Singh, N. K., & Zarbakhsh, S. (2025). Salinity stress amelioration through selenium and zinc oxide nanoparticles in rice. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12106-3>
- Mkambula, P., Birol, E., Friesen, V. M., Munyua, H. M., Alberts, D., Aytekin, D., Mudyahoto, B., Boy, E., & Mbuya, M. N. (2022). Transforming food systems to deliver nutritious foods: the vital roles of fortification and biofortification. GAIN Discussion Paper n°10 <https://doi.org/10.36072/dp.10>
- Molotoks, A., Smith, P., & Dawson, T. P. (2021). Impacts of land use, population, and climate change on global food security. *Food and Energy Security*, 10(1). <https://doi.org/10.1002/fes3.261>
- Morais, E. G. de, Silva, M. A., Quispe, A. P. V., Machado, G. G. L., Prado, D. T., Benevenute, P. A. N., Lima, J. de S., de Sousa, G. F., de Barros Vilas Boas, E. V., & Guilherme, L. R. G. (2024). Foliar sprays of multi-nutrient fertilizer containing selenium produce functional tomato fruits with higher shelf life. *Plants*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/plants13162288>

- Mousavi, S. R., Galavi, M., & Rezaei, M. (2013). Zinc (Zn) Importance for Crop Production-A Review. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(1), 64–68.
- Muñoz, F. F., Stoffel, M. M., Cécili, G., Trod, B. S., Daurelio, L. D., Bouzo, C. A., & Guevara, M. G. (2021). Improving the foliar biofortification of broccoli with selenium without commercial quality losses. *Crop Science*, 61(6), 4218–4228. <https://doi.org/10.1002/csc.2.20630>
- Muthayya, S., Rah, J. H., Sugimoto, J. D., Roos, F. F., Kraemer, K., & Black, R. E. (2013). The Global Hidden Hunger Indices and Maps: An Advocacy Tool for Action. *PLoS ONE*, 8(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067860>
- Nafady, N. A., & Elgharably, A. (2018). Mycorrhizal symbiosis and phosphorus fertilization effects on Zea mays growth and heavy metals uptake. *International Journal of Phytoremediation*, 20(9), 869–875. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1438358>
- Nahim-Granados, S., Oller, I., Malato, S., Sánchez Pérez, J. A., & Polo-Lopez, M. I. (2019). Commercial fertilizer as effective iron chelate (Fe<sup>3+</sup>-EDDHA) for wastewater disinfection under natural sunlight for reusing in irrigation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 253, 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.04.041>
- Narwal, B. R. P., Kumar, R., & Antil, R. S. (2010). Long-term effect of farmyard manure and N on the distribution of zinc and copper in soil fractions under pearl millet-wheat cropping system. *19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*.
- Narwal, S., Kumar, D., Kharub, A. S., & Verma, R. P. S. (2020). Barley biofortification: present status and future prospects. *Wheat and Barley Grain Biofortification*, 11, 275–294. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818444-8.00011-0>
- Natasha, Shahid, M., Niazi, N. K., Khalid, S., Murtaza, B., Bibi, I., & Rashid, M. I. (2018). A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health. *Environmental Pollution*, 34(234), 915–934. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.019>
- Nazaries, L., Pan, Y., Bodrossy, L., Baggs, E. M., Millard, P., Murrell, J. C., & Singh, B. K. (2013). Evidence of microbial regulation of biogeochemical cycles from a study on methane flux and land use change. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(13), 4031–4040. <https://doi.org/10.1128/AEM.00095-13>
- Newman, R. G., Moon, Y., Sams, C. E., Tou, J. C., & Waterland, N. L. (2021). Biofortification of Sodium Selenate Improves Dietary Mineral Contents and Antioxidant Capacity of Culinary Herb Microgreens. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.716437>
- Nicolescu, A., Babotă, M., Barros, L., Rocchetti, G., Lucini, L., Tanase, C., Mocan, A., Bunea, C. I., & Crișan, G. (2023). Bioaccessibility and bioactive potential of different phytochemical classes from nutraceuticals and functional foods. *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1184535>
- Nie, Z., Zhu, J., Li, J., Liu, H., Zhao, P., Gao, W., Qin, S., Li, C., Zhang, W., & Sui, F. (2020). Phosphorus application alters concentrations and proportions of organic Se forms in the grain of winter wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(3), 282–291. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900045>
- Ofori, K. F., Antonello, S., English, M. M., & Aryee, A. N. A. (2022). Improving nutrition through biofortification—A systematic review. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1043655>
- Oh, S., Cave, G., & Lu, C. (2021). Vitamin B12 (Cobalamin) and Micronutrient Fortification in Food Crops Using Nanoparticle Technology. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.668819>
- Oliveira, V. de S., Marchiori, J. J. de P., Ferreira, L. de S., Boone, G. T. F., Pereira, L. L. dos S., Carriço, E., & Bolsoni, E. Z. (2023). The Nutrient Zinc in Soil and Plant: A Review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(4), 25–30. <https://doi.org/10.9734/ijps/2023/v35i42794>
- OMS. (2023). *Aceleración de las actividades para prevenir las carencias de micronutrientes y sus consecuencias, incluida la espina bífida y otros defectos del tubo neural, mediante un enriquecimiento seguro y eficaz de los alimentos*. Organización Mundial de la Salud.
- Organización de las Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Población. (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of results* (UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9).
- Ova, E. A., Kutman, U. B., Ozturk, L., & Cakmak, I. (2015). High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. *Plant and Soil*, 393(1–2), 147–162. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2483-8>
- Oztekin, Y., & Buyuktuncer, Z. (2024). Agronomic Biofortification of Plants with Iodine and Selenium: A Potential Solution for Iodine and Selenium Deficiencies. *Biological Trace Element Research*, 203, 2899–2910. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04346-7>
- Padovani, R. M., Amaya-Farfán, J., Antonio, F., Colugnati, B., Martins, S., & Domene, Á. (2006). Dietary reference intakes: application of tables in nutritional studies. In *Rev. Nutr* (Vol. 19, Number 6).
- Pal, V., Singh, G., & Dhaliwal, S. S. (2021). A New Approach in Agronomic Biofortification for Improving Zinc and Iron Content in Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Grain with Simultaneous Foliar Application of Zinc Sulphate, Ferrous Sulphate and Urea. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 883–896. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00408-0>
- Pannico, A., El-Nakhel, C., Graziani, G., Kyriacou, M. C., Giordano, M., Soteriou, G. A., Zarrelli, A., Ritieni, A., De Pascale, S., & Roupael, Y. (2020). Selenium biofortification impacts the nutritive value, polyphenolic content, and bioactive constitution of variable microgreens genotypes. *Antioxidants*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/antiox9040272>
- Panzeri, C., Pecoraro, L., Dianin, A., Sboarina, A., Arnone, O. C., Piacentini, G., & Pietrobello, A. (2024). Potential Micronutrient Deficiencies in the First 1000 Days of Life: The Pediatrician on the Side of the Weakest. *Current Obesity Reports*, 13(2), 338–351. <https://doi.org/10.1007/s13679-024-00554-3>
- Phattarakul, N., Rerkasem, B., Li, L. J., Wu, L. H., Zou, C. Q., Ram, H., Sohu, V. S., Kang, B. S., Surek, H., Kalayci, M., Yazici, A., Zhang, F. S., & Cakmak, I. (2012). Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. *Plant and Soil*, 367(1–2), 131–141. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1211-x>
- Pilon-Smits, E. A. H. (2019). On the ecology of selenium accumulation in plants. *Plants*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/plants8070197>
- Prom-u-thai, C., Rashid, A., Ram, H., Zou, C., Guilherme, L. R. G., Corguinha, A. P. B., Guo, S., Kaur, C., Naeem, A., Yamuangmorn, S., Ashraf, M. Y., Sohu, V. S., Zhang, Y., Martins, F. A. D., Jumrus, S., Tutas, Y., Yazici, M. A., & Cakmak, I. (2020). Simultaneous Biofortification of Rice With Zinc, Iodine, Iron and Selenium Through Foliar Treatment of a Micronutrient Cocktail in Five Countries. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.589835>
- Puccinelli, M., Malorgio, F., Incrocci, L., Rosellini, I., & Pezzarossa, B. (2021a). Effects of individual and simultaneous selenium and iodine biofortification of baby-leaf lettuce plants grown in two different hydroponic systems. *Horticulturae*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120590>
- Puccinelli, M., Pezzarossa, B., Pintimalli, L., & Malorgio, F. (2021b). Selenium Biofortification of Three Wild Species, *Rumex acetosa* L., *Plantago coronopus* L., and *Portulaca oleracea* L., Grown as Microgreens. *Agronomy*, 11(1155). [https://doi.org/10.3390/agronomy11\(1155\)](https://doi.org/10.3390/agronomy11(1155))
- Quispe, A. P. V., Morais, E. G. de, Benevenuto, P. A. N., Lima, J. de S., dos Santos, L. C., Silva, M. A., Chalfun-Júnior, A., Marchiori, P. E. R., & Guilherme, L. R. G. (2025). Priming effect with selenium and iodine on broccoli seedlings: Activation of biochemical mechanisms to mitigate cold damages. *Plant Physiology and Biochemistry*, 223, 109876. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109876>
- Raj, A. B., & Raj, S. K. (2019). Seed priming: An approach towards agricultural sustainability. *Journal of Applied and Natural Science*, 11(1), 227–234. <https://doi.org/10.31018/jans.v11i1.2010>

- Ram, S., Malik, V. K., Gupta, V., Narwal, S., Sirohi, M., Ankush, Pandey, V., Gupta, O. P., Misra, A. K., & Singh, G. (2024). Impact of foliar application of iron and zinc fertilizers on grain iron, zinc, and protein contents in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Nutrition*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1378937>
- Rasouli-Sadaghiani, M., Malakouti, M. J., Khavazi, K., & Miransari, M. (2014). Siderophore efficacy of fluorescent pseudomonades affecting labeled iron (59Fe) uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes differing in Fe efficiency. In M. Miransari (Ed.), *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses* (pp. 121–132). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0721-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0721-2_7)
- Ravello, R. A. V., de Oliveira, C., Lessa, J., Boas, L. V. V., de Castro, E. M., Guilherme, L. R. G., & Lopes, G. (2021). Selenium application influenced selenium biofortification and physiological traits in water-deficit common bean plants. *Crop and Pasture Science*, 73(2), 44–55. <https://doi.org/10.1071/CP20519>
- Reis, H. P. G., Barcelos, J. P. de Q., Junior, E. F., Santos, E. F., Silva, V. M., Moraes, M. F., Putti, F. F., & Reis, A. R. dos. (2018). Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality. *Journal of Cereal Science*, 79, 508–515. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.004>
- Rhaman, M. S., Rauf, F., Tania, S. S., & Khatun, M. (2020). Seed Priming Methods: Application in Field Crops and Future Perspectives. *Asian Journal of Research in Crop Science*, 8–19. <https://doi.org/10.9734/ajrcs/2020/v5i230091>
- Saha, S., Chakraborty, M., Padhan, D., Saha, B., Murmu, S., Batabyal, K., Seth, A., Hazra, G. C., Mandal, B., & Bell, R. W. (2017). Agronomic biofortification of zinc in rice: Influence of cultivars and zinc application methods on grain yield and zinc bioavailability. *Field Crops Research*, 210, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.023>
- Saltzman, A., Birol, E., Bouis, H. E., Boy, E., De Moura, F. F., Islam, Y., & Pfeiffer, W. H. (2013). Biofortification: Progress toward a more nourishing future. *Global Food Security*, 2(1), 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.12.003>
- Santos, L. C. dos, Martins, G. S., Benevenuto, P. A. N., de Sousa Lima, J., Santos, F. R. dos, Andrade, O. V. S., de Oliveira, I. P., Bispo, F. H. A., Botelho, L., Rabêlo, F. H. S., Marchiori, P. E. R., Guilherme, L. R. G., & Lopes, G. (2024). Soil application of selenium in wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress improves grain quality and reduces production losses. *Plants*, 13(24), 3460.
- Santos, J. A., Tekle, D., Rosewarne, E., Flexner, N., Cobb, L., Al-Jawaldeh, A., Kim, W. J., Breda, J., Whiting, S., Campbell, N., Neal, B., Webster, J., & Trieu, K. (2021). A Systematic Review of Salt Reduction Initiatives around the World: A Midterm Evaluation of Progress towards the 2025 Global Non-Communicable Diseases Salt Reduction Target. In *Advances in Nutrition* (Vol. 12, Number 5, pp. 1768–1780). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/advances/nmab008>
- Sarwar, M., Saleem, M. F., Anwar, A., Ahmad, H., Ali, B., Shahid, M., Hashem, A., Kumar, A., & Abd-Allah, E. F. (2025). Exogenous Zinc Alleviates Post-Anthesis Heat Stress by Improving the Defense Mechanism and Leaf Physiology of Bread Wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02516-7>
- Savarino, G., Corsello, A., & Corsello, G. (2021). Macronutrient balance and micronutrient amount through growth and development. *Italian Journal of Pediatrics*, 47(1). <https://doi.org/10.1186/s13052-021-01061-0>
- Schiavon, M., Nardi, S., dalla Vecchia, F., & Ertani, A. (2020). Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil*, 453(1–2), 245–270. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>
- Shahane, A. A., & Shivay, Y. S. (2022). Agronomic Biofortification of Crops: Current Research Status and Future Needs. *Indian Journal of Fertilisers*, 18(2), 164–179.
- Sharma, P., Dwivedi, S., & Singh, D. (2016). Global Poverty, Hunger, and Malnutrition: A Situational Analysis. In: Singh, U., Praharaj, C., Singh, S., Singh, N. (eds) *Biofortification of Food Crops*. Springer, New Delhi. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8_2)
- Sheoran, S., Kumar, S., Ramtekey, V., Kar, P., Meena, R. S., & Jangir, C. K. (2022). Current Status and Potential of Biofortification to Enhance Crop Nutritional Quality: An Overview. *Sustainability (Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/su14063301>
- Shivay, Y. S., & Prasad, R. (2016). Agronomic interventions for micronutrient biofortification of pulses. *Indian Journal of Agronomy*, 61(4), 161–172.
- Somma, A., Palmitessa, O. D., Conversa, G., Serio, F., & Santamaria, P. (2024). Localized foliar application of iodine on tomato: An effective approach for targeted agronomic biofortification. *Scientia Horticulturae*, 327. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112807>
- Sow, S., & Ranjan, S. (2021). A Review on Agronomic Biofortification for Improving Food and Nutritional Security. *Research Biotech*, 3(2), 139. <https://doi.org/10.54083/resbio/3.2.2021.139-144>
- Stevens, G. A., Beal, T., N Mbuya, M. N., Luo, H., & Neufeld, L. M. (2022). Micronutrient deficiencies among preschool-aged children and women of reproductive age worldwide: a pooled analysis of individual-level data from population-representative surveys. *Lancet Glob Health*, 10, e1590–e1599.
- Subramanyam, K., Laing, G. Du, & Van Damme, E. J. M. (2019). Sodium selenate treatment using a combination of seed priming and foliar spray alleviates salinity stress in rice. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00116>
- Suganya, A., Saravanan, A., Baskar, M., Pandiayarajan, P., & Kavimani, R. (2020). Agronomic biofortification of maize (*Zea mays* L.) with zinc by using of graded levels of zinc in combination with zinc solubilizing bacteria and Arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Nutrition*, 44(7), 988–994. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1845383>
- Sundaria, N., Singh, M., Upreti, P., Chauhan, R. P., Jaiswal, J. P., & Kumar, A. (2019). Seed Priming with Iron Oxide Nanoparticles Triggers Iron Acquisition and Biofortification in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Grains. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(1), 122–131. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9818-7>
- Szerement, J., Szatanik-Kloc, A., Mokrzycki, J., & Mierzwa-Hersztek, M. (2022). Agronomic Biofortification with Se, Zn, and Fe: An Effective Strategy to Enhance Crop Nutritional Quality and Stress Defense—A Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 1129–1159. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00719-2>
- Takkar, P. N., & Collin, D. W. (1993). The distribution and correction of Zn deficiency. In A. D. Robson (Ed.), *Zinc in Soils and Plants*. Kluwer Academic Publishers.
- Tam, E., Keats, E. C., Rind, F., Das, J. K., & Bhutta, Z. A. (2020). Micronutrient supplementation and fortification interventions on health and development outcomes among children under-five in low- and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *Nutrients*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/nu12020289>
- Tavanti, T. R., Melo, A. A. R. de, Moreira, L. D. K., Sanchez, D. E. J., Silva, R. dos S., Silva, R. M. da, & Reis, A. R. dos. (2021). Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 160, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040>
- Teklu, D., Gashu, D., Joy, E. J. M., Amede, T., & Broadley, M. R. (2023a). Effectiveness of Agronomic Biofortification Strategy in Fighting against Hidden Hunger. *Agronomy*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy13082173>
- Teklu, D., Gashu, D., Joy, E. J. M., Lark, R. M., Bailey, E. H., Wilson, L., Amede, T., & Broadley, M. R. (2023b). Impact of zinc and iron agronomic biofortification on grain mineral concentration of finger millet varieties as affected by location and slope. *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1159833>
- Terrin, G., Canani, R. B., Di Chiara, M., Pietravalle, A., Aleandri, V., Conte, F., & De Curtis, M. (2015). Zinc in early life: A key element in the fetus and preterm neonate. *Nutrients*, 7(12), 10427–10446. <https://doi.org/10.3390/nu7125542>
- Terry, N., Zayed, A. M., De Souza, M. P., & Tarun, A. S. (2000). Selenium in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 51, 401–433.

- Umesha, S., Manukumar, H. M. G., & Chandrasekhar, B. (2018). Sustainable Agriculture and Food Security. In R. L. Singh & S. Mondal (Eds.), *Biotechnology for Sustainable Agriculture* (pp. 67–92). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812160-3.00003-9>
- Vega-Ravello, R., Romero-Poma, M. B., de Oliveira, C., Guilherme, L. R. G., & Lopes, G. (2023). Soil Selenium Addition for Producing Se-Rich Quinoa and Alleviating Water Deficit on the Peruvian Coast. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 238–250. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01004-6>
- Velu, G., Ortiz-Monasterio, I., Cakmak, I., Hao, Y., & Singh, R. P. (2014). Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *Journal of Cereal Science*, 59(3), 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.09.001>
- Verma, S., Chakdar, H., Kumar, M., Varma, A., & Saxena, A. K. (2021). Microorganisms as a Sustainable Alternative to Traditional Biofortification of Iron and Zinc: Status and Prospect to Combat Hidden Hunger. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 1700–1717. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00473-5>
- Vetési, V., Záray, G., Endrédi, A., Sandil, S., Rékási, M., Takács, T., & Dobosy, P. (2022). Iodine biofortification of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) plants cultivated in three different soils. *PLoS ONE*, 17(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275589>
- Wang, S., Xu, L., & Hao, M. (2022). Impacts of Long-Term Micronutrient Fertilizer Application on Soil Properties and Micronutrient Availability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph192316358>
- Watts-Williams, S. J., Patti, A. F., & Cavagnaro, T. R. (2013). Arbuscular mycorrhizas are beneficial under both deficient and toxic soil zinc conditions. *Plant and Soil*, 371(1–2), 299–312. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1670-8>
- Weffort, V. R. S., & Lamounier, J. A. (2024). Hidden hunger – a narrative review. *Jornal de Pediatria*, 100, S10–S17. <https://doi.org/10.1016/j.jped.2023.08.009>
- White, P. J. (2018). Selenium metabolism in plants. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, 1862(11), 2333–2342. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.05.006>
- Wójcik, P. (2024). Responses of 'Burlat' Sweet Cherry Trees to Selenium Fertilisation under Low Soil Selenium Conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 8343–8352. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02119-8>
- World Health Organization (WHO), & Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2005). *Vitamin and mineral requirements in human nutrition*. World Health Organization.
- Xie, X., Hu, W., Fan, X., Chen, H., & Tang, M. (2019). Interactions Between Phosphorus, Zinc, and Iron Homeostasis in Nonmycorrhizal and Mycorrhizal Plants. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01172>
- Yasin, M., El-Mehdawi, A. F., Anwar, A., Pilon-Smits, E. A. H., & Faisal, M. (2015). Microbial-enhanced Selenium and Iron Biofortification of Wheat (*Triticum aestivum* L.) - Applications in Phytoremediation and Biofortification. *International Journal of Phytoremediation*, 17(4), 341–347. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.922920>
- Zevallos, S., Salas, E., Gutierrez, P., Burgos, G., De Boeck, B., Mendes, T., Campos, H., & Lindqvist-Kreuzer, H. (2024). Foliar Zn Application Increases Zn Content in Biofortified Potato. *Agriculture*, 14(12), 2186. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122186>
- Zhang, Y., Cao, H., Wang, M., Zou, Z., Zhou, P., Wang, X., & Jin, J. (2023). A review of iodine in plants with biofortification: Uptake, accumulation, transportation, function, and toxicity. *Science of the Total Environment*, 878. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163203>
- Zhao, X. Q., Mitani, N., Yamaji, N., Shen, R. F., & Ma, J. F. (2010). Involvement of silicon influx transporter OsNIP2;1 in selenite uptake in rice. *Plant Physiology*, 153(4), 1871–1877. <https://doi.org/10.1104/pp.110.157867>
- Zhou, X., Yang, J., Kronzucker, H. J., & Shi, W. (2020). Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.586421>
- Zia, M. H., Ahmed, I., Bailey, E. H., Lark, R. M., Young, S. D., Lowe, N. M., Joy, E. J. M., Wilson, L., Zaman, M., & Broadley, M. R. (2020). Site-Specific Factors Influence the Field Performance of a Zn-Biofortified Wheat Variety. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00135>
- Zou, C. Q., Zhang, Y. Q., Rashid, A., Ram, H., Savasli, E., Arisoy, R. Z., Ortiz-Monasterio, I., Simunji, S., Wang, Z. H., Sohu, V., Hassan, M., Kaya, Y., Onder, O., Lungu, O., Mujahid, M. Y., Joshi, A. K., Zelenskiy, Y., Zhang, F. S., & Cakmak, I. (2012). Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. *Plant and Soil*, 361(1–2), 119–130. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1369-2>
- Zulfikar, U., Hussain, S., Maqsood, M., Zamir, S. I., Ishfaq, M., Ali, N., Ahmad, M., & Maqsood, M. F. (2022). Enhancing the accumulation and bioavailability of iron in rice grains via agronomic interventions. *Crop and Pasture Science*, 73(2), 32–43. <https://doi.org/10.1071/CP21140>