Actualización sobre el contenido de hierro, zinc y selenio en el grano de trigo.

Iron, Zinc and Selenium in wheat grain: A review

Garcia, Pilar Teresa

Foro de la Alimentación, la Nutrición y la salud de la Bolsa de Cereales. (FANUS)

* Correspondencia: pitegarcia@yahoo.com

Resumen

La deficiencia en micronutrientes, conocida como "hambre oculta" afecta a billones de personas, tanto en países en desarrollo como en los países desarrollados. Para superar la malnutrición se emplean diversas estrategias para desarrollar cultivares de trigo con mayores concentraciones en Fe (hierro), Zn (zinc) y Se (selenio). La biofortificacion con micronutrientes de los cultivos básicos se considera como una herramienta útil para combatir las deficiencias de ellos. Esta alternativa busca incrementar el contenido de nutrientes mediante técnicas de fertilización, fitomejoramiento tradicional o fitomejoramiento asistido con biotecnología. Para que un programa de biofortificacion tenga éxito no debería afectar el rendimiento, debe demostrar su eficacia para disminuir una determinada deficiencia y debe ser aceptado por productores y consumidores. Debe tener en cuenta las características agroecológicas y tener como objetivo los requerimientos dietarios de los humanos.

Abstract

Micronutrient deficiency, also known as "hidden hunger" is a serious problem for billons of persons in developed and non-developed countries. To overcome malnutrition several strategies are used to obtain wheat cultivars with more content of bioavailable Fe, Zn and Se in the grain. Biofortification is the process of increasing the content and bioavailability of essential vitamins and minerals in staple crops, through breeding or agronomic practices, to improve nutritional status. With micronutrient malnutrition, or hidden hunger, continuing to affect nearly one-third of the world`s population, biofortification is a promising and sustainable agriculture-based strategy to target mineral deficiencies. The biofortification used should be sensitive to agroecological and soil particularities, human dietary requirements but with no negative effects on the quality and quantity of the crops.

Introducción

La deficiencia en microelementos, minerales y vitaminas, constituye en la actualidad un problema que afecta a billones de personas (Knez y Graham, 2013; Sami UL-Allh, 2018; Wells y Graham, 2004). La deficiencia de hierro (Fe) alcanza a casi 1,6 billones y la de zinc (Zn) a casi 1/3 de la población mundial. Estas deficiencias llevan a una variedad de problemas asociados a la salud humana. El Zn es el número 11 y el Fe el número 6 entre las mayores deficiencias. Mundialmente 43% de niños y 29% de mujeres en la edad reproductiva tienen anemia y la mitad de los casos se debe a deficiencia de Fe (WHO 2015) y la deficiencia de Zn afecta a 155 millones de niños (WHO 2013). Estas deficiencias afectan también a países desarrollados. En el Reino Unido la mitad de las adolescentes y un cuarto de las mujeres adultas tienen un LRNI menor a lo aconsejado (Roberts et al., 2018). La vida y salud humana y animal exigen 22 elementos esenciales: C, H, O, N, Na, P, K, Ca, S y Cl y microelementos que están en trazas (Mg, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Se, Mo, I, Zn y Cu) que son requeridos en muy pequeñas concentraciones ya que cantidades excesivas pueden ser toxicas (Kopittke et al., 2017).

Los cereales, naturalmente pobres en Fe, Zn y Se, son, sin embargo, una fuente significativa de dichos nutrientes en países donde el consumo de cereales es importante. Ello ha motivado numerosos estudios

internacionales que están desarrollando diversas estrategias para incrementar sus concentraciones, muy especialmente en el endosperma amiláceo que conforma la semilla y contiene las reservas para el desarrollo del embrión. Las concentraciones de Fe, Zn y Se varían en su contenido, según la variedad particular del alimento y las condiciones climáticas y agronómicas en las que se produce, comercializa, almacena y prepara, que, sumados a las características del suelo, definen las concentraciones de dichos nutrientes.

La denominada "Green Revolution" exitosa en el incremento de la producción de granos ha contribuido, sin embargo, a disminuir el aporte de Fe y Zn en el grano de trigo por un efecto de dilución y ello se atribuye a una falta de reconocimiento de la importancia de los mismos, al empleo de variedades de alto rendimiento, al riego en gran escala y al uso de una gran fertilización con macronutrientes (Grassini et al., 2016; Curtis y Halford 2014).

2. Ubicación en el grano del hierro, zinc y selenio

El grano de trigo está conformado básicamente por el pericarpio, el endosperma y embrión. El endosperma está compuesto por la capa de aleurona más externa, endosperma corneo vitro y amiláceo. Es en la capa de aleurona del grano maduro, donde se encuentran las concentraciones mayores de Fe y Zn en conjunción con compuestos como el ácido fítico, polifenoles y fibras que inhiben su biodisponibilidad (Beasley et al., 2019). El Fe se encuentra preferentemente en la capa aleurona y el Zn en el embrión. La significancia biológica de esas diferencias en ubicación no es todavía conocida (Balk et al., 2019). Estudios recientes han determinado la distribución del Fe en granos de Triticum aestivum por medio de técnicas que usan "Synchrotron X-ray fluorescence" (De Brier et al., 2016). Consecuentemente la remoción la capa aleurona y el germen hace que la harina tenga valores menores de Fe y Zn. Si en el grano entero tenemos por ejemplo 28,2 mg/kg de Fe y 28,6 mg/kg de Zn, en la harina tenemos 6,7 mg/kg de Fe y 8,4 mg/kg de Zn (Tang et al., 2008).

3. Factores que determinan la concentración en el grano

La concentración de Fe, Zn y Se en el grano de trigo depende de muchos factores inherentes al suelo, la temperatura, el clima, la variedad, el manejo, la aplicación de fertilizantes, etc. (Sherry et al., 2013; Zhao et al., 2009). El contenido del mineral en el suelo, la forma química del mismo que permita ser utilizada por la planta, el pH, el contenido de materia orgánica, las concentraciones de ácido fítico y polifenoles, el aporte de sustancias promotoras como el ácido ascórbico y ciertos probióticos, la actividad microbiana, etc. son los factores más relevantes que determinan el contenido de dichos minerales en el grano de trigo.

Las plantas difieren en su habilidad para para extraer cada nutriente del suelo. Granos con altos niveles de micronutrientes producen mejoras en las plantas cuando se siembran en suelos deficientes y esa ventaja inicial se traduce en mayores rendimientos. La baja concentración en el suelo de Zn y Se y la baja biodisponibilidad del Fe son factores que afectan el contenido en el grano. El 50% de los suelos dedicados a la producción de trigo son pobres en Zn y Se. La forma química en que se encuentra el mineral para que pueda ser utilizada por la planta. El pH del suelo muchas veces determina la forma química en la que están disponibles los nutrientes, no siendo la forma química asimilable por la planta y quedando retenido en el suelo. El agregado de materia orgánica afecta las características químicas, físicas y biológicas del suelo, muchas veces aumenta el contenido de vitaminas y minerales del cultivo, mejora la estructura física del suelo, haciendo crecer más la extensión de las raíces y aumenta el microbiota y la actividad de la fauna. La presencia de factores anti nutricionales, como los fitatos y algunos polifenoles, que reducen la absorción del Fe y del Zn. Estas sustancias forman complejos, la mayoría insolubles, con cationes di o trivalentes que no se absorben durante la digestión intestinal. El ácido fítico es la reserva más importante de fosforo de la semilla. El fosforo es hidrolizado del fitato durante la germinación. Si el suelo es pobre en fosforo, bajar el fitato en semillas puede afectar el crecimiento de las semillas. Este efecto negativo se puede corregir aumentando los promotores de la biodisponibilidad aun en presencia de fitatos. Los fenoles y polifenoles, taninos hidrolizables o condensados y fenil propanoides, pueden unirse al Fe y Zn y disminuir su biodisponibilidad. Otros actuando como antioxidantes reducen la oxidación de Fe+++ a Fe++ aumentando su biodisponibilidad. La actividad microbiana que controla la disponibilidad al generar fitasas que liberan los minerales de los complejos con fitatos (Connorton et al.,

2017).

Actualmente se considera necesario detectar cultivares con bajos niveles de fitatos. Liu et al. (2006) encontraron en 86 genotipos de trigo una variación del 30% en los niveles de fitatos. Ficco et al. (2009) determinaron los contenidos de fitatos y microelementos en una colección de trigos italianos. Guttiere et al. (2004) identificaron y caracterizaron trigos con bajos niveles de ácido fítico. Joyce et al. (2005) estudiaron las concentraciones y distribución del ácido fítico y ciertos micronutrientes en el grano de trigo en variedades con bajas concentraciones del mismo. Sin embargo, Gomez Coronado et al., (2018) evaluaron, en las condiciones del clima mediterráneo, el potencial de 9 nuevos genotipos de trigo y encontraron que las diferencias en los contenidos de Fe y Zn en el grano dependían mayormente del cultivar y del ano. Dichos autores encontraron que si las concentraciones diarias requeridas son de 12,5 g mg de Fe y 13,5 mg de Zn el mejor cultivar proveería en 100g el 26,4 % de Fe y 35,9% de Zn de los requerimientos. Ahmad et al., 2013 destacan sin embargo el uso del ácido fítico como "marker" de diversos grupos genéticos de trigo.

4. Estrategias de biofortificacion

La magnitud de las deficiencias en micronutrientes ha generado, sobre todo en los países con suelos deficientes en estos minerales, traducidos en deficiencias en sus poblaciones, el desarrollo de diversas estrategias basadas en las biofortificaciones agronómicas y genéticas. La fertilización foliar ha sido bastante exitosa en el caso del Zn, pero no tanto en el caso del Fe (Filkelstein et al., 2017; Zhang et al., 2010). La fertilización con Se del suelo ha sido muy exitosa en países como Finlandia. Los estudios realizados en diversos países, con un gran consumo de trigo, indican que los valores actuales de Fe, Zn y Se en el grano de trigo están por debajo de los valores recomendados (Cakmak et al., 2018: Aslam et al., 2018).

La biofortificacion puede ser agronómica o genética (convencional con cruzamientos y modificaciones génicas). Aplicaciones foliares de Zn como ZnSO4 aumentan un 60% el contenido total del grano de trigo (Cakmak et al., 2018). En el caso del Fe no resulta tan fácil y solo se puede incrementar si se lo combina con fertilización con N2 (Aciksoz et al., 2011) lo cual puede ser económica o ambientalmente no aceptable. Numerosos programas implementados por el Internacional Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) no pudieron sin embargo desarrollar líneas de trigo con altas concentraciones de Fe (Bouis et al., 2017). El progreso de las estrategias transgénicas está asociadas a un mayor conocimiento de cómo las plantas toman y distribuyen los micronutrientes, principalmente a través de la identificación de genes para el transporte de minerales y la biosíntesis de "orgánic metal chelators". Este conocimiento explotado por la biotecnología demuestra que es posible incrementar Fe y Zn no solo en todo el grano sino también en el endosperma, demostrando que no hay razones biológicas para que el Fe y en Zn no puedan depositarse en el endosperma amiláceo (Borril et al., 2014; Kenzhebayeva et al., 2019).

5. Zinc

Zn es uno de los microelementos más importantes en el cuerpo humano con un promedio entre 1,4 a 2,3 g (Calesnick y Dinan, 1988). Cumple importantes funciones fisiológicas en los sistemas biológicos e interactúa con muchas enzimas y otras proteínas. Un 10% de las todas las proteínas del cuerpo humano son Zn-dependientes (Krezel y Marat, 2016). El RDA sugerido por el International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG) varía entre 9 y 19 mg/día para adultos que consuman una dieta basada en cereales no refinados, dependiendo de estados especiales como el embarazo y la lactación (Brown et al., 2004). Por ejemplo, un individuo que consume 400 g harina diariamente, consume solo 3,2 mg de Zn. Hay una muy alta asociación entre deficiencia del Zn en el suelo y deficiencia en humanos (Alloway, 2009; Cakman et al., 2018).

El Zn se localiza en la capa de aleurona y en el embrión. En el endosperma puede haber 10 mg por kilo y en el embrión y capa de aleurona más de 100 mg (Ozturk et al., 2006). En una harina blanca puede haber solo 5-10 mg de Zn por kilo (Peterson et al.,1983). Las concentraciones de Zn en el grano varían generalmente entre 20 a 35 mg/kg-1 con valores promedio de 28-30mg/kg-1. En suelos pobres en Zn puede ser menor a 20mg/kg-1. En Australia y Turquía el grano puede tener menos de 10mg/kg-1 pero si se lo fertiliza con Zn puede llegar a 20mg/kg-1. El objetivo final deseado es producir trigo con 40-50 mg/kg-1 (Cakmak et al., 2010). Otros estudios indican valores en el grano de trigo entre 7 a 85mg/kg con valores en distintas partes

del grano, pero muy escasos en el endosperma, y aconsejan la necesidad de llegar a valores adecuados, de 8 y 30 mg/kg en el mismo (Cakmak, et al., 2018). El CIMMYT ha conseguido desarrollar líneas con 20-40 % más de Zn en India y Pakistan (Velu et al., 2014 y 2018). Cultivares primitivos o salvajes pueden tener 2 o tres veces más de Zn (Graham et al.,1992; Grassini et al., 2016). El 50% de los suelos destinados al cultivo de trigo son pobres en Zn disponible. La disponibilidad del Zn en las raíces es muy baja en suelos alcalinos y ello ocurre globalmente en un 30% de las áreas sembradas (Alloway, 2009). Las concentraciones de Zn disminuyen 30 veces por cada unidad de aumento del pH del suelo entre 5 y 7 (Marschner, 1993). A pH mayores a 8 el Zn se une a óxidos de hierro y calcitas disminuyendo así la disponibilidad del Zn en las raíces. A demás el contenido de humedad del suelo y el contenido de materia orgánica limitan la cantidad de Zn soluble especialmente en el ambiente que rodea a las raíces. Estas características son comunes en áreas destinadas a la producción de Zn (Rengel, 2015). Es interesante considerar que la deficiencia Zn en el trigo ocurre a menudo cuando la humedad del suelo es limitada e irregular como ocurre por ejemplo en Australia y en ciertos países asiáticos (Graham et al, 1992; Bagci et al. 2007; Huang et al. 2019). La reducción del contenido en fitatos aumenta la biodisponibilidad del Zn (Gibson et al., 2010). El fitato se localiza en principalmente en el embrión y la capa aleurona y casi nada en el endosperma lo que indica que, si aumentamos Zn en el endosperma, este será potencialmente más biodisponible. El Zn llega al grano absorbido continuamente del suelo por las raíces y traslocado al grano, o, depositado en hojas y tejidos vegetativos y luego para ser translocado en el grano durante el estado reproductivo. La relativa contribución de esos dos factores a la acumulación de Zn en el grano es función de factores que dependen de las plantas y del suelo. Estos factores incluyen disponibilidad de Zn y agua disponible durante el llenado del grano, longitud del llenado del grano y del estado nutricional de la planta. Para la biofortificacion de cereales con Zn es crítico mantener una cantidad adecuada de Zn en el suelo o una gran disponibilidad de Zn disponible en los órganos vegetativos durante el llenado del grano. El proyecto Harvest Zinc realizo diversos experimentos durante 7-8 años en 12 países con trigo, arroz y maíz con diversas aplicaciones en suelo y foliar y el trigo tuvo una buena respuesta a la fertilización con Zn. Aplicaciones en el suelo fueron efectivas en varias situaciones agroecológicas, variedad Triticum durum L. 60 a 250% y variedad Triticum aestivum L. 20 a 90%, siendo las aplicaciones foliares aún más eficientes. Tanto la aplicación como el momento de la aplicación foliar son muy importante. En el momento de la floración se detectaron mas Zn en el endosperma del grano. Los resultados actuales sugieren que tanto la entrada de Zn como la removilizacion son importantes para determinar la concentración en el grano. Los mecanismos genéticos y moleculares que controlan la translación de las hojas al grano son aún poco conocidos. La biofortificacion foliar con Zn también aumenta la concentración del Fe. Magallanes et al. (2017) estudiaron la variabilidad en el contenido de Zn y ácido fítico en 46 variedades de cultivares de Triticum durum L. y los efectos de una irrigación reducida. Los valores de Zn oscilaron entre 24,8 – 48,8 mg/kg y los porcentajes de fitatos entre 0,462-0,952 % y la relación molar fitatos/Zn oscilo entre 16,9-23,6. Ficco et al. (2009) estudiando 84 cultivares de trigo durum italiano encontraron valores para Zn de 28,5 a 46,3mg /kg y para el fosforo inorgánico de 0,46 a 0,76 mg/kg. Hui Liu et al. (2014) en 655 muestras de trigo obtuvieron para el Zn 30,4 mg/kg-1 en primavera y 30,3/kg-1 en invierno. Fe y Zn estuvieron positivamente correlacionados entre sí, pero negativamente con el rendimiento. Valores de 88- 87% para Fe y Zn respectivamente fueron inadecuados respecto al nivel de Zn deseado. En España y Portugal el 10% de la población es deficiente en Zn, y considerando que las RDI en Europa son de 15mg/Zn día, el 56% de población consume menos de los dos tercios recomendados del RDI (Gomez-Coronado et al., 2018). En suelos con baja disponibilidad de Zn, la mejor estrategia para aumentar las concentraciones en el grano parece ser seleccionar los cultivares más eficientes en acumular Zn con el agregado de aplicaciones de Zn en suelo y en forma foliar.

6. Hierro

El cuerpo humano contiene 3-5 g de Fe y la mayoría (60-70%) se encuentra en las células rojas de la hemoglobina. El RDI recomendado es de 10mg Fe/día para la mujer y15mgFe/día para hombres entre 25-50 años (FAO 2017).

En el suelo tenemos Fe+++ y Fe++ pero las plantas toman preferentemente Fe++ y para ello deben reducir Fe+++ a Fe++ a través de la enzima reductasa situada en la membrana plasmática de la raíz. Esta enzima

alcanza su máxima actividad a pH 4-5. Temperaturas extremas, mayores o menores de 25°C, pH mayores de 7,5 disminuyen el desarrollo radicular y provocan una reducción de la capacidad de absorción del Fe por la planta. Elevadas concentraciones de macro y micro nutrientes así como metales pesados también afectan su actividad. La solubilidad del Fe en condiciones aeróbicas y con pH neutros y alcalinos precipita en formas insolubles mientras que a pH ácidos y condiciones reductoras la concentración del Fe será mayor. La solubilidad del Fe en el suelo depende de la materia orgánica. La asociación del Fe con los agentes quelantes de la materia orgánica da lugar a la formación de complejos que incrementan notablemente su concentración y la movilidad de este nutriente en la disolución de suelo. En los suelos calizos el pH esta entre 7,5 y 8,5 y por lo tanto la solubilidad del Fe es muy baja. Ficco et al. (2009) estudiando 84 cultivares de trigo durum italiano dan valores para Fe de 33,6 a 65,5 mg /kg-1 y para el P inorgánico de 0,46 a 0,76 mg/kg-1. Magallanes et al. (2017) estudiaron la variabilidad en el contenido de Fe y ácido fítico en 46 variedades de cultivares de trigo durum en un sistema con una reducida irrigación. Los valores de Fe oscilaron entre 25,5 – 40,05 mg/kg-1 y los de fitatos entre 0,462-0,952 % y la relación molar fitatos/Fe fue 12,1-29,6. Hui Liu et al. (2014) en 655 cultivares de trigo obtuvieron para el Fe 48,2 mg/kg-1 en primavera y rendimiento. 63% y 72% respectivamente fueron inadecuados respecto del valor recomendado. Shahzad et al. (2014), encontraron que La concentración de Fe en el grano de trigo entero fue de 29-73mg/kg y el 75% se encuentra en distintas partes del grano, pero no en el endosperma.

(Kenzhebayera et al., (2019) con un contenido de Fe en el grano de trigo de 40,9 a 89.0 mg/kg y una variación en las relaciones molares ácido fítico/Fe de 1,40 a 5,32 observaron que, si bien la biodisponibilidad del Fe es muy baja, alrededor del 5%, la disminución del contenido de fitatos puede aumentar la misma 4 veces. Gupta et al. (2015) monitorearon en germoplasma de trigos la relación entre los contenidos de Fe y de ácido fítico. Gomez Coronado et al. (2018) en 9 variedades de trigo en condiciones mediterráneas encontraron que el contenido de Fe en el grano fue afectado solo por la variedad más que por el clima, con un rango de Fe entre 29-37mg/kg. Un radio molar fitato/Fe inferior a 10 indica una buena biodisponibilidad del Fe (Engle et al. 2005).

7. Selenio

El organismo requiere solo trazas de selenio, pero este es un componente básico de nuestra dieta. Es un componente estructural de las seleno-proteínas y enzimático en la producción de la hormona tiroidea, donde actúa como antioxidante y catalizador. Evita el desarrollo de la virulencia e inhibe el crecimiento de HIV y es requerido por el sistema inmune, movimiento del esperma y disminuye las posibilidades de abortos. Participa en la producción de enzimas antioxidantes. Es parte esencial del metabolismo humano a través de las seleno proteínas.

Su relación con la CVD y el cáncer es motivo de numerosos estudios (Li, HF et al. 2008). Existe un estrecho margen entre toxicidad, esencialidad y deficiencia y ello es de gran importancia por sus efectos en la salud humana (Fordyce, 2006). Las recomendaciones en el Reino Unido son entre 60 y 75 ug/día para hombres y mujeres. Sin embargo, la entrada de Se declino de 60ugSe/día en 1970 a 35ugSe/día en 1990 atribuyéndolo a menor Se en el suelo y otros factores. En el Reino Unido disminuyeron en el 2008 los niveles de Se en la población al dejar de importar trigo de EEUU, proveniente de suelos altos en Se. Aunque las concentraciones de Se en cereales son muy bajas, entre 10 y 550 ug Se/kg-1 según regiones, son una fuente importante de Se (Hawkeford y Zhao, 2007). Se del suelo está bajo control geológico y en algunos casos de la atmosfera (actividad volcánica). Como metal oscila en suelos entre 0,1-2,0 mg/kg y en zonas seleniferas puede llegar a 10mg/kg (Fordyce, 2006). Trigos europeos son muy bajos en Se, en muchos países no superan los 50mg Se/kg, pero en EEUU (400mgSe/kg) y Canadá (700mgSe/kg) los valores son mucho más altos. El Se en el suelo predomina como selenato en suelos bien aireados y alcalinos. Tanto como selenito o sulfato los transportadores lo toman como sulfato. Hay muchas variaciones en la acumulación de Se entre variedades y especies (Guerrero et al., 2014).

En 1970 la entrada de Se por parte de la población de Finlandia era de 0,025mg/kg y por ello en 1984 se implementó un programa suplementación de fertilizantes con Se en forma de selenato de sodio. Desde 1985 todos

los fertilizantes contienen 15mg Se/kg. Como efecto de ello se aumentó el contenido de Se en un 15% en cultivos, 6% en carne bovina, 2% en porcina y un 3% en leche. El consumo promedio de la población paso de 0,04mg Se/día a 0,08mg/Se día y las concentraciones en plasma aumentaron de 0,89umg Se/L a 1,40umg/SeL, valor que se considera un valor optimo (Alfthan et al., 2015).

UK, Australia y China han iniciado programas para evaluar los niveles de Se en sus cultivos y adecuar las dosis a aplicar (Hawkeford et al. 2007; Broadley et al., 2010; Riaz, et al., 2018). Aunque los cereales presentan bajas concentraciones de Se, 10-550 ug/kg-1, según región, presenta ventajas pues en el trigo esta como selenio-metionina (60%) que es la forma más biodisponible y en menor cantidad como Se-cisteína, Se-metil-selenio-cisteína, selenato y selenito (Hart et al 2010). En Portugal los valores de Se en grano de trigo son 34ug/kg-1 (Ventura et al., 2007). En sistemas hidropónicos se demostró que en bajas concentraciones el Se estimula el crecimiento, pero en altas concentraciones reduce la elongación de las raíces en el grano de trigo (Guerrero et al., 2014). El Se presente en el grano de trigo presenta ventajas pues en los procesos posteriores las transformaciones son mínimas (alrededor del 10%) y que está en formas de Se más biodisponibles (80% del total ingerido) en comparacion del Se presente en la carne y el pescado (Hart et al., 2011).

Conclusiones

La biofortificacion con micronutrientes de los cultivos básicos se considera como una herramienta útil para combatir las deficiencias de ellos (Asiam et al., 2018, Balk et al., 2019; Garcia et al.,2018). Esta alternativa busca incrementar el contenido de nutrientes mediante técnicas de fertilización, fitomejoramiento tradicional o fitomejoramiento asistido con biotecnología. Para que un programa de biofortificacion tenga éxito no debería afectar el rendimiento, debe demostrar su eficacia para disminuir una determinada deficiencia y debe ser aceptado por productores y consumidores. El uso de fertilizantes debe ir más allá de NPK incluyendo microelementos, pero en cada caso será diferente. No es posible, inclusive no es necesario, tener un fertilizante con una composición balanceada de los 14 nutrientes, debido a una gran variación en las características del suelo, las necesidades temporales de cada cultivo y la negativa interacción de los nutrientes. Debe tener en cuenta las características agroecológicas y tener como objetivo los requerimientos dietarios de los humanos.

"The right nutrient combination is use for the right crop and at the right place and time" (Dimkpa, CO y Bindraban, 2016)

8. Referencias bibliograficas

Aciksoz, SB, Yaziki, A, Ozturk, L. (2011) Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilisers. Plant and Soil 349:215-229.

Ahmad, I, Mohammad, F, Zeb, A, Noorka, IR. (2013) Determination and inheritance of phytic acid as marker in diverse genetic group of bread wheat. American Journal of Molecular Biology 3:158-164.

Alfthan, G, Eurola, M, Ekhim, P. et al. (2015) Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 31:142-147.

Alloway, BJ. (2009) Soil factors associated with zinc deficiency in crops and human. Environmental Geochemistry & Health 31: 537-548.

Aslam, MF, Ellis, PR, Berry SE et al. (2018) Enhancing mineral bioavailability from cereals: current strategies and future perspectives. Nutrition Bulletin 43:184-188.

Bagci, SA, Ekiz, H, Yilmaz, A, Cakmak, I. (2007) Effects of zinc deficiency and drought on grain yield of field-grown wheat cultivars in Central Anatolia. Journal of Agronomy & Crop Science 193:198-206.

Balk, J, Connorton, JM, Wan, Y, Lovegrove, A, Moore, KL, Uauy, C, Sharp, PA. (2019) Improving wheat as a source of iron and zinc for global nutrition. Nutrition Bulletin 44 :53-59.

Beasley, JT, Bonneau, JP, Sanchez-Palacios, JT, et al. (2019) Metabolic engineering of bread wheat improves

grain iron concentration and bioavailability. https://doi.org./10.1111/pbi.13074.

Borril, F, Connorton, JM, Balk, J, Miller, AJ, Sanders, D, UAUY, C. (2014) Biofortification of wheat grain with iron and zinc integrating novel genomic resources and knowledge from model crops. Frontiers in Plant Science 5: Article 53.

Bouis, HEI, Saltzman, A. (2017) Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from Harvest Plus, 2003 through 2016. Global Food Security 12: 49-58.

Broadley, MR, Alcock, JP, Alford, J, et al. (2010) Selenium biofortification of high yielding winter wheat by liquid or granular selenium fertilization. Plant Soil 332:5 -18.

Brown, KH, Hambidge, KM, Ranum, P. (2010) Zinc fortification of cereal flours current recommendations and research needs: Food and Nutrition Bulletin. 31: S72-S74)

Cakmak, I, Pfeiffer, WH, McClafferty, B. (2010) Biofortification of durum wheat with zinc and iron. Cereal Chemistry 87:10-20.

Cakmak, I, Kutman, UB. (2018) Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. European Journal of Soil Science 69:172-180.

Calesnick, B, Dinan, AM. (1988) Zinc deficiency and zinc toxicity. American Family Physician Journal 37:267-270.

Connorton, JM, Balk, J, Rodriguez-Celma, J. (2017) Iron transport in plants – a brief overview. Metallomics Journal 9:813-823.

Curtis, T, Halford, NG. (2014) Food security: The challenge of increasing wheat yield and the importance of not compromising food safety. Annals of Applied Biology 164:354-372.

De Brier, N, Gomand, SV, Donner, E, et al. (2016) Element distribution and iron speciation in mature wheat grains (Triticum aestivum L.) using synchrotron X-ray fluorescence near-edge structure (XANES) imaging. Plant Cell and Environment 39:1835-1847.

Dimkpa, CO, Bindraban, P. (2016) Fortification of micronutrients for efficient agronomic production. Agronomy for Sustainable Development 36:1-26.

Engle-Stone, R, Yeung, A, Welch, R, Glahn, R. (2005) Meat and ascorbic acid can promote Fe availability from phytate but not from Fe- tannic acid complexes. Journal of Agriculture and Food Chemistry 53: 10276-10284.

Ficco, DBM, Riefolo, C, Nicastro, G, et al. (2009) Phytate and mineral elements concentration in a collection of Italian durum wheat cultivars. Field Crops Research 111:235-242

Finkelstein, JL, Haas, JD, Mehta, S. (2017) Iron-biofortified staple food crops for improving iron status: a review of the current evidence. Current Opinion in Biotechnology 44:138-145.

Fordyce, F. (2006) Selenium deficiency and toxicity in the environment. Essentials Medical Geology 373-415.

Garcia-Oliveira, AL, Chander, S, Ortiz, R, Menkir, A, Gedi, M. (2018). Genetic basis and breeding perspectives of grain iron and zinc enrichment in cereals. Plant Science 9:937-943.

Gibson, RS, Bailey, KB, Gibbs, M, Ferguson, EL. (2010) A review of phytate, iron, zinc and calcium concentrations in plant-based foods used in low-income countries and implications for bioavailability. Food & Nutrition Bulletin 31: S134-S146.

Gomez Coronado, F, Almeida, A, Santamaria, O, Cakmak, I, Poblaciones, MJ. (2018) Potential of advance breeding lines of bread-making wheat to accumulate grain minerals (Ca, Fe, Mg and Zn) and low phytates under Mediterranean conditions. Journal of Agronomy and Crop Science 1-12.

Graham, RD, Ascher, JS, Hynes, SC. (1992) Selecting zinc-efficient cereal genotypes for soils of low zinc status. Plant and Soil 146:241-250.

Grassini, P, Eskridge, KM, Cassman, KG. (2016) Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. Nature Communications 4, 2918.

Guerrero, B, Llugani, M, Palacios, O, Valiente, M. (2014) Dual effects of different selenium species on wheat.

Plant Physiology and Biochemistry 83:300-307

Gupta, RK, Gangoliya, SS, Singh, NK. (2015) Screening and characterization of wheat germplasms for phytic acid and iron content. Journal of Agricultural Science and Technology 17:747-756.

Guttiere, M, Bowen, D, Dorch, JA, Raboy, V, Souza, E. (2004) Identification and characterization of a low phytic acid wheat. Crop Science 44: 418-424.

Hart, DJ, Fairweather-Tait, SJ, Broadley, MR, Dickinson, SJ et al. (2011) Selenium concentrations and speciation in biofortified flour and bread of selenium during grain biofortification, processing and production of Se-enriched food. Food Chemistry 126-1771-1778.

Hawkeford, MJ, Zhao, FJ. (2007) Strategies for increasing the Selenium content of wheat. Journal Cereal Science 46:282-292

Huang, T, Huang, Q, She, X, et al. (2019) Grain zinc concentration and the relation con soil nutrient availability in different wheat cropping regions of China. Soil and Tillage Research 191:57-65

Hui Liu, Wang ZH. (2014) Grain iron and zing concentrations of wheat and the relationships to yield in major wheat production areas in China. Field Crops Research 156:151-160.

Joyce, C, Deneau, A, Peterson, K, Ockenden, I, et al. (2005) The concentration and distribution of phytic acid phosphorus and other mineral micronutrients in wild-type and low phytic Js-12-LPA wheat grain. Canadian Journal of Botany 83:1599-1607.

Kenzhebayeva, S, Abekova, A, Atabayera, S, et al. (2019) Mutan lines of spring wheat with increased iron, zinc, and micronutrients in grains and enhanced bioavailability for human health. BioMed Research International: articIe D 9692053.

Knez, M, Graham, RD. (2013) The impact of micronutrient in agricultural soils and crops on the nutritional health of human deficiencies. O. Selinus et al. (eds) Essential of Medical Geology: Revised edition.

Kopittke, PM, Wang, P, Dalal, RC. (2017) Soil physicochemical properties impacting upon and animal and human health. In The nexus of soils, plants and human health (pp 64-71) Stuttgart. Germany: Catena-Schweizerbart.

Krezel, A, Marat, W. (2016). The biological inorganic chemistry of zinc ions. Archives of Biochemistry & Biophysics 611:3-29.

Li, HF, McGrath, SP, Zhao, FJ. (2008) Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenite or selenite. New Phytol Journal 178:92-102

Liu, ZH, Wang, HY, Wang, XE, Zhang, Chen, PD, Liu, DJ. (2006) Genotypic and spike positional difference in grain phytase activity, phytate, inorganic phosphorus, iron, and zinc contents in wheat (Triticum aestivum L). Journal Cereal Chemistry 44:212-219.

Magallanes-Lopez, AM, Hernandez-Espinosa, N., Velu, G, et al. (2017) Variability in iron, zinc and phytic acid content in a worldwide collection of commercial durum wheat cultivars and the effect of reduced irrigation on these traits. Food Chemistry 237:499-505.

Marschner, H. (1993) Zinc uptake from soils. In Zinc in Soils and Plants (Edited AD Robson pp 59-77).

Ozturk L, Yazici, MA, Yucel, C, Torum, A et al. (2006) Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. Physiologia Plantarum 128: 144-152.

Peterson, CJ, Johnson, VA, Mattern PJ. (1983). Evaluation of variation in mineral element concentrations in wheat flour and bran of different cultivars. Cereal Chemistry, 60:450-455.

Rengel, Z. (2015) Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. Journal of Soil Science & Plant Nutrition 15:397-409.

Riaz, A, Abbas, A, Huda, N-ul, Mubeen, H., Ibrahim, N. Raza, S. (2018) Methods to enhance Selenium in wheat through biofortificacion: A review. Journal Biotechnology & Biomaterials 8:282-284

Roberts, C, Steers, T, Maplethorpe, N, et al. (2018) National Diet and Nutrition Survey Results from Years 7 and

8 of the Rolling Programme 2014/2015-2015/2016. London: Public Health England and Food Standard Agency.

Sami UL-Allh. (2018) Combating hidden hunger in Agriculture Perspective. Deficiencies in Micronutrients. World Review of Nutrition and Dietetics 118:161-162.

Shahzad, Z, Rouached, H, Ralcha, A. (2014) Combating mineral malnutrition through iron and zinc biofortification of cereals. Comprehensive Reviews Food Science and Food Safety Doi 10.1111/1541-4337.12063.

Sharper, N, Hawkesford, M, Pironen, V. et al. (2013) Natural variation in grain composition of wheat and related cereals. Journal Agricultural and Food Chemistry 61:8295-8303.

Tang, J, Zou, C, Je, Z, et al. (2008) Mineral element distribution in milling fractions of Chinese wheats. Journal of Cereal Science 48: 821-828.

Velu, G, Ortiz-Monasterio, I, Cakmak, I, Hao, Y, Sing, RP. (2014) Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. Journal Cereal Chemistry 59. (3): 365-372.

Velu, G, Tutus, Y, Gomez- Becerra, HF, Hao, Y, Demir, L, Kara, R. (2018) QTL mapping for grain zinc and iron concentrations and zinc efficiency in a tetraploid and hexaploidy wheat mapping populations. Plant Soil 411,81-99.

Ventura, MG, Campo-Freitas, M. (2007) Selenium content in selected Portuguese Foods. European Food Res Technology 224:395-402.

Wells, RM, Graham, RD. (2004) Breeding for micronutrients in stable food crops from a human nutrition perspective. Journal Experimental Botany 55:353-364.

WHO (World Health Organization (2013) World Health Researches for Universal Health Coverage. WHO Genève Switzerland.

WHO (World Health Organization) (2015) The Global Prevalence of Anaemia in 2011. WHO Genève Switzerland.

Zhang, Y, Shi, R, Razaul, KM, Zhang, F, Zou, C. (2010) Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar applications. Journal Agricultural Food Chemistry 58: 12268-12274.

Zhao, FJ, Su, YH, Dunham, SJ, et al. (2009) Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin. Journal of Cereal Chemistry 49: 290-295.