

Julio César Amezcua Romero y Miguel Lara Flores

El zinc en las plantas

El zinc es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, pero se convierte en un elemento tóxico cuando se encuentra en exceso. En el presente artículo se revisan las funciones y los efectos del zinc, tanto para las especies vegetales como para los cultivos agrícolas en particular. Finalmente, se discute el papel que desempeña el zinc en la planta de frijol, *Phaseolus vulgaris* L.

Cuando escuchamos hablar de metales, pensamos inmediatamente en el hierro, el cobre, el oro o la plata, pero olvidamos uno con el cual convivimos diariamente y que además es indispensable para nuestra existencia. El zinc, cuyo símbolo químico es Zn, es el vigésimo tercer elemento químico más abundante en la Tierra y tiene una gran diversidad de usos, debido a sus propiedades

anticorrosivas, antimicrobianas, cicatrizantes y estimulantes. Al zinc se le encuentra en el revestimiento que protege al hierro y al acero de la corrosión, así como en productos como colorantes, cerámicas, ungüentos, desodorantes y suplementos alimenticios. En los humanos, el zinc actúa como micronutriente esencial (indispensable para el funcionamiento óptimo del organismo), el cual es necesario para el sistema inmune y los sentidos del olfato y del gusto, así como para la cicatrización de heridas y la división y el crecimiento de las células. Afortunadamente, los beneficios nutricionales del zinc no son exclusivos para los humanos, sino para todos los seres vivos, entre ellos las plantas.







■ **Micronutriente esencial para las plantas**

■ El zinc es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La cantidad de zinc que éstas necesitan para crecer y desarrollarse adecuadamente es muy pequeña: oscila entre 15 y 20 miligramos por kilogramo de tejido seco; estos valores representan menos de 0.1% del peso seco total del tejido. Por tal razón, el zinc es clasificado como un micronutriente. Pero a pesar de que se requiere en cantidades muy pequeñas, este elemento es realmente indispensable para que las plantas completen su ciclo de vida, ya que participa directamente en el metabolismo de las células y, en particular, porque ningún otro elemento puede desempeñar las mismas funciones.

Al igual que en todos los organismos vivos, la importancia del zinc para las plantas está relacionada con su capacidad de actuar como estabilizador de la estructura de las proteínas o como un cofactor (ión inorgánico) necesario para la activación de las enzimas involucradas en diferentes procesos metabólicos. En las plantas, el zinc es necesario para llevar a cabo el metabolismo de los ácidos nucleicos, ya que este elemento forma parte de las enzimas y proteínas que están involucradas en la síntesis y expresión del ADN, tales como las polimerasas de ADN y de ARN, las desacetilasas de histonas y las proteínas con dedos de zinc llamadas factores de transcripción, que en

conjunto controlan la expresión génica. Aunado a lo anterior, el

zinc también tiene un papel central en la síntesis de proteínas celulares debido a que regula la actividad de las enzimas necesarias para dicho proceso, como son las llamadas factores de inicio de la traducción y las sintetasas del ARN de transferencia.

Por otra parte, el zinc es indispensable para que ocurra la fotosíntesis y se lleve a cabo el metabolismo de los carbohidratos en las plantas, debido a que este elemento estabiliza o activa las proteínas involucradas en dichos procesos. El zinc forma parte de unas proteínas llamadas chaperonas, las cuales se encargan de mantener la estructura tridimensional adecuada de la enzima ribulosa bifosfato carboxilasa/oxigenasa, mejor conocida como Rubisco, la cual es responsable de la fijación del carbono atmosférico por las plantas. Asimismo, el zinc es necesario para mantener activos tanto al fotosistema II, encargado de captar la luz durante el proceso de fotosíntesis, como a la enzima anhidrasa carbónica, involucrada en la hidratación del dióxido de carbono en las plantas.

El zinc forma parte, además, de las enzimas que participan en la percepción de factores de estrés biótico y abiótico –originados por otros organismos o por cambios ambientales, respectivamente–, así como en la respuesta de defensa de las plantas para contender contra dichos estreses. El zinc es un componente estructural de las proteínas cinasas, que son las encargadas de transmitir las señales originadas por los agentes causantes de estrés hacia el interior de las células, con el fin de preparar y estimular la respuesta a dichos agentes. El zinc también es un componente estructural de las enzimas alcohol deshidrogenasa y superóxido dismutasa, que están

involucradas en la respuesta de defensa de las plantas contra el estrés. La primera de estas enzimas se encarga de continuar con el metabolismo de la glucosa cuando las plantas se encuentran estresadas por una deficiencia de oxígeno; por ejemplo, durante una inundación, para proveerlas de energía. La segunda enzima convierte al anión superóxido –una especie reactiva de oxígeno causante de estrés oxidativo y muy dañina para



las células— en oxígeno molecular y agua, para así proteger a las plantas del daño celular provocado por dicho estrés cuando éstas se encuentran bajo ataque de patógenos o en condiciones ambientales desfavorables.

Las proteínas y enzimas mencionadas anteriormente no son las únicas afectadas por el zinc en las plantas. Mediante análisis *in silico* (es decir, hecho por simulación computacional), en la planta modelo *Arabidopsis thaliana* se han encontrado más de mil proteínas diferentes que contienen, unen o transportan zinc. Asimismo, se ha determinado que el metaloproteoma del zinc (cantidad de proteínas relacionadas con este elemento) comprende hasta 9% del proteoma (cantidad total de proteínas) en los organismos eucariotas. Estos porcentajes tan altos de proteínas asociadas exclusivamente con el zinc revelan la importancia que tiene este elemento para el funcionamiento adecuado de las células, no sólo en las plantas sino en los organismos eucariotas en general.

■ Problemas por la deficiencia de zinc

■ Desafortunadamente, algunos factores como la escasez, la poca disponibilidad y el agotamiento del zinc en el suelo hacen de este elemento uno de los principales micronutrientes minerales limitantes del crecimiento y desarrollo, tanto de los cultivos agrícolas como de todas las especies vegetales. Entre los principales síntomas visibles asociados con una deficiencia de zinc en las plantas, se encuentran la disminución en el tamaño del organismo y de sus hojas; inclusive llegan a morir los ápices (puntas) de las hojas y ramas. Si el zinc es deficiente también es común observar la aparición de manchas amarillas o cafés en las hojas, las cuales indican el grado de afectación de la planta: las primeras se deben a la disminución del contenido de clorofila, mientras que las segundas son indicativas de zonas con muerte celular.

El zinc también es necesario para el desarrollo adecuado de las flores y para el proceso de fecundación, por lo que en condiciones pobres de zinc se ven afectados severamente los órganos reproductores de las plantas. El tubo polínico (estructura vegetal que

se desarrolla cuando el polen se posa sobre el estigma) requiere de zinc para poder crecer y llevar a los gametofitos masculinos o células espermáticas hasta los óvulos contenidos en el saco embrionario, lugar donde se lleva a cabo la fecundación. Por lo tanto, no resulta extraño que la infertilidad del polen sea la causa principal de la baja producción de granos y semillas de los cultivos agrícolas cuando hay condiciones de deficiencia de zinc.

Asimismo, se llega a generar un problema nutricional que afecta de manera adversa a todas las plantas; no obstante, algunas especies son más sensibles que otras. Por ejemplo, los cultivos de maíz (Figura 1), algodón, manzana y frijol son más sensibles que otros, como los de trigo, avena o chícharo. Por tal motivo, la aplicación de fertilizantes con sales inorgánicas de zinc se ha convertido en una práctica agrícola común para mantener, promover y garan-

Modelo

Es especie ampliamente estudiada por ser fácil de mantener y reproducir en laboratorio y por contar con ventajas para los trabajos experimentales.



Figura 1. Deficiencia de zinc en maíz: clorosis en las hojas (tomado de: Alloway, 2008).



tizar tanto el crecimiento como la productividad de todos los cultivos, independientemente de su sensibilidad a la deficiencia de zinc.

■ Exceso de zinc, tóxico para las plantas

■ La práctica agrícola de fertilización exhaustiva con sales de zinc ha mejorado el rendimiento de los cultivos; sin embargo, la aplicación constante de grandes cantidades de zinc en el suelo o directamente en las plantas conlleva el riesgo de generar acumulaciones de dicho elemento que pueden llegar a ser tóxicas. Asimismo, otras actividades humanas, como la minería, la fundición y el riego de suelos agrícolas con aguas residuales, también contribuyen a la contaminación de los suelos y ponen en riesgo el crecimiento y desarrollo de las plantas y, de manera particular, de los cultivos agrícolas.

La absorción y acumulación de grandes cantidades de zinc resulta tóxica para las plantas porque ocasiona un desbalance metabólico generalizado en sus células. En exceso, el zinc es capaz de remplazar e inhibir la función de otros elementos esenciales, como el hierro y el magnesio. También se puede unir a proteínas y enzimas que no lo requieren, por lo que causa su inactivación y genera un daño o la muerte

de las células. A nivel del organismo, los síntomas visibles asociados a niveles excesivos de zinc en los tejidos y órganos de las plantas son: la disminución de frutos y semillas, un crecimiento atrofiado y el amarillamiento de las hojas debido al fenómeno de clorosis (ocasionado por la degradación de la clorofila y de los cloroplastos, Figura 2). Aunado a lo anterior, el exceso de zinc en los suelos provoca en las plantas una deficiencia de nutrientes tales como el fósforo, el magnesio y el manganeso, ya que el zinc compete e interfiere con la absorción de éstos por las raíces.

Los síntomas de toxicidad por exceso de zinc en las plantas aparecen, por lo general, cuando las hojas presentan concentraciones mayores a 300 miligramos por kilogramo de tejido. Sin embargo, los umbrales de toxicidad varían entre los diferentes tipos de plantas. Desafortunadamente, los cultivos agrícolas se encuentran entre las especies vegetales más sensibles a la toxicidad provocada por el exceso de zinc. Por ejemplo, el rábano muestra síntomas de toxicidad cuando en sus hojas se encuentran concentraciones de zinc menores a 100 miligramos por kilogramo de tejido.

A pesar de su susceptibilidad inherente, algunos cultivos agrícolas son más resistentes que otros a la toxicidad ocasionada por las cantidades elevadas de



Figura 2. Exceso de zinc en frijol: clorosis y necrosis en las hojas.

Cuadro 1. Cantidades de zinc en las hojas de varios cultivos agrícolas (tomado de: Schulte, 2004; Sela, s/f).

Cultivo	Deficiencia	Suficiencia	Exceso
	(partes por millón)		
Soya	<15	21-50	>75
Trigo	<18	19-70	>100
Avena	<5	21-70	>100
Alfalfa	<10	21-70	>100
Maíz	<15	26-75	>150
Arroz	<20	21-160	>250
Algodón	<50	51-300	>400

zinc. Las gramíneas (como el trigo y el maíz) son menos sensibles a la toxicidad por zinc que las leguminosas (como el frijol y la soya) y que los cultivos vegetales frondosos (como la espinaca y el betabel). Estas diferencias en susceptibilidad sugieren que existen variaciones características para cada grupo de cultivos según la capacidad de absorción del zinc por las raíces.

El zinc en el desarrollo de la planta de frijol

En el Laboratorio de Investigación Interdisciplinaria de la Escuela Nacional de Estudios Superiores de la Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad León, estudiamos el papel que desempeña el zinc en el crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícolas. El objetivo es aportar conocimiento que sienta las bases para proponer y desarrollar soluciones que mejoren su crecimiento, desarrollo, productividad y calidad nutricional. Para ello, como modelo de estudio se usa a la planta de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) por su importancia económica y nutricional, y, además, por ser considerada como una planta muy sensible a la deficiencia de zinc (Figura 3).

En las primeras dos semanas de desarrollo se observó y caracterizó el crecimiento de las plántulas de frijol en medios nutritivos con tres condiciones de zinc: ausencia, suficiencia (0.5 partes por millón de sulfato de zinc) y exceso (desde 10 hasta 4000 veces más, respecto a la condición de suficiencia). En ausencia de zinc, el tamaño de las hojas disminuyó en comparación con las plántulas crecidas

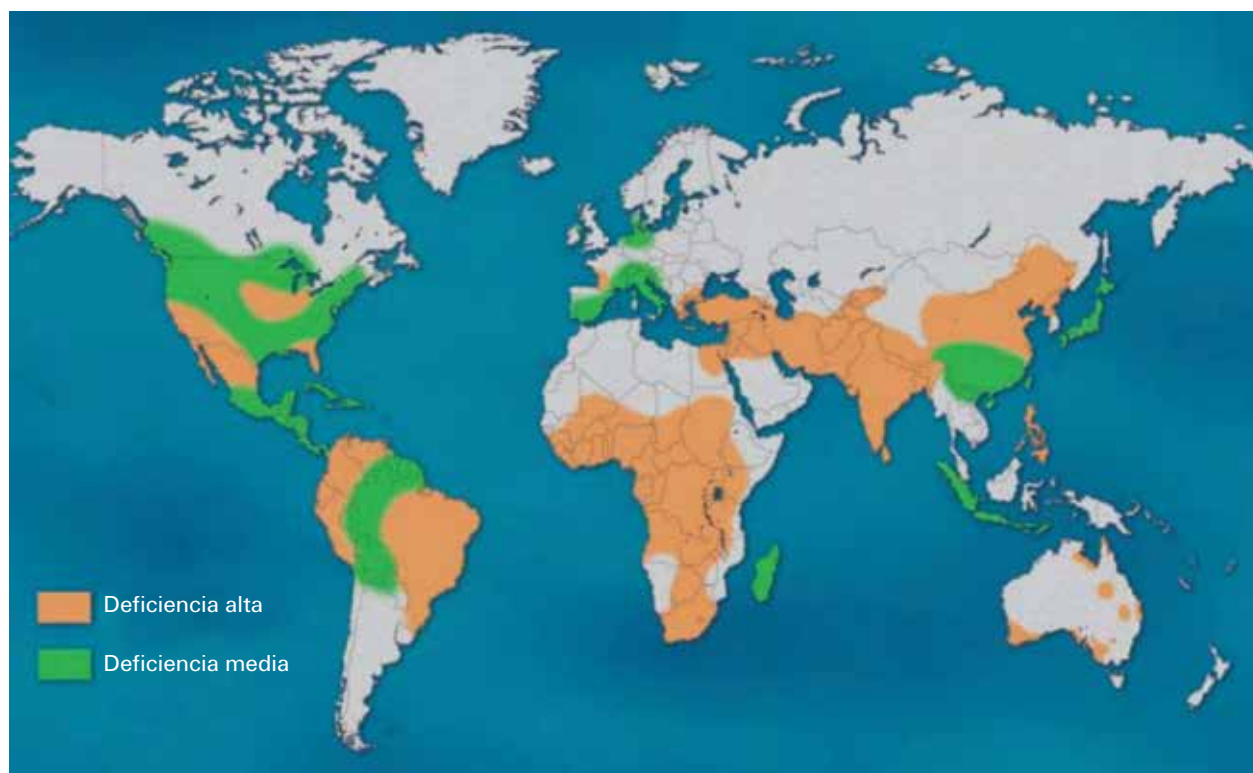


Figura 3. Deficiencia de zinc en los cultivos agrícolas a nivel mundial (tomado de: Alloway, 2008).



bajo condiciones de suficiencia de zinc; mientras que el tamaño de la raíz y del tallo no se afectó, lo cual podría deberse al almacenamiento de dicho elemento en las semillas. Por otra parte, el exceso de zinc afectó el desarrollo de las hojas, así como el tamaño de la raíz y del tallo. Se encontró, además, que en condiciones 4000 veces excesivas de zinc se inhibe por completo el desarrollo de la parte aérea (es decir, el tallo y las hojas) de las plántulas. Estos resultados muestran que el zinc es un micronutriente necesario desde las etapas tempranas de desarrollo del frijol y que puede llegar a ser muy tóxico en exceso (Figura 4).

Algo muy interesante es que las plántulas de frijol son capaces de tolerar un exceso de zinc de hasta 100 veces durante su desarrollo temprano. Esto sugiere que las plántulas poseen mecanismos que les permiten contender, en cierta medida, con los efectos tóxicos del exceso de zinc. Dichos mecanismos podrían estar involucrados en la absorción, el transporte y el almacenamiento de este elemento dentro de la planta, así como en la protección y reparación de los procesos metabólicos de las células.

A nivel molecular, el análisis de la expresión de los genes de las enzimas antioxidantes catalasa, superóxido dismutasa y ascorbato peroxidasa (involucradas en la defensa de las plantas contra el estrés oxidativo) mostró una respuesta diferencial de dichas enzimas en las hojas de las plántulas de frijol que estaban bajo condiciones de ausencia y exceso de zinc. En comparación con su expresión génica bajo condiciones de suficiencia de zinc, se encontró que en ausencia de este elemento la expresión de los genes catalasa y superóxido dismutasa disminuyó considerablemente; mientras que en exceso de zinc se observó un aumento en la expresión de los genes de las tres enzimas. Estos resultados sugieren que la deficiencia de zinc disminuye la capacidad antioxidante de las plántulas de frijol, lo que las hace más susceptibles a cualquier factor ambiental que provoque estrés oxidativo. Por otra parte, el aumento en la expresión génica de las enzimas cuando hay exceso de zinc indica que se está provocando un estrés oxidativo en las plántulas, originado por el aumento de especies reactivas de oxígeno en las células; asimismo, significa que las plántulas tratan

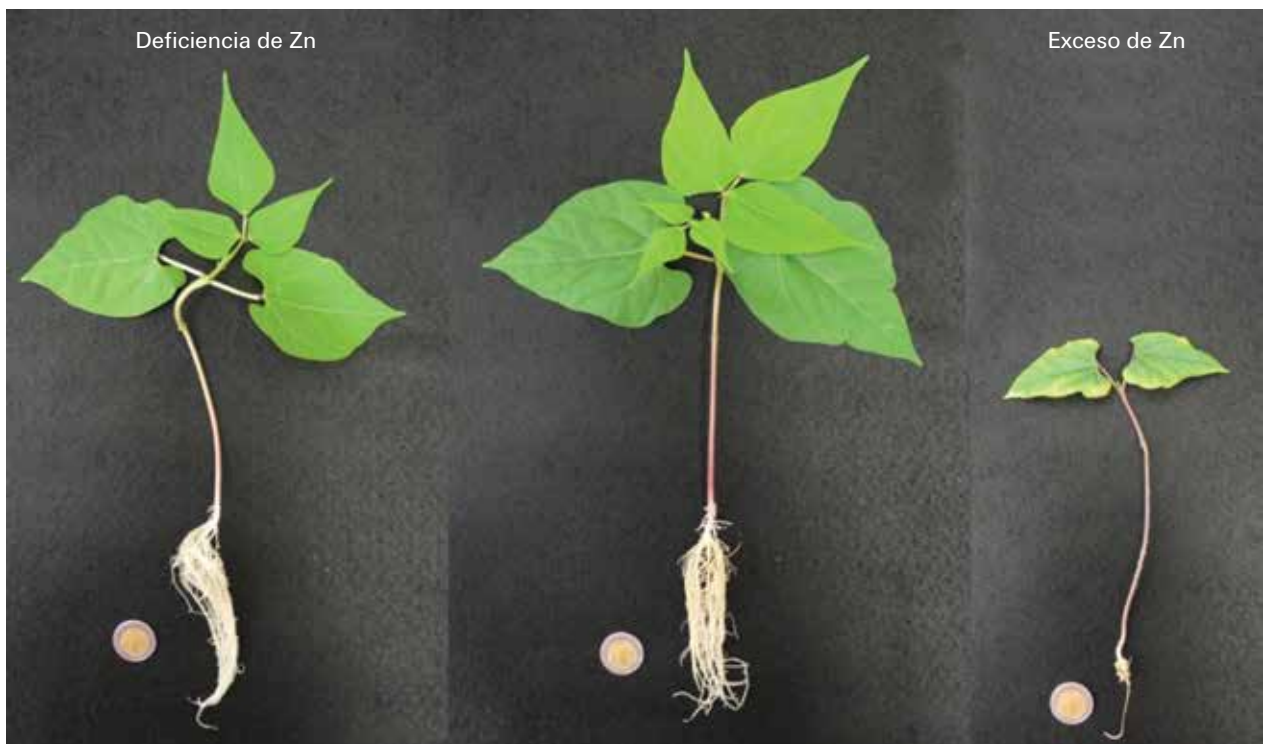


Figura 4. Plántulas de frijol en condiciones de deficiencia, suficiencia y exceso de zinc.



de contender contra los daños provocados por dichas especies mediante la acumulación de enzimas capaces de removerlas.

En conclusión, es muy importante profundizar en el conocimiento de los procesos –tanto fisiológicos como de desarrollo– involucrados en la absorción, el transporte y la acumulación de zinc en las plantas. De manera particular, se deben estudiar dichos procesos en los cultivos agrícolas para en un futuro lograr controlar y ajustar las cantidades de zinc que cada cultivo agrícola requiera para tener un desarrollo y una productividad óptimos; asimismo y en consecuencia, evitar los efectos dañinos ocasionados por la falta o el exceso de dicho elemento.

Julio César Amezcua Romero

Departamento de Ciencias Agrogenómicas, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad León, Universidad Nacional Autónoma de México.

jamezcua@enes.unam.mx

Miguel Lara Flores

Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.

mlara@unam.mx

Lecturas recomendadas

- Alloway, B. J. (2008), *Zinc in soils and crop nutrition*, 2.^a ed., Bruselas y París, International Zinc Association/International Fertilizer Industry Association.
- Broadley, M. R., P. J. White, J. P. Hammond *et al.* (2007), “Zinc in plants”, *New Phytologist*, 173:677-702.
- Lin, Y. F. y M. G. M. Aarts (2012), “The molecular mechanisms of zinc and cadmium stress response in plants”, *Cellular and Molecular Life Sciences*, 69:3187-3206.
- Marschner, P. (2012), *Mineral nutrition of higher plants*, 3.^a ed., San Diego, Academic Press.
- Schulte, E. E. (2004), “Soil and Applied Zinc”, en: *Understanding Plant Nutrients*, Madison, Cooperative Extension Publications/University of Wisconsin-Extension.
- Sela, G. (s/f), “Zinc in Plants”, *SMART! Fertilizer Management*. Disponible en: <<http://www.smart-fertilizer.com/articles/zinc-in-plants>>. Consultado el 8 de mayo de 2017.
- Sinclair, S. A. y U. Krämer (2012), “The zinc homeostasis network of land plants”, *Biochimica et Biophysica Acta*, 1823:1553-1567.