

## Bioavailable zinc in soil for pecan tree nutrition

Zinc biodisponible en suelo para la nutrición del nogal pecanero

Nancy A. Madrigal-Soteno; Dámaris L. Ojeda-Barrios\*; Victor M. Guerrero-Prieto; Graciela Ávila-Quezada; Rafael Parra-Quezada

Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. V. Carranza y Escorza s/n, Centro, Apartado Postal 24. Chihuahua, Chih, C. P. 31000, México.  
dojeda@uach.mx (\*Corresponding author).

### Abstract

The pecan tree is one of the most cultivated fruit trees in Mexico because of its high profitability. This fruit needs significant amounts of zinc (Zn), which ranks as one of the micronutrients most required by this crop. The main effects of Zn in plant metabolism are observed in the synthesis of chlorophyll and tryptophan. It is also involved in enzyme activity related to the detoxification of reactive oxygen species. This nutrient deficiency is related to soil type. In order to understand the factors that influence zinc bioavailability in soil for pecan tree nutrition, the following review is presented. It is concluded that Zn deficiency in pecan orchards is more common in cold weather periods, wet springs, sandy soils with low organic matter content, alkaline pH and high levels of carbonates. This deficiency causes poor root development.

**Keywords:** *Carya illinoensis*, trace metals, pH, carbonates, organic matter.

### Resumen

El nogal pecanero es uno de los frutales más cultivados a nivel nacional por su alta rentabilidad. Este frutal tiene necesidades importantes de zinc (Zn), el cual se ubica como uno de los micronutrientes más requeridos por este cultivo. Los principales efectos del Zn en el metabolismo de la planta se observan en la síntesis de clorofila y triptófano. También está involucrado en la actividad de enzimas relacionadas con la detoxificación de las especies reactivas de oxígeno. La deficiencia de este nutriente se relaciona con el tipo de suelo. Con el objetivo de conocer los factores que influyen en la biodisponibilidad del Zn en el suelo para la nutrición del nogal pecanero se presenta la siguiente revisión. Se concluye que la deficiencia de Zn en las huertas de nogal es más común en periodos fríos, primaveras húmedas, y suelos arenosos con bajo contenido de materia orgánica, pH alcalino y altos contenidos de carbonatos. Esta deficiencia ocasiona un escaso desarrollo radical.

**Palabras clave:** *Carya illinoensis*, metales traza, pH, carbonatos, materia orgánica.

## Introduction

The pecan tree (*Carya illinoensis* [Wangenh.] K. Koch) is one of Mexico's main crops due to its high profitability (Ojeda et al., 2014). Currently, pecan trees are harvested in the municipalities of Delicias, Jiménez and Casas Grandes, located in the northern Mexican state of Chihuahua (SIAP, 2014).

This crop suffers from nutritional deficiencies of minor elements such as zinc (Zn), manganese (Mg) and iron (Fe) (Kabata & Pendias, 2010). Zn is an essential element for plant growth, development and reproduction, and its deficiency produces interveinal chlorosis that can be easily seen in fruit trees, which is related to a stabilizing role of the chlorophyll molecule (Ojeda-Barrios, Hernández-Rodríguez, Martínez-Tellez, Núñez-Barrios, & Perea-Portillo, 2009). Zn plays a fundamental role in critical cellular functions such as protein metabolism, gene expression, structural and functional integrity of biomembranes, photosynthetic C metabolism and indole-3-acetic acid (IAA) metabolism (Haydon, & Cobbett, 2007; Hafeez, Khanif, & Saleem, 2013). Due to the importance of this nutrient for the plant, Figure 1 shows a scheme in which the pecan tree's need for available Zn in the soil can be seen.

### Main biological functions of zinc

Zinc (Zn) is an essential micronutrient involved in a wide variety of physiological processes (Di Baccio, Kopriva, Sebastiani, & Rennenberg, 2005; Broadley, White, Hammond, Zelko, & Lux, 2007; Ojeda-Barrios et al., 2009) and thus its deficiency adversely affects plant growth and development (Jain, Bhargava, Tarafdar, Singh, & Panwar, 2013). Zn is currently regarded as the most limiting nutrient in crop production after nitrogen and phosphorus (Hafeez, et al., 2013).

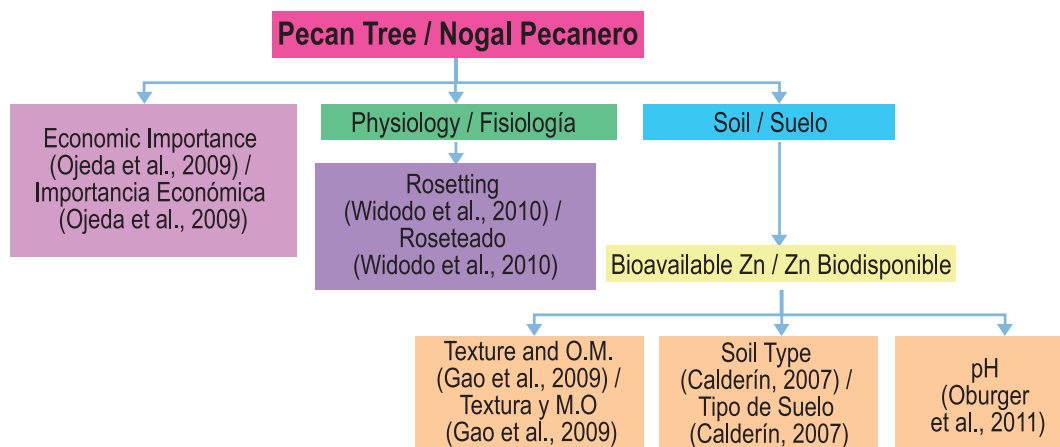
## Introducción

El nogal pecanero (*Carya illinoensis* [Wangenh.] K. Koch) representa uno de los principales cultivos de la República mexicana, por su alta rentabilidad (Ojeda et al., 2014). Actualmente, la superficie cosechada del nogal pecanero se localiza en el norte del país, en el estado de Chihuahua en los municipios de Delicias, Jiménez y Casas Grandes (SIAP, 2014).

Este cultivo presenta problemas de deficiencias nutrimentales de elementos menores como el zinc (Zn), manganeso (Mg) y fierro (Fe) (Kabata & Pendias, 2010). El Zn es un elemento esencial para el crecimiento, desarrollo y reproducción de las plantas, su deficiencia produce clorosis intervenal que es fácil de observar en árboles frutales, lo que se relaciona con un papel estabilizador de la molécula de clorofila (Ojeda-Barrios, Hernández-Rodríguez, Martínez-Tellez, Núñez-Barrios, & Perea-Portillo, 2009). El Zn tiene un papel fundamental en funciones celulares críticas como el metabolismo de proteínas, expresión de genes, integridad estructural y funcional de biomembranas, metabolismo fotosintético del C y el metabolismo del ácido-3-indol acético (AIA) (Haydon, & Cobbett, 2007; Hafeez, Khanif, & Saleem, 2013). Debido a la importancia de este micronutriente para la planta, en la Figura 1 se muestra un esquema en el cual se puede observar la necesidad que tiene el nogal pecanero del Zn disponible en el suelo.

### Principales funciones biológicas del zinc

El zinc (Zn) es un micronutriente esencial involucrado en una amplia variedad de procesos fisiológicos (Di Baccio, Kopriva, Sebastiani, & Rennenberg, 2005; Broadley, White, Hammond, Zelko, & Lux, 2007; Ojeda-Barrios et al., 2009) que afecta negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas cuando es



**Figure 1. Factors affected by Zn deficiency and availability in the soil.**

**Figura 1. Factores que se ven afectados por la deficiencia de Zn y su disposición en el suelo.**

Zn catalyzes the synthesis of serine, which is a precursor of the amino acid tryptophan, which in the leaf is converted into indoleacetic acid. This auxin is responsible for shoot and leaf growth, so it is normal that both grow less when Zn becomes deficient, stopping terminal growth and forcing the lateral buds to grow weakly, which forms the typical rosette symptom (Ojeda-Barrios, Abadía, Lombardini, Abadía, & Vázquez, 2012).

Various physiological processes are damaged in plants suffering from Zn deficiency, which causes a rapid inhibition in growth and development and, therefore, in final yield. Zn plays a fundamental role in critical cellular functions such as protein metabolism, gene expression, structural and functional integrity of biomembranes, photosynthetic C metabolism and indole-3-acetic acid (IAA) metabolism (Marschner, 2011). There are many Zn-binding sites among the membranes, particularly inside of them (Hafeez et al., 2013).

The majority of the most important Zn functions relate to its ability to coordinate tetrahedral bonds in different vital constituents of the cell. The main cellular ligands with which Zn are tetrahedrally coordinated are cysteine, histidine and aspartate or glutamate (Marschner, 2011). These ligands, especially cysteine and histidine, bind to Zn with much higher affinity and stability than Fe. Therefore, the formation of reactive oxygen species by reactions between Fe and cysteine and histidine residues is blocked when there is adequate Zn present (Hafeez et al., 2013).

### Zinc in soil

It is present in primary minerals, clay minerals and organic matter (Weng, Temminghoff, & Van Riemsdijk, 2001). A tendency for certain clays (type 2:1 montmorillonite) to have more Zn deficiencies than soils dominated by other clays has been reported (Rose, Rose, Pariasca-Tanaka, Widodo, & Wissuwa, 2011). The Zn deficiency is common in calcareous soils with a pH ranging from 7.5 to 8.6. Zn in these soils can replace calcium (Ca) and Mg in the exchange complex (Covelo, Vega, & Andrade, 2007). The solubility of this in the soil is higher in acidic soils (pH: 4 to 5.5); its absorption is reduced by having neutral or alkaline conditions (pH > 7.0) (Hinsinger, Plassard, Tang, & Jaillard, 2003). Also, excessive liming produces a deficiency of the element (Catlett, Heil, Lindsay, & Ebinger, 2002).

The acidifying effect of N nutrition with ammonium fertilizers ( $\text{NH}_4^+$ ) can improve the solubility of many Zn compounds in the soil and assist in the movement of the micronutrient within the plant (Quijano-Guerta, Kirk, Portugal, Bartolome, & McLaren, 2002). The original sources of Zn in soil are as carbonates: smithsonite ( $\text{ZnCO}_3$ ), silicates: hemimorphite  $\text{Zn}_4(\text{OH})_2 \text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,

deficiente (Jain, Bhargava, Tarafdar, Singh, & Panwar, 2013). Actualmente el Zn es considerado como el nutriente más limitante en la producción de cultivos después del nitrógeno y fósforo (Hafeez, et al., 2013).

El Zn cataliza la síntesis de la serina, la cual es precursora del Aminoácido triptófano, que en la hoja es convertido en ácido indolacético. Esta auxina es responsable del crecimiento del brote y de la hoja, por lo que es normal que ambos disminuyan su tamaño cuando el Zn llega a ser deficiente, deteniéndose el crecimiento terminal y forzando a las yemas laterales a crecer débilmente, lo cual forma el típico síntoma de roseta (Ojeda-Barrios, Abadía, Lombardini, Abadía, & Vázquez, 2012).

Diversos procesos fisiológicos son dañados en plantas que sufren deficiencia de Zn, la cual, causa una rápida inhibición en el crecimiento y desarrollo y por lo tanto, en el rendimiento final. El Zn tiene un papel fundamental en funciones celulares críticas como el metabolismo de proteínas, expresión de genes, integridad estructural y funcional de biomembranas, metabolismo fotosintético del C y el metabolismo del ácido-3-indol acético (AIA) (Marschner, 2011). Existen muchos sitios de unión del Zn entre las membranas, particularmente en el interior de las mismas (Hafeez et al., 2013).

La mayoría de las funciones más importantes del Zn se relacionan a su habilidad para coordinar enlaces tetraédricos en diferentes constituyentes vitales de la célula. Los principales ligandos celulares con los que se coordina tetraédricamente el Zn son la cisteína, histidina y aspartato o glutamato (Marschner, 2011). Estos ligandos, especialmente la cisteína e histidina, se unen al Zn con mucha mayor afinidad y estabilidad que el Fe. Por lo que la formación de especies reactivas de oxígeno por reacciones entre el Fe y los residuos de cisteína e histidina son bloqueados en presencia adecuada de Zn (Hafeez et al., 2013).

### El zinc en el suelo

Está presente en los minerales primarios, los minerales arcillosos y la materia orgánica (Weng, Temminghoff, & Van Riemsdijk, 2001). Se ha reportado cierta tendencia de las arcillas (tipo 2:1 montmorilloníticas) a presentar más deficiencias de Zn que suelos dominados por otras arcillas (Rose, Rose, Pariasca-Tanaka, Widodo, & Wissuwa, 2011). La deficiencia de Zn es común en suelos calcáreos con un pH que varía de 7.5 a 8.6. En estos suelos el Zn puede reemplazar al calcio Ca y al Mg en el complejo de intercambio (Covelo, Vega, & Andrade, 2007). La solubilidad de éste en el suelo es mayor en suelos ácidos (pH: 4 a 5,5); su absorción se reduce al tener condiciones neutras o alcalinas (pH > 7,0) (Hinsinger, Plassard, Tang, & Jaillard, 2003). Así

and as sulphides where sphalerite (ZnS), which is the main source of soil Zn, is found.

Plants absorb nutrients from the soil solution which contains various chemical species, where biochemical processes take place and the exchange with the hydrosphere and biosphere occurs. It also provides water for plant growth, and is a means to exchange nutrients between the roots and the soil (Parkpain, Sreesai, & Delaune, 2000).

In general, micronutrient absorption by plants is affected by physical and chemical soil factors, of which the most important are pH, electrical potential, water regime, organic matter content, cation exchange capacity, nutrient balance, and the concentration of other trace elements (Cattani, Fragoulis, Bocelli, & Capri, 2006). Also, weather conditions show an influence on the metal uptake rate.

The most important way in which Zn is transported by the plant via xylem is by diffusion, which is a passive process wherein Zn enters the plant through the root, dissolved in the soil solution (Dessureault-Rompré, Nowack, Schulin, & Luster, 2007).

About 95 % of total Zn is moved by diffusion, and the limiting factors of the roots can reduce its availability. This is the most important reason why deficiencies occur in compacted soils or where root growth is restricted (Degryse, Verma, & Smolders, 2008).

### Bioavailability

The bioavailability of a nutrient consists of its chemical availability (de las Heras, Mañas, & Labrador, 2005). Chemical reactions between heavy metals and solid soil components determine their solubility and bioavailability (Basta, Ryan, & Chaney, 2005). Zn availability decreases significantly in alkaline soils, causing deficiencies of this nutrient (Weng, Vega, & Van Riemsdijk, 2011).

Zn is found in ferromagnesian metals, where weathering releases bivalent Zn, which is easily adsorbed onto soil particles and organic matter, interchangeably (Hoffland, Wei, & Wissuwa, 2006).

The main factor that determines Zn availability in soil is pH (Oburger, Jones, & Wenzel, 2011). Zn is easily adsorbed onto the cation exchange sites at high pH and easily displaced by  $\text{CaCl}_2$  at low pH. Thus, soluble Zn and the ratio of  $\text{Z}^{+2}$  to organic Zn-ligand complexes increase at low pH (Broadley et al., 2007). In calcareous soils  $\text{Zn}^{+2}$  is found at concentrations as low as  $10^{-11}$  -  $10^{-9}$  and can limit the growth of agricultural crops (Hacisalihoglu & Kochian, 2003).

como el encalado excesivo produce una deficiencia del elemento (Catlett, Heil, Lindsay, & Ebinger, 2002).

El efecto acidificante de la nutrición de N con fertilizantes amoniacales ( $\text{NH}_4^+$ ), puede mejorar la solubilidad de muchos compuestos de Zn en el suelo y ayudar en el movimiento de este micronutriente dentro de la planta (Quijano-Guerta, Kirk, Portugal, Bartolome, & McLaren, 2002). Las fuentes originales de Zn en el suelo son en forma de carbonatos: smithsonita ( $\text{ZnCO}_3$ ), silicatos: hemimorfita  $\text{Zn}_4(\text{OH})_2 \text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , y en forma de sulfuros donde se encuentra la esfalerita ZnS, la cual es la principal fuente de Zn en el suelo.

Las plantas absorben los nutrientes desde la solución del suelo el cual contiene diversas especies químicas, donde se realizan los procesos bioquímicos y se produce el intercambio con la hidrosfera y biosfera. Además provee agua para el crecimiento de las plantas, y es una vía para el intercambio de nutrientes entre las raíces y el suelo (Parkpain, Sreesai, & Delaune, 2000).

En general, la absorción de micronutrientes por las plantas es afectado por factores físicos y químicos del suelo, de los cuales los más importantes son pH, potencial eléctrico, régimen de agua, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, balance de nutrientes, y la concentración de otros elementos traza (Cattani, Fragoulis, Bocelli, & Capri, 2006). También, las condiciones climáticas muestran una influencia en la velocidad de captación de metales.

La forma más importante en que el Zn se transporta por la planta via xilema es por difusión, la cual consiste en un proceso pasivo en donde el Zn entra a la planta a través de la raíz, disuelto en la solución de suelo (Dessureault-Rompré, Nowack, Schulin, & Luster, 2007).

El 95 % del total del Zn es movido por difusión, y los factores limitantes de las raíces pueden reducir su disponibilidad. Esta es la razón más importante del por qué se presentan las deficiencias en suelos compactados o donde el crecimiento de la raíz es restringida (Degryse, Verma, & Smolders, 2008).

### Biodisponibilidad

La biodisponibilidad de un nutriente, consiste en la disponibilidad química de éste (de las Heras, Mañas, & Labrador, 2005). Las reacciones químicas entre los metales pesados y los componentes sólidos del suelo determinan su solubilidad y biodisponibilidad (Basta, Ryan, & Chaney, 2005). La disponibilidad del Zn disminuye notablemente en los suelos alcalinos, produciendo deficiencias de este nutriente (Weng, Vega, & Van Riemsdijk, 2011).

This micronutrient limits the yield of most crops because it has little mobility inside the plant, which causes the first deficiency symptoms to appear in new leaves (Alloway, 2009). Maximum  $Zn^{2+}$  availability is found in soil solution at pH 6.7 (Wang, Xie, Chen, Jiang, & Q., 2008). Applying urea initially increases the pH due to the hydrolysis of the urea into  $H^{+}$  and  $CO_3^{2-}$ , but the  $NH_4^{+}$  is rapidly transformed into  $NO_3^{-}$  generating an acid reaction (Weng et al., 2011). In soils with a pH below 6.7, Zn is present in an easily assimilable form for the plant (Hoffland et al., 2006).

### Factors affecting Zn bioavailability

Texture and organic matter are other factors that affect Zn bioavailability, since the elements useful for the plant are 98 % immobilized in the solid phase of the soil, both on the mineral and organic particles (Gao, Zhang, & Hoffland, 2009), whereas the other 2 % are adsorbed onto the colloidal particles of clay soil (Luster, Göttelein, Nowack, & Sarret, 2009) and chemical compounds having coordination bonds such as chelates (Roca-Fernández, Paz-González, & Vidal-Vázquez, 2008).

Thus, the physical conditions of the soil can act indirectly on the availability of micronutrients. Jaitz et al. (2011) mention that organic matter is directly involved in improving the soil structure, performing a chelating action towards metal nutrients.

Soil moisture affects the availability of Zn, since excess moisture makes the deficiency of the micronutrient more noticeable, which tends to disappear with increasing temperature (Walworth & Pond, 2006). On the other hand, sandy soils have low concentrations of Zn (Armienta, Cruz, Aguayo, & Ceniceros, 2009), whereas soils with mechanical obstructions affect bioavailability, since they restrict root exploration to access areas with greater Zn availability. In alkaline, calcareous or heavy soils, Zn immobilization occurs more than in neutral or slightly acidic soils (Calderín, 2007). In calcareous soils, Ca replaces Zn in the cation exchange complex, decreasing the availability of the latter since it forms insoluble complexes (Sharma, Agrawal, & Marshall, 2008). Regarding soils low in organic matter, they impede the adsorption of Zn onto their particles and the formation of soluble organic complexes with this micronutrient (Basta, & McGowen, 2004). Instead, high copper (Cu) concentrations in the soil solution can reduce the availability of Zn, and vice versa, due to competition at the plant root's absorption sites (Chagué-Goff, 2005; Bling et al., 2008).

### Conclusion

The pecan tree is a species which is very sensitive to Zn deficiency. It is concluded that this deficiency in

El Zn se encuentra en minerales ferromagnésicos, donde la meteorización de estos libera Zn en forma bivalente, que con facilidad queda adsorbida sobre las partículas del suelo y la materia orgánica, en forma intercambiable (Hoffland, Wei, & Wissuwa, 2006).

El principal factor que determina la disponibilidad del Zn en el suelo es el pH (Oburger, Jones, & Wenzel, 2011). El Zn es fácilmente adsorbido en los sitios de intercambio catiónico a pH alto y fácilmente desplazado por  $CaCl_2$  a pH bajo. De este modo el Zn soluble y la relación de  $Z^{+2}$  a complejos orgánicos ligantes de Zn incrementan a bajo pH (Broadley et al., 2007). En suelos calcáreos el  $Zn^{+2}$  se encuentra en concentraciones tan bajas como  $10^{-11}$  -  $10^{-9}$  M y puede limitar el crecimiento de cultivos agrícolas (Hacisalihoglu & Kochian, 2003).

Este micronutriente limita el rendimiento de la mayoría de los cultivos debido a que presenta poca movilidad dentro de la planta, lo que hace que los primeros síntomas de deficiencia se presenten en las hojas nuevas (Alloway, 2009). La máxima disponibilidad del  $Zn^{2+}$  se encuentra en la solución del suelo en un pH 6.7 (Wang, Xie, Chen, Jiang, & Q., 2008). La aplicación de urea incrementa inicialmente el pH por la hidrólisis de la urea en  $NH_4^{+}$  y  $CO_3^{2-}$ , pero el  $NH_4^{+}$  es rápidamente transformado a  $NO_3^{-}$  generando una reacción ácida (Weng et al., 2011). En suelos con un pH inferior a 6.7 el Zn está presente en forma fácilmente asimilable para la planta (Hoffland et al., 2006).

### Factores que afectan la biodisponibilidad del Zn

La textura y materia orgánica son otros de los factores que afectan la biodisponibilidad del Zn, ya que los elementos útiles para la planta están en el 98 % inmovilizados en la fase sólida del suelo, tanto en las partículas minerales como en las orgánicas (Gao, Zhang, & Hoffland, 2009), y en el otro 2 %, están adsorbidos a las partículas coloidales del suelo arcilloso (Luster, Göttelein, Nowack, & Sarret, 2009) y a los compuestos químicos que presentan enlaces de coordinación como los quelatos (Roca-Fernández, Paz-González, & Vidal-Vázquez, 2008).

De esta manera, las condiciones físicas del suelo pueden actuar indirectamente en la disponibilidad de los micronutrientes. Jaitz et al., (2011) menciona que la materia orgánica actúa directamente en la mejora de la estructura del suelo realizando una acción quelatante hacia los nutrientes metálicos.

La humedad del suelo afecta la disponibilidad del Zn, ya que el exceso hace más notable la deficiencia del micronutriente, donde tiende a desaparecer al aumentar la temperatura (Walworth & Pond, 2006). Por otra parte en los suelos arenosos, se tienen bajas concentraciones de Zn (Armienta, Cruz, Aguayo, & Ceniceros, 2009).

pecan orchards is more common in cold periods, wet springs, sandy soils with low organic matter content, alkaline pH and high levels of carbonates, resulting in poor root development.

### End of English version

### References / Referencias

- Alloway, B., J. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environ Geochem Health* 31:537–548
- Armienta O., Cruz, A. Aguayo, N., & Ceniceros. (2009). "Geochemical distribution of arsenic, cadmium, lead and zinc in river sediments affected by tailings in Zimapan, a historical polymetallic mining zone of México. *Environ. Geol.* 58: 1467 - 1477.
- Basta N. T., Ryan, J. A., & Chaney, R. L. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: Key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34: 49–63
- Basta, N. T., & McGowen, S. L. (2004). Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil. *Environ. Pollut.* 127: 73-82.
- Biling, W. A. N. G., Zhongmiao, X. I. E., Jianjun, C. H. E. N., Jiang, J., & Qiufeng, S. U. (2008). Effects of field application of phosphate fertilizers on the availability and uptake of lead, zinc and cadmium by cabbage (*Brassicachinensis* L.) in a mining tailing contaminated soil. *J. Environ. Sci.* 20, 1109-1117.
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, 173(4), 677-702.
- Calderín, A. (2007). Material de origen natural que retiene cationes de metales pesados. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 8 (3): 204-213.
- Catlett, K. M., Heil, D. M., Lindsay, W. L., & Ebinger, M. H. (2002). Soil chemical properties controlling zinc 2+ activity in 18 Colorado soils. *Soil Sci. Soc. Am J.* 66:1182–1189
- Cattani, I., Fragoulis, G., Bocelli, R., & Capri, E. (2006). Copper bioavailability in the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.) grown in two Italian soils. *Chemosphere.* 64:1972-1979.
- Chagué-Goff, C. (2005). Assessing the removal efficiency of Zn, Cu, Fe and Pb in a treatment wetland using selective sequential extraction: a case study. *Water Air Soil Pollution* 160: 161-179.
- Covelo, E. F., Vega, F. A., & Andrade, M. L. (2007). Competitive sorption and desorption of heavy metals by individuals soil components. *J. Hazard. Mat.* 140: 308–315.
- De las Heras J., Mañas P., & Labrador J. (2005). Effects of several applications of digested sewage sludge on soils and plants. *J. Environ. Sci. Health Part A* 40, 437–451.

En los suelos con impedimentos mecánicos afectan la biodisponibilidad, ya que restringen la exploración radicular para acceder a zonas con mayor disponibilidad de Zn. En suelos alcalinos, calcáreos o pesados ocurre más la inmovilización del Zn en comparación de aquellos suelos neutros o ligeramente ácidos (Calderín, 2007). En los suelos calcáreos, el Ca sustituye al Zn en el complejo de intercambio catiónico, disminuyendo este último su disponibilidad, ya que forma complejos insolubles (Sharma, Agrawal, & Marshall, 2008). En relación a suelos con bajo contenido de materia orgánica, impiden la adsorción del Zn a sus partículas y la formación de complejos orgánicos solubles con este micronutriente (Basta, & McGowen, 2004). En cambio las altas concentraciones de cobre (Cu) en la solución del suelo pueden reducir la disponibilidad de Zn, y viceversa; debido a la competencia en los sitios de absorción en la raíz de la planta (Chagué-Goff, 2005; Bling et al., 2008).

### Conclusión

El nogal pecanero es una especie muy sensible a la deficiencia de Zn. Se concluye que esta deficiencia en las huertas de nogal pecanero es más común en periodos fríos, primaveras húmedas, suelos arenosos con bajo contenido de materia orgánica, pH alcalino y altos contenidos de carbonatos, ocasionando un escaso desarrollo radical.

### Fin de la versión en español

- Di Baccio, D., Kopriva, S., Sebastiani, L., & Rennenberg, H. (2005). Does glutathione metabolism have a role in the defence of poplar against zinc excess?. *New Phytologist*, 167(1), 73-80
- Degryse F., Verma V. K., & Smolders E. (2008). Mobilization of Cu and Zn by root exudates of dicotyledonous plants in resin-buffered solutions and in soil. *Plant Soil* 306:69–84
- Dessureault-Rompré J., Nowack B., Schulin R., & Luster J. (2007). Spatial and temporal variation in organic acid anion exudation and nutrient anion uptake in the rhizosphere of *Lupinus albus* L. *Plant Soil* 301:123–134
- Gao X., Zhang F., & Hoffland E. (2009). Malate exudation by six aerobic rice genotypes varying in zinc uptake efficiency. *J Environ Qual* 38:2315–2321
- Hacisalihoglu, G., & Kochian, L. V. (2003). How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. *New phytologist*, 159(2), 341-350.
- Hafeez, B., Khanif, M., & Saleem, M. (2013). Role of zinc in plant nutrition-a review. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(2), 374-391.

- Haydon, M. J., & Cobbett, C. S. (2007). Transporters of ligands for essential metal ions in plants. *New Phytol.* 174: 499–506.
- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., & Jaillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant Soil* 248:43–59
- Hoffland, E., Wei, C., & Wissuwa, M. (2006). Organic anion exudation by lowland rice (*Oryza sativa* L.) at zinc and phosphorus deficiency. *Plant Soil* 283:155–162
- Jain, N., Bhargava, A., Tarafdar, J. C., Singh, S. K., & Panwar, J. (2013). A biomimetic approach towards synthesis of zinc oxide nanoparticles. *Applied microbiology and biotechnology*, 97(2), 859-869.
- Jaitz, L., Mueller, B., Koellensperger, G., Huber, D., Oburger, E., Puschenreiter, M., & Hann, S. (2011). LC-MS analysis of low molecular weight organic acids derived from root exudation. *Anal Bioanal Chem* 400:2587–2596
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2010). *Trace Metals in Soils and Plants*. 3rd edition. CRC Press.
- Kabata-Pendias, A. (2004). Soil-plant transfer of trace elements: an environmental issue. *Geoderma* 122: 143-149.
- Luster, J., Göttlein, A., Nowack, B., & Sarret, G. (2009). Sampling, defining, characterising and modeling the rhizosphere-the soil science tool box. *Plant Soil* 321:457–482
- Marschner, P. (2011). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3er Edition. Academic Press. 672p.
- Oburger, E., Jones, D., & Wenzel, W. (2011). Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. *Plant Soil* 341:363–382
- Ojeda-Barrios, D. L., Hernández-Rodríguez, O. A., Martínez-Tellez, J., Núñez-Barrios, A., & Perea-Portillo, E. (2009). Aplicación foliar de quelato de zinc en nogal pecanero. *Revista Chapingo serie especial Horticultura* 15: 205- 210.
- Ojeda-Barrios, D. L., Perea-Portillo, E., Hernández-Rodríguez, A., Ávila-Quezada, G., Abadía, J., & Lombardini, L. (2014). Foliar Fertilization with Zinc in Pecan Trees. *HortScience* , 562-566.
- Ojeda-Barrios, D., Abadía, J., Lombardini, L., Abadía, A., & Vázquez, S. (2012). Zinc deficiency in field-grown pecan trees: changes in leaf nutrient concentrations and structure. *Journal of the Science of Food and Agriculture* , 1672-1678.
- Parkpain, P., Sreesai, S., & Delaune R. D. (2000). Bioavailability of heavy metals in sewage sludge-amended Thai soils. *Water Air Soil Pollution* 122, 163-82.
- Quijano-Guerta C., Kirk G. J. D., Portugal A. M., Bartolome V. I., & McLaren G., C. (2002). Tolerance of rice germplasm to zinc deficiency. *Field Crop Res* 76:123–130
- Roca Fernández, A. I., Paz González, A., & Vidal Vázquez, E. (2008). Análisis total de los elementos presentes en el suelo tras la adición de compost procedente de RSU. *Actas del VIII Congreso SEAE*. Murcia. (en prensa).
- Rose, M. T., Rose, T. J., Pariasca-Tanaka, J., Widodo, B., & Wissuwa, M. (2011). Revisiting the role of organic acids in the bicarbonate tolerance of zinc-efficient rice genotypes. *Funct Plant Biol* 38:493–504
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2014). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2008*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México.
- Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. M. (2008). Heavy metals (Cu, Cd, Zn and Pb) contamination of vegetables in Urban India: a case study in Varanasi. *Environ. Poll.* 154, 254-263.
- Walworth, J., & Pond, A. (2006). Zinc nutrition of pecan growing in alkaline soils. *Pecan South*. July 14-21p.
- Wang, B., Xie, Z., Chen, J., Jiang, J., & SU, Q. (2008). Effects of field application of phosphate fertilizers on the availability and uptake of lead, zinc and cadmium by cabbage (*Brassica chinensis* L.) in a mining tailing contaminated soil. *J. Environ. Sci.* 20, 1109-1117.
- Weng, L., Vega, F. A., & Van Riemsdijk, W. H. (2011). Competitive and synergistic effects in pH dependent phosphate adsorption in soils: LCD modeling. *Environ Sci Technol* 45:8420– 8428
- Weng, L., Temminghoff, E. J., & Van Riemsdijk, W. H. (2001). Contribution of individual sorbents to the control of heavy metal activity in sandy soil. *Environ. Sci. Technol.*, 35: 4436-43.