

ARTÍCULO DE REVISION

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

DOI 10.47864/SE(53)2023p66-72_175

EFECTO DEL SILICIO Y EL MAGNESIO EN EL ALIVIO DE ESTRÉS POR METALES PESADOS

Nathalia Gutiérrez Toro¹ ✉ Francisco Restrepo Higueta²

1. I.A. Analista de
investigación y
desarrollo,

Agrosilicium SAS. ✉
nathalia.gutierrez@agro
silicium.com

2 I.A. M.Sc. Gerente
Técnico, Agrosilicium
SAS.

PALABRAS

CLAVES:

fitotoxicidad,
bioacumulación,
quelación,
compartimentación,
cadmio, plomo,
arsénico.

RESUMEN

El incremento de metales pesados en el suelo es una gran limitante para la producción agrícola y un riesgo para la salud dada su bioacumulación; sin embargo, elementos benéficos como el silicio, han demostrado jugar un papel muy importante en el alivio de la fitotoxicidad causada por estos metales. Algunos mecanismos propuestos para aliviar el estrés con silicio (Si) incluyen la inmovilización de metales tóxicos en el suelo, la estimulación de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos, coprecipitación de metales, quelación de iones metálicos, compartimentación, alteraciones estructurales de la pared celular y alteraciones moleculares a nivel de la planta. En la presente revisión, se detalla el efecto potencial del silicio (Si) y el magnesio (Mg) y los mecanismos implicados en el alivio de la toxicidad causada por metales pesados, así como su efecto en conjunto. Además, se comparten algunos resultados obtenidos en la neutralización de cadmio, plomo y arsénico con la adición de silicato de magnesio en dosis crecientes, con lo cual se logra llevar a cero el valor de los metales en solución.

EFFECT OF SILICON AND MAGNESIUM ON HEAVY METAL STRESS RELIEF

KEY WORDS:

phytotoxicity,
bioaccumulation,
chelation,
compartmentation,
cadmium, lead,
arsenic.

ABSTRACT

The increase of heavy metals in the soil is a great limitation for agricultural production and a health risk given its bioaccumulation, however, beneficial elements such as silicon have been shown to play an important role in alleviating phytotoxicity caused by these metals. Some mechanisms proposed to relieve stress with silicon (Si) include the immobilization of heavy metals in the soil, the stimulation of enzymatic and non-enzymatic antioxidants, coprecipitation of metals, chelation of metal ions, compartmentation, structural alterations of the cell wall and molecular alterations at the level of the plant. In this review, the potential effect of silicon (Si) and magnesium (Mg) and the mechanisms involved in alleviating heavy metal toxicity are detailed, as well as their overall effect. In addition, some results obtained in the neutralization of cadmium, lead and arsenic with the addition of magnesium silicate in increasing doses to bring the value of metals in solution zero are shared.

Rec : 07/10/2023

Acep : 12/12/2023

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la contaminación por metales pesados en el suelo y el agua ha aumentado particularmente en áreas con mayor presión antropogénica. La acumulación de metales pesados en el suelo es motivo de preocupación en la producción agrícola debido a los efectos adversos en la seguridad y comercialización de los alimentos, la salud de los organismos del suelo y la fitotoxicidad que genera en los cultivos afectando su crecimiento.

Sin embargo, estos “metales pesados” pueden clasificarse como micronutrientes que en cantidades mínimas, algunos, son esenciales para las plantas, como es el caso del cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), y cobalto (Co), involucrados en procesos fisiológicos y bioquímicos de la planta, principalmente en reacciones redox y componentes enzimáticos. Se dice que sólo cuando estos están presentes en formas biodisponibles y en niveles excesivos, tienen el potencial de volverse tóxicos (Nagajyoti, Lee & Sreekanth, 2010).

Los demás metales pesados se clasifican como no esenciales y potencialmente tóxicos, como por ejemplo, cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), cromo (Cr), arsénico (As) y plata (Ag), significan un riesgo no solo para las plantas sino para los demás seres vivos ya que se incorporan en la cadena trófica (Bhat *et al.*, 2019; Kalaivanan & Ganeshamurthy, 2016).

Altas concentraciones de metales pesados alteran la absorción, acumulación y translocación de elementos esenciales en la planta (Zia-ur-Rehman, Sabir & Nadeem; 2015). Efectos tóxicos comunes causados por metales pesados incluyen la inhibición de crecimiento y fotosíntesis, baja acumulación de biomasa, afectación de la asimilación de nutrientes y del balance hídrico, senescencia y finalmente la muerte de la planta (Ali *et al.*, 2011).

Efecto del silicio en la reducción de estrés por metales pesados

Los efectos del silicio (Si) como elemento benéfico, han sido muy estudiados en el sistema suelo-planta. Algunos de los papeles más importantes que tiene el silicio en las plantas son la absorción y homeostasis de los nutrientes, y la reducción del estrés causado por algunos metales pesados presentes en el suelo (Liang *et al.*, 2005). Una de las propiedades de los silicatos en el suelo para reducir el estrés por la presencia de metales pesados es que pueden convertir fracciones solubles e intercambiables de metales en formas químicas estables, disminuyendo la biodisponibilidad del metal.

La adición de silicato al suelo promueve la polimerización de compuestos silicatados, conocidos como ligandos potenciales para metales pesados complejos (Dietzel, 2000; Sommer *et al.*, 2006). El alivio de la fitotoxicidad de metales pesados no es solo debido a la disminución de la biodisponibilidad de los metales en los suelos tratados con Si, sino que también depende de los efectos del Si dentro de la planta (Epstein, 1999; Liang *et al.*, 2007). De acuerdo con Bhat *et al.* (2019) los principales mecanismos de mejora del Si al estrés metálico incluyen: la inmovilización de metales tóxicos en el suelo, la estimulación de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos, coprecipitación de metales, quelación de iones metálicos, compartimentación, alteraciones estructurales de los tejidos vegetales y alteraciones moleculares a nivel de la planta.

Inhibición de la translocación de metales desde las raíces a los brotes.

El Si afecta la translocación y distribución de metales pesados en varias partes de la planta y les permite sobrevivir bajo mayor estrés. Se observó que el tratamiento con Si reduce el transporte de Zn desde las raíces a los brotes y aumenta la unión de Zn a la pared celular, disminuyendo así la concentración de Zn en los brotes de arroz (Yamaji, Mitatni & Ma, 2008). En trigo, la aplicación de Si también

reduce la translocación de Cd de la raíz a los brotes y granos (Naeem, Ghafoor & Farooq; 2015), y en arroz, Shi *et al.* (2005) observaron una disminución del 33% en la translocación de Cd de la raíz a los brotes. Igualmente Zehra *et al.* (2020) demostraron en *A. annua* que el Si aplicado exógenamente aumentó la acumulación de Cu en los tejidos de las raíces conteniendo su translocación a los brotes, aliviando los efectos dañinos del exceso de Cu en las plantas afectadas y al mismo tiempo promoviendo el crecimiento y aumento de la producción.

Estimulación de sistemas antioxidantes en plantas: El sistema antioxidante enzimático y no enzimático estimulado por el Si ayuda a disminuir el estrés oxidativo al reducir la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). Varios estudios han demostrado una relación entre la aplicación de silicio y el alivio del estrés causado por Cd, Pb, Mn, Zn y Cu en cultivos como tomatillo, pepino, arroz y maíz (Shi *et al.*, 2005; Lukačová *et al.*, 2013; Jia-Wen *et al.*, 2013). Tripathi *et al.* (2013) también informan que el Si mejoró la tolerancia al As en algunos cultivares de arroz. La aplicación de Si remedió significativamente el estrés oxidativo inducido por As en un cultivar al limitar la absorción de As y mejorar los sistemas antioxidantes y tiólicos más que en otro cultivar. Aunque no está claro si es el resultado de una acción directa o indirecta del Si, lo cierto es que la aplicación de este elemento causa un aumento significativo de antioxidantes enzimáticos como la superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa y glutatión reductasa y no enzimáticos como ascorbato y glutatión; reduciendo al mismo tiempo compuestos relacionados con el estrés oxidativo como el malondialdehído (MDA), Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) y la fuga electrolítica (Li *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2005).

Compartimentación de iones metálicos dentro de las plantas: Liu *et al.* (2013) informan por primera vez que una forma de Si unida a la pared inhibe la absorción de iones de cadmio en las células de arroz

posiblemente a través de la codeposición de Si y Cd en la pared celular como complejos de [matriz de pared de Si]-Cd. Un aumento en la densidad de carga negativa debido a la asociación de Si puede explicar por qué las plantas tratadas con Si tienen más deposición de Cd en la pared celular. El mismo estudio sugiere además que la inhibición de la absorción de cadmio por el Si unido a la pared está relacionada no solo con una mayor deposición de Cd en la pared celular, sino también con la baja expresión de genes transportadores de Cd como *Nramp5* (Ma *et al.*, 2015).

Bajo estrés prolongado por Cd, se encontró que las paredes celulares modificadas con Si reducen la toxicidad del Cd mediante la compartimentación del Cd en vacuolas para reducir los niveles de Cd en el citoplasma. También se observó que el silicio aumenta la localización de Mn en la pared celular en pepino (Dragišić *et al.*, 2012). Además, en plantas tratadas con Si, se localizó menos Mn en el simplasto (<10%) y se unió más Mn a la pared celular (> 90%) en comparación con las plantas control (Rogalla & Römheld, 2002). Se han identificado complejos de Si en la pared celular de diferentes plantas. Los posibles ligandos de Si incluyen los de hemicelulosa, pectina y lignina (Fig. 1) (Sheng & Chen, 2020). La asociación de ácido monosilícico en la pared celular de la planta puede conducir a la formación de enlaces Si – O – C, lo que lleva a una mayor densidad de carga negativa en la pared y, por lo tanto, aumenta la unión de los iones metálicos libres a la pared. Esta mayor carga negativa, además, da como resultado un alivio de la toxicidad de los metales pesados y una mejora en la absorción de nutrientes (He *et al.*, 2015; Adrees *et al.*, 2015) (Fig. 2).

De otro lado, el Si unido a la pared celular modula la síntesis y remodelación de la pared celular, lo que da como resultado una relativamente densa disposición de microfibrillas de celulosa y una pared celular reforzada contra el estrés biótico y abiótico (Sheng *et al.*, 2018). La remodelación de la pared celular inducida por Si también tiene

efectos benéficos para mantener la integridad de la membrana plasmática y, además, mejora la tolerancia al estrés salino, así como a la homeostasis de nutrientes (Sheng et al., 2018). También es posible que la remodelación de la pared celular inducida por Si desencadena la señalización de la integridad de la pared celular y, por lo tanto, mejora el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés (Engelsdorf et al., 2018; Voxeur y Hofte, 2016). Dada la coexistencia de silicio orgánico y SiO₂ inorgánico en las plantas, es un desafío distinguir los efectos de las dos sustancias químicas en el crecimiento de las plantas y las respuestas al estrés. (Głazowska et al., 2018).

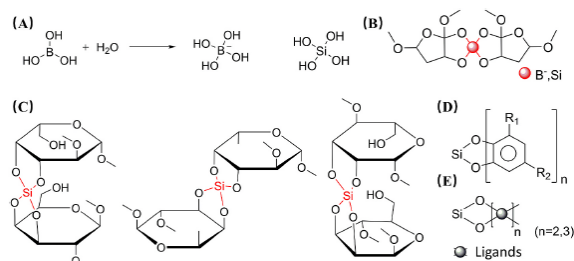


Figura 1. Posibles patrones de enlaces de Si en la pared celular (Tomada de Sheng & Chen, 2020)

En la figura 1 se describen los posibles patrones de vinculación del silicio a la pared de células de las plantas. (A) El ácido bórico se convierte en borato [B(OH)₄⁻] en soluciones a pH fisiológico. La similitud estructural implica la comparabilidad de productos químicos y las propiedades de Si y B. (B) Las reacciones de enlaces 1,3 residuos de apiosilo en ramnogalacturonano II (RG-II, pectina) con ácido bórico y ácido monosilícico (Kobayashi et al., 1996; O'Neill et al., 1996). (C) Complejamiento de hidroxilo entre H₄SiO₄ y cis-dioles en hemicelulosas. Complejos de silicato / borato-azúcar están formados por la reacción de formosa en la Fig.1B y C. (D) Posible reticulación de Si y unidades fenólicas en ligninas (Birchall, 1995). (E) Si poli-coordinado en plantas. A diferencia del Boro, el Silicio puede formar hasta seis enlaces coordinados (Kinrade et al., 1999).

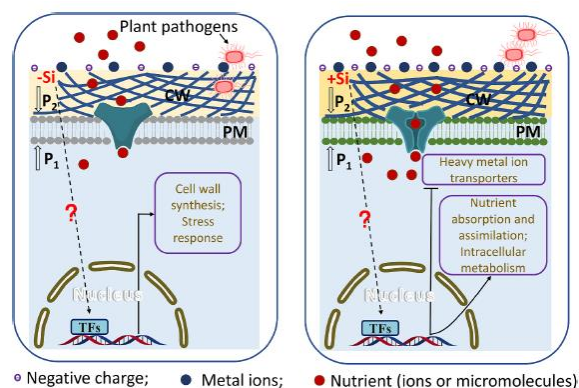


Figura 2. Papel del Silicio en la formación de complejos en la pared celular de las plantas (Tomada de Sheng & Chen, 2020)

En la figura 2 se ilustran distintas funciones de la matriz de silicio en la pared celular y su influencia en el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés. Un posible mecanismo es que el silicio orgánico altera la estructura de la pared celular y por lo tanto sus propiedades mecánicas y potencial superficial. De esta manera, aumenta la densidad de carga negativa de la pared celular y, por lo tanto, la unión de iones metálicos en la pared (Ma et al., 2015).

Las Paredes celulares relativamente rígidas proporcionan presión invertida (P2) para contrarrestar la turgencia celular (P1), que ayuda a mantener la integridad de la membrana plasmática (PM verde en las células β Si) y evitar la despolarización (PM gris en células -Si) (Sheng et al., 2018). La membrana plasmática estabilizada tiene efectos benéficos sobre los transportadores o canales de iones y, además induce tolerancia al estrés y homeostasis de iones y nutrientes. Los enlaces Si-O-C de la matriz de pared celular no son escindibles por las enzimas de degradación de la pared celular producidas por patógenos vegetales haciendo la pared resistente a la degradación durante la infección de patógenos (Schwarz, 1973). Es posible que la remodelación de la pared celular inducida por el Si, coordina la señalización con la integridad de la pared celular para regular dinámicamente el crecimiento de las plantas y su desarrollo en respuesta a cambios ambientales, y da como

resultado un alivio de la toxicidad de los metales pesados.

En conclusión se dice que el Si juega un papel importante para mejorar la resistencia al estrés causado por los metales pesados. Sin embargo, los mecanismos de alivio mediados por Si pueden estar correlacionados con las especies de plantas, el entorno de crecimiento, los metales pesados, los nutrientes minerales, el momento del estrés impuesto, entre otros factores.

Efecto del Magnesio en la reducción de estrés por metales pesados

El magnesio considerado esencial para la planta, también puede aliviar el estrés por metales pesados al disminuir la actividad de los iones metálicos en la superficie de la membrana plasmática (competencia físico-química), al mejorar las actividades de las enzimas involucradas en la biosíntesis de ligandos orgánicos y al aumentar el secuestro vacuolar de metales pesados a través del aumento de la actividad de las bombas H^+ en el tonoplasto (Rengel *et al.*, 2016).

El magnesio mejora no solo la toxicidad del Al^{3+} , sino también la toxicidad de otros metales. Se propuso el alivio de la fitotoxicidad de Cd por Mg^{2+} en el caso de la espinaca de mostaza japonesa (*Brassica rapa* L. var. *Perviridis*) (Kashemand Kawai 2007), con la desviación de crecimiento resultante en un crecimiento de brotes ~ 2 veces mayor y una concentración de Cd 40% menor en los brotes. Pedler *et al.* (2004) demostraron el alivio por Mg^{2+} de la rizotoxicidad del Zn en trigo y rábano.

Efecto del Silicato de magnesio (SiliMagnum®) en la reducción de estrés por metales pesados

Con el propósito de contribuir al mejoramiento en la calidad de los abonos orgánicos que se utilizan en la agricultura, se desarrolló un trabajo de investigación en búsqueda de la neutralización de metales pesados en residuos orgánicos provenientes de la planta de depuración de aguas residuales

urbanas, a partir de curvas de adición de silicato de magnesio, obtenidas al someter al abono a pruebas de incubación, buscando la neutralización de los metales pesados que contienen estos abonos.

Paralelamente se desarrollaron pruebas de neutralización de cadmio, plomo, y arsénico en soluciones acuosas preparadas en laboratorio, encontrando resultados altamente satisfactorios (Figuras 3, 4, 5 y 6) (Ríos & Cristancho, 2016).

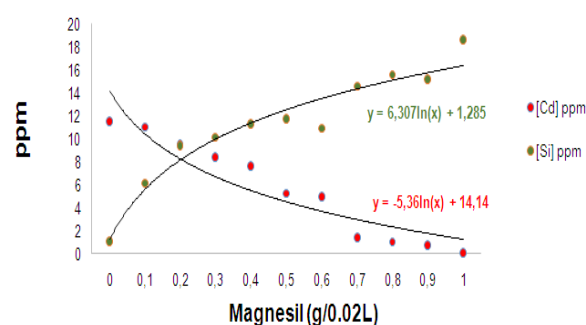


Figura 3. Efecto de dosis crecientes de SiliMagnum – Magnesil sobre Cadmio

Las reacciones de formación de complejos con los metales pesados se asemejan a las que ocurren para acomplejar el aluminio del suelo:

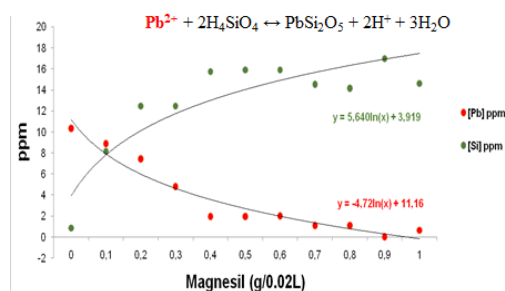
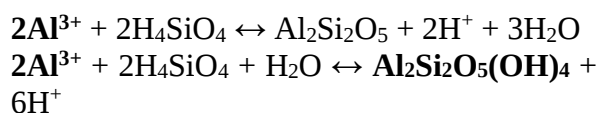


Figura 4. Efecto de dosis crecientes de SiliMagnum – Magnesil sobre Plomo

De tal manera que se cambia el reactivo de Al por el de Cd, Pb, As o el metal del que se trate, pues todos ellos son cationes metálicos (Osorio, 2014).



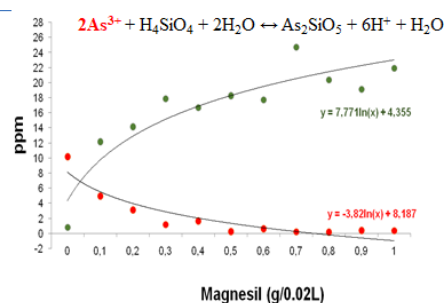


Figura 5. Efecto de dosis crecientes de SiliMagnum – Magnesil sobre Arsénico

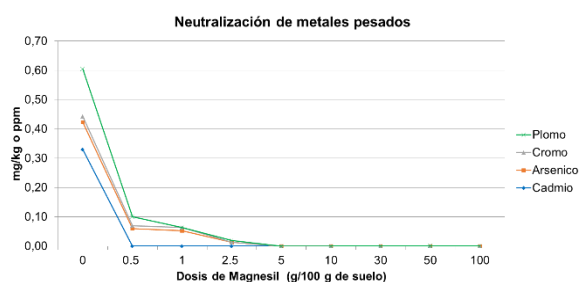


Figura 6. Efecto de dosis crecientes de SiliMagnum – Magnesil sobre metales pesados en suelos

Las figuras 3, 4 y 5 muestran claramente el impacto que se logra con las aplicaciones de SiliMagnum® o Magnesil® en soluciones acuosas ricas en cada uno de los metales pesados. (Rios y Cristancho, 2016). La figura 6 es parte de un trabajo de investigación más amplio sobre la remediación de metales pesados en suelos y materiales orgánicos (Duque & Restrepo, 2018). Es difícil separar el efecto del silicio y el impacto que puede tener el magnesio en estas reducciones, pero es claro que ambos elementos contenidos en el producto comercial tienen la capacidad de reducir los efectos adversos que pueden tener los metales pesados, no sólo en la toxicidad de las plantas, sino en cortar sus efectos en la cadena alimenticia de animales y humanos que pueden estar comprometidos.

BIBLIOGRAFIA

Ali, S., Bai, P., Zeng, F., Cai, S., Shamsi, I. H., Qiu, B., & Zhang, G. 2011. The ecotoxicological and interactive effects of chromium and aluminum on growth, oxidative damage and antioxidant enzymes on two barley genotypes differing in Al

tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 70(2-3), 185-191.

Bhat, J. A., Shivaraj, S. M., Singh, P., Navadagi, D. B., Tripathi, D. K., Dash, P. K.,... & Deshmukh, R. 2019. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*, 8(3), 71.

Dragišić Maksimović, J., Mojović, M., Maksimović, V., Römheld, V., & Nikolic, M. 2012. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. *Journal of Experimental Botany*, 63(7), 2411-2420.

Duque, C.; Restrepo, F. 2018. *Remediación de metales pesados en lodos de la planta San Fernando con dosis crecientes de SiliMagnum*. Sin publicar.

Imtiaz, M., Mushtaq, M.A., Rizwan, M.S., Arif, M.S., Yousaf, B., Ashraf, M., Shuanglian, X., Rizwan, M., Mehmood, S., Tu, S., 2016. Comparison of antioxidant enzyme activities and DNA damage in chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes exposed to vanadium. *Environ. Sci. Pollut.*

Jia-Wen, W. U., Yu, S. H. I., Yong-Xing, Z. H. U., Yi-Chao, W. A. N. G., & Hai-Jun, G. O. N. G. 2013. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review. *Pedosphere*, 23(6), 815-825.

Kalaivanan, D.; Ganeshamurthy, A.N. 2016. Mechanisms of heavy metal toxicity in plants. In *Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops*; Springer: Berlin, Germany, pp. 85–102.

Liu, J., Zhang, H., Zhang, Y., & Chai, T. 2013. Silicon attenuates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L. by reducing cadmium uptake and oxidative stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 68, 1-7.

Li, P., Song, A., Li, Z., Fan, F., & Liang, Y. 2012. Silicon ameliorates manganese toxicity

by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, 354(1-2), 407-419.

Lukačová, Z., Švubová, R., Kohanová, J., & Lux, A. 2013. Silicon mitigates the Cd toxicity in maize in relation to cadmium translocation, cell distribution, antioxidant enzymes stimulation and enhanced endodermal apoplastic barrier development. *Plant Growth Regulation*, 70(1), 89-103.

Ma, J., Cai, H., He, C., Zhang, W., & Wang, L. 2015. A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells. *New Phytologist*, 206(3), 1063-1074.

Neumann, D., & Zur Nieden, U. 2001. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. *Phytochemistry*, 56(7), 685-692.

Naeem, A., Ghafoor, A., & Farooq, M. 2015. Suppression of cadmium concentration in wheat grains by silicon is related to its application rate and cadmium accumulating abilities of cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(12), 2467-2472.

Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. V. M. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental chemistry letters*, 8(3), 199-216.

Osorio, N. W. 2014. Manejo de nutrientes en suelos del trópico. Editorial Medellín, Colombia: L. Vieco SAS, 117-129.

Tripathi, P., Tripathi, R. D., Singh, R. P., Dwivedi, S., Goutam, D., Shri, M., ... & Chakrabarty, D. (2013). Silicon mediates arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through lowering of arsenic uptake and improved antioxidant defence system. *Ecological engineering*, 52, 96-103.

Rengel, Z., Bose, J., Chen, Q., & Tripathi, B. N. 2016. Magnesium alleviates plant toxicity of aluminium and heavy metals. *Crop and Pasture Science*, 66(12), 1298-1307.

Rios, J.J. y Cristancho, A. 2016. *Efecto del Magnesil en la neutralización de metales pesados en solución*. Sin publicar.

Rogalla, H., & Römheld, V. 2002. Role of leaf apoplast in silicon-mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant, Cell & Environment*, 25(4), 549-555.

Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q., & Yu, J. 2005. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Phytochemistry*, 66(13), 1551-1559.

Sheng, H. & Chen, S. 2020. Plant silicon-cell wall complexes: Identification, model of covalent bond formation and biofunction. *Elsevier Plant Physiology and Biochemistry* 155 (2020) 13–19.

Song, A., Li, Z., Zhang, J., Xue, G., Fan, F., & Liang, Y. 2009. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 74-83.

Vieira Da Cunha, P. K., Araújo Do Nascimento, W. C., & Da Silva, J. A. 2008. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 849-853.

Yamaji, N., Mitatni, N., & Ma, J. F. 2008. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *The plant cell*, 20(5), 1381-1389.

Zehra, A., Choudhary, S., Wani, K. I., Naeem, M., Khan, M. M. A., & Aftab, T. 2020.

Silicon-mediated cellular resilience mechanisms against copper toxicity and glandular trichomes protection for augmented artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua*. *Industrial Crops and Products*, 155, 112843.

Zia-Ur-Rehman, M., Sabir, M., & Nadeem, M. 2015. Remediating cadmium-contaminated soils by growing grain crops using inorganic amendments. *Soil remediation and plants: Prospects and challenges*, 367-396.