



## El silicio (Si), un aliado de las plantas

Mora Soto, Y., Reyes Tena, A. y López Pérez, L. (2025). El silicio (Si), un aliado de las plantas [*Postprint*]. CIENCIA *ergo-sum*, 33. <https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a55>

Sección: Espacio del Divulgador

**Universidad Autónoma del Estado de México, México**

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

## El silicio (Si), un aliado de las plantas Silicon (Si), an ally of plants

**Yamilet Mora Soto**

Adscripción: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Correo electrónico: [1132958f@umich.mx](mailto:1132958f@umich.mx)

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-9806-6826>

**Alfredo Reyes Tena**

Adscripción: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Correo electrónico: [alfredo.reyes@umich.mx](mailto:alfredo.reyes@umich.mx)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9112-8303>

**Luis López Pérez**

Adscripción: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.<sup>1</sup>

Correo electrónico: [luis.lopez.perez@umich.mx](mailto:luis.lopez.perez@umich.mx)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7904-9039>

Recepción: 10 de octubre de 2024

Aprobación: 30 de mayo de 2025

### RESUMEN

Este artículo de divulgación explora el impacto del silicio (Si), en la nutrición y resistencia de las plantas. El objetivo fue destacar su papel en la mitigación del estrés biótico y abiótico, pese a no considerarse un nutriente esencial. La metodología consistió en una revisión de investigaciones previas sobre su presencia en el suelo, mecanismos de absorción y efectos fisiológicos. Los resultados sugieren que el silicio fortalece estructuras de la planta, mejora la adaptación a condiciones adversas y optimiza el crecimiento vegetal. Su uso en prácticas agrícolas indica que aumenta la productividad y sostenibilidad, evidenciando la necesidad de reconsiderar su clasificación en la nutrición vegetal. En conclusión, estos hallazgos evidencian nuevas estrategias en el manejo de cultivos y su protección.

**PALABRAS CLAVE:** nutrición, elementos benéficos, crecimiento vegetal, protección vegetal.

### ABSTRACT

This outreach article explores the impact of silicon (Si) on plant nutrition and resilience. The objective was to highlight its role in mitigating biotic and abiotic stress, despite not being considered an essential nutrient. The methodology consisted of a review of previous research on its presence in the soil, absorption mechanisms, and physiological effects. The results suggest that silicon strengthens plant structures, improves adaptation to adverse conditions, and optimizes growth. Its use in agricultural practices indicates increased productivity and sustainability, highlighting the need to reconsider its classification in plant nutrition. In conclusion, these findings point to new strategies in crop management and plant protection.

**KEYWORDS:** nutrition, beneficial elements, plant growth, plant protection.

---

<sup>1</sup> Autor para correspondencia.

## INTRODUCCIÓN

Todas las plantas requieren nutrientes para crecer, formar tejidos y los órganos que a diario comemos, de alguna forma u otra, son parte fundamental para la fabricación de moléculas que ayudan a la planta a alimentarse y fortalecerse ante los cambios del ambiente. En este sentido, te has preguntado ¿cuáles son estos nutrientes?, ¿en qué cantidad son necesarios?, ¿de dónde los obtienen?, ¿existen más elementos que se podrían considerar como nutrientes?, las respuestas a estas interrogantes pudieran ser básicas para las personas que estudian las plantas, sin embargo, en ocasiones poco se sabe de ciertos elementos como el silicio (Si), que poco a poco ha ido incorporándose en la agricultura debido a las investigaciones que determinan sus funcionalidad e importancia en la producción agrícola y que años atrás ha sido considerado como un nutriente beneficiosos y no esencial, dado que está presente en forma abundante en la corteza terrestre. Como todas las especies vegetales comparten las mismas rutas metabólicas para la formación de las moléculas que les permiten crecer y aprovechar su entorno, entonces, es probable que el Si también se considere un nutriente esencial para muchas otras plantas. De ahí que resulta interesante conocer de qué forma este elemento poco estudiado podría considerarse útil en la producción de alimentos de origen vegetal, considerando su uso como promotor del crecimiento y protector contra las enfermedades que a diario se presentan en la agricultura.

### 1. LAS PLANTAS REQUIEREN NUTRIENTES

Las plantas son seres vivos pertenecientes al reino vegetal, se originaron a finales del período Devónico, hace aproximadamente 380 millones de años. En la actualidad, han adquirido la capacidad de colonizar todos los hábitats presentes de la Tierra (Gutiérrez, 2020) y en producir semillas o en desarrollar sistemas conductores como el xilema y el floema para distribuir agua y nutrientes en su propio sistema, también han formado tejidos con funciones de protección y de sostén. Cabe destacar que estos organismos son autótrofos, lo cual significa que producen sus propio alimento, esto lo logran mediante el proceso metabólico nombrado fotosíntesis, el cual se lleva a cabo en organelos especializados llamados cloroplastos, aquí el dióxido de carbono que fijan las hojas y el agua que absorben de las raíces se transforman en carbohidratos (azúcares) y oxígeno. Este proceso permitió la vida vegetal y animal como la conocemos hasta ahora, pues, requiere de la energía solar,

reacciones bioquímicas, enzimáticas y energéticas como el NADPH y ATP para elaborar otros compuestos útiles y necesarios como proteínas, lípidos, aceites esenciales, hormonas, etc., con el fin de que puedan sobrevivir o inclusive sean de alimento para otros seres vivos. Para ello, necesitan de ciertos recursos necesarios que otorga el suelo y puedan absorber por medio de la raíz y transportar al cuerpo vegetativo para lograr crecer, desarrollarse, adaptarse, reproducirse, sobrevivir y coexistir en el medio al cual se encuentran ancladas, lo que les ha conferido evolucionar y colonizar con éxito los ambientes terrestres (Chuncho et al., 2019, Gutiérrez, 2020 y Campbell et al., 2021).

Para garantizar el desarrollo y funcionamiento óptimo de la fotosíntesis en las plantas, éstas dependen de tres fuentes principales como el aire, agua y suelo. Donde podemos encontrar diferentes minerales considerados como esenciales y otros considerados como beneficiosos, es decir que las plantas los adquieren por altas o mínimas concentraciones, ya que al existir excesos o deficiencias aparecen algunos síntomas como malformaciones, crecimiento anormal, decoloraciones, quemaduras, etc. Por lo que, la nutrición mineral es fundamental en la agricultura para diagnosticar a tiempo los productos agrícolas, modernizar las prácticas agrícolas, proteger el medio ambiente y comprender las interacciones ecológicas de las plantas (Kathpalia y Bhatla, 2018 y Taiz et al., 2022).

### **1. 1. Nutrientes esenciales para las plantas**

Las plantas por medio de sus raíces extraen, captan, absorben nutrientes del suelo y agua, estos están en forma de iones y compuestos inorgánicos de los cuáles se han identificado más de 60 elementos, pero no todos son incorporados a las plantas, sin embargo, solo 16 son considerados como esenciales en angiospermas y gimnospermas, lo que significa que son necesarios para que la planta los acumule e integre a su metabolismo y pueda completar su ciclo de vida. El carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O<sub>2</sub>) componen más del 90% de las plantas y se obtienen del agua y el CO<sub>2</sub> que, en presencia de luz, producen carbohidratos. Luego, destacan seis elementos que son requeridos en concentraciones altas, razón por la cual son llamados como macronutrientes y estos son: el nitrógeno (N), el cual es constituyente de formar parte de compuestos de carbono en la planta para su desarrollo, crecimiento, formación de frutos y granos; el fósforo (P), propicia al metabolismo energético, la fotosíntesis y respiración, así como la germinación de las semillas; el potasio (K), se

encarga de controlar y regular la transpiración evitando la pérdida de agua dentro de las células; el azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg) intervienen en la síntesis de vitaminas, clorofila, compuestos volátiles y proteínas para preservar las estructuras celulares, brindar rigidez a la pared celular y protección contra patógenos (Bonilla, 2013; Taiz et al., 2022;).

Ahora bien, existen otros elementos que la planta necesita en cantidades pequeñas, pues en exceso pueden resultar tóxicos y a estos se les conoce como micronutrientes, donde se incluyen al cloro (Cl), hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) en el caso de la cebada y molibdeno (Mo), todos ellos tienen la función en participar como componentes en reacciones enzimáticas, metabólicas y de balance, dado que equilibran cargas positivas y negativas en el interior de las células vegetales (Bonilla, 2013; Taiz et al., 2022).

## **1. 2. Elementos beneficiosos**

Del mismo modo como se ha indicado la relevancia de los elementos esenciales también existen los que son considerados como beneficiosos, debido a que tienen la característica de aportar o participar en funciones específicas y con concentraciones muy bajas dado que pueden aplicarse de forma foliar o radicular en sistemas hidropónicos y en soluciones de florero, en el caso de especies ornamentales (Bonilla, 2013 y Gómez-Merino, et al., 2015). Entre los múltiples beneficios están el de suplir o compensar aquellos efectos tóxicos que pueden llegar a ocasionar otros elementos, además estimulan al crecimiento y desarrollo de las plantas, mejoran la nutrición y el deterioro del entorno del suelo, detonan la defensa en la planta contra el estrés biótico y abiótico (Bonilla, 2013; Gómez-Merino, et al., 2015 y Willey, 2016). Entre ellos, se encuentra al sodio (Na), para plantas con metabolismo fotosintético C4 como el amaranto, el maíz, la caña de azúcar, y sorgo, donde se han evidenciado múltiples beneficios y ante la deficiencia de potasio (Gómez-Merino et al., 2015), por otra parte, las plantas CAM como las crasuláceas, el nopal, la pitahaya y orquídeas (INTAGRI, 2018), el Na mejora el crecimiento vegetal (Gómez-Merino et al., 2015). Por otro lado, el cobalto (Co) interviene en la fijación y asimilación de nitrógeno en leguminosas; así pues, el selenio (Se) puede aplazar la senescencia, disminuir el impacto negativo de la radiación solar y activar mecanismos antioxidantes. No obstante, el yodo (I) aplicado en dosis correctas intercede en la absorción de nitrógeno en lechuga y espinaca, además mejora la absorción de otros

elementos esenciales como Mg, Fe y Zn e incrementa el rendimiento y el tamaño de los frutos de manzano (Gómez-Merino et al., 2015), el aluminio (Al), se ha reportado en la literatura que ayuda en el desarrollo de la radícula en la semilla, en la modulación del color en las hortensias, además, mejora el crecimiento y tiempo de vida de floración como en las rosas, lisiantus y rododendro, asimismo, detona mecanismos de defensa contra algún estrés y ayuda en el establecimiento de la plántula, sin embargo, este elemento en concentraciones altas puede reducir el crecimiento de las raíces, por lo que afectaría la absorción de agua y nutrientes, impidiendo así el crecimiento vegetal (Bonilla, 2013; Gómez-Merino, et al., 2015 y Kochhar y Kaur, 2020).

Otro elemento beneficioso es el silicio (Si), este elemento en años recientes ha captado mayor atención y se han realizado varios trabajos e investigaciones en distintas plantas de interés agrícola, señalando que puede ayudar a contrarrestar efectos adversos de diversos tipos de estrés biótico y abiótico (Aguirre et al., 2020), equilibrar los efectos tóxicos de metales pesados, aumenta el crecimiento en avena, incrementa la germinación en melón y activa mecanismos de defensa y vitalidad en las plantas, pues se ha reportado que en clavel, el Si disminuye la producción de etileno propiciando el tiempo de floración en florero (Gómez-Merino et al., 2015).

## 2. DIFERENCIAS ENTRE SILICIO Y SÍLICE

Antes de comenzar es necesario diferenciar los conceptos silicio y sílice, para ello, se recurre a la química inorgánica, pues el término silicio es un elemento que se encuentra en la tabla periódica del grupo 4A, tiene como simbología (Si) y considerado como un metaloide tetravalente y un buen semiconductor, por ello, es usado en los circuitos electrónicos. Es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre de la Tierra al representar el 27.2%. Mientras que, la sílice es un compuesto formado por la unión del silicio con el oxígeno y es representado con la fórmula molecular  $\text{SiO}_2$  o conocido como dióxido de silicio. Este compuesto es el más estable y se encuentra en la naturaleza como cuarzo, caolinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , esméctica, vermiculita  $(\text{Mg, Fe, Al})_3(\text{Al, Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , sílice amorfo o silicofitolitos  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , formas cristalinas como el feldespato, ortoclasa, plagioclasa y silicatos ( $\text{SiO}_4$ ), tales como el silicato de aluminio  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , silicato de magnesio  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , silicato de potasio  $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ , silicato de hierro  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , el silicato de calcio  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , el

silicato de sodio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , estos compuestos están presentes en las arenas, arcillas y en menores proporciones en el suelo (Liang et al., 2015a; Chang y Overby, 2019; Osterrieth et al., 2019; Bist et al., 2020 y Maldonado, 2022). A nivel industrial, la sílice es empleada para la producción de vidrio, productos químicos, en la industria de la construcción, electrónica, para filtración, alimentos y en medicina (IGME, 2022).

## 2. 2. ¿De qué forma se almacena el silicio en los organismos?

El silicio es un elemento químico con gran importancia para algunos organismos y en particular para las plantas, ya que la manera en la que está disponible es como ácido silícico o ácido monosilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), este compuesto se forma por la erosión o desgaste de las rocas ígneas y sedimentarias de la litosfera, debido por la temperatura, el pH, el agua y la actividad microbiana (Raturi et al., 2021). Sin embargo, el ciclo del silicio comienza de manera natural mediante la meteorización de las rocas de silicio o de silicato en las montañas, en la costa o en los ríos, después de esto, los fragmentos de roca de silicato liberados al agua se mezclan y crean una reacción química utilizando el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera, por ello, la meteorización es importante para liberar Si disuelto en el agua y eliminar el  $\text{CO}_2$  atmosférico (Cassarino et al., 2024). Así mismo el silicio disuelto es dirigido hacia los mares y océanos, donde a su vez, algunos organismos como las esponjas de mar, los radiolarios y las diatomeas capturan grandes cantidades de silicio y lo absorben y depositan en su esqueleto o pared celular, para formar espículas, conchas opalinas y frústulas, ya que estas estructuras les servirán de protección contra depredadores o ante factores ambientales y puedan realizar su función como es la de capturar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) tanto de la atmósfera como del lecho marino. Posteriormente, cuando mueren estos seres vivos se libera el silicio de su esqueleto y se mezcla con el agua para después ser utilizado nuevamente o se irá a sedimentar en el fondo marino, allí tal vez le lleve mucho tiempo permanecer enterrado junto con el carbono capturado (Raya y Aguirre, 2012; Britannica, 2023 y Cassarino et al., 2024). Por otra parte, a medida que los suelos se deterioran y empobrecen el suministro de silicio, se vuelve menos disponible en particular para las plantas, asimismo existen evidencias e investigaciones que revelan que el ciclo del silicio podría estar regulado por el tiempo, la meteorización, la naturaleza y tamaño de las partículas, el pH del suelo, el clima húmedo, la erosión acidificada, la textura, la mineralogía y la acción de microorganismos como las

bacterias solubilizadoras de silicatos (SSB) (Tombeur et al., 2020 y Raturi et al., 2021). Se han reportado los siguientes géneros de SSB como: *Acidobacillus*, *Burkholderia*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Aminobacter*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, etc., a su vez, están presentes y distribuidas en ambientes como el suelo, agua, sedimentos, minerales, rocas erosionadas y en la rizosfera, tienen una importante participación en el ciclo biogeoquímico del Si y un gran potencial para solubilizar silicatos e incrementar la disponibilidad de este elemento en las plantas promoviendo la fertilidad de los suelos en la agricultura (Raturi et al., 2021).

Como se planteó en el párrafo anterior, el Si es asimilado por las plantas como ácido silícico, sin embargo se han postulado sus posibles mecanismos de absorción y guardan relación con la absorción del agua, pues de esta forma puede el Si atravesar la membrana plasmática de las células presentes en la raíz de la planta, cabe destacar que depende de la capacidad de las raíces de absorberlo, la presencia y expresión de genes, la identificación de los transportadores en las diferentes especies vegetales (Mitani-Ueno y Feng, 2020), por ello, es necesario conocer el ciclo biogeoquímico del Si, su importancia en el funcionamiento con los ecosistemas, la relación con la fertilidad y los cambios de uso de suelo y la variación filogenética de las plantas (Hodson et al., 2005 y Schaller et al., 2021). Acorde a los tipos de absorción del silicio pueden efectuarse por transporte pasivo o difusión facilitada, es aquí donde por canales proteicos de la membrana plasmática de la célula, garantizan la absorción del Si en la planta y depende del gradiente de concentración, este mecanismo está presente en la mayor parte de las especies vegetales, por otro lado, en el transporte activo no está relacionado al gradiente de concentración pero se ha identificado en plantas con alta e intermedia capacidad de acumulación de Si (Raven, 2003 y Gaur et al., 2020). Se ha descubierto en las raíces de arroz, cebada, maíz y trigo transportadores de Si como es *Lsi1* (*OsLsi1*), el cual es el primer gen de entrada identificado y responsable de facilitar el transporte pasivo a través de las acuaporinas, proteínas inducidas por el gen y presentes en la membrana plasmática de las células, estas cavidades están en la exodermis y endodermis, ambos tejidos son un conjunto de células que bordean a la raíz para absorber el Si y puede retomar dirección por dos vías, una es por el apoplasto o es el espacio extracelular de las células y simplasto o espacio intracelular de las células de la planta. Existen más genes como *Lsi1*, *Lsi2*, *Lsi3* y *Lsi6*, que son los encargados en activar las proteínas presentes en la membrana plasmática de las células en la planta y puedan permitir el transporte del Si a la



exodermis, endodermis, células corticales y parenquimáticas (Ma y Yamaji, 2015; Guo-chao et al., 2018). Además, aún falta seguir investigando otros transportadores de Si en otras partes de la planta (Gaur et al., 2020).

Por otra parte, después de que el Si es absorbido por las células de la raíz y el agua contenida al interior de la planta es evaporada, el ácido silícico se sobresatura en el interior de la planta y se precipita en forma de fitolitos (Reven, 2003) conforme va siendo transportado hacia la pared celular el Si se acumula en las hojas y brotes formando un tejido silicificado. Sin embargo, no en todas las plantas llega a presentarse este proceso de biomineralización, pues depende de la transpiración, la distribución de los fitolitos y en la capacidad de las plantas que logren acumular el silicio en sus células (Strömberg et al., 2016). Así pues, la cantidad de silicio depositado en la materia seca depende de la unidad de agua transpirada, a su vez este Si regresa y se une al ciclo del silicio (Reven, 2003).

### 3. APLICACIONES DEL SILICIO EN LA AGRICULTURA

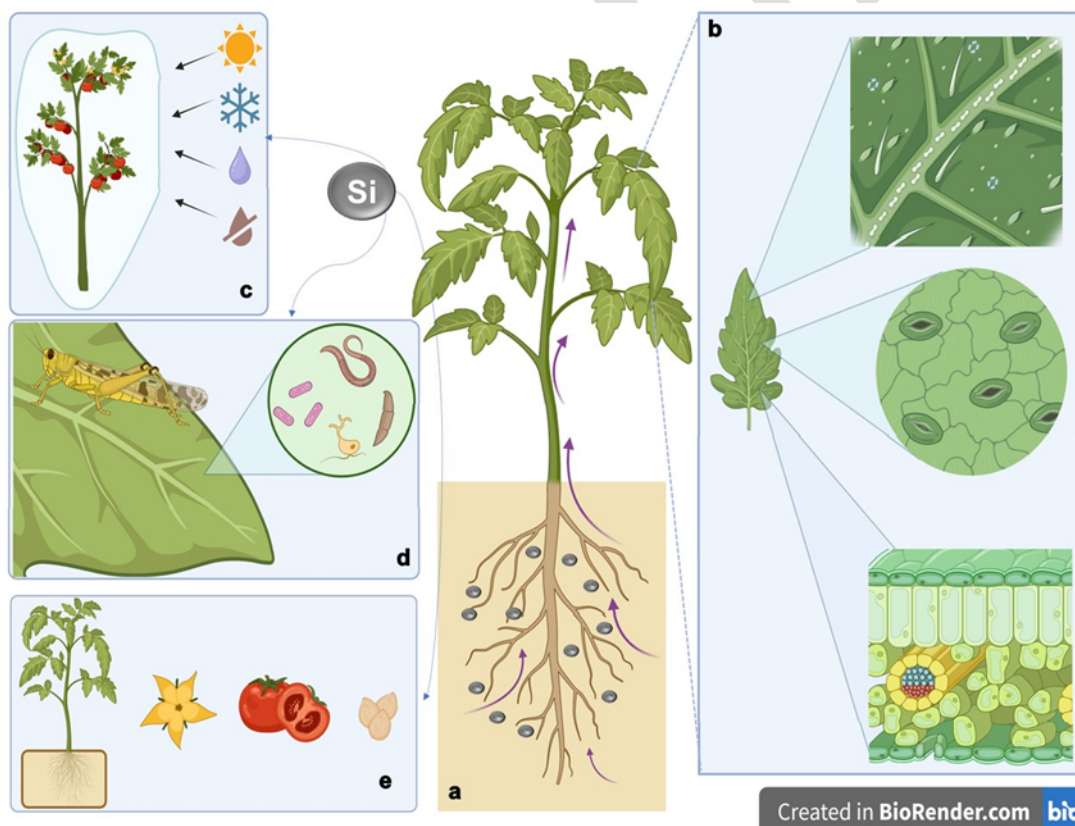
Se ha reportado sobre el uso del silicio en la agricultura hace más de 2000 años, en China, ya que los agricultores incorporaban paja de arroz con estiércol como fertilizante para mejorar el rendimiento de los cultivos, pero en 1917, Isenosuke Onodera fue probablemente el primer científico quien descubrió que el silicio tiene un papel importante al reducir enfermedades en plantas de arroz. Al ser descubierto el silicio, existió un mayor interés por su uso en otros cultivos, donde ha mostrado tener la capacidad para contrarrestar diferentes tipos de estrés tanto bióticos y abióticos (Liang et al., 2015b, Hassan y Ryong, 2018). En algunos países como Japón, Corea, Brasil, Australia, Sudáfrica e India utilizan el silicio como fertilizante y lo incluyen en diferentes formulaciones comerciales (Liang et al., 2015b). Cabe destacar, que a nivel mundial el volumen de producción del silicio en el año 2022 fue de 8.8 millones de toneladas métricas y China es el mayor productor de este mineral, le siguen Rusia, Brasil, Noruega y Estados Unidos, aunque es difícil encontrarlo como elemento puro, pero tiene diversos usos en la industria (Statista Research Department, 2024).

No obstante, se han utilizado diferentes tipos de fuentes a base de silicio como las orgánicas en las que destacan las cenizas de cascarilla de arroz, el biochar, estiércol y compost, así como también las inorgánicas como el gel de sílice, ácido silícico, escorias ricas en silicio, silicato de sodio, silicato de calcio, silicato de potasio, sílice amorfa ( $\text{SiO}_2$ ), nanopartículas

de  $\text{SiO}_2$  (Ahammed y Yang, 2021) y tierra de diatomeas la cual tiene un 90% de  $\text{SiO}_2$  (Loya et al., 2022).

Por lo tanto, en términos generales (Fig. 1), el Si en la agricultura tiene amplios beneficios como es la deposición de este elemento en la planta brindando rigidez y fuerza, además está involucrado en el crecimiento, desarrollo de las plantas, estimulación de la actividad enzimática y mecanismos de defensa y generación de antioxidantes útiles para la planta en condiciones de estrés hídrico (Ahmad, 2021); además se ha reportado que el Si interviene en la reparación celular, regula el metabolismo y en la síntesis de fitohormonas, sin embargo, estas últimas requieren de una investigación más detallada junto con el conocimiento de los procesos moleculares (Pandey et al., 2024).

**Figura 1**  
**Representación de los beneficios del silicio en las plantas de interés agrícola**



Fuente: elaboración propia.

Nota: a. Absorción del silicio por medio del suelo y transportado hacia los brotes y hojas; b. formación de tricomas, regulación estomática y rigidez en la pared celular; c y d. protección ante los factores de estrés abióticos y bióticos; e. mejor rendimiento y productividad en los cultivos.

En relación con lo anterior, este elemento mejora en las plantas la resistencia y tolerancia a la salinidad de los suelos, modula e interviene en diferentes procesos fisiológicos y bioquímicos (Dhiman et al., 2021), disminuye la absorción y acumulación por la toxicidad de metales pesados, permitiendo tener alimentos más seguros y confiables para ser consumidos, sin embargo, los mecanismos siguen siendo aún desconocidos en como el Si interviene para la desintoxicación de metales pesados en las plantas por lo que se requieren investigaciones más profundas, tanto a nivel celular y molecular (Khan et al., 2021). Otro atributo el cual el Si ha despertado el interés es en la capacidad de atenuar los daños por desequilibrio de nutrientes, pues su relación está concentrada en la actividad del silicio con bacterias solubilizadoras y movilizadoras que incrementan la fertilidad del suelo y promueven el crecimiento vegetal (Raza et al., 2023), otro aspecto relevante del Si en la agricultura es el de mitigar los daños ocasionados por las sequías, la radiación UV y los cambios bruscos de temperatura, los cuales afectan a las plantas con el crecimiento vegetal y la producción de frutos, sin embargo, al adicionar silicio bajo esas condiciones existe incremento en el contenido de clorofila, azúcares, antocianinas, flavonoides y componentes antioxidantes en las plantas (Čermelj et al., 2021).

Por otra parte, la aplicación del silicio ante la presencia de plagas y enfermedades se ha reportado que el silicio mejora la rigidez celular de los tejidos de la planta y evita la entrada de patógenos; lo cual, activa en la planta su sistema de defensa sistémica contra microorganismos nocivos (Liang et al., 2015c; Rodrigues et al., 2015). Así, por ejemplo, el uso de tierra de diatomeas suele tener un efecto protector en granos de maíz, así como de insecticida contra *Sitophilus zeamais*, sin embargo, dada su potencialidad sugieren más pruebas y ser una alternativa sostenible para el manejo de plagas en silos de almacenamiento de granos (Marrero-Artabe et al., 2020). Otro rasgo de la aplicación de tierra de diatomeas *in vitro* sobre el molusco *Arion distinctus* es que tiene efecto en su movilidad y mortalidad, lo que este producto es eficaz para el control de babosas es cultivos de fresa (Méndez-Otero et al., 2019). En caso de aplicar otros productos a base de silicio, se ha demostrado que reduce la incidencia de plagas como la mosca blanca en plantas de tomate, esto es debido a que los cristales de Si se acumulan en los haces conductores de los insectos (Peñaloza, 2021).

Cabe considerar, que en los suelos fragmentados existen deficiencias de Si, por lo que podría ser un factor limitante para la producción de los cultivos, debido a que es removido o absorbido del suelo y ya no es regresado, así pues, la importancia de conocer el uso apropiado y cuantificado de fertilizantes con Si deben realizarse pruebas adicionales para su detección (Haynes, 2017).

### 3. 1. Evidencias del silicio en el control de enfermedades en plantas

En la década de los 1950's, se comenzó a indagar sobre los efectos del Si en los cultivos de arroz, ya que mejoraban el rendimiento y crecimiento, pero al mismo tiempo disminuía la incidencia de enfermedades que lo atacan. Por ello, el comienzo de las investigaciones desde la década de 1980's hasta nuestra actualidad, se conoce que el Si reduce la intensidad de enfermedades que son causadas por hongos, oomycetes, bacterias, virus y nematodos en muchas especies vegetales importantes (Datnoff y Rodrigues, 2015). Algunos ejemplos de evidencias que se destacan a continuación sobre el uso del Si en el control de enfermedades se encuentran el de Delgado-Morato y Bermúdez-Cardona, (2021), los cuales, reportan que al agregar el silicio como agente inductor incrementa la actividad enzimática de Polifenoloxidasas (PPO) y proponen como alternativa para el manejo de marchitez vascular generado por *Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici* en plantas de tomate. Así pues, los estudios realizados al agregar silicio en los cultivos de arroz minimizan el daño causado por los hongos *Magnaporthe oryzae* y *Rhizoctonia solani*, debido a que el Si se deposita en la pared celular y espacios intercelulares de la planta o induce la biosíntesis de lignina maximizando los beneficios y controlando las enfermedades de estos agentes causales (Sathe et al., 2021). De la misma forma, al aplicar el Si de manera exógena mejora la tolerancia en la caña de azúcar ante la infección por la bacteria *Xanthomonas albilineans* pues modula y activa la expresión tanto hormonal y actividad enzimática en la Fenilalanina amonio-liasa (PAL), el ácido jasmónico (JA) y ácido salicílico (SA) (Hong et al., 2021).

Por ello, como se ha descrito anteriormente los efectos notables del silicio en la reducción de las múltiples enfermedades causadas por los organismos patógenos en las plantas, permite ser una estrategia integrada al manejo de enfermedades y reduce el uso de agentes químicos, lo cual no daña al medio ambiente (Rodrigues et al., 2015).

## PROSPECTIVA

Las plantas son seres vivos que dependen directamente de las condiciones del ambiente para crecer y sobrevivir, pero a medida que entendemos su funcionamiento, vamos descubriendo que existen otros elementos químicos en la naturaleza que podrían desempeñar funciones clave en el metabolismo vegetal. Tal como ha documentado Pandey et al., (2024) sobre el silicio, que es poco conocido y requiere de investigaciones moleculares más a fondo, así como también, el impacto del Si en la absorción, transporte y desintoxicación por metales pesados y el efecto que tiene este elemento ante diversas especies vegetales. Sin embargo, como se mencionó anteriormente muchos de sus beneficios están relacionados con mejorar la resistencia a factores de estrés como la sequía y la presión por enfermedades principalmente en la raíz o el tallo.

En este sentido, la realización de estudios sobre el uso del silicio en la agricultura principalmente para mejorar la nutrición y salud de los cultivos ha favorecido el desarrollo de nuevos productos elaborados con silicio como uno de los principales ingredientes activos.

Por esta razón, el silicio podría tener un uso continuo en la agricultura y al ser un elemento natural, que no impacta su uso al ambiente, ni a los agricultores lo cual ayudaría en aminorar los graves problemas ambientales actuales en los agroecosistemas, por el uso excesivo de agroquímicos.

Por otro lado, es relevante considerar la dosis de silicio a utilizar, así como la fuente y el modo de aplicación, como se ha reportado en las diversas investigaciones este elemento favorece la absorción de agua y otros nutrientes minerales, lo que podría favorecer a la sanidad de la planta.

De acuerdo con lo anterior, resulta claro que este elemento puede emplearse como un componente en diversos fertilizantes e inductores de resistencia a plagas y enfermedades, no obstante, quedan algunas preguntas sin abordar, ¿cómo actúa el silicio con la microbiota nativa del suelo? ¿qué implicaciones tendría con su aplicación constante en campo? y ¿qué cantidades son necesarias para incorporarlo a los cultivos agrícolas?

Por otra parte, cabe indicarse que el consumir vegetales ricos en silicio mejoraría nuestra alimentación, al ser considerado un oligoelemento fundamental para la formación y

mantenimiento de los huesos, estructuras nerviosas y piel.

Finalmente, hay muchos atributos beneficiosos de uso del silicio en la agricultura como se ha mencionado, pero aún existen vacíos de información sobre sus funciones y mecanismos de acción lo cual hace imperante la necesidad de seguir investigando sobre este elemento viendo sus potenciales beneficios en diferentes condiciones.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con lo presentado en este trabajo, el silicio es un elemento muy abundante en la corteza terrestre de la Tierra, el cual puede desempeñar funciones importantes en el funcionamiento fisiológico de las plantas como el crecimiento, el desarrollo y mitigación a ciertos tipos de estrés. Sin embargo, este elemento resulta poco comprendido, ya que no es considerado como un nutriente esencial y no es lo suficientemente claro los mecanismos que intervienen al ser transportado en el interior celular y traslocación en la planta. En la medida que nuevas investigaciones reporten los mecanismos relacionados con su absorción, transporte y funciones del silicio en las plantas, es posible que aparezcan en el mercado nuevos productos con formulaciones a base de este elemento. En conclusión, el silicio junto con otros elementos beneficiosos, podrían formar parte de las estrategias de nutrición, manejo integrado de plagas y enfermedades y mitigación de estreses medioambientales todos estos con un enfoque sustentable en la agricultura actual.

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a los árbitros, que revisaron la estructura y contenido de este artículo de divulgación. Sus observaciones y sugerencias fueron fundamentales para mejorar la claridad y rigor del trabajo presentado. La primera autora agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el apoyo financiero otorgado a través de la beca para estudios de maestría. El segundo y tercer autor agradecen a la CIC de la UMSNH, por el financiamiento de los proyectos de investigación 2025 y al ICTI, Michoacan, por el financiamiento de los proyectos FCCHTI23\_ME-4.1.-0028 UMSNH/DVSS/87/202 y FCCHTI23\_ME-4.1.-0011 UMSNH/DVSS/77/2023. Su respaldo ha sido esencial para la generación de conocimiento y de fortalecimiento a la investigación científica.

## REFERENCIAS

- Aguirre, A. J., Gómez-García, D., Azorín, J. & Fillat, F. (2020). Contenido en sílice y su variación en algunas plantas abundantes en los pastos de los pirineos. 53ª Reunión Científica de la SEEP. Pastos y Pac. 73-80 pp.  
[https://digital.csic.es/bitstream/10261/110280/1/Aguirre%2C%20A.%20J.Contenido%20en%20s%C3%ADlice%20y%20su%20variaci%C3%B3n\\_SEEP2014.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/110280/1/Aguirre%2C%20A.%20J.Contenido%20en%20s%C3%ADlice%20y%20su%20variaci%C3%B3n_SEEP2014.pdf)
- Ahammed, G. J. & Yang, Y. (2021). Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165:200-206.  
doi:10.1016/j.plaphy.2021.05.031
- Ahmad, M. M., Hussain, W. A., Hamid, M. S., Ul, R. I., Tahir, I., Ahmad, P. & Rashid, I. (2021). Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165:187-195. doi:10.1016/j.plaphy.2021.04.021
- Bist, V., Niranja, A., Ranjan, M., Lehri, A., Seem, K. & Srivastava, S. (2020). Silicon-solubilizing media and its implication for characterization of bacteria to mitigate biotic stress. *Front. Plant Sci*, 11:28. doi:10.3389/fpls.2020.00028
- Bonilla, I. (Ed.). (2013). Capítulo 6. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. En J. Azcón-Bieto & M. Talón (Coords.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. (pp. 103-119). McGraw Hill Interamericana.
- Britannica, T. Editores de la Enciclopedia. (2023). Silicio. Enciclopedia Británica.  
<https://www.britannica.com/science/silicon>
- Campbell, N. A., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V. & Orr, R. B. (Eds.). (2021). *Biology. A Global Approach* (12th ed.). Pearson Education Limited.
- Cassarino, L., Pickering, R. A., Zhang, Z. & Liguori, B. (2024). The silicon cycle in the ocean. *Front. Young Minds*. 12:1178327. doi:10.3389/frym.2023.1178327
- Čermelj, A. M., Golob, A., Vogel-Mikuš & Germ, M. (2023). Silicon Mitigates Negative impacts of drought and UV-B radiation in plants. Review. *Plants*, 11-91.  
doi:10.3390/plants11010091

Chang, R. & Overby, J. K. A. (2019). *Chemistry* (13th ed.). McGraw-Hill Education.

Chuncho, V. G. A., Chuncho, M. C. G. & Aguirre M. Z. H. (2019). *Anatomía y morfología vegetal*. Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

Datnoff, L. E. & Rodrigues, F. A. (2015). Chapter 1. History of Silicon and Plant Disease. En F. A. Rodrigues & L. E. Datnoff. *Silicon and Plant Diseases*. Springer International Publishing Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-22930-0

Delgado-Morato, L. D. & Bermúdez-Cardona, M. B. (2021). Inducción de Resistencia en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y antagonismo de *Trichoderma viride* contra *Fusarium oxysporum*. *Acta Agronómica*, 70(1):101-106. doi:10.14482/INDES.30.1.303.661

Dhiman, P., Rojora, N., Bhardwaj, S., Sudhakaran, S. S., Kumar, A., Raturi, G., Chakraborty, K., Prakash, G. O., Devanna, B. N., Kumar, T. D. & Deshmukh, R. (2021). Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162:110-123. doi:10.1016/j.plaphy.2021.02.023

Gaur, S., Kumar, J., Kumar, D., Kumar, C. D., Mohan, P. S. & Kumar, S. P. (2020). Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202:110885. doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110885

Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Cuacua-Temiz, C., Jácome, C. M. de los A. & Senties-Herrera, H. (2015). Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *AGROENTORNO*, 166: 19-21.

Guo-chao, Y., Nikolic, M., Mu-jun, Y., Zhuo-xi, X. & Yong-chao, L. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10):2138-2150. doi:10.1016/S2095-3119(18)62037-4

Gutiérrez, H. F. & Pensiero, J. F. (2020). Capítulo 3 Espermatófitos. En H. F. Gutiérrez (Ed.), *Botánica sistemática de las plantas con semillas* (pp. 58-59). Santa Fe: Ediciones UNL.

[https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/5567/botanica1\\_web.pdf](https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/5567/botanica1_web.pdf)

Hassan, E. & Ryong, J. B. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action



mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147:881-896. doi:10.1016/j.ecoenv.2017.09.063

Haynes, R. J. (2017). The nature of biogenic Si and its potential role in Si supply in agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 245:100-111. doi:10.1016/j.agee.2017.04.021

Hodson, M. J., White, P. J., Mead, A. & Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 96: (6). doi:1025-1046. doi.10.1093/aob/mci255

Hong, D.-d., Talha, J., Yao, Y., Zou, Z.-y, Fu, H.-y., Gao, S.-j., Xie, Y. & Wang, J.-d. (2021). Silicon enhancement for endorsement of *Xanthomonas albilineans* infection in sugarcane. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 220:112380. doi:10.1016/j.ecoenv.2021.112380

IGME (Instituto Geológico y Minero de España). (2022). Panorama Minero. Sílice (Industrial) 2021. Disponible en: <https://info.igme.es/media/Pdfs/SILICE%202021.pdf>

INTAGRI. (2018). Plantas C3, C4 Y CAM. [https://www.intagri.com/public\\_files/125.-Plantas-C3-C4-y-CAM.pdf](https://www.intagri.com/public_files/125.-Plantas-C3-C4-y-CAM.pdf)

Kathpalia, R. & Bhatla, S. C. (2018). Plant Mineral Nutrition. En S. C. Bhatla & M. A. Lal (Eds.), *Plant Physiology, Development and Metabolism*, (pp. 37-81). Springer, Singapore. doi:10.1007/978-981-13-2023-1\_2

Khan, I., Afzan, A. S., Rizwan, M., Ali, S., Jawad, H. M., Brestic, M., Zhang, X. & Huang, L. (2021). Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicología y Seguridad Ambiental*, 222: 112-515. doi:10.1016/j.ecoenv.2021.112510

Kochhar, S. L. & Kaur, G. S. (2020). Chapter 4. Mineral Nutrition and Absorption. En S. L. Kochhar & G. S. Kaur (Eds.), *Plant Physiology. Theory and Applications* (pp:100-134). Cambridge University Press.

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. & Song, A. (2015a). Chapter 3. Silicon Biogeochemistry and Bioavailability in Soil. En Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong & A. Song. *Silicon in Agriculture From Theory to Practice* (pp:45-65). Springer

Science+Business Media Dordrecht. doi:10.1007/978-94-017-9978-2

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. & Song, A. (2015b). Chapter 1. History and Introduction of Silicon Research. En Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong & A. Song. *Silicon in Agriculture From Theory to Practice*, (pp:1-14). Springer Science+Business Media Dordrecht. doi:10.1007/978-94-017-9978-2

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. & Song, A. (2015c). Chapter 9. Silicon and Plant-Pathogen Interactions. En Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong & A. Song. *Silicon in Agriculture From Theory to Practice* (pp:181-193). Springer Science+Business Media Dordrecht. doi:10.1007/978-94-017-9978-2

Loya, R. J. G., Beltrán, M. F. A., Zamora, S. S., Ruiz, E. F. H. & Navajas, J. J. (2022). Tierra de diatomeas: una alternativa sustentable para protección de maíz almacenado. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 2(2): 1-5. doi:10.22533/at.ed.973222201036

Ma, J. F. & Yamaji, N. (2015). A cooperated system of silicon transport in plants. Review. *Trends in Plant Science*, 20 (7): 435-442. doi:10.1016/j.tplants.2015.04.007

Maldonado, Y. (2022). Geología web. Minerales y Piedras Preciosas: nombres, tipos, significado y fotos. [https://geologiaweb.com/minerales/piedras-preciosas/#google\\_vignette](https://geologiaweb.com/minerales/piedras-preciosas/#google_vignette)

Marrero-Artabe, L., Torrent Molina, J., Velázquez Carrera, N., Socorro Fuentes, V., & Ramírez González, M. (2020). Eficacia de Tierra Diatomea para el control de *Sitophilus zeamais* Motschulsky en un silo metálico. *Revista de Protección Vegetal*, 35(1).

Méndez-Otero, A. C., & Castellanos González, L. (2019). Eficacia de la tierra de diatomeas y la cal sobre ariónidos y agriolimácidos. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(3), 579-593.

Mitani-Ueno, N. & Feng, M. J. (2020). Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(1), 10-17. doi:10.1080/00380768.2020.1845972

Osterrieth, M., Frayssinet, L., Benvenuto, L., Donna, R., Paolicchi, M. R., Frayssinet, C., Borrelli, N., Fernández, H. M. N. & Morel, E. (2019). Sílice amorfa y biogeoquímica del

silicio en secuencias pedosedimentarias del sudeste bonaerense. V Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie (RAGSU), La Plata, pp 402- 405.

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77848>

Pandey, R., Singh, C., Mishra, S., Iderawumi, A. M. & Vyas, D. (2024). Silicon uptake and transport mechanisms in plants: processes, applications and challenges in sustainable plant management, *Biología Futura*, 76(1):19-31. doi:10.1007/s42977-024-00247-x

Peñaloza, L. M. B. (2021). Evaluación del comportamiento agronomico del cultivo de tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) con aplicación de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>). [Proyecto de investigación para obtener el grado, Universidad Técnica de Ambato].

<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/38723f0d-c4bd-47b5-8ff9-e4973f7ed2c4/content>

Raturi, G., Sharma, Y., Rana, V., Thakral, V., Myaka, B., Salvi, P., Singh, M., Dhar, H. & Deshmukh, R. (2021). Exploration of silicate solubilizin bacteria for sustainable agricultura and silicon biogeochemical cycle. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166. 827 -838.

doi:10.1016/j.plaphy.2021.06.039

Raya, P. J. C. & Aguirre, M. C. L. (2012). El papel del Silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia Tecnológica*, 43: 42-46.

<https://www.redalyc.org/pdf/944/94424470007.pdf>

Raza, T. S., Abbas, M., Amna, Imran, S., Yahya, K. M., Rebi, A., Rafie-Rad, Z. & Eash, N. (2023). Impact of silicon on plant nutrition and significance of silicon mobilizing bacteria in agronomic practices. *Silicon*, 15:3797-3818. doi:10.1007/s12633-023-02302-z

Reven, J. A. (2003). Cycling silicon – the role of accumulation in plants. Commentary. *New Phytologist Forum*, 158:3 pp: 419-421. doi:10.1046/j.1469-8137.2003. 00778.x

Rodrigues, F. A., Dallagnol, L. J., Silveira, D. H. S. & Datnoff, L. E. (2015). Chapter 4. Silicon Control of Foliar Diseases in Monocots and Dicots. En F. A. Rodrigues & L. E. Datnoff (Eds). *Silicon and Plant Diseases*. Springer International Publishing Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-22930-0

Sathe, A. P., Kumar, A., Mandlik, R., Raturi, G., Yadav, H., Kumar, N., Shivaraj, S. M., Jaswal, R., Kapoor, R., Kumar, G. S., Sharma, T. R. & Sonah, H. (2021). Role of silicon in elevating resistance against sheath blight and blast diseases in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 166:128-139. doi:10.1016/j.plaphy.2021.05.045

Schaller, J., Puppe, D., Kaczorek, D., Ellerbrock, R. & Sommer, M. (2021). Silicon Cycling in Soils Revisited. *Plants*, 10,295. doi:10.3390/plants10020295

Statista Research Department. (2024). Chemicals & Resources: Mining, Metals & Minerals: Silicon mining worldwide – statistics & facts.  
<https://www.statista.com/topics/1959/silicon/#topicOverview>

Strömberg, C. A. E., Di Stilio, V. S. & Song, Z. (2016). The functional role of silicon in plant biology. Functions of phytoliths in vascular plants: an evolutionary perspective. *Functional Ecology*. 30: (8), 1286-1297. doi:10.1111/1365-2435.12692

Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A. & Zeiger, E. (Eds.). (2022). *Plant Physiology and Development*. Oxford University Press.

Tombeur, F., Turner, B. L., Laliberté, E., Lambers, H. & Cornelis, J-T. (2020). Silicon dynamics during 2 million years of soil development in a coastal dune Chronosequence under a Mediterranean climate. *Ecosystems*. doi:10.1007/s10021-020-00493-9

Willey, N. (2016). Chapter 7: Essential and Beneficial Elements. En Willey, N. (Ed.), *Environmental Plant Physiology* (pp:153-174). Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC.

CC BY-NC-ND