



**Agrogeología del silicio: Comprensión de los materiales geológicos y la formación de suelos
para el fortalecimiento de la agricultura**

**Silicon agrogeology: Relationship between geological materials and soil formation for
agricultural enhancement**

Autor

Iván Andrés Barrientos Acevedo

Asesora

María Isabel Pérez Hernández

Proyecto de grado para optar al título de geólogo

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2023

Página de dedicatoria

La vida universitaria ha sido una fase importante en mi vida, ya que implicó un cambio de ciudad y de rutina en donde tendría que aprender y desarrollar mis habilidades académicas, financieras, sociales y personales. Durante estos cinco años siempre tuve apoyo de diferentes personas que me han acompañado durante todo este proceso universitario y desde este documento quisiera expresar mis agradecimientos al aporte que ellos generaron.

Agradezco a mis padres, Wilmar Barrientos y Nayibe Acevedo por siempre velar por mi bienestar emocional y estar pendiente de mi persona diariamente a pesar de la distancia, por ser mis referentes desde pequeño y por ser una de mis motivaciones para siempre seguir adelante en el mejoramiento de nuestro futuro.

Agradezco a mi tío, Álvaro Barrientos, por ser mi figura de apoyo desde el momento que llegué a una nueva ciudad, por aconsejarme en varios temas de vida y por brindarme el espacio para desenvolverme en un entorno independiente.

Agradezco a mis amigos: Alejandra Chávez, Facnory Cabrera, Camila Yepes, Vanessa Navarro, Michelle González, Camila Botero, Marinela Sánchez, Brayan Restrepo, Juan Gutiérrez, Julián Calero, Esteban De Vargas, Laura Prada, Andrés Silva, Juan Guzmán, Santiago Arroyave, Liceth Roldán, Laura Enríquez, Paula Vásquez, María Fernanda Álzate, Lucía Patarroyo y Samuel Valencia por enriquecer esta etapa de mi vida con buenos momentos y experiencias cotidianas que me ayudaron a entender muchas cosas sobre mí mismo, sobre ustedes y sobre la carrera.

Agradezco a Ana Acevedo por ser la primera persona que estuvo conmigo desde el primer día que pisé esta institución y por acompañarme siempre en los buenos y malos momentos. Le deseo mucho aprendizaje y suerte en sus prácticas profesionales y en su futuro.

Agradezco a la docente Isabel Hernández por interesarse y comprometerse con mi temática de proyecto de grado y darme la oportunidad de llevarla adelante.

Agradezco a la docente Diana Ortega por introducirme al mundo de la geología económica y producirme el interés por conocer la utilidad y procesos que tienen que atravesar los minerales para generar los productos que usamos y consumimos en nuestras vidas.

Agradezco a los docentes del pregrado de geología: Marcela Jaramillo, Camilo Bustamante, Felipe Paniagua, Alejandro Beltrán y Juan Darío Restrepo por sus aportes en mi desarrollo académico y por ser referentes en lo que significa una trayectoria científica y laboral.

Gracias a todos y les deseo éxitos en sus proyectos de vida.

CONTENIDO

1. Resumen	5
2. Abstract	6
3. Introducción.....	7
4. Sistema Roca-Suelo: Origen de los minerales de silicio y su incorporación al suelo.....	9
5. Sistema Suelo-Planta: Mecanismos de absorción de ácido silícico por la planta	12
6. Composición y estabilidad de los fertilizantes inorgánicos de silicio	14
7. Comprobación de la efectividad de los fertilizantes de silicio: Respuesta de las plantas ante situaciones de estrés.....	17
7.1. Respuesta de plantas fertilizadas con silicio ante estrés biótico	18
7.2. Respuesta de plantas fertilizadas con silicio ante estrés abiótico	19
7.2.1. Relacionado con macronutrientes.....	19
7.2.2. Relacionado con micronutrientes.....	20
7.2.3. Relacionado con elementos benéficos o metales pesados	20
8. Similitudes de los planteamientos	21
9. Discusiones sobre la esencialidad del silicio	23
10. Diversidad edafológica en Colombia y cultivos captadores de silicio	25
11. Conclusiones	27
12. Referencias	29

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Reacciones químicas simplificadas de la conversión de un silicato a ácido silícico.	11
Tabla 2. Los 12 órdenes de la taxonomía de suelos.	11
Tabla 3. Lista de fertilizantes inorgánicos de silicio comerciales.....	15

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema simplificado de los procesos y factores que forman a las rocas, los suelos y las formas del silicio presentes en la naturaleza.	10
Figura 2. A) Elementos encontrados en altas concentraciones en el suelo que se transportan pasivamente hacia las raíces de un cultivo por difusión. B) Entrada de agua y minerales a través de las vías apoplásticas y simplásticas de las raíces. C) Transporte de agua y solutos por medio del xilema hacia las hojas, tallos y órganos reproductores que permiten al ácido silícico acumularse como fitolitos en los tejidos de la planta.	14
Figura 3. Línea de producción simplificada de los fertilizantes de silicio.....	17

Figura 4. Representación de los tipos de estrés a los que una planta es sometida..... 18

Figura 5. Elementos que actúan como productores y reservorios de silicio y ácido silícico junto a los flujos de interacción entre ellos..... 23

Figura 6. A) Número de publicaciones relacionadas con el silicio en plantas desde 2010 hasta 2020, basado en una búsqueda en Scopus con las palabras clave del título: "Silicio" o "Silicato" y "Plantas", refinada a "Ciencias Agrícolas y Biológicas" (marzo de 2021). B) Número de artículos principales publicados que indican únicamente la interacción entre el Si (silicio) y el estrés nutricional..... 25

Figura 7. A) Mapa de suelos regional de Colombia. B) Mapa de suelos negros de Colombia. C) Mapa de fertilidad en Colombia. 26

1. Resumen

Las características de los fertilizantes de silicio dependen de aspectos relacionados con su materia prima, proceso de fabricación, presentación física y su composición química. Se evidencia que la aplicación de silicio en la agricultura genera beneficios significativos para las plantas al mejorar su resistencia al estrés biótico y abiótico, y mejorando la absorción de nutrientes esenciales. Estos productos se derivan principalmente de silicatos inorgánicos, extraídos en sus formas minerales y procesados para convertirlos en formas solubles que, al agregarse al suelo, se convierten en ácido silícico, el cual es una fuente biodisponible para las plantas. La estabilidad de los fertilizantes de silicio es un aspecto crítico, y su efectividad puede variar según las condiciones del suelo y el tipo de cultivo. La heterogeneidad edafológica en Colombia, con diversos tipos de suelos y condiciones climáticas, crea un entorno propicio para el cultivo de plantas captadoras de silicio, como arroz, caña de azúcar, maíz, trigo, yuca, papas, soya y remolacha azucarera. Comprender los mecanismos de absorción y transporte de silicio, la elección adecuada de fertilizantes y la variabilidad edafológica en la producción agrícola son factores clave en la aplicación efectiva de silicio para beneficio de la agricultura.

Palabras clave: Fertilizantes de silicio, Estrés en plantas, Ácido silícico, Elementos benéficos, Sílice amorfa.

2. Abstract

The characteristics of silicon fertilizers depend on aspects related to their raw materials, manufacturing process, physical presentation and chemical composition. It is evident that the application of silicon in agriculture generates significant benefits for plants by improving their resistance to biotic and abiotic stress, and enhancing the absorption of essential nutrients. These products are primarily derived from inorganic silicates, extracted in their mineral forms and processed to convert them into soluble forms, which, when added to the soil, become silicic acid, a bioavailable source for plants. The stability of silicon fertilizers is a critical aspect, and their effectiveness may vary depending on soil conditions and the type of crop. The edaphological heterogeneity in Colombia, with various soil types and climatic conditions, creates a favorable environment for the cultivation of silicon-accumulating plants, such as rice, sugarcane, corn, wheat, cassava, potatoes, soybeans, and sugar beets. Understanding the mechanisms of silicon absorption and transportation, the appropriate choice of fertilizers, and the edaphological variability in agricultural production are key factors in the effective application of silicon for the benefit of agriculture.

Keywords: Silicon fertilizers, Plant stress, Silicic acid, Beneficial elements, Amorphous silica.

3. Introducción

Una fuerte seguridad alimentaria garantiza, en un territorio, un nivel de producción que mantenga la disponibilidad física de los alimentos, un acceso económicamente razonable a estos, una diversidad suficiente para proveer una dieta balanceada y una estabilidad de los propios sistemas alimentarios para resistir factores naturales u ocasionados por la actividad humana, donde el incumplimiento de algunos de estos componentes resultaría en condiciones estacionales, transitorias o crónicas de privación de alimentos y malnutrición, por consecuencia contribuyendo al desarrollo de la pobreza al reducirse el desarrollo físico, cognitivo y productivo de los habitantes que la sufran (FAO, 2011). La base de la obtención de alimentos está ligada al sector agrícola que depende en gran medida de la calidad del suelo, ya que este condiciona el suministro de nutrientes, agua y oxígeno, junto a que regula la actividad microbiana y sirve de reservorio de materia orgánica que es aprovechada por los cultivos. Sin embargo, las propiedades del suelo pueden verse afectadas por sus condiciones intrínsecas de infertilidad o factores como la alteración física, química y biológica de agentes bióticos o abióticos externos, lo que requiere la implementación de medidas que regulen la respuesta de una especie vegetal ante diversos tipos de estrés (Bindraban et al., 2019).

La fertilidad de un suelo está configurada por el aporte persistente de nutrientes provenientes de la meteorización de minerales y rocas, la descomposición y almacenamiento de materia orgánica, la adición de nuevo material a través de sedimentación o vulcanismo, la fijación biológica de nitrógeno de la atmósfera, la agregación de fertilizantes; y por las propiedades internas del mismo suelo como lo son la textura, estructura, aireación y suministro de agua, debido a que determinan la asimilación de los elementos químicos adyacentes (Strateen, 2007). Los fertilizantes son productos que proveen de nutrientes al suelo y respaldan entre el 40% y el 60% de toda la producción de cultivos en la actualidad (Johnston & Bruuselma, 2014) los cuales pueden ser clasificados, según su naturaleza, en orgánicos e inorgánicos. En el caso de los inorgánicos, a excepción del nitrógeno (N), todos sus nutrientes se derivan de recursos de origen geológico, los cuales pueden aplicarse en el suelo sin mayores modificaciones o ser transformados industrialmente antes de ser aplicados (CEPS, 2005), asimismo, estos productos clasifican a sus compuestos químicos acorde a la cantidad que se le induce al suelo, resultando en una categorización de fertilizantes de nutrientes primarios, secundarios y micronutrientes (Martín & Castiel, 2017).

Sin embargo, existen productos fertilizantes compuestos por elementos químicos que no abarcan ninguna de las categorías previamente mencionadas, sino que son clasificados como fertilizantes de elementos benéficos cuyo rol es variable según el elemento químico que se aplique al suelo y la especie vegetal que está siendo alimentada con este mismo. Entre ellos, se encuentra el silicio, el segundo elemento más abundante después del oxígeno en la corteza terrestre, existente en la mayoría de los suelos en la forma de diferentes minerales del grupo de los silicatos (Pavlovic et al., 2021). El silicio no puede ser absorbido por todas las plantas, pero las que acumulan este elemento han demostrado una marcada resistencia ante factores ambientales, patógenos y de susceptibilidad que impedirían su crecimiento normal. Los beneficios obtenidos durante la aplicación de fertilizantes de silicio se encuentran relacionados a 1) la mejora de las barreras físicas ante la infección en tejidos, 2) la disminución de las alteraciones en las respuestas de defensa del huésped, 3) la supresión del efecto de insectos, agentes fúngicos y bacterianos, 4) el alivio del estrés físico provocado por la variación de la temperatura, el fuerte viento, la sequía, la variación de la incidencia de luz solar y el anegamiento, y 5) el alivio del estrés químico provocado por la deficiencia o exceso de fósforo y nitrógeno, la presencia de metales pesados y la salinidad (Ma, 2004).

En Colombia, a escala regional, coexisten diferentes tipos de suelos, formados a partir de las variaciones climáticas, geológicas y topográficas del país (IGAC, 2015) en donde crecen cultivos que tienen una alta tasa de absorción de silicio. Los tipos de suelos cuya parte mineral se expongan a una extrema intemperización suelen poseer una alta permeabilidad, baja fertilidad, abundancia de arcillas tipo caolinita, bajas capacidades de intercambio catiónico y altas cantidades de hierro y aluminio (USDA, 1999). Todas estas condiciones favorecen el aumento de la acidez y la prevalencia de elementos tóxicos (Straaten, 2007) por lo que se hace necesario realizar tratamientos con fertilizantes e insumos minerales, químicos y orgánicos, si se busca obtener una superficie con alta productividad en cultivos y unas prácticas inteligentes de agricultura.

El objetivo de este estudio es recopilar la información relevante sobre los resultados de diferentes investigaciones para responder a la pregunta de “¿Cuáles serían las características de los fertilizantes de silicio respecto a su materia prima, sus procesos fisicoquímicos requeridos en su tratamiento, su composición química final y su estabilidad en el suelo?” Para ello el documento se divide en diferentes apartados con temáticas que abordan una visión que combina criterios

geológicos, agronómicos y biológicos para describir de mejor manera la cadena de eventos naturales e industriales que llevan a los componentes de una roca a ser asimilables por las plantas.

4. Sistema Roca-Suelo: Origen de los minerales de silicio y su incorporación al suelo

Los silicatos son un grupo mineral que representa casi un 25% de los minerales conocidos, cerca del 40% de los más corrientes, constituyen más del 90% de la corteza terrestre y reflejan alguna característica del ambiente donde se formó dentro de la mineralogía de rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas, rocas alteradas y suelos (Hurlbut, 1981). La clasificación de los silicatos se compone de 6 clases: Nesosilicatos, Sorosilicatos, Ciclosilicatos, Inosilicatos, Filosilicatos y Tectosilicatos, diferenciados por la proporción Si:O y su arreglo de los tetraedros de sílice (SiO_4) de forma independiente, en parejas, anillos, cadenas sencillas/dobles, hojas y armazones (Hurlbut, 1981).

Dentro de las clases de silicatos previamente mencionadas, solo son algunas de ellas las que contienen los minerales predilectos para la fabricación de fertilizantes inorgánicos de silicio. En el caso de los Inosilicatos se encuentra la Wollastonita (CaSiO_3), un silicato de calcio (Datnoff et al., 2001) y mineral ganga de los depósitos de skarn cuyo génesis es asociado a metamorfismo de contacto de rocas carbonatadas en las zonas de más altas temperaturas de la aureola de contacto (Fernández, 1995). Respecto a los Tectosilicatos y Filosilicatos, entre ellos se encuentran los silicatos de potasio, encontrados en rocas de composición granítica y los productos generados a partir de su meteorización o metamorfismo (Manning, 2010), y los silicatos de sodio, con un origen similar, ya que el alto contenido de este elemento es característico en rocas de composición ácida. Por otro lado, también existen fuentes de silicio de origen biogénico compuestas por esqueletos de algas unicelulares denominadas diatomeas cuyo proceso de formación se resume en que sus caparazones hechos de silicio se depositan en el lecho marino o lacustre de baja profundidad, se fosilizan y posteriormente forman una roca sedimentaria silíceas llamada diatomita (Baglione, 2011). Adicionalmente, los residuos inorgánicos industriales como las cenizas volantes, las cenizas de fondo y la escoria de las industrias de la energía termal, acero y carbón, se han considerado como enmiendas potenciales para el suelo y fertilizantes de sílice, sin embargo, el impacto ambiental que podría generar el hierro dentro de estos compuestos se ha de considerar todavía (Anggria et al., 2021).

El silicio contenido dentro de una amplia variedad de materiales geológicos en la forma de sílice (SiO_2), varía su porcentaje en rocas ígneas en un 35%-80%, en metamórficas un 60%-70%, en sedimentarias según el aporte de la roca madre y en sedimentos biogénicos hasta un 100%

(Straaten, 2007). Las tasas de meteorización de los silicatos dentro de la estructura de un material geológico pueden ser relativamente altas, en el caso de poseer minerales ferromagnesianos como los olivinos y piroxenos, o muy bajas, en el caso de tener presencia de cuarzo, esto debido a su resistencia intrínseca al desgaste generado por factores como el clima, el relieve, la materia orgánica y el tiempo (**Figura 1**). Independientemente de su composición, el resultado de la interacción entre los factores anteriormente mencionados con las rocas y minerales, es la formación de suelos, minerales arcillosos, formas microcristalinas del silicio como el allofanita $[Al_2O_3(SiO_2)_{1.3-2.0} * 2.5-3.0H_2O]$, imogolita $[Al_2SiO_3(OH)_4]$, ópalo-CT (Cristobalita-Trimidita), calcedonia (SiO_2) y cuarzo secundario, formas mineralógicas como nódulos de sílice, sílice incluida en óxidos pedogénico y la generación de ácido silícico (H_4SiO_4), la forma soluble del silicio para las plantas (Schaller, 2021).

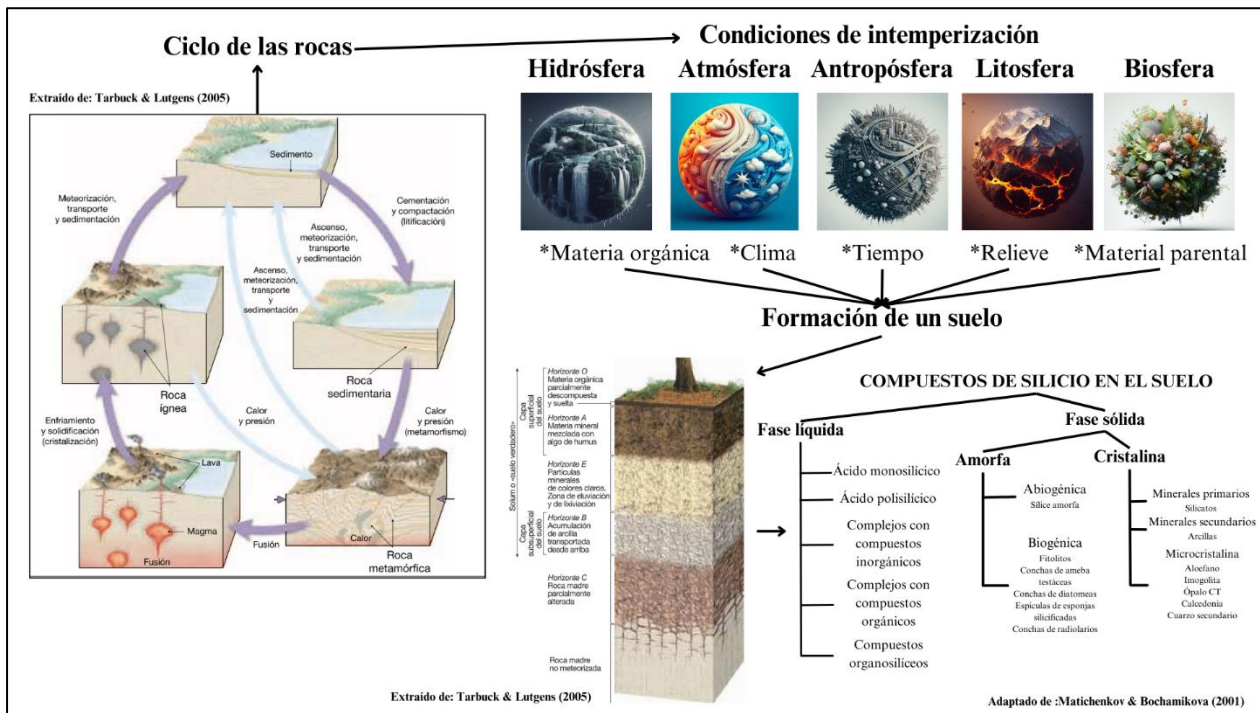


Figura 1. Esquema simplificado de los procesos y factores que forman a las rocas, los suelos y las formas del silicio presentes en la naturaleza. Fuente: Adaptado de Tarbuck & Lutgens (2005) y de Matichenkov & Bochamikova (2001).

En términos geoquímicos, la velocidad de disolución de silicatos estables como el cuarzo es tan relativamente baja que no se puede considerar una fuente principal de ácido silícico (Bennett et al., 1988), caso contrario son los feldespatos, los cuales se erosionan comparativamente más rápido (Brady & Walther, 1989). Es posible simplificar la representación de la interacción química a fórmulas estequiométrica donde interaccionan los minerales, el agua y la acción ácida proveniente

de la lluvia (**Tabla 1**) que regula el pH del sistema, de manera que mientras más bajo sea este, más rápida será la reacción (Exley, 1998).

Tabla 1. Reacciones químicas simplificadas de la conversión de un silicato a ácido silícico.

pH	Ácido	Reactantes	Producto
5,0	Carbónico	2SiO_2 (cuarzo) + 4CO_2 + $12\text{H}_2\text{O}$	$2\text{Si}(\text{OH})_4$ (ácido silícico) + 4HCO_3^- + $4\text{H}_3\text{O}^+$
5,0	Carbónico	$2\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (k-feldespato) + 2CO_2 + $11\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (caolinita) + 2K^+ + 2HCO_3^- + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$ (ácido silícico)
4,0	Sulfúrico	$2\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (k-feldespato) + H_2SO_4 + $4\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$ (montmorillonita) + 2K^+ + SO_4^{2-} + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$ (ácido silícico)
N/A	Carbónico	Mg_2SiO_4 (olivino) + 2CO_2 + $2\text{H}_2\text{O}$	2MgCO_3 (magnesita) + H_4SiO_4 (ácido silícico)
N/A	Carbónico	$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (Na-plagioclasa) + $2\text{H}_2\text{CO}_3$ + $9\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (caolinita) + 2Na^+ + 2HCO_3^- + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$ (ácido silícico)

Fuente: Adaptado de Exley (1998), Zhang et al. (2017) y Straaten (2007).

Los suelos resultantes se clasifican acorde a las características referentes a su contenido de materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), color, saturación de bases, tipo de epipedón, tipo de horizontes de suelo, su régimen de temperatura, su régimen de humedad y su grado de madurez (USDA, 1999) generando un sistema internacional de taxonomía de suelos que abarca 12 órdenes principales (**Tabla 2**). Se es posible inferir el contenido de ácido silícico en cada tipo de suelo, ya que, de manera general, cada uno de ellos posee un rango de ocurrencia respecto a su contenido mineral meteorizado, existiendo condiciones climáticas propias de su formación que no son las ideales para una rápida creación de ácido silícico (aridisoles, gelisuelos), en cambio, para otros las condiciones ambientales han propiciado un rápido desarrollo de esta sustancia, pero al mismo tiempo, el suelo es tan maduro que otros agentes disolventes la han transportado a un lugar diferente a la de origen (oxisoles, ultisoles).

Tabla 2. Los 12 órdenes de la taxonomía de suelos.

Orden	Características
Alfisoles	Suelos tropicales a templados con alto contenido de bases
Andisoles	Suelos volcánicos de clima templado a tropical con alto contenido de agua, arcilla amorfa y nutrientes
Aridisoles	Suelos de zonas áridas y/o con alto contenido de sales
Entisoles	Suelos escasamente desarrollados con predominancia de materiales minerales
Gelisuelos	Suelos sujetos a dinámicas de congelación y descongelación
Histosoles	Suelos húmedos ácidos, con muy alto contenido de MO y baja capacidad de CIC
Inceptisoles	Suelos pocos desarrollados formados en cualquier entorno (excepto árido) con agua disponible para las plantas durante más de la mitad del año o más de 3 meses consecutivos durante una temporada cálida

Orden	Características
Molisoles	Suelos templados, ricos en MO, alta CIC, alto contenido de bases y predominancia de minerales arcillosos
Oxisoles	Suelos tropicales ácidos, ricos en óxidos de hierro y aluminio, pobres en bases, baja CIC y bajo contenido de MO
Espodosoles	Suelos ácidos de clima húmedo con materia orgánica degradada, hierro y aluminio
Ultisoles	Suelos tropicales a subtropicales, pobres en bases, baja CIC y formados a partir de una alta variedad de materiales parentales
Vertisoles	Suelos tropicales a templados con contenido de minerales arcillosos expansibles

Fuente: Adaptado de United States Department of Agriculture (1999).

5. Sistema Suelo-Planta: Mecanismos de absorción de ácido silícico por la planta

Las interacciones del ácido silícico con los organismos vegetales involucran la entrada de este en las células y para los organismos multicelulares en los espacios intercelulares acuosos del organismo (Raven, 2001). La "condición predeterminada" para el transporte de solutos a través de las membranas celulares es que el soluto atraviese la membrana por difusión (**Figura 2A**) a través del componente lipídico de la membrana. En el caso de una sustancia neutra (no cargada) como el ácido silícico, dicho flujo de solución lipídica ocurre desde el lado de la membrana en el que la concentración de ácido silícico es mayor hacia el lado donde la concentración es menor, disolviéndose el soluto a través de la membrana y emergiendo en la solución acuosa del lado de baja concentración (Raven, 1983). Es posible que el ácido silícico atraviese las membranas en respuesta a una diferencia de concentración a través de canales proteicos, como las acuaporinas, que facilitan el paso de solutos de bajo peso molecular además del agua (Tyerman et al., 1998). Sin embargo, no se ha demostrado la permeación del ácido silícico a través de las acuaporinas, por lo que se maneja la probabilidad de que el coeficiente de permeabilidad del ácido silícico de las membranas aumente considerablemente con la presencia de las acuaporinas (Gerbeau et al., 1999). El transporte activo de ácido silícico se puede reconocer a nivel celular (o multicelular) mediante la demostración del movimiento de H_4SiO_4 desde una concentración más baja hacia una concentración más alta (Raven, 2001). Por ejemplo, se ha identificado un mecanismo de transporte activo de ácido silícico en microorganismos fotosintéticos como las diatomeas, consistente en utilizar el sodio (Na^+) como ion impulsor para mover H_4SiO_4 desde una concentración baja en el ambiente acuático hacia una concentración más alta en las células (Hildebrand et al., 1998). Sin embargo, en organismos fotosintéticos de agua dulce y plantas terrestres, el mecanismo exacto de transporte activo de ácido silícico no está claro, por lo que se plantea la posibilidad de que puedan utilizar tanto el sodio (Na^+) como el hidrógeno (H^+) como iones impulsores (Raven, 2001).

Respecto al transporte del ácido silícico a nivel tisular, es decir, a nivel tejido, se han identificado dos principales vías de transporte: el apoplasto, que involucra las paredes celulares y espacios intercelulares, y el simplasto, que comprende el citosol y las células conductoras del floema (**Figura 2B**), implicando tanto la difusión (mecanismo de transporte pasivo) como el flujo de masa (mecanismo de transporte activo) (Raven, 2001). En el desplazamiento del ácido silícico, agua y minerales desde las raíces al xilema (corta distancia), el ácido silícico se desplaza a través de la vía apoplástica, que incluye diversas capas de tejido de la raíz como la epidermis, córtex, endodermis y periciclo, al igual que existe una vía simplástica que abarca todas las células vivas dentro de las raíces, ya que están interconectadas por plasmodesmas, que facilitan el transporte hacia el citoplasma de otra célula (Raven, 2001). La vía apoplástica es adecuada para transportar sustancias solubles en agua, como el H_4SiO_4 , siempre que no haya obstrucciones en las paredes celulares causadas por compuestos lipofílicos (Peterson & Cholewa, 1998). En el transporte a larga distancia a través del xilema (**Figura 2C**) y de productos fotosintetizados como carbohidratos a través del floema, prácticamente todo el transporte de solutos, incluido el H_4SiO_4 , ocurre por flujo de masa (Raven, 2001). En esta etapa, es fundamental entender que el transporte de H_4SiO_4 a través del apoplasto de la raíz no puede aumentar la concentración en la savia del xilema por encima de la del suelo circundante, independientemente de si el flujo es por difusión o flujo de masa (Raven, 1983). Por otro lado, la vía simplástica involucra la absorción de $\text{Si}(\text{OH})_4$ desde el suelo y su transporte a través de las células hacia el xilema. Esta vía podría requerir transporte activo para mantener una concentración de $\text{Si}(\text{OH})_4$ más alta en la savia del xilema que en el suelo (Raven, 2001).

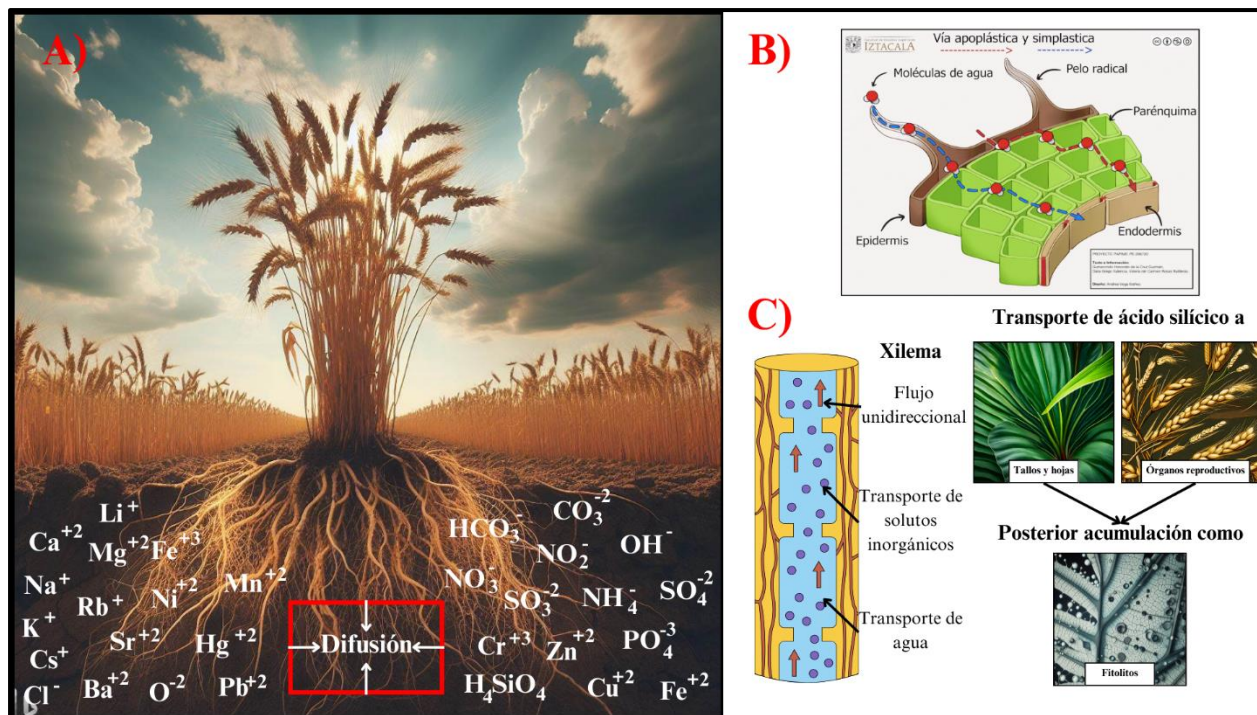


Figura 2. A) Elementos encontrados en altas concentraciones en el suelo que se transportan pasivamente hacia las raíces de un cultivo por difusión. B) Entrada de agua y minerales a través de las vías apoplásticas y simplásticas de las raíces. C) Transporte de agua y solutos por medio del xilema hacia las hojas, tallos y órganos reproductores que permiten al ácido silícico acumularse como fitolitos en los tejidos de la planta.
Fuente: Figura A y C, elaboración propia, Figura B, adaptada de La Cruz et al. (2022).

La concentración de ácido silícico (H_4SiO_4) en el suelo, varía entre 0.1 y 0.6 miliMoles, lo que es aproximadamente dos órdenes de magnitud más alto que las concentraciones de fósforo (Yan et al., 2018). El silicio es absorbido y transportado a través de la planta para depositarse como fitolitos de SiO_2 en el lumen, las paredes celulares y los espacios intercelulares (Hodson & Evans, 2020). Sin embargo, las especies de plantas difieren considerablemente en su capacidad para acumular silicio (Si), con valores que van desde el 0.1% hasta el 10% de este elemento químico en peso seco (Epstein, 1994, 1999). En consecuencia, algunas especies de plantas se ven afectadas mínimamente por la fertilización con silicio (Si) en comparación con otras (Coskun et al., 2019).

6. Composición y estabilidad de los fertilizantes inorgánicos de silicio

Las interacciones del silicio (Si) con elementos minerales esenciales y elementos beneficiosos son en gran medida específicas de las plantas y también dependen del estado mineral (deficiencia o exceso), sumando el hecho de que este elemento es capaz de controlar la disponibilidad de diferentes compuestos químicos en los suelos, compitiendo por la unión a partículas de suelo según la especiación del ácido silícico (Schaller et al., 2021). Las características composicionales en la

que los fertilizantes inorgánicos de silicio comercialmente disponibles se presentan, dependen de los requerimientos que necesite un determinado tipo de suelo o la practicidad que tendría el consumidor respecto a la forma de aplicación, resultando en una amplia variedad de productos que pueden tener un gran porcentaje de silicio (Si) en su composición, un porcentaje reducido de este elemento pero equilibrado con otros minerales que provean al suelo más nutrientes y poseer una forma física presentada en gránulos, polvos, líquidos y piedra clara (**Tabla 3**).

Tabla 3. Lista de fertilizantes inorgánicos de silicio comerciales.

Empresa/Institución	Productos	Presentación	Química
Eden Solutions	BLUEGOLD Silica	Mezcla líquida-sólida	Cuarzo (SiO ₂), nitrógeno (N), saponinas y agua (H ₂ O)
Eden Solutions	BLUEGOLD Wollastonite	Mineral no procesado	Wollastonita (CaSiO ₃)
Agripower	Agrisilica Granular	Gránulos (2mm-5mm)	Sílice amorfa y óxidos minerales (>99%) junto a cuarzo (<1%).
Agripower	Agrisilica Powder	Polvo (<100 micrones)	Sílice amorfa y óxidos minerales (>99%) junto a cuarzo (<1%).
Canadian Wollastonite	Canadian Wollastonite	Piedra clara, tamaño arena y polvo	Wollastonita, dióxido, feldespato potásico, cuarzo, calcita, sulfatos y minerales menores.
Agromil Corona	CRENTO Firmeza Origen	Gránulos (2mm-4mm)	SiO ₂ (70%)
Agromil Corona	CRENTO Firmeza Potasio	Gránulos (2mm-4mm)	SiO ₂ (65%) y K ₂ O (3%)
Agromil Corona	CRENTO Firmeza Menores	Gránulos (2mm-4mm)	SiO ₂ (27.5%), CaO (11%), P ₂ O ₅ (4%), S (2.1%), Zn (1.5%), B (0.6%) y Cu (0.5%)
Agromil Corona	CRENTO Firmeza calcio magnesio	Gránulos (2mm-4mm)	SiO ₂ (32%), CaO (17%), MgO (5%) y P ₂ O ₅ (4%)
Agromil Corona	CRENTO Firmeza Pro-Potasio	Líquida	SiO ₂ (330g/l) y K ₂ O (170g/l)
CrossOver	CrossOver Ag, G Ag, Hort, Hort SM, G Hort, Turf, G Turf	Granular	Diferentes distribuciones de C, Mg, H ₄ SiO ₄ , S, SiO ₂ y Mo
Haitor	Potassium silicate foliar fertilizer	Polvo	SiO ₂ (≥50%) y K ₂ O (≥10%)
Haitor	Seaweed silicon fertilizer powder	Polvo	SiO ₂ (≥30%), K ₂ O (≥5%) y ácido de alga marina (≥5%)
Haitor	Silicon calcium magnesium	Granular	SiO ₂ (≥30%), CaO (≥30%) y MgO (≥5%)
Haitor	Soil conditioner for crop	Polvo	SiO ₂ (≥25%), CaO (≥25%) y MgO (≥5%)
Haitor	Water soluble silicon fertilizer	Polvo	SiO ₂ (≥50%)
Imerys	NYAD® MD200 Wollastonite	Polvo	SiO ₂ (46.52%), CaO (45.72%), pérdida de ignición (6.3%), MgO (0.71%)

Empresa/Institución	Productos	Presentación	Química
Megasilica	Tierra de diatomeas	Granular	No especificado
MontanaGrow	MontanaGrow	Polvo	SiO ₂ (77.9%), Al ₂ O ₃ (11.3%, forma de baja solubilidad y no fitotóxica de aluminio), K ₂ O (5.2%), FeO ₃ (2.5%), Na ₂ O (2.3%) y MgO (0.9%)
Vanderbilt Minerals	VANSIL Wollastonite	Polvo	CaO (44.1%), SiO ₂ (51.3%), MgO (1.7%), Al ₂ O ₃ (1.1%), pérdida de ignición (1.1%) y Fe ₂ O ₃ (0.2%)

Fuente: Adaptado de Tayade et al. (2022).

Los fertilizantes sólidos de origen mineral, en este caso de silicio, poseen 3 formas físicas de comercialización: 1) la “sólido-granulada” que se trata sobre los minerales que se trituran y tamizan a un determinado rango de granulometría, 2) la segunda forma se denomina “granulada” consistente en moler el mineral a un tamaño de partícula de polvo, para luego ser convertido en gránulos mediante equipamiento especial (disco peletizador, tambor aglomerador) a un tamaño de partícula similar que en fertilizantes químicos granulados, al mismo tiempo que se utilizan aglomerantes (carboximetilcelulosa, lignosulfonato de sodio) para obtener un gránulo esférico con un buen comportamiento físico durante su procesamiento, distribución y aplicación en el suelo, 3) y la tercera forma es la de “polvo” la cual es la más adecuada para utilizar como enmiendas (Duggan, 2007). Mientras tanto, en el caso de los fertilizantes líquidos, los minerales de silicio han de ser sometidos a reacciones químicas con ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido clorhídrico (HCl) o tratamiento con agentes alcalinos como el hidróxido de sodio (NaOH) para generar el ácido silícico, diluirlo en agua, agregar aditivos si lo requiere el producto, analizar y eliminar sus impurezas y finalmente envasarlo y distribuirlo. Acorde a las fichas técnicas de estos productos, independientemente de su presentación, los fertilizantes de silicio no han de ser tóxicos, inflamables, corrosivos y deben ser estables e higroscópicos para que sean compatibles con otros productos fertilizantes.

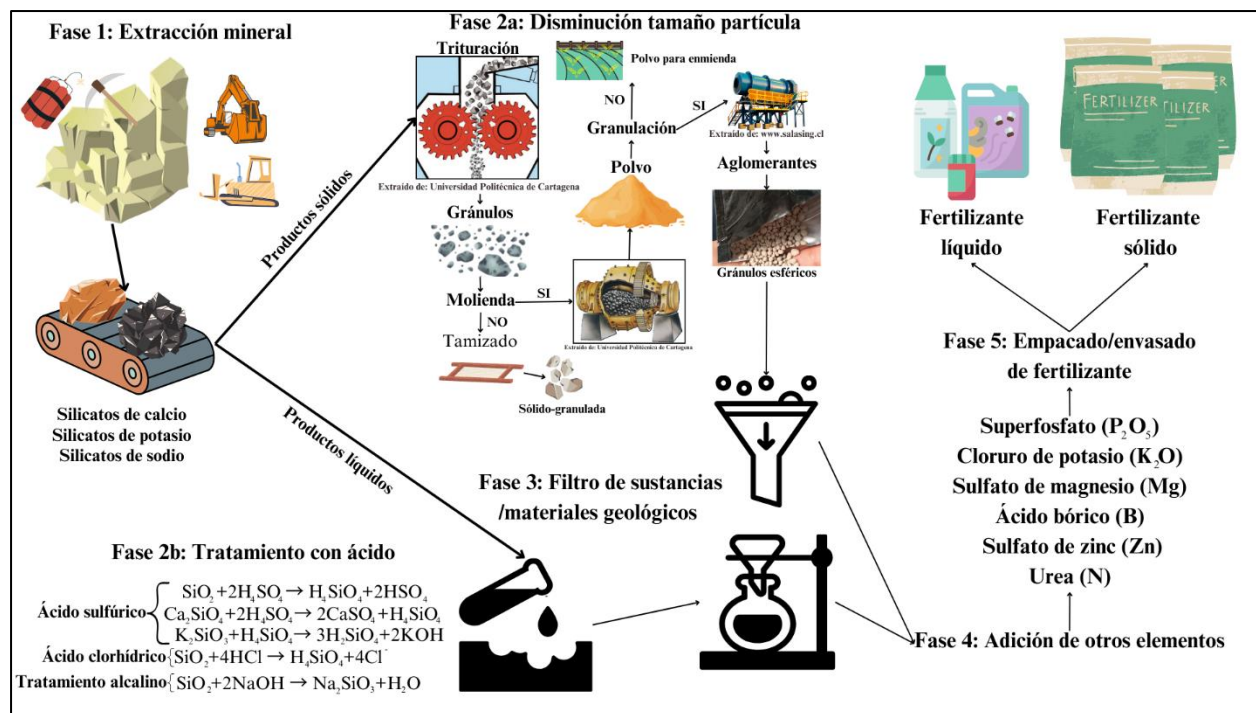


Figura 3. Línea de producción simplificada de los fertilizantes de silicio. Fuente: Elaboración propia.

La liberación de los elementos químicos contenidos en la estructura mineral de los agrominerales está relacionada con la meteorización química, mecánica y biológica, por consecuencia, los minerales de silicato relativamente inestables pueden ser más efectivos como fertilizantes para el suelo que los estables, a su vez que su tasa de disolución es una función del pH, lo que significa que cada mineral responde de manera diferente ante la acidez que exista en el suelo (Zhang et al., 2017). En presencia de agua, la hidratación, la hidrólisis de la red cristalina y las reacciones de intercambio catiónico entre iones alcalinos, alcalinotérreos, H^+ y H_3O^+ , degradan a los silicatos y logran disolverlos (Bunker, 1994).

7. Comprobación de la efectividad de los fertilizantes de silicio: Respuesta de las plantas ante situaciones de estrés

Las plantas, a lo largo de su ciclo vital, están expuestas a un gran número de condiciones o factores estresantes, clasificados en bióticos y abióticos, los cuales disparan los mecanismos de adaptación de un organismo vegetal para poder alcanzar un nuevo óptimo fisiológico, no sin antes alterar el estado metabólico que, en el caso de perdurar el estímulo estresante, culminará con la muerte de la planta (Azcón-Bieto & Talón, 2008). El estrés biótico es causado por la acción de grandes y pequeños animales, otras plantas, y agentes patógenos como lo son los hongos, bacterias, virus y viroides, mientras tanto, el estrés abiótico es ocasionado por sequía, alta salinidad, cambios de

temperatura, inundaciones, deficiencia o exceso de radiación, compactación del suelo, viento, deficiencia de elementos minerales, lesiones y contaminantes medioambientales como lo son el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos clorofluorocarbonados (CFC), el ozono (O₃) y los metales pesados (Azcón-Bieto & Talón, 2008).



Figura 4. Representación de los tipos de estrés a los que una planta es sometida. *Fuente: Elaboración propia.*

7.1. Respuesta de plantas fertilizadas con silicio ante estrés biótico

La aplicación de silicio (Si) en los cultivos tiene como resultado la acumulación de este elemento en los tejidos celulares de las plantas y la estimulación de sus enzimas que activan sus mecanismos de defensa. Sidhu et al., (2013) fertilizaron cultivos de arroz con silicato de calcio (Ca₂SiO₄) bajo condiciones de crecimiento en invernadero para posteriormente someterlos al ataque de larvas de barrenadores del tallo, dando como resultado la reducción de la tasa de perforación de las larvas en un 40% y la consecuente disminución de su tasa de crecimiento al dificultar su fuente de alimento y refugio. En cultivos de trigo, el tratamiento con silicato sódico (Na₂SiO₃) actúa contra patógenos foliares y patógenos de la base del tallo, reduciendo ligeramente la producción de esporas y la gravedad de los síntomas entre un 18% y 67% producidos por enfermedad fúngica, y aumentando considerablemente la cantidad de silicio en el suelo con una agregación de 200 kg ha⁻¹ (Rodgers-Gray & Shawn, 2004). Asimismo, la aplicación edáfica de silicato de calcio en plantas de trigo

reduce el número total de pulgones verdes, a causa de la deposición de sílice en el tejido de las hojas, aumentando notoriamente la actividad de enzimas defensivas, su dureza y, por lo tanto, dificultando su perforación (Gomes et al., 2005). En césped, la fertilización con sílice soluble en forma de silicato de sodio ($\text{NaSiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) hace que las plantas sean significativamente menos consumidas por las langostas, y en el caso de ser estos cultivos consumidos, causan en el insecto un peor desempeño en su digestión, ya que los fitolitos sólidos ubicados en el tejido vegetal se atascan entre sus piezas bucales y genera abrasión entre las mismas (Hunt et al., 2008).

7.2. Respuesta de plantas fertilizadas con silicio ante estrés abiótico

7.2.1. Relacionado con macronutrientes

Bajo condiciones de deficiencia de nitrógeno (N) en un cultivo, la aplicación de silicio (Si) en forma de silicato de sodio neutro y silicato de potasio, aplicado de manera foliar, aumenta el rendimiento del arroz en un 18.6%, efecto que radica en la sustitución estequiométrica del silicio (Si) con el carbono (C), aumentando la síntesis de lignina en un 27% y el rendimiento del grano en un 23.32% (Deus et al., 2019). Bajo el mismo principio, la aplicación de silicio también mejoraría el rendimiento en cultivos como la caña de azúcar y de las coberturas de pasto, ya que, al reemplazar parcialmente al carbono (C) en el tejido de los brotes, se estabiliza la función de la fotosíntesis (Pavlovic et al., 2021), factor que se asocia con una mayor producción de biomasa gracias a la mayor tasa de captación y acumulación de nitrógeno (N) y fósforo (P).

El silicio (Si) es capaz de incrementar el tránsito del fósforo (P) en la planta, mejorando su asimilación y permitiendo a la planta ser más resistente a las enfermedades, al mismo tiempo que se reduce el consumo de hierro (Fe) y manganeso (Mn), debido a que estos causan efectos desfavorables sobre la disponibilidad del fósforo (P) en el suelo (Ma & Takahashi, 1990).

La aplicación de silicato de sodio (Na_2SiO_3) en maíz cultivado en invernadero y sometido a condiciones de estrés hídrico, redujo la transpiración en las hojas de la planta y aumentó los niveles de clorofila, biomasa, calcio (Ca) y potasio (K), mejorando el estado hídrico de la planta y concluyendo que la aplicación de fertilizantes de silicio es ideal para tratar zonas de producción con condiciones áridas o semiáridas (Kaya et al., 2006). Asimismo, la aplicación de esta misma forma de fertilizante de silicio en cultivos de maíz deficientes en magnesio (Mg) mantuvo el crecimiento y desarrollo normal de la planta y aumentó sus niveles de clorofila y azúcares solubles (Hosseini et al., 2019).

El silicio (Si) atenúa los efectos oxidativos, de crecimiento y de calidad de la deficiencia de calcio (Ca), en cultivos de col al disminuir la extravasación celular y aumentar tanto el contenido de ácido sórbico como la materia fresca y seca, proporcionando hojas más firmes debido a la disminución de la pérdida de agua después de la cosecha (Pavlovic et al., 2021).

En cultivos de lechuga, guisante, zanahoria y trigo, el silicio impacta positivamente en la absorción de magnesio (Mg) y en el crecimiento de los brotes, pero no influye en facilitar la disponibilidad del magnesio (Mg) en el suelo para la planta (Greger et al., 2018).

7.2.2. Relacionado con micronutrientes

La disponibilidad de hierro (Fe) en la rizosfera, así como su transporte en raíces y hojas se ve significativamente beneficiada con la agregación de silicio (Si), resultando en una mejor distribución del hierro (Fe) (Palocvic et al., 2021), al mismo tiempo que se mitigan los efectos tóxicos generados por su exceso (Stevic et al., 2016) como la cantidad de placa de hierro, la falta de absorción y la reducción de la elongación en las raíces (Fu et al., 2012).

El tratamiento con silicio (Si) en un entorno con exceso de zinc (Zn), reduce su cantidad en los tejidos de la planta y convierte sus iones en variantes no fitotóxicas, evitando que la longitud, superficie y cantidad de las raíces se vean alteradas (Song et al., 2018).

Para las plantas que no reciben suficiente manganeso (Mn), el silicio (Si) representa una mejora en el rendimiento antioxidante para mitigar los síntomas de la deficiencia inducida por la formación de especies reactivas al oxígeno, en lugar de aumentar directamente la absorción y/o removilización del manganeso (Bityuuski et al., 2021).

El silicio acuoso limita la toma de iones de cobre (Cu) desde el suelo, por consiguiente, alivia la toxicidad ocasionada por este mismo elemento (Keller et al., 2015). En el caso de toxicidad por níquel (Ni), el silicio (Si) protege los biomarcadores, combatiendo la inhibición de la capacidad fotosintética, el metabolismo de antioxidantes y osmolitos en las plantas (Abh-Allah et al., 2019). El uso de silicio (Si) en suelos salinos, es decir, con altas concentraciones de sodio (Na) y cloro (Cl), provoca la reducción de estos en el transporte de la raíz a los brotes de una planta (Shi et al., 2013).

7.2.3. Relacionado con elementos benéficos o metales pesados

Los síntomas causados por la toxicidad del aluminio (Al) son la inhibición de la elongación de las raíces junto a lesiones oxidativas, síntomas que pueden ser tratados con la añadidura de formas solubles de silicio, generando un alargamiento de las raíces entre un 17,9% y un 29,5% (Xiao et

al., 2021) y un recubrimiento extracelular que protege a la planta de los iones de aluminio (Feng et al., 2019). El exceso de sodio (Na) en el suelo induce un estrés ambiental que limita el crecimiento y la asimilación de agua en un cultivo (Cabezas et al., 2022), el cual al ser tratado con silicio (Si) reduce la absorción de este elemento, sin embargo, la sobre-fertilización a corto plazo de silicio (Si) puede llevar a una mayor acumulación de sodio (Na) en el tejido de la raíz (Bosnic et al., 2018). Las formas solubles del selenio utilizan un mecanismo de transporta similar al ácido silícico (Zhao et al., 2010) y que, dependiendo del pH del suelo, el ácido silícico puede ser capaz de inhibir la correcta absorción del selenio (Lazard et al., 2010).

El trigo fertilizado con silicato de sodio (Na_2SiO_3) bajo estrés ocasionado por exceso de cadmio (Cd) presentó un mejoramiento en su crecimiento, disminución de la absorción de cadmio (Cd) por las raíces, restricción de la translocación del mismo elemento de las raíces hacia las partes aéreas y aumentó significativamente la biomasa en condiciones donde la concentración de cadmio (Cd) era clasificada como intermedia y alta, además de impedir su concentración total en hojas jóvenes, de media edad y viejas (Wu et al., 2016). Asimismo, la aplicación de esta misma forma de fertilizante en cultivos de arroz, redujeron las concentraciones de cadmio (Cd) en los protoplastos de la célula, junto a que los organelos de esta permanecieron casi intactos en condiciones de cadmio (Cd) alto (Liu et al., 2013).

Cultivos de arroz desarrollados en condiciones de invernadero, fertilizados con silicato de potasio y sometidos a estrés provocado por Arsénico (Ar) revirtieron los efectos perjudiciales provocados por este elemento tóxico para las plantas, específicamente, relacionados con la disminución de la conductancia foliar a niveles de los estomas y del mesófilo, los cuales son parámetros que al verse afectados, pueden impactar en la fotosíntesis, por lo tanto, la nutrición con silicio (Si) se considera un actor central en preservar, al menos en parte, la actividad fotosintética en plantas de arroz tratadas con arsénico (Sanglard et al., 2014).

8. Similitudes de los planteamientos

Los diferentes experimentos que se han centrado en analizar los efectos de la aplicación de fertilizantes de silicio han sometido a diferentes tipos de cultivos a variados escenarios de estrés en condiciones de abundancia o deficiencia de este elemento químico. Las semillas de cada cultivo fueron previamente esterilizadas y fertilizadas con agentes minerales de silicato de potasio, sodio y calcio, y en otros casos, ácido silícico puro, que se mezclaron con soluciones nutritivas y

crecieron en condiciones de temperatura y humedad controladas. Las variables para medir fueron relativas a cada cultivo y el tipo de estrés, entre ellas, la distribución del contenido de silicio y otro elemento químico en peso seco, rendimiento de la planta, producción de biomasa, niveles de clorofila, tasa de transpiración, crecimiento de la planta, afectaciones mecánicas, efectos oxidativos, producción de enzimas defensivas, acumulación de silicio en las partes aéreas de la planta, tasas de perforación, población de insectos, producción de esporas, efectos de enfermedades, elongación de las raíces, entre otros. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que la mayoría de estos experimentos fueron reproducidos en un ambiente de condiciones controladas, por lo que algunos resultados pueden verse modificados en una situación de campo abierto donde es común la conjugación de varias condiciones de estrés biótico y/o abiótico.

Como es representado en la **Figura 5**, el aporte producido por la meteorización mineral es considerada la fuente primaria de ácido silícico, pero no la única. Los productos cristalinos secundarios como las arcillas también pueden aportar el silicio contenido dentro de su estructura química, al igual que la sílice amorfa, una forma del sílice que no presenta un patrón de repetición tridimensional en su disposición atómica, sino que sus átomos y moléculas están dispuestos de manera desordenada y aleatoria. Dependiendo de las condiciones de acidez del suelo, la temperatura, la presencia de cationes metálicos y desecación, es posible que el ácido silícico atraviese procesos de polimerización en donde se forman estructuras más complejas que pueden llegar a formar una red cristalina o disociarse para volver a su estado monomérico. Al mismo tiempo, el agua actúa como un agente transportador que va disminuyendo el contenido de silicio en el suelo para integrarlo a los cuerpos de agua que posteriormente desembocan en los océanos, iniciando el ciclo marino del silicio que alimenta a organismos que lo aprovechan para generar biomineralizaciones que, al morir, se sedimentan en el lecho marino y con el tiempo forman rocas biogénicas ricas en silicio. Las raíces de la planta absorben y transportan el silicio hacia las partes aéreas de la planta, en donde se pueden depositar como fitolitos, microcristales de sílice que se forman en la estructura celular, donde actúan de barrera mecánica o también pueden mantenerse como silicio soluble que interactúa químicamente con las proteínas y otros elementos químicos que ingresan a la planta.

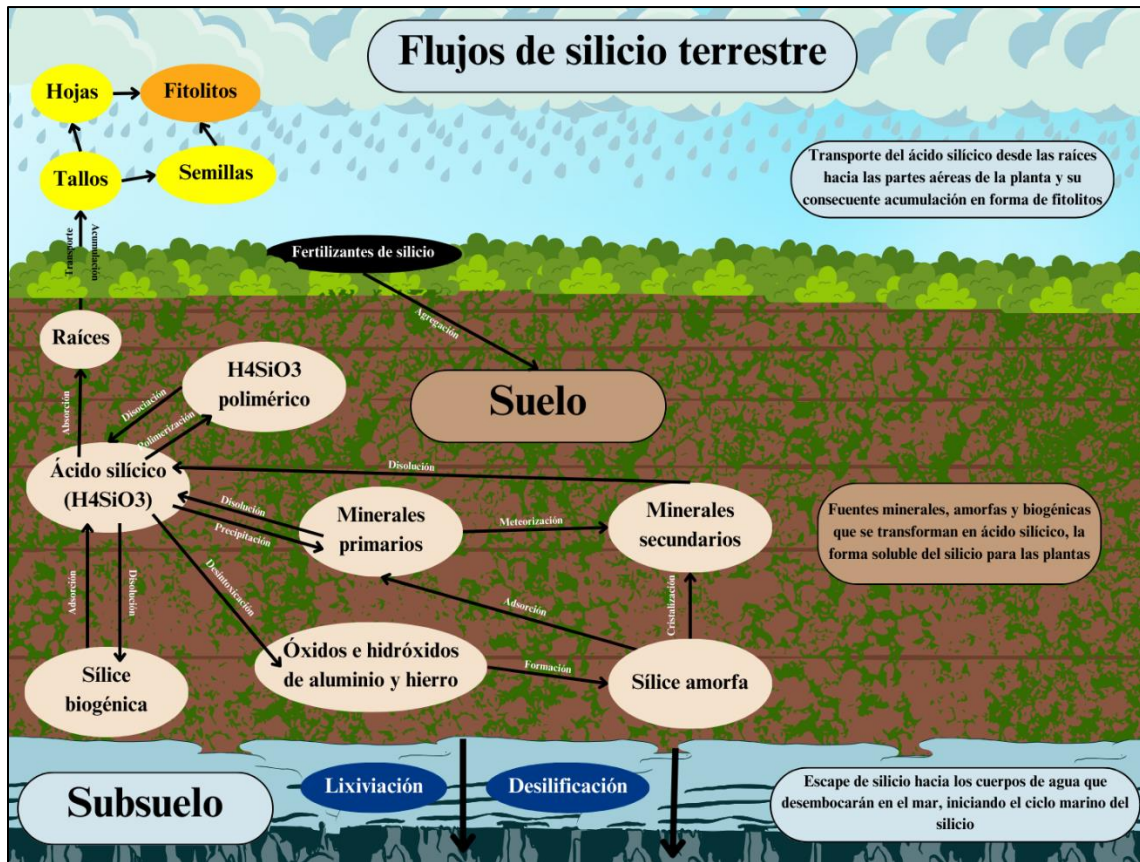


Figura 5. Elementos que actúan como productores y reservorios de silicio y ácido silícico junto a los flujos de interacción entre ellos. *Fuente: Elaboración propia.*

9. Discusiones sobre la esencialidad del silicio

Durante el siglo XIX, no existía consenso científico sobre la utilidad de la agregación mineral en el suelo para el mejoramiento de los cultivos. Los primeros aportes en la industria de los fertilizantes fueron hechos por Justus von Liebig (1803-1873), el cual situaba al nitrógeno (N), azufre (S), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), silicio (Si), sodio (Na) y hierro (Fe) como elementos esenciales, estableciendo la nutrición mineral en las plantas como una disciplina y extendió el uso de potasa, superfosfato y nitrógeno inorgánico a finales del mismo siglo (Marschner, 2012). Sin embargo, los estudios realizados se basaron en la observación y especulaciones en lugar de la experimentación, por lo que las bases de estos planteamientos no eran sólidas, generándose un nuevo concepto de esencialidad consistente en que : 1) Una planta no debe ser capaz de completar su ciclo de vida en ausencia de un determinado elemento químico, 2) la función de ese elemento químico no debe ser reemplazada por otro, y 3) el elemento debe estar directamente involucrado en el metabolismo de la planta como constituyente o metabolito de

la planta (Arnon & Stoud, 1939). Bajo esta definición, el silicio no es un elemento esencial, ya que no cumple con todos los parámetros establecidos, sin embargo, muchas especies para las que no se ha demostrado que el silicio sea esencial pueden crecer mejor en medios que contengan abundante silicio que en medios que no, ya sean cultivos en solución, en suelo o con bajas concentraciones de este elemento en una forma fácilmente absorbible (Epstein, 1994), por lo que a principios del siglo XXI se propuso una nueva definición para un elemento esencial si cumple uno o dos de los siguientes criterios: 1) el elemento forma parte de una molécula que es un componente intrínseco de la estructura o el metabolismo de la planta o 2) la planta puede estar tan gravemente deficiente en el elemento que presenta anomalías en el crecimiento, el desarrollo o la reproducción, es decir, "rendimiento", en comparación con las plantas con una deficiencia menor (Epstein & Bloom, 2003). El silicio solo es importante para determinadas especies vegetales, para unas teniendo el 0.1% del peso seco y para otras el 10% o mayor (Epstein, 1994), y dentro del grupo de las plantas que tienen una alta absorción de ácido silícico se encuentran siete de los diez cultivos más producidos en el mundo (caña de azúcar, maíz, arroz, trigo, papa, yuca, soya y remolacha azucarera) (Guntzer et al., 2012), por lo que determinar las propiedades del suelo en las que son producidos y darles el tratamiento apropiado con enmiendas, fertilizantes NPK y fertilizantes de micronutrientes aumentaría su producción y calidad de una manera sostenible respecto a mantener un equilibrio nutricional en el suelo. El interés investigativo respecto a determinar estas propiedades se refleja en el aumento de los estudios de ciencias agrícolas que relacionan los conceptos de plantas y silicio (**Figura 5A**) y los conceptos de silicio y estrés nutricional en la última década (**Figura 5B**).

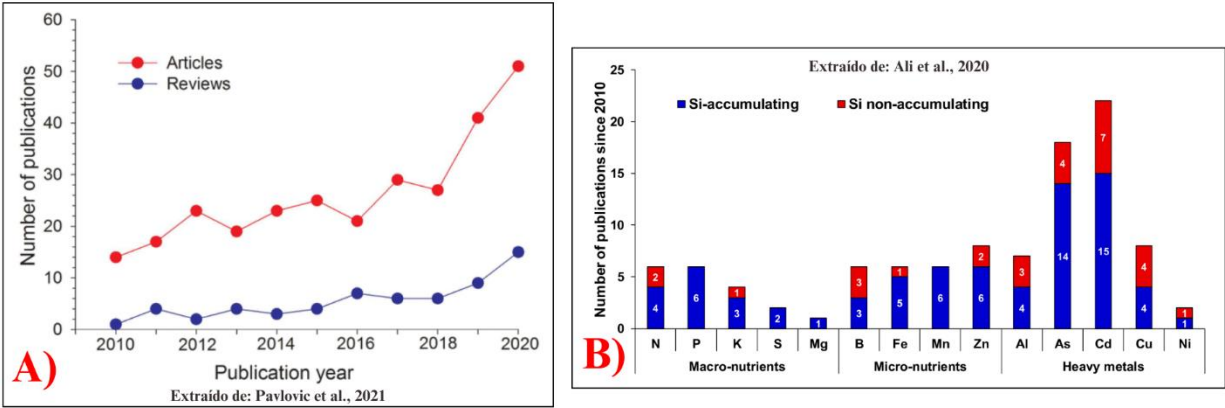


Figura 6. A) Número de publicaciones relacionadas con el silicio en plantas desde 2010 hasta 2020, basado en una búsqueda en Scopus con las palabras clave del título: "Silicio" o "Silicato" y "Plantas", refinada a "Ciencias Agrícolas y Biológicas". B) Número de artículos principales publicados que indican únicamente la interacción entre el Si (silicio) y el estrés nutricional. Fuente: Adaptado de Pavlovic et al. (2021) y Ali et al. (2020).

10. Diversidad edafológica en Colombia y cultivos captadores de silicio

La heterogeneidad geológica y climática de Colombia es reflejada en sus tipos de suelo, ya que el país cuenta con todas las categorías taxonómica descritas anteriormente. Acorde al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2015), el extremo oriental del país se encuentra dominado por espodosoles, la región de la Guajira por aridisoles, las islas de San Andrés y Providencia por vertisoles, molisoles e inceptisoles, las sabanas caribeñas por vertisoles, alfisoles, molisoles y ultisoles, los valles de los ríos Cauca y Magdalena por molisoles y entisoles, el norte de la Región Pacífica por histosoles, alfisoles y entisoles, las partes altas de la Región Andina por andisoles e inceptisoles, y las regiones de la Amazonía, Orinoquía y parte de las estribaciones de las cordilleras Oriental y Central por ultisoles, entisoles y oxisoles (**Figura 7A**). Los gelisuelos no son muy abundantes en el país si se compara con los otros órdenes de suelo, pero cabe destacar su presencia en las partes de mayor relieve topográfico de los Andes y de la Sierra Nevada de Santa Marta.

También cabe destacar la presencia de suelos negros (**Figura 7B**) que abarcan el 21.26% del área nacional (245.229,11km²), los cuales se caracterizan por su tonalidad oscura, espesores iguales o mayores a 25cm, enriquecimiento en carbono orgánico, buena retención de agua y alto contenido de nutrientes, los cuales están predominantemente dispuestos en la región andina (IGAC, 2022).

Respecto a la cartografía relacionada a la fertilidad (**Figura 7C**), esta se hizo con base en la distribución geográfica de las propiedades químicas (pH, SAL, SB, CaCO₃, K y P) y la fertilidad química natural de los suelos de Colombia, categorizando a las regiones de la Orinoquia y Amazonía como zonas de muy baja fertilidad, y las regiones Caribe y parte de la Andina como

zonas de muy alta fertilidad (IGAC, 2022). Sin embargo, como fue descrito anteriormente, la fertilidad depende de la interacción de variables complejas relacionadas con el aporte constante de nutrientes en un territorio, así como las propiedades internas del suelo, sumado al hecho de que cada cultivo tiene requerimientos diferentes para su crecimiento y que la actividad humana es capaz de alterar constantemente cualquiera de las variables medidas, y que cada una de estas variables tendrá ordenes de magnitud mucho más altos dependiendo del lugar del país donde se mida, sesgo que podría estar afectando el mapa de fertilidad (**Figura 7C**), ya que se pueden observar datos debatibles como el posicionar la Isla de San Andrés con un valor de fertilidad mucho más alto que el de la Región Andina.

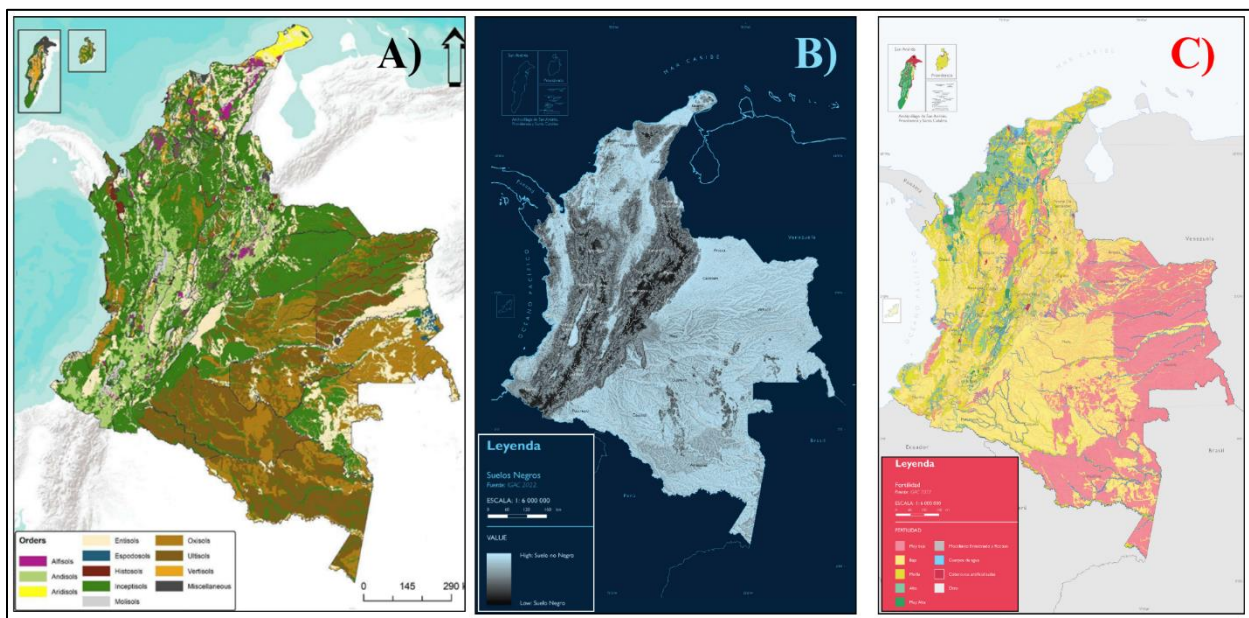


Figura 7. A) Mapa de suelos regional de Colombia. B) Mapa de suelos negros de Colombia. C) Mapa de fertilidad en Colombia. *Fuente: Adaptado de IGAC (2015,2022).*

La variedad edafológica ha dado cabida a que en la nación existan campos de cultivo de las especies vegetales captadoras de silicio, siendo su distribución, en el caso del arroz, en el Bajo Cauca, la Costa Norte, los Llanos y los Santanderes (Fedearroz, 2022). La caña de azúcar se cultiva en 30 municipios de Valle del Cauca, 9 de Cauca, 5 de Caldas, 5 de Risaralda y 1 de Quindío (Minagricultura, 2020). Los departamentos de mayor sembrada de maíz son Córdoba, Meta, Huila, Sucre y Tolima, contando con el 45% del área total de cultivo para maíz blanco y el restante 55% para maíz amarillo (AgroBayer, 2023). El trigo duro y el trigo pan son cultivados principalmente en Boyacá, Nariño, Cundinamarca y Tolima (ColombiaVerde, 2023). La yuca es sembrada en los departamentos de Córdoba, Bolívar, Sucre y Antioquia (Minagricultura, 2020). Las variedades de

papas como la papa criolla, pastusa, sabanera, amarilla, única y tumbay son producidas en los cultivos ubicados en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Nariño (ColombiaVerde, 2023). La soya se siembra en la altillanura del piedemonte del departamento del Meta y el Valle del Cauca (Minagricultura, 2019). Finalmente, la remolacha azucarera se enmarca en el esquema de producción agrícola de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Nariño, Tolima y Caldas (Agrosavia, 2023).

En la literatura se ha cuantificado la cantidad de silicio absorbido por los cultivos previamente mencionados y realizado una comparación de estas magnitudes con ecosistemas de diferentes especies vegetales. Por ejemplo, la absorción de silicio por parte del trigo se encuentra entre 20-113 kg/ha por año, en arroz entre 270-500kg/ha por año (Keller et al., 2012) y en caña de azúcar de 379 kg/ha por año (Savant et al., 1999), mientras que en la partes aéreas de las especies vegetales de ecosistemas como grandes llanuras se encuentra entre 22-67kg/ha (Blecker et al., 2006), en sabana de pasto húmedo tropical de 33kg/ha (Alexandre et al., 2011), en biogeosistemas forestales de 83 kg/ha (Sommer et al., 1983), en bosque de haya-abeto de 180 kg/ha y en bosque de pino de 90 kg/ha (Bartoli, 1983). Estos datos reflejan la gran diferencia del potencial de algunos cultivos para acumular silicio (Si) respecto a la biomasa de algunos ecosistemas, por lo que entender los flujos de este elemento en el suelo colombiano y llevar a cabo prácticas de fertilización donde siempre se tengan en cuenta podría resultar en un mejoramiento de la calidad y productividad del sector agrario.

11. Conclusiones

La evidencia recopilada de diferentes estudios resalta la importancia y complejidad existente entre los sistemas roca-suelo y suelo-planta del silicio respecto a sus formas resultantes de la transformación de los silicatos y el rol multifacético de sus variedades solubles en ofrecer beneficios a la fisiología vegetal y la nutrición de los cultivos, lo que se traduce en un reforzamiento y sostenimiento de los sistemas alimentarios de diferentes territorios.

La influencia de la aplicación de fertilizantes inorgánicos de silicio actúa como agente promotor de las defensas de la planta ante condiciones de estrés biótico y abiótico. Sin embargo, la efectividad de los beneficios varía según el tipo de cultivo, la concentración de silicio en el suelo y las condiciones fisicoquímicas de este mismo, por lo que se subraya la necesidad de un enfoque

aplicativo que se adapte a las condiciones intrínsecas de cada área destinada a labores de agricultura.

Los silicatos inorgánicos pueden afectar positivamente el rendimiento de los cultivos al controlar la disponibilidad de otros elementos en el suelo, lo que sugiere una aplicación estratégica de silicio para mejorar la absorción de nutrientes esenciales. La liberación de elementos químicos contenidos en agrominerales se relaciona con la meteorización y varía según el tipo de silicato, lo que plantea desafíos en la selección de fertilizantes adecuados.

Los mecanismos del ingreso del silicio hacia los cultivos a nivel celular y tisular son conocidos, siendo procesos de difusión y de transporte en masa, posiblemente, por canales proteicos como las acuaporinas. A nivel tisular, la planta emplea las vías apoplástica y simplástica, que involucran paredes celulares y células conductoras del xilema y el floema. Sin embargo, aún existen vacíos de conocimiento respecto a la exactitud de las interacciones químicas del silicio con todos los demás elementos químicos, y cómo esta interacción actúa en los organelos de la célula vegetal y en el estado fisiológico de la planta, por lo tanto, la comprensión de estos mecanismos es esencial para optimizar la absorción de silicio y maximizar su beneficio en los cultivos.

En un contexto más amplio, la heterogeneidad edafológica de Colombia, con sus diversos tipos de suelos y condiciones climáticas, crea un entorno propicio para el cultivo de plantas captadoras de silicio, como arroz, caña de azúcar, maíz, trigo, yuca, papas, soya y remolacha azucarera. El conocimiento detallado de las propiedades de los suelos, las necesidades específicas de estos cultivos y la interacción con los fenómenos climáticos colombianos es esencial para optimizar la aplicación de fertilizantes de silicio y mejorar la producción agrícola de manera sostenible.

Poseer una visión integrada de la geología, agronomía y biología permite dilucidar la cadena de eventos naturales que dan lugar a la formación de rocas y minerales de silicatos y cómo la interacción entre estos, y las condiciones de intemperización de la superficie terrestre hace que se conformen los suelos, y a partir de sus propiedades se establezcan categorías que aludan a sus características beneficiosas para la producción de cultivos y cómo el funcionamiento interno de estos cultivos responden a las diferentes condiciones de estrés que existen en el ambiente.

La relación entre el silicio y las plantas se presenta como un campo de estudio en constante evolución, con evidencia creciente de su papel en la mejora de la resistencia de las plantas al estrés

y el incremento de su rendimiento. La absorción y el transporte de silicio, la elección adecuada de fertilizantes y la consideración de la variabilidad edafológica en la producción agrícola son factores clave en la aplicación efectiva de silicio para beneficio de la agricultura.

12. Referencias

- Abh_Allah, E., Hashem, A., Alam, P., Ahmad, P. (2019). Silicon Alleviates Nickel-Induced Oxidative Stress by Regulating Antioxidant Defense and Glyoxalase Systems in Mustard Plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(4), 1260-1273. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09931-y>.
- AgroBayerColombia. (2023, Octubre 26). *Solución para maíz*. <https://www.agro.bayer.co/es-co/cultivos/maiz.html>.
- Agrosavia. (2023, Octubre 26). *Aspecto generales del cultivo de la remolacha*. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/20908>.
- Alexandre, A., Bouvet, M., & Abbadie, L. (2011). The role of savannas in the terrestrial Si cycle: a case-study from Lamto, Ivory Coast. *Global and Planetary Change*, 78(3-4), 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.007>.
- Anggria, L., Husnain, & Masunaga, T. (2021). A method for production of pure silica as fertilizer from industrial waste material. *IOP conference series*, 648(1), 012213. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012213>.
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). THE ESSENTIALITY OF CERTAIN ELEMENTS IN MINUTE QUANTITY FOR PLANTS WITH SPECIAL REFERENCE TO COPPER. *Plant Physiology*, 14(2), 371-375. <https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>.
- Baglione, L. (2011). Usos de la tierra diatomea. *Revista Técnicaña*, 27, 31-32. https://saltonverde.com/wp-content/uploads/2015/tec_no27_2011_p33-34.pdf.
- Bartoli, F. J. E. B. (1983). The biogeochemical cycle of silicon in two temperate forest ecosystems. *Ecological Bulletins*, 469-476.
- Bennett, P. C., Melcer, M. E., Siegel, D. I., & Hassett, J. P. (1988). The dissolution of quartz in dilute aqueous solutions of organic acids at 25 C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(6), 1521-1530. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90222-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90222-0).
- Bindraban, P. S., Dimkpa, C. O., White, J. C., Franklin, F. A., Melse-Boonstra, A., Koele, N., Pandey, R., Rodenburg, J., Senthilkumar, K., Demokritou, P., & Schmidt, S. (2020).

- Safeguarding human and planetary health demands a fertilizer sector transformation. *Plants, People, Planet*, 2(4), 302-309. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10098>.
- Bityutskii, N. P., Pavlović, J., Yakkonen, K. L., Maksimović, V., & Nikolić, M. (2014). Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. *Plant Physiology and Biochemistry*, 74, 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.015>.
- Blecker, S. W., McCulley, R. L., Chadwick, O. A., & Kelly, E. F. (2006). Biologic cycling of silica across a grassland bioclimate sequence. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(3). <https://doi.org/10.1029/2006GB002690>.
- Bosnić, P., Pavličević, M., Nikolić, N., & Nikolić, M. (2018). High monosilicic acid supply rapidly increases NA accumulation in maize roots by decreasing external Ca^{2+} activity. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(2), 210-216. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800153>.
- Brady, P. V., & Walther, J. V. (1989). Controls on silicate dissolution rates in neutral and basic pH solutions at 25 C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(11), 2823-2830. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90160-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90160-9).
- Bunker, B. C. (1994). Molecular mechanisms for corrosion of silica and silicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 179, 300-308. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(94\)90708-0](https://doi.org/10.1016/0022-3093(94)90708-0).
- Centro de Estudios Para la Sustentabilidad (CEPS). (2005). *Minerales para la agricultura en Latinoamérica*. Editorial CEPS. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/LIB-223.pdf>.
- ColombiaVerde. (2023, Octubre 26). *Cultivos de trigo en Colombia*. <https://colombiaverde.com.co/geografia/agricultura/cultivos-de-trigo-en-colombia/>.
- ColombiaVerde. (2023, Octubre 26). *Cultivos de papa en Colombia*. <https://colombiaverde.com.co/geografia/agricultura/cultivos-de-papa-en-colombia/>.
- Coskun, D., Deshmukh, R., Sonah, H., Menzies, J. G., Reynolds, O. L., Feng, J., Kronzucker, H. J., & Bélanger, R. R. (2018). The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*, 221(1), 67-85. <https://doi.org/10.1111/nph.15343>.
- Datnoff, L. E., Snyder, G. H., & Korndörfer, G. H. (2001). *Silicon in agriculture*. Elsevier.
- De la Cruz, G.H., Valdés, O., Reyero, M.R., Gómez, S.L., Arriaga, A. (2022). *El ascenso del agua sistema suelo-planta-atmósfera y estrés hídrico*. Universidad Nacional Autónoma de México: Facultad de Estudios Superiores Iztacala.

- Deus, A. C. F., De Mello Prado, R., De Cássia Félix Alvarez, R., De Oliveira, R. L. L., & Felisberto, G. (2019). Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. *Silicon*, 12(5), 997-1005. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00195-5>.
- Duggan, A. E. M. T. (2007). Calidad de fertilizantes: ¿Cuáles son las principales propiedades y atributos que determinan su valor agronómico? *In Simposio de Fertilidad*, 1-12. <https://www.tecnoagro.com.ar/notas/fertilidad/calidad-de-fertilizantes.pdf>.
- Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91(1), 11-17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>.
- Epstein, E. (1999). SILICON. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, 50(1), 641-664. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>.
- Epstein E and Bloom AJ. (2003). *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives, 2nd Eds.* John Wiley & Sons, New York
- Exley, C. (1998). Silicon in Life: A Bioinorganic Solution to Bioorganic Essentiality IJD Birchall Memorial Lecture.1. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 69(3), 139-144. [https://doi.org/10.1016/s0162-0134\(97\)10010-1](https://doi.org/10.1016/s0162-0134(97)10010-1).
- Fedearroz. (2023, Octubre 26). Área sembrada de arroz mecanizado (hectáreas) según zona arroceras, total año. <https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/area-produccion-y-rendimiento/>.
- Feng, Y., Li, X., Guo, S., Chen, X., Chen, T., He, Y., Shabala, S., & Yu, M. (2019). Extracellular silica nanocoat formed by layer-by-layer (LBL) self-assembly confers aluminum resistance in root border cells of pea (*Pisum sativum*). *Journal of Nanobiotechnology*, 17, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12951-019-0486-y>.
- Fernández Caliani, J.C. (1995). *Geología, mineralogía y génesis de las mineralizaciones de Wollastonita de Mérida (Extremadura)*. (Tesis Doctoral Inédita). Universidad de Sevilla, Sevilla. <https://idus.us.es/handle/11441/79115>.
- Gerbeau, P., Güçlü, J., Ripoche, P., & Maurel, C. (1999). Aquaporin Nt-TIPa can account for the high permeability of tobacco cell vacuolar membrane to small neutral solutes. *The Plant Journal*, 18(6), 577-587. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.1999.00481.x>.

- Gomes, F. B., Moraes, J. C. D., Santos, C. D. D., & Goussain, M. M. (2005). Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. *Scientia Agricola*, 62(6), 547-551. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600006>.
- Greger, M., Landberg, T., & Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7(2), 41. <https://doi.org/10.3390/plants7020041>.
- Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201-213. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>.
- Gutiérrez, A. C., Araya, F. C., Condori, W. E., Vallejos, F. A. G., & Águila, P. M. (2022). El silicio (SI) y su efecto mitigador del estrés salino en cultivos hortícolas. *Idesia*, 40(1), 129-133. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292022000100129>.
- Hildebrand, M., Dahlin, K., & Volcani, B. E. (1998). Characterization of a silicon transporter gene family in *Cylindrotheca fusiformis*: sequences, expression analysis, and identification of homologs in other diatoms. *Molecular and General And Genomics*, 260(5), 480-486. <https://doi.org/10.1007/s004380050920>.
- Hodson, M. J., & Evans, D. E. (2020). Aluminium–silicon interactions in higher plants: an update. *Journal of Experimental Botany*, 71(21), 6719-6729. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa024>.
- Hosseini, S. A., Naseri Rad, S., Ali, N., & Yvin, J. C. (2019). The ameliorative effect of silicon on maize plants grown in Mg-deficient conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(4), 969. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa024>.
- Hurlbut, C. S., & Klein, C. (1988). *Manual de mineralogía de Dana* (No. 549 HUR).
- Hunt, J. W., Dean, A. P., Webster, R. E., Johnson, G. N., & Ennos, A. R. (2008). A novel mechanism by which silica defends grasses against herbivory. *Annals of botany*, 102(4), 653-656. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn130>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2015). *Suelos y tierras de Colombia - Tomo 1*. Bogotá, Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2022). *Los suelos negros y su importancia*. Dirección de Gestión de Información Geográfica.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2022). *Fertilidad de los suelos colombianos*. Dirección de Gestión de Información Geográfica.

- Johnston, A. M., & Bruulsema, T. W. (2014). 4R nutrient stewardship for improved nutrient use efficiency. *Procedia Engineering*, 83, 365-370. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.029>.
- Kaya, C., Tuna, L., & Higgs, D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of plant nutrition*, 29(8), 1469-1480. <https://doi.org/10.1080/01904160600837238>.
- Keller, C., Guntzer, F., Barboni, D., Labreuche, J., & Meunier, J. D. (2012). Impact of agriculture on the Si biogeochemical cycle: input from phytolith studies. *Comptes Rendus Geoscience*, 344(11-12), 739-746. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.10.004>.
- Keller, C., Rizwan, M., Davidian, J. C., Pokrovsky, O. S., Bovet, N., Chaurand, P., & Meunier, J. D. (2015). Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μM Cu. *Planta*, 241(4), 847-860. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2220-1>.
- Lazard, M., Blanquet, S., Fiscaro, P., Labarraque, G., & Plateau, P. (2010). Uptake of selenite by *Saccharomyces cerevisiae* involves the high and low affinity orthophosphate transporters. *Journal of Biological Chemistry*, 285(42), 32029-32037. <https://doi.org/10.1074/jbc.M110.139865>.
- Liu, J., Ma, J., He, C., Li, X., Zhang, W., Xu, F., Lin, Y., & Wang, L. (2013). Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells by a wall-bound form of silicon. *New Phytologist*, 200(3), 691-699. <https://doi.org/10.1111/nph.12494>.
- Ma, J., & Takahashi, E. (1990). Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. *Plant and soil*, 126(1), 115-119. <https://doi.org/10.1007/BF00041376>.
- Ma, J. F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil science and plant nutrition*, 50(1), 11-18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>.
- Manning, D. A. (2010). Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. *Agronomy for sustainable development*, 30(2), 281-294. <https://doi.org/10.1051/agro/2009023>.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Martín, V., Francisco, J., & Fereres Castiel, E. L. I. A. S. (2017). *Fitotecnia: principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Ediciones Mundi-Prensa.

- Matichenkov, V. V., & Bocharnikova, E. A. (2001). The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. *In Studies in plant science*, 8, 209-219. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80017-3](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80017-3).
- Minagricultura. (2020). *Cadena caña de azúcar*. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. <https://sioc.minagricultura.gov.co/CanaAzucar/Documentos/2020-12-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.
- Minagricultura. (2020). *Subsector Productivo de la Yuca*. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Yuca/Documentos/2020-12-31%20Cifras%20Sectoriales%20yuca.pdf>.
- Minagricultura. (2021). *Soya*. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. <https://sioc.minagricultura.gov.co/AlimentosBalanceados/Documentos/2021-06-30%20Cifras%20Sectoriales%20Soya.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Una introducción a los conceptos básicos de la seguridad alimentaria*. División de Análisis de Agricultura y Desarrollo Económico de las Naciones Unidas. <https://www.fao.org/3/al936s/al936s00.pdf>.
- Pavlović, J., Kostic, L., Bosnić, P., Kirkby, E. A., & Nikolić, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>.
- Peterson, C. A., & Cholewa, E. (1998). Structural modifications of the apoplast and their potential impact on ion uptake. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 161(5), 521-531. <https://doi.org/10.1002/jpln.1998.3581610505>.
- Straaten, P. (2007). *Agrogeology: The use of rocks for crops*. Enviroquest Ltd. 352 River Road, Cambridge, Ontario, Canada. https://www.researchgate.net/publication/328392285_AGROGEOLOGY_The_use_of_rocks_for_crops.
- Raven, J. A. (1983). THE TRANSPORT AND FUNCTION OF SILICON IN PLANTS. *Biological Reviews*, 58(2), 179-207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.1983.tb00385.x>.
- Raven, J. A. (2001). Silicon transport at the cell and tissue level. *In Studies in plant science*, 8, 41-55. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80007-0](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80007-0).

- Rodgers-Gray, B. S., & Shaw, M. W. (2004). Effects of straw and silicon soil amendments on some foliar and stem-base diseases in pot-grown winter wheat. *Plant Pathology*, 53(6), 733-740. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2004.01102.x>.
- Sanglard, L. V. P., Martins, S. C. V., Detmann, K. C., Silva, P. E. M., Lavinsky, A. O., Silva, M. M., Detmann, E., Araújo, W. L., & DaMatta, F. M. (2014). Silicon nutrition alleviates the negative impacts of arsenic on the photosynthetic apparatus of rice leaves: An analysis of the Key Limitations of Photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, 152(2), 355-366. <https://doi.org/10.1111/ppl.12178>.
- Schaller, J., Puppe, D., Kaczorek, D., Ellerbrock, R., & Sommer, M. (2021). Silicon cycling in soils revisited. *Plants*, 10(2), 295. <https://doi.org/10.3390/plants10020295>.
- Shi, Y., Wang, Y., Flowers, T. J., & Gong, H. (2013). Silicon decreases chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. *Journal of plant physiology*, 170(9), 847-853. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.018>.
- Sidhu, J. K., Stout, M. J., Blouin, D. C., & Datnoff, L. E. (2013). Effect of silicon soil amendment on performance of sugarcane borer, *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) on rice. *Bulletin of Entomological Research*, 103(6), 656-664. <https://doi.org/10.1017/S0007485313000369>.
- Song, A., Li, P., Li, Z., Fan, F., Nikolic, M., & Liang, Y. (2011). The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. *Plant and Soil*, 344(1-2), 319-333. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0749-3>.
- Sommer, M., Jochheim, H., Höhn, A., Breuer, J., Zagórski, Z., Busse, J., Barkusky, D., Meier, K., Puppe, D., Wanner, M., & Kaczorek, D. (2013). SI cycling in a Forest Biogeosystem – The importance of transient state biogenic SI pools. *Biogeosciences*, 10(7), 4991-5007. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4991-2013>.
- Stević, N., Korać, J., Pavlović, J., & Nikolić, M. (2016). Binding of transition metals to monosilicic acid in aqueous and xylem (*Cucumis sativus* L.) solutions: A low-T electron paramagnetic resonance study. *BioMetals*, 29(5), 945-951. <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9966-9>.
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física (Octava)*. Pearson Educación S. A., Madrid.

- Tayade, R., Ghimire, A., Khan, W., Lay, L., Attipoe, J. Q., & Kim, Y. (2022). Silicon as a smart fertilizer for sustainability and crop improvement. *Biomolecules*, *12*(8), 1027. <https://doi.org/10.3390/biom12081027>.
- Tyerman, S. D., Bohnert, H. J., Maurel, C., Steudle, E., & Smith, J. A. C. (1999). Plant aquaporins: their molecular biology, biophysics, and significance for plant water relations. *Journal of Experimental Botany*, *50*, 1055-1071. <http://www.jstor.org/stable/23696209>.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Natural Resources Conservation Service.
- Wu, J., Geilfus, C. M., Pitann, B., & Mühling, K. H. (2016). Silicon-enhanced oxalate exudation contributes to alleviation of cadmium toxicity in wheat. *Environmental and Experimental Botany*, *131*, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.06.012>.
- Xiao, Z., Yan, G., Ye, M., & Liang, Y. (2021). Silicon relieves aluminum-induced inhibition of cell elongation in rice root apex by reducing the deposition of aluminum in the cell wall. *Plant and Soil*, *462*(1-2), 189-205. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04850-y>.
- Yan, G., Nikolić, M., Ye, M., Xiao, Z., & Liang, Y. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, *17*(10), 2138-2150. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(18)62037-4).
- Zhang, G., Kang, J., Wang, T., & Zhu, C. (2017). Review and outlook for agromineral research in agriculture and climate mitigation. *Soil Research*, *56*(2), 113-122. <https://doi.org/10.1071/SR17157>.
- Zhao, X. Q., Mitani, N., Yamaji, N., Shen, R. F., & Ma, J. F. (2010). Involvement of silicon influx transporter OsNIP2;1 in selenite uptake in rice. *Plant Physiology*, *153*(4), 1871-1877. <https://doi.org/10.1104/pp.110.157867>.