

El silicio como regulador de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de plantas de cultivo bajo estrés hídrico: una revisión y análisis bibliométrico

Silicon as a regulator of physiological, biochemical, and molecular responses in crop plants under water stress: a review and bibliometric analysis

Carlos Ciceri Coronado^{1,2,*}, Yennifer Barrios Rico²,
Yoly Dayana Moreno Ortega², Nixon Flórez Velasco²

¹ Grupo de Investigación en Biodiversidad y Desarrollo Amazónico (BYDA). Centro de Investigaciones Amazónicas MACAGUAL- César Augusto Estrada González (CIMAZ). Florencia, Colombia, caciceri@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-3527-4039>

² Grupo de Investigación Agroindustrial La Angostura. Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila. Campoalegre, Colombia, ybarriosr@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0002-2868-2229>

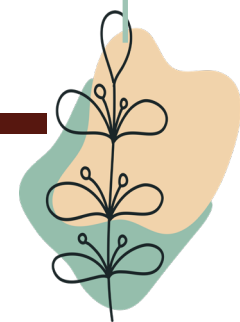
² Grupo de Investigación Agroindustrial La Angostura. Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila. Campoalegre, Colombia, nflorez@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-0012-3484>

² Grupo de Investigación Agroindustrial La Angostura. Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila. Campoalegre, Colombia, ydmoreno@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-6840-8510>

Autor para correspondencia: caciceri@sena.edu.co

Como citar:

Ciceri Coronado, C., Barrios Rico, Y., Moreno Ortega, Y. D., y Flórez Velasco, N. (2024). El silicio como regulador de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de plantas de cultivo bajo estrés hídrico: una revisión y análisis bibliométrico. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 11(1), 19-48.



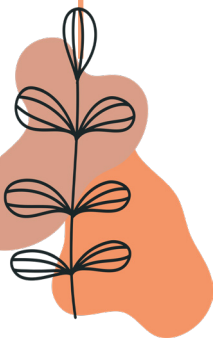
Resumen

El cambio climático ha intensificado los eventos de sequía representando una de las principales limitaciones para la productividad agrícola. Dada esta problemática, el presente estudio se justifica por la necesidad de explorar estrategias que incrementen la tolerancia de las plantas al estrés hídrico, siendo el silicio (Si) un elemento fundamental para mitigar sus efectos adversos. El objetivo de esta revisión es analizar el papel del silicio (Si) en la regulación de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de plantas de cultivo bajo condiciones de sequía. Para ello, se realizó un análisis bibliométrico siguiendo las directrices de PRISMA y una revisión sistemática en las bases de datos Scopus y Web of Science, identificando un total de 100 publicaciones relevantes. Los resultados muestran que el silicio (Si) mejora la retención de agua, la eficiencia fotosintética activa, las defensas antioxidantes, y además regula la apertura estomática junto con la acumulación de osmoprotectores. Concluimos que el silicio (Si) es una herramienta prometedora para fortalecer la resiliencia de los cultivos al estrés hídrico y contribuir a la sostenibilidad agrícola, sin embargo, se requiere mayor investigación sobre sus mecanismos moleculares en diferentes especies vegetales para profundizar en su aplicación.

Palabras clave: Silicio, estrés hídrico, mecanismos de resistencia, sequía, cultivos agrícolas

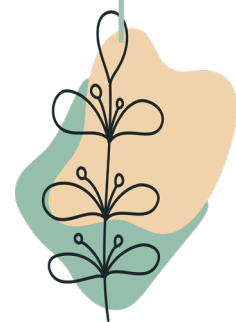
Abstract

Climate change has intensified drought events, representing one of the main limitations to agricultural productivity. Given this issue, the present study is justified by the need to explore strategies that increase plant tolerance to water stress, with silicon (Si) being a key element in mitigating its adverse effects. The general



objective of this review is to analyze the role of silicon in regulating the physiological, biochemical, and molecular responses of crop plants under drought conditions. A bibliometric analysis was conducted following PRISMA guidelines, along with a systematic review in Scopus and Web of Science databases, identifying 100 relevant publications. The results show that Si improves water retention, photosynthetic efficiency, and activates antioxidant defenses, in addition to regulating stomatal opening and the accumulation of osmoprotectants. We conclude that silicon is a promising tool to strengthen crop resilience to water stress and contribute to agricultural sustainability, although further research is needed on its molecular mechanisms in different plant species.

Keywords: Silicon, Water stress, resistance mechanisms, drought, agricultural crops



Introducción

El cambio climático contemporáneo ha intensificado la frecuencia y severidad de eventos de sequía, posicionándose como uno de los principales factores de estrés abiótico que afecta la producción agrícola a nivel mundial (Sato et al., 2024; Yang et al., 2021). La sequía no solo reduce la disponibilidad de agua, sino que además desencadena una serie de respuestas fisiológicas y moleculares en las plantas comprometiendo su crecimiento, desarrollo y rendimiento productivo (Guizani et al., 2024; Qiao et al., 2024). Entre las estrategias para incrementar la supervivencia del rendimiento de las plantas ante situaciones de estrés ambiental, se encuentra el manejo de la nutrición mineral (Ayyaz et al., 2024), donde las aplicaciones de fertilizantes a base de silicio (Si) mejoran la defensa y rendimiento de los cultivos bajo condiciones de estrés (Barão et al., 2023; Hassan et al., 2024; Tayade et al., 2022). Aunque el silicio (SI) no es un nutriente esencial, ha emergido como un elemento beneficioso para mitigar los efectos adversos del estrés abiótico (Mehta et al., 2020), mejorando la resistencia de cultivos mediante la regulación de procesos fisiológicos (Costa et al., 2024), morfológicos, bioquímicos (Cheraghi et al., 2024), y genéticos (Thakral et al., 2024), optimizando así la respuesta de las plantas ante condiciones adversas como la alta salinidad (Gill et al., 2024; Teimoori et al., 2023), el estrés térmico (Saha et al., 2021) y, especialmente el déficit hídrico (Ahsan et al., 2023; Cheraghi et al., 2024; Johnson et al., 2022; Wang et al., 2021).

El papel del silicio (SI) en la regulación de las respuestas al estrés abiótico se explica por su capacidad para influir en la expresión génica y en las rutas metabólicas asociadas a la tolerancia al estrés (Biju et al., 2023). Esta regulación incluye la estabilización de estructuras celulares, la modulación del equilibrio osmótico y la activación de sistemas antioxidantes, entre otros mecanismos (Bhardwaj & Kapoor, 2021). Con los avances recientes en herramientas genómicas y epigenéticas, se ha profundizado en la comprensión de cómo el silicio (SI) interactúa con los sistemas biológicos de las plantas para proporcionar una mayor resiliencia frente a condiciones de estrés (Mir et al., 2022; Stadnik et al., 2022). Además, su capacidad para mejorar la resistencia de los cultivos a condiciones adversas, como la sequía, contribuye a la optimización de los recursos hídricos y a una menor dependencia de insumos químicos (Kovács et al., 2022).

En este sentido, el presente artículo revisa la literatura científica disponible sobre el papel del silicio (Si) en la respuesta de las plantas al estrés hídrico, apoyando la



adaptación de la agricultura a los desafíos del cambio climático para promover prácticas sostenibles y resilientes que favorezcan la seguridad alimentaria y la conservación de los recursos naturales. Para esto, se analizaron aspectos fisiológicos y moleculares, complementando la revisión con un análisis bibliométrico que identifica las tendencias de investigación en este campo emergente.

Materiales y métodos

Diseño del estudio

El estudio se orientó por las directrices de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis Protocol) (Park et al., 2022). Se empleó un enfoque bibliométrico para analizar las tendencias de investigación, identificar áreas clave de interés y examinar las implicaciones, direcciones políticas y futuras investigaciones relacionadas con el uso de silicio (Si) como regulador del estrés hídrico en plantas de cultivo. Este método fue seleccionado por su capacidad para ofrecer un análisis exhaustivo y cuantitativo, proporcionando valiosas perspectivas sobre estrategias y políticas aplicables (Liu et al., 2024).

Estrategia de búsqueda de literatura y selección de estudios

Se realizó una revisión sistemática el 25 de agosto de 2023 en las bases de datos Scopus (<https://www.scopus.com/>) y Web of Science (<https://clarivate.com/>). Se definieron palabras clave para formular los términos de búsqueda. Seleccionamos la ecuación: TTITLE-ABS-KEY (“silicio” AND “cultivos” AND “genes” AND “sequía”) para realizar la búsqueda. Las bases de datos descargadas de Scopus y Web of Science se combinaron en un solo archivo Excel utilizando la herramienta del paquete Bibliometrix en RStudio, y se eliminaron los documentos duplicados.

Análisis de datos y visualización

Se utilizó el paquete de R “bibliometrix” (RSB) versión 4.4.1 y el software VOSviewer (VSv) versión 1.6.20 (<https://www.vosviewer.com/>) para analizar instituciones, revistas co-citadas, países, autores, revistas, autores co-citados y co-ocurrencia de palabras clave, entre otros. RSB se utilizó para analizar la evolución temática, el número de artículos y citas a lo largo del tiempo, análisis de centralidad y densidad,



e identificación de los autores más activos en la investigación sobre la regulación del estrés hídrico mediante el silicio. Por último, VSv se empleó para analizar y visualizar redes de co-ocurrencia.

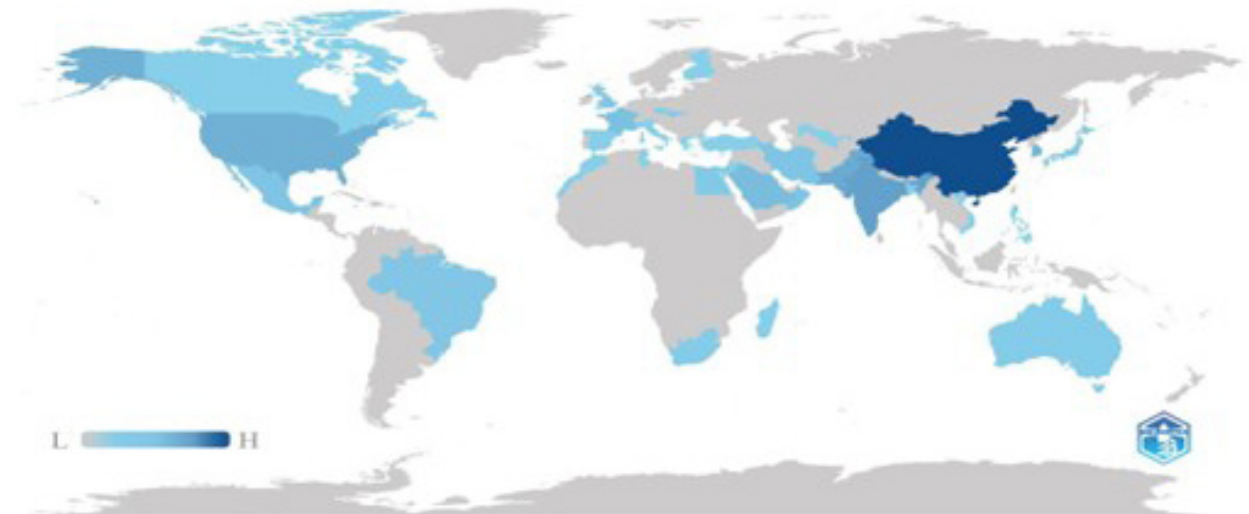
Análisis bibliométrico

Contribución científica y documentos más citados a nivel mundial

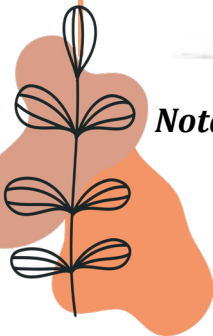
El análisis bibliométrico reveló que China lidera la producción científica en el tema relacionado con el silicio (Si) y la sequía, con un total de 100 publicaciones entre 2003 y 2023, seguido por Estados Unidos con 80 publicaciones (Figura 1). Sin embargo, a pesar del mayor volumen de publicaciones, los artículos de China han recibido menos citas, lo que podría indicar una menor influencia en la comunidad científica internacional. En términos de áreas temáticas, Estados Unidos, China e India dominan en investigación sobre mecanismos moleculares, mientras que algunos países de Europa se destacan en fisiología.

Figura 1.

Producción científica por país. La intensidad del color azul indica un mayor número de artículos. Se presenta a China como uno de los países que más investiga en temas relacionados con el silicio (Si) y la sequía.



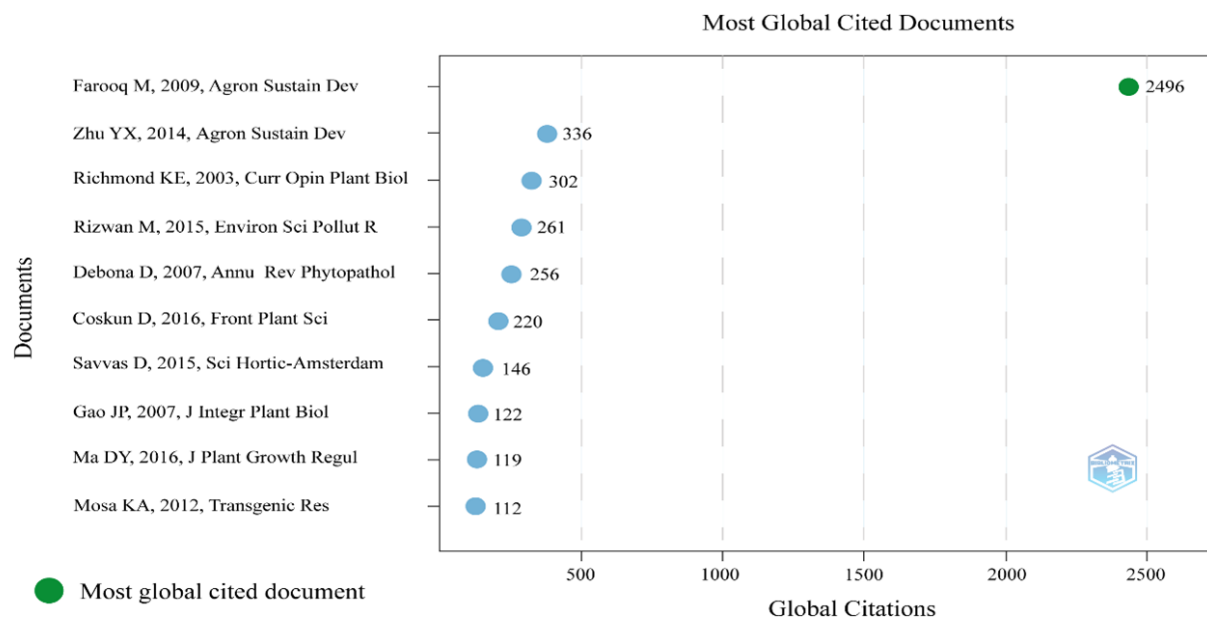
Nota. Elaboración propia



Por otra parte, se identificaron los documentos más citados en el periodo comprendido entre los años 2003 y 2023 (Fig. 2), revelando que la investigación realizada por Farooq y colaboradores en el 2009 “Plant drought stress: effects, mechanisms and management” publicada en la revista “Agronomy for Sustainable Development” es el documento más citado con alrededor de 2496 menciones, indicando su importancia e impacto en la comunidad científica que estudia los efectos del estrés hídrico en las plantas.

Figura 2.

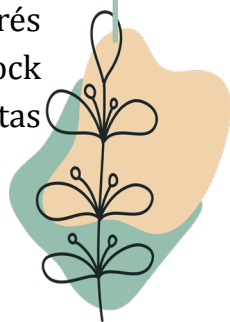
Los documentos más citados a nivel mundial entre 2003 y 2023. La investigación realizada en el 2009 por Farooq y colaboradores se posiciona como la más citada.



Nota. Elaboración propia

Análisis de co-ocurrencia de palabras clave

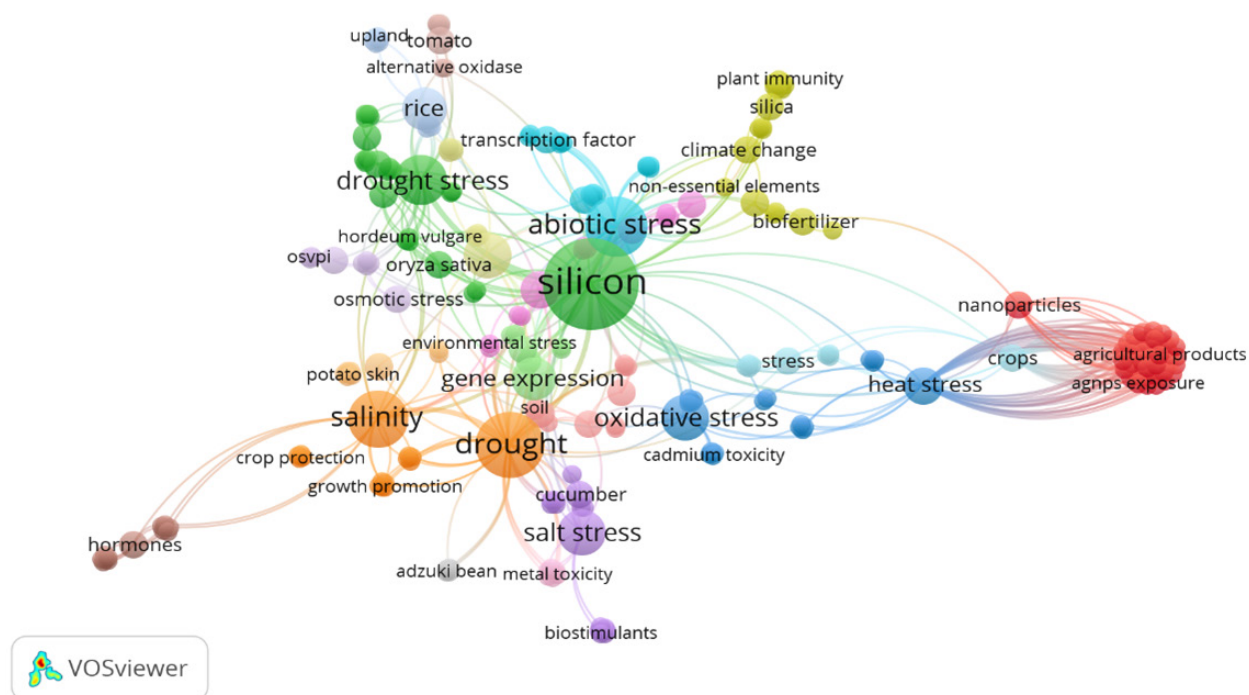
El mapa de red muestra nueve grupos de palabras clave interrelacionadas con temas agrupados dentro del campo de estudio (Fig. 3). El nodo marrón agrupa términos relacionados con “tomate”, “oxidasa alternativa” y “hormonas”, indicando un enfoque en aspectos específicos de bioquímica y biología vegetal. En el nodo azul, se encuentran términos asociados con “cultivo en secano”, “arroz”, “estrés”, “estrés oxidativo”, “toxicidad por cadmio”, “estrés térmico”, “factor de transcripción por shock térmico”, “antioxidantes” y “cultivos”, indicando la relación del estrés y las respuestas



antioxidantes en diversos cultivos bajo condiciones adversas. Por otro lado, el nodo azul claro agrupa términos como “factor de transcripción”, “fisiología”, “bioinformática” y “estrés abiótico”, sugiriendo un enfoque en la regulación genética y las herramientas bioinformáticas para estudiar la respuesta a condiciones de estrés abiótico. El nodo verde incluye términos como “estrés por sequía”, “Arabidopsis”, “acuaporinas”, “fluorescencia de clorofila”, “contenido de clorofila”, “Oryza sativa”, “Triticum sativum”, “Hordeum vulgare”, “pared celular”, “rendimiento de cultivos”, “expresión génica” y “silicio”, destacando la importancia de la investigación sobre la respuesta a la sequía y la evaluación de parámetros fisiológicos y genéticos en diferentes cultivos.

Figura 3.

Mapa de red basado en la co-ocurrencia de términos en títulos y resúmenes. Los colores indican agrupaciones de términos relacionados identificados por VOSviewer.



Nota. Elaboración propia

El nodo naranja, por su parte, agrupa términos relacionados con “fertilización con silicio”, “agronomía”, “papa”, “salinidad”, “sequía”, “crecimiento de plantas de cultivo”, “resistencia a enfermedades” y “protección”, indicando el papel del silicio (Si) en la agronomía y su impacto en la resistencia y crecimiento de las plantas. El nodo magenta se centra en “tolerancia”, “elemento beneficioso”, “planta” y “fitohormonas”,

reflejando el interés en la tolerancia a condiciones adversas y el papel de los elementos beneficiosos y fitohormonas. En el nodo amarillo, se agrupan términos como “gen de defensa”, “sílice”, “cultivos hortícolas”, “cambio climático”, “elementos no esenciales”, “agricultura sostenible”, “biofertilizante” y “nanobiofertilizante”, destacando la investigación sobre la defensa vegetal frente al cambio climático y el uso de biofertilizantes en la agricultura sostenible. El nodo púrpura incluye términos como “pepino”, “estrés salino”, “bioestimulantes”, “transcriptoma”, “transpiración”, “estrés osmótico”, “estrés por salinidad” y “apoplasto”, centrando el estudio en los efectos del estrés salino y osmótico en diversos cultivos y el papel de los bioestimulantes. En general, este estudio ofrece una visión general del estado actual de la investigación sobre mecanismos de respuesta de plantas de cultivo a estrés hídrico, destacando las áreas para una mayor investigación y las posibles vías para futuras investigaciones.

27

Análisis de centralidad

El rango de centralidad y la densidad son herramientas importantes para analizar las palabras clave de los autores (Herrera-Viedma et al., 2016). La centralidad es el grado de interacción del tema de interés con otros temas de investigación, mientras que la densidad es la fuerza interna del tema de investigación (Salleh, 2022). La Figura 4 muestra que las palabras clave de los autores se dividieron en 9 grupos principales. En el cuadrante de temas básicos, los grupos 1 (osmotic stress, abiotic stress, y root hydraulic conductance), 2 (gene family and acid biosynthesis) muestran una baja densidad y alta centralidad, indicando un desarrollo débil, pero con temas que son importantes en el campo de investigación. En el cuadrante de temas motores, encontramos que los grupos 3 (metabolism, acid, y gene), 4 (flavonoid biosynthesis, y transcription factors), 5 (drought, plants, y silicon), y 6 (drought tolerance, oxidative stress, y drought stress) tienen alta centralidad y densidad. Estos son los temas más desarrollados e importantes en el campo del silicio (Si) y la sequía.

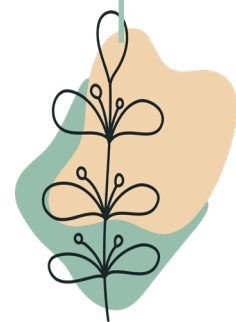
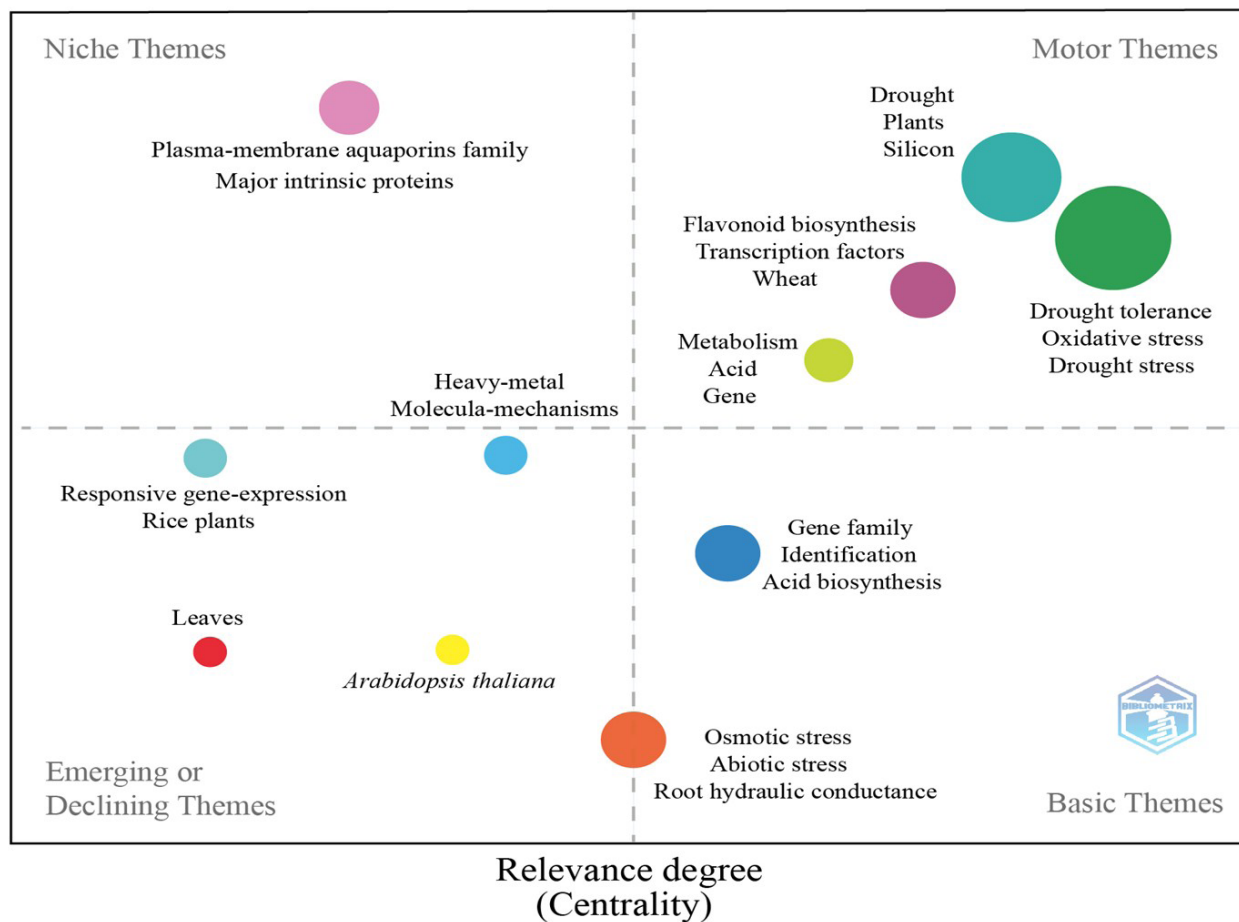


Figura 4.

Mapa temático de las palabras clave del autor por clúster. Cada burbuja representa un clúster de red, y la posición de la burbuja se establece según la centralidad y densidad.



Nota. elaboración propia

Por otro lado, el grupo 7 (plasma-membrane, aquaporins family, y major intrinsic proteins) se encuentra en el cuadrante de temas nicho; estos temas han desarrollado enlaces internos (alta densidad) pero tienen baja centralidad, es decir, una importancia limitada para el campo (Della Corte et al., 2019). Los grupos 8 (heavy metal, y molecular mechanisms) y 9 (responsive gene expresión, y rice plant) tienen una baja centralidad y densidad, indicando un desarrollo débil y marginal en el campo.

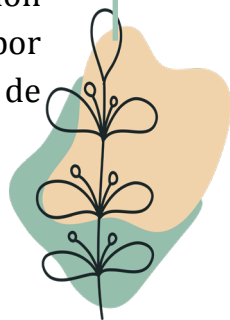
Efectos del estrés hídrico en plantas de cultivo

El estrés hídrico es una de las principales limitantes para la productividad de las plantas de cultivo a nivel mundial (Seleiman et al., 2021). Este tipo de estrés ocurre cuando la disponibilidad de agua en el suelo es insuficiente para satisfacer las demandas transpiratorias de las plantas (Ghadirnezhad Shiade et al., 2023), lo que desencadena una serie de respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares para adaptarse a las condiciones adversas (Liang et al., 2020; Tian et al., 2024; Urmi et al., 2023). El estrés hídrico no solo afecta a las plantas a nivel individual, sino que también tiene implicaciones significativas para los ecosistemas agrícolas (Rajanna et al., 2023). Las condiciones de sequía recurrente, ocasionadas por el cambio climático, modifican los patrones de disponibilidad de agua, lo que obliga a los agricultores a adaptar sus prácticas de manejo y seleccionar cultivares más resistentes (Saeed et al., 2024).

La sequía puede inhibir significativamente la fotosíntesis del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) limitando la conductancia estomática, como lo indican Liang et al (2020), esto puede influir en las características morfológicas y fisicoquímica de los frutos. Una investigación realizada por Klunklin & Savage (2017) demuestra que las condiciones de estrés hídrico modifican los compuestos bioactivos de los frutos del tomate, afectando las características de calidad. Además, Alomari-Mheidat et al (2023) reportan que el rendimiento más sensible en las plantas de tomate afectadas por la sequía se ve reflejado en el tamaño del fruto, donde no se evidencia recuperación antes de la cosecha.

En cultivos como el arroz (*Oryza sativa* L.), el déficit hídrico tiene una fuerte influencia en las características fisiológicas y el rendimiento (Bhandari et al., 2023; Salgotra & Chauhan, 2023). Los resultados del estudio de Yang et al (2019) sugieren que este tipo de condiciones de estrés aumentan significativamente el grano calcáreo y la caliza, afectando la apariencia y la calidad nutricional. Por otro lado, según Panja et al (2024) la escasez de agua reduce la fotosíntesis en el arroz, disminuyendo la acumulación de materia seca y afectando el llenado del grano. Además, la sequía retrasa la floración y provoca esterilidad en las espiguillas, lo que resulta en un bajo rendimiento de grano en la cosecha (Shah et al., 2024).

Por último, en cultivos de plantas superiores sensibles a las variaciones climáticas, como el caso del cacao (*Theobroma cacao* L.), El estrés por sequía inhibe la elongación celular en plantas debido a la disminución de la presión de turgencia, causada por la menor absorción de agua (Neither et al., 2020). Esto, junto con la reducción de



la fotoasimilación y los metabolitos necesarios para la división celular, deteriora la mitosis y provoca una disminución en el crecimiento de la planta (Fig. 5). Estos estudios sugieren la necesidad de estrategias de mitigación eficaces para proteger la producción y calidad de los cultivos bajo condiciones de estrés hídrico.

Figura 5.

Descripción de posibles mecanismos de reducción del crecimiento bajo estrés por sequía en plantas de cacao.



Nota. Elaboración propia

Mecanismos de resistencia a la sequía

Las plantas han desarrollado una variedad de mecanismos de resistencia a la sequía que les permiten sobrevivir y reproducirse en condiciones de escasez de agua (Qiao et al., 2024). Estos mecanismos incluyen adaptaciones que permiten a las plantas minimizar el daño causado por el estrés hídrico, mantener la integridad celular y continuar su crecimiento y desarrollo en condiciones adversas (Giordano et al., 2021). En la tabla 1 se presentan los principales mecanismos de resistencia al estrés hídrico en las plantas, categorizados en morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y genéticos. Además, se incluyen ejemplos específicos de cultivos que exhiben cada tipo de adaptación.



Tabla 1.

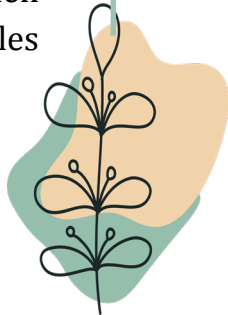
Principales mecanismos de resistencia al estrés hídrico en las plantas de cultivo.

Mecanismo	Ejemplo	Cultivo relacionado	Referencia
Morfológico	Reducción del tamaño de las hojas.	Maíz (<i>Zea mays</i>)	(Avramova et al., 2015)
	Aumento en la profundidad de las raíces.	Trigo (<i>Triticum spp.</i>)	(Grzesiak et al., 2019)
Fisiológico	Cierre de estomas para reducir la transpiración.	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	(Polania et al., 2022)
	Reducción en la tasa de fotosíntesis.	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	(Liang et al., 2020)
	Aumento en la eficiencia del uso del agua (WUE).	Uva (<i>Vitis vinifera</i>)	(Safari et al., 2022)
Bioquímico	Aumento en la producción de antioxidantes.	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	(Urmi et al., 2023)
	Síntesis de proteínas de choque térmico (HSPs).	Soya (<i>Glycine max</i>)	(Xu et al., 2022)
Genético	Regulación de genes en la tolerancia a la sequía.	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)	(Tian et al., 2024)

Nota. Elaboración propia

Mecanismos morfológicos

Cuando las plantas experimentan estrés hídrico, su primera respuesta se manifiesta en alteraciones tanto en su morfología externa como en su estructura interna (Avramova et al., 2015). El impacto más notable de la falta de agua es la desaceleración del crecimiento, que puede llegar a causar la muerte de la planta (He et al., 2021). Estudios han demostrado que, frente a condiciones abióticas adversas, las plantas pueden adaptarse a los cambios ambientales mediante la plasticidad fenotípica (Grzesiak et al., 2019). Un ejemplo de ello es la disminución significativa de la altura en arroz (Patmi & Pitoyo, 2020), maíz (Luqman et al., 2023) y caña (Misra et al., 2020), debido principalmente al aumento de la caída de las hojas, la disminución de la expansión celular y la alteración de la mitosis en condiciones de sequía (Yang et al., 2021). Por otra parte, el estudio reportado por Sarshad et al (2021) concluye que las adaptaciones morfológicas en las plantas están estrechamente relacionadas con la capacidad para sobrevivir en ambientes áridos. Esto indica que los mecanismos morfológicos cumplen un rol importante en la adaptación de las plantas a condiciones de sequía, ya que les permiten optimizar el uso y la conservación del agua (Li et al., 2022).

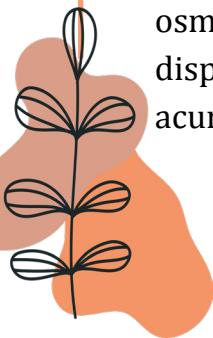


Otro de los mecanismos morfológicos de respuesta al estrés hídrico es el “escape de la sequía”, una estrategia en la que las plantas acortan su ciclo de vida o temporada de crecimiento para reproducirse antes de que el entorno se vuelva seco (Naikwade, 2023). Por ejemplo, investigaciones en especies de plantas del género *Cactaceae* han demostrado que la reducción del área foliar y el desarrollo de estructuras especializadas como espinas contribuyen significativamente a la minimización de la pérdida de agua por transpiración (Maceda et al., 2024). Por otra parte, especies como *Sorghum bicolor* mantienen un espesor de cutícula y la presencia de tricomas en la superficie de las hojas, lo que le permite una mayor resistencia a la sequía (Abreha et al., 2022; Sarshad et al., 2021). Para las plantas de cultivo, el escape de la sequía ocurre cuando el desarrollo fenológico de la planta se alinea con los períodos de disponibilidad de humedad, permitiendo que la planta evite los efectos negativos del estrés hídrico terminal (Chowdhury et al., 2021).

Mecanismos fisiológicos

Las plantas desarrollan respuestas fisiológicas que les permiten enfrentar el estrés hídrico al regular procesos clave para la supervivencia y el crecimiento. Uno de los mecanismos más estudiados es el cierre estomático, una respuesta que reduce la transpiración y minimiza la pérdida de agua en momentos críticos (Gupta et al., 2020; Oguz et al., 2022). Sin embargo, esta estrategia puede limitar la fotosíntesis, afectando el crecimiento y el rendimiento del cultivo (Liang et al., 2020). En cultivos como el frijol (*Phaseolus vulgaris*), se ha documentado que el cierre de estomas es una respuesta directa al déficit hídrico, lo que a su vez provoca una disminución en la conductancia estomática y en la tasa de fotosíntesis (Polania et al., 2022). Este mecanismo permite a las plantas conservar agua durante períodos de sequía, aunque a costa de una menor producción de biomasa.

Otro mecanismo fundamental es la mejora en la eficiencia del uso del agua (WUE), el cual permite a las plantas producir más biomasa con menos agua (Yan et al., 2023). En estudios realizados en uva (*Vitis vinifera*), se ha demostrado que el incremento en la WUE está relacionado con una mayor eficiencia en la fotosíntesis por unidad de agua utilizada (Zamorano et al., 2021). Esta adaptación es fundamental para asegurar la productividad bajo condiciones de sequía. Por otra parte, la regulación osmótica permite a las plantas mantener la turgencia celular en condiciones de baja disponibilidad de agua (Bhutto et al., 2023; Crabos et al., 2023). Este proceso implica la acumulación de solutos compatibles como prolina, azúcares solubles y glicina betaína,



que actúan como osmoprotectores (Bhandari et al., 2023; Bhardwaj et al., 2023; Cheraghi et al., 2024). Estas moléculas no solo mantienen el equilibrio osmótico, sino que también estabilizan proteínas y estructuras celulares, protegiendo a las plantas de daños adicionales causados por la sequía. En cultivos como el arroz (*Oryza sativa*), la acumulación de estos compuestos ayuda a las plantas a retener agua, protegiendo las estructuras celulares durante el estrés (Patmi & Pitoyo, 2020).

Mecanismos bioquímicos y genéticos

Las plantas, al enfrentar condiciones de estrés hídrico, activan una serie de mecanismos bioquímicos y moleculares que les permiten adaptarse y sobrevivir en ambientes áridos (Rakkammal et al., 2023). la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) bajo estrés hídrico desencadena respuestas antioxidantes, donde enzimas como la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasa (POD) desempeñan un papel fundamental al neutralizar el exceso de ROS y prevenir el daño oxidativo a las células (Bhandari et al., 2023; Oguz et al., 2022; Sarshad et al., 2021). En cultivos como el arroz se ha demostrado que el daño oxidativo de las plantas puede ser aliviado por la acumulación de osmolitos, esto gracias a un efecto combinado ocasionado por las aplicaciones de ácido salicílico y prolina (Urmi et al., 2023). Por otra parte, la síntesis de proteínas también permite que las plantas respondan de manera rápida y eficaz a los cambios ambientales, garantizando la supervivencia en condiciones extremas (Guo et al., 2023). Las proteínas de choque térmico (HSP) actúan como chaperonas moleculares, estabilizando y asistiendo en el correcto plegamiento de otras proteínas que pueden desnaturalizarse bajo condiciones de sequía (Rahman et al., 2022). Por ejemplo, se ha observado que en la soya (*Glycine max*), la síntesis de HSP se incrementa en condiciones de estrés hídrico (Xu et al., 2022).

A nivel genético, las plantas responden al estrés hídrico mediante la regulación de genes específicos que controlan procesos clave para la tolerancia a la sequía (Guizani et al., 2024; Naikwade et al., 2023). Entre estos se encuentran los genes que codifican para proteínas LEA (Late Embryogenesis Abundant), que protegen las membranas y las proteínas durante la deshidratación (Jia et al., 2022). En un estudio realizado por Magwanga et al (2018) identificaron un total de 242, 136 y 142 genes LEA en tres especies de algodón americano (*Gossypium hirsutum*, *Gossypium arboreum* y *Gossypium raimondii*, respectivamente). Estos genes mostraron una alta expresión en tejidos sometidos a condiciones de sequía, lo que sugiere su participación directa en la adaptación al estrés hídrico. Además, estas proteínas son capaces de prevenir la



agregación de proteínas desnaturalizadas y mantener la estabilidad celular durante episodios de deshidratación, lo que resalta su papel fundamental en la respuesta genética a la sequía.

Por otra parte, la señalización mediada por el ácido abscísico (ABA) juega un papel central en la respuesta al estrés hídrico (Fiallos-Salguero et al., 2023). El ABA induce el cierre estomático y regula la expresión de genes involucrados en la biosíntesis de osmoprotectores y antioxidantes, promoviendo la capacidad de las plantas para conservar agua y reducir el daño celular (Ilyas et al., 2021). Estudios recientes han identificado también el papel de factores de transcripción como los de las familias MYB, NAC y DREB, que regulan la expresión de genes asociados con la adaptación a la sequía (Khatun et al., 2021).

Finalmente, las plantas también recurren a mecanismos genéticos avanzados, como el uso de tecnologías biotecnológicas y de edición genética para mejorar su tolerancia al estrés hídrico (Li et al., 2022). La tecnología CRISPR/Cas9 ha permitido identificar y modificar genes que controlan la eficiencia del uso del agua y la resistencia a la sequía, lo que ofrece un gran potencial para desarrollar variedades de cultivos más resistentes (Yang et al., 2021). La selección asistida por marcadores y la genómica funcional también está facilitando la identificación de loci de caracteres cuantitativos (QTL) que contribuyen a la resistencia a la sequía en diferentes especies de cultivos, lo que abre nuevas vías para mejorar la productividad en ambientes con recursos hídricos limitados (Ilyas et al., 2021).

Silicio (Si) como regulador del estrés hídrico

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, aunque su disponibilidad para las plantas varía considerablemente (Kovács et al., 2022). A pesar de no ser considerado un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, su papel beneficioso en la mejora de la tolerancia al estrés, especialmente el estrés hídrico (Fig. 6), ha sido ampliamente documentado (Bhardwaj & Kapoor, 2021; Wang et al., 2021). El silicio (Si) se acumula en los tejidos de las plantas principalmente en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) y se deposita como sílice amorfa, formando fitolitos que ayudan a las plantas a soportar condiciones de estrés (Shivaraj et al., 2022; Sourì et al., 2021).

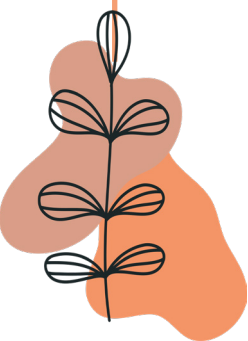
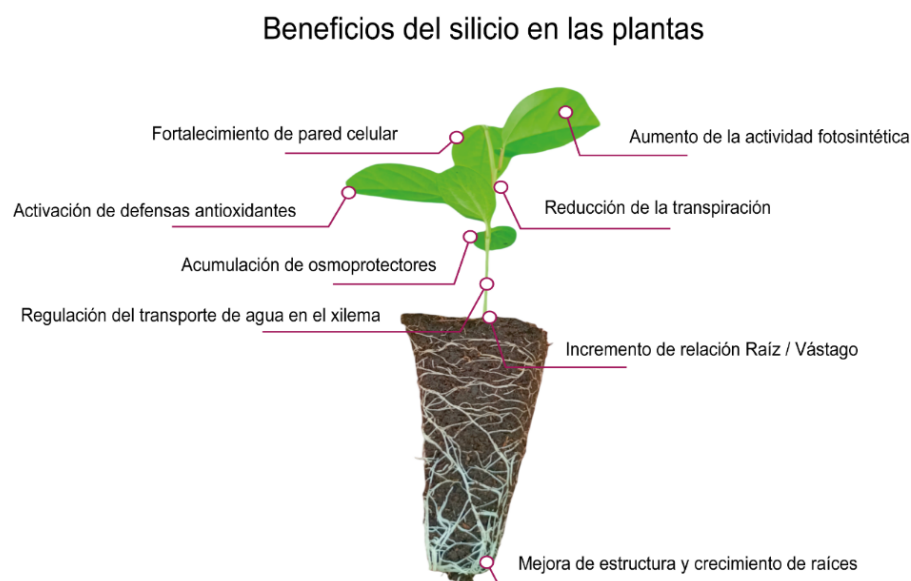


Figura 6.

Principales beneficios del silicio (Si) en las plantas bajo condiciones de estrés hídrico.



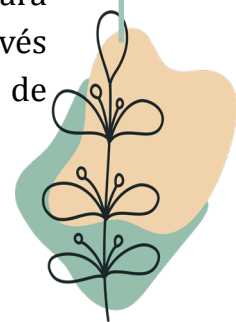
Nota. Elaboración propia

Mecanismos de absorción y transporte de silicio (Si)

Las plantas absorben silicio (Si) en forma de ácido monosilícico a través de transportadores específicos localizados en las membranas celulares de las raíces (Moraes et al., 2024). Los principales transportadores involucrados en este proceso son Lsi1 (transportador de entrada) y Lsi2 (transportador de salida), que facilitan el movimiento del silicio (Si) desde el suelo hacia el xilema y, posteriormente, hacia los tejidos aéreos (Rajora et al., 2023; Wang et al., 2024). El silicio (Si) se puede acumular en diversas estructuras celulares, como las paredes celulares y la cutícula, lo que mejora la resistencia física de las plantas y ayuda a regular la pérdida de agua (Bhardwaj et al., 2023).

Efectos del silicio bajo condiciones de sequía

El silicio actúa mitigando los efectos del estrés hídrico a través de múltiples mecanismos fisiológicos y bioquímicos. En primer lugar, mejora la capacidad de las plantas para retener agua al aumentar la eficiencia en la absorción y transporte de agua a través de las raíces, incrementando la relación raíz/vástago y modificando la anatomía de



las raíces (Bhardwaj et al., 2023; Wang et al., 2021). También regula la apertura y cierre de los estomas, reduciendo la transpiración y minimizando la pérdida de agua (Bukhari et al., 2021).

Además, el silicio (Si) favorece la acumulación de osmoprotectores como prolina y compuestos fenólicos, que ayudan a las células vegetales a mantener la homeostasis osmótica bajo estrés (Bhardwaj et al., 2023). A nivel bioquímico, el silicio activa sistemas antioxidantes en las plantas, como las enzimas catalasa, superóxido dismutasa y peroxidasa, lo que reduce la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y protege las células de los daños oxidativos inducidos por el estrés hídrico (Bukhari et al., 2021; Wang et al., 2021).

Impacto en la fotosíntesis y el crecimiento

El silicio (Si) también mejora la fotosíntesis al mantener la integridad de los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, bajo condiciones de sequía (Xu et al., 2022). La suplementación con silicio (Si) ayuda a las plantas a mantener mayores tasas de fotosíntesis y eficiencia en el uso del agua, lo que se traduce en un crecimiento sostenido incluso bajo condiciones de déficit hídrico (Khan et al., 2024). Esto resulta en una mejora general en la producción de biomasa y rendimiento de los cultivos (Ghouri et al., 2022; Malik et al., 2021).

Regulación genética y molecular

A nivel molecular, el silicio (Si) ha demostrado inducir la expresión de genes relacionados con la respuesta al estrés hídrico (López-Pérez et al., 2024). Estos genes están involucrados en procesos clave como la síntesis de osmoprotectores, la regulación del balance hídrico y la activación de señales hormonales como el ácido abscísico (ABA) y el ácido jasmónico (JA), cruciales en la adaptación de las plantas a la sequía (Malik et al., 2021). Además, el silicio (Si) interactúa con otras vías de señalización que mejora la resiliencia al estrés, contribuyendo a la estabilidad del metabolismo celular durante el déficit hídrico (Bhardwaj et al., 2023).

Conclusiones y futuras perspectivas

El silicio (Si) cumple un rol fundamental en la mitigación del estrés hídrico en las plantas de cultivo, ayudando a mejorar la regulación estomática, la protección antioxidante y la absorción de agua. Estos mecanismos permiten a las plantas mantener su eficiencia



fotosintética y crecimiento incluso en condiciones de sequía, lo que contribuye a mejorar el rendimiento agrícola. A pesar de estos avances, aún se requiere una mayor comprensión de los mecanismos moleculares específicos mediante los cuales el silicio (Si) regula respuestas al estrés hídrico, especialmente en plantas no acumuladoras de silicio (Si).

Las investigaciones se deben enfocar en la mejora de las estrategias de fertilización con silicio (Si), explorando su interacción con otros nutrientes y hormonas, y en el desarrollo de aplicaciones más sostenibles para la agricultura. El uso del silicio (Si) podría ser la clave para reducir el consumo de agua y fertilizantes químicos, lo que favorecería la sostenibilidad de la producción agrícola. Sin embargo, es necesario estudiar más a fondo los impactos a largo plazo del uso de silicio (Si) en los suelos y ecosistemas agrícolas para maximizar sus beneficios sin comprometer el equilibrio ecológico.

Contribución de autores

CCC y **NFV** conceptualizaron la idea, recolectaron la literatura y analizaron los datos. **CCC**, **YBR** y **NFV** participaron en la redacción. Además, **CCC**, **YDMO** y **NFV** revisaron y editaron la versión final. Todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito.

Agradecimientos

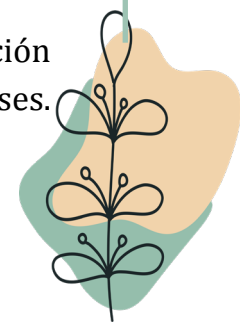
Los autores agradecen al Centro de Formación Agroindustrial La Angostura por permitir el desarrollo de la investigación en sus instalaciones.

Financiación

El presente estudio se deriva del proyecto de investigación “Implementación de silicio (SI) como estrategia de mitigación para disminuir la vulnerabilidad del cacao al cambio climático en el Huila” con ID SGPS-11161-2023 financiado por el Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del SENA (SENNOVA).

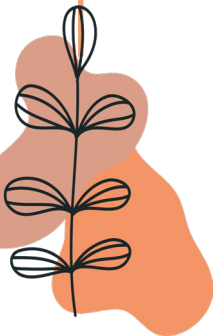
Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.



Declaración de uso de IA en el proceso de escritura

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron OpenAI (ChatGPT-4) para la corrección lingüística del manuscrito. Tras utilizar esta herramienta/servicio, los autores revisaron y editaron el manuscrito según fuera necesario y asumen la responsabilidad del contenido de la publicación.

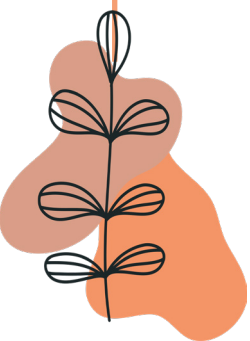


Referencias bibliográficas

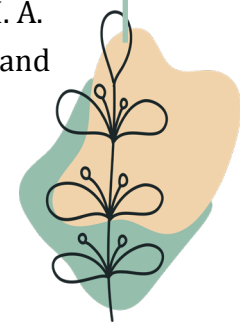
- Abreha, K. B., Enyew, M., Carlsson, A. S., Vetukuri, R. R., Feyissa, T., Motlhaodi, T.,... & Geleta, M. (2022). Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*, 255, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>
- Ahsan, M., Valipour, M., Nawaz, F., Raheel, M., Abbas, H. T., Sajid, M.,... & Zulfiqar, H. (2023). Evaluation of silicon supplementation for drought stress under water-deficit conditions: an application of sustainable agriculture. *Agronomy*, 13(2), 599. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020599>
- Alomari-Mheidat, M., Corell, M., Castro-Valdecantos, P., Andreu, L., Moriana, A., & Martín-Palomo, M. J. (2023). Effect of water stress and rehydration on the cluster and fruit quality of greenhouse tomatoes. *Agronomy*, 13(2), 563. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020563>
- Avramova, V., AbdElgawad, H., Zhang, Z., Fotschki, B., Casadevall, R., Vergauwen, L.,... & Beemster, G. T. (2015). Drought induces distinct growth response, protection, and recovery mechanisms in the maize leaf growth zone. *Plant physiology*, 169(2), 1382-1396. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00276>
- Ayyaz, A., Zhou, Y., Batool, I., Hannan, F., Huang, Q., Zhang, K.,... & Zhou, W. (2024). Calcium nanoparticles and abscisic acid improve drought tolerance, mineral nutrients uptake and inhibitor-mediated photosystem II performance in *Brassica napus*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(2), 516-537. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11108-7>
- Barão, L. (2023). The use of si-based fertilization to improve agricultural performance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 1096-1108. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01106-1>
- Bhandari, U., Gajurel, A., Khadka, B., Thapa, I., Chand, I., Bhatta, D.,... & Shrestha, J. (2023). Morpho-physiological and biochemical response of rice (*Oryza sativa* L.) to drought stress: A review. *Heliyon*, 9(3). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)00951-9](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)00951-9)
- Bhardwaj, S., & Kapoor, D. (2021). Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 1044-1053. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.005>



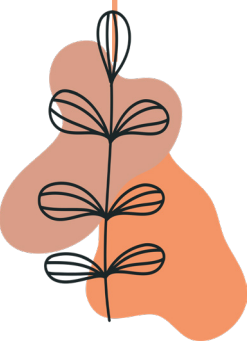
- Bhardwaj, S., Sharma, D., Singh, S., Ramamurthy, P. C., Verma, T., Pujari, M.,... & Prasad, R. (2023). Physiological and molecular insights into the role of silicon in improving plant performance under abiotic stresses. *Plant and Soil*, 486(1), 25-43. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05395-4>
- Bhutto, LA, Osborne, CP y Quick, WP (2023). Ajuste osmótico y cambios metabólicos en condiciones de estrés por sequía en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 55, 915-923.
- Biju, S., Fuentes, S., & Gupta, D. (2023). Novel insights into the mechanism (s) of silicon-induced drought stress tolerance in lentil plants revealed by RNA sequencing analysis. *BMC Plant Biology*, 23(1), 498. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04492-5>
- Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M.,... & Manan, A. (2021). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. *Silicon*, 13, 4757-4772. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4>
- Cheraghi, M., Motesarezadeh, B., Mousavi, S. M., Basirat, M., Alikhani, H. A., & Zarebanadkouki, M. (2024). Application of silicon improves rhizosheath formation, morpho-physiological and biochemical responses of wheat under drought stress. *Plant and Soil*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06584-z>
- Chowdhury, MK, Hasan, MA, Bahadur, MM, Islam, MR, Hakim, MA, Iqbal, MA,... & Islam, MS (2021). Evaluación de la tolerancia a la sequía de algunos genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) a través de la fenología, el crecimiento y los índices fisiológicos. *Agronomía*, 11 (9), 1792.
- Costa, M. G., de Mello Prado, R., Palaretti, L. F., & de Souza Júnior, J. P. (2024). The effect of abiotic stresses on plant C: N: P homeostasis and their mitigation by silicon. *The Crop Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>
- Crabos, A., Huang, Y., Boursat, T., Maurel, C., Ruffel, S., Krouk, G., y Boursiac, Y. (2023). Regulaciones transcripcionales tempranas diferenciadas por turgencia y potencial osmótico en las raíces de *Arabidopsis*. *Journal of Experimental Botany*, 74 (18), 5917-5930.
- Della Corte, V., Del Gaudio, G., Sepe, F., & Sciarelli, F. (2019). Sustainable tourism in the open innovation realm: A bibliometric analysis. *Sustainability*, 11(21), 6114. <https://doi.org/10.3390/su11216114>



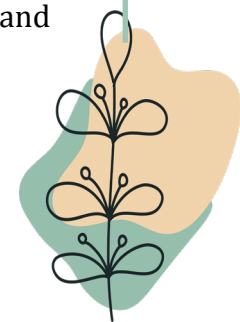
- Fiallos-Salguero, M. S., Li, J., Li, Y., Xu, J., Fang, P., Wang, Y.,... & Tao, A. (2023). Identification of AREB/ABF gene family Involved in the response of ABA under salt and drought stresses in Jute (*Corchorus olitorius* L.). *Plants*, 12(5), 1161. <https://doi.org/10.3390/plants12051161>
- Ghadirnezhad Shiade, S. R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E., & Pessarakli, M. (2023). Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—A review. *Journal of plant Nutrition*, 46(9), 2198-2230. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720>
- Ghourri, F., Ali, Z., Naeem, M., Ul-Allah, S., Babar, M., Baloch, F. S.,... & Shahid, M. Q. (2022). Effects of silicon and selenium in alleviation of drought stress in rice. *Silicon*, 14(10), 5453-5461. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01277-z>
- Gill, S., Ramzan, M., Naz, G., Ali, L., Danish, S., Ansari, MJ y Salmen, SH (2024). Efecto del biocarbón basado en nanopartículas de silicio en el crecimiento del trigo, los antioxidantes y la concentración de nutrientes bajo estrés salino. *Scientific Reports*, 14 (1), 6380. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55924-7>
- Giordano, M., Petropoulos, S. A., & Roupheal, Y. (2021). Response and defence mechanisms of vegetable crops against drought, heat and salinity stress. *Agriculture*, 11(5), 463. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050463>
- Grzesiak, M. T., Hordyńska, N., Maksymowicz, A., Grzesiak, S., & Szechyńska-Hebda, M. (2019). Variation among spring wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in response to the drought stress. II—Root system structure. *Plants*, 8(12), 584. <https://doi.org/10.3390/plants8120584>
- Guizani, A., Babay, E., Askri, H., Sialer, M. F., & Gharbi, F. (2024). Screening for drought tolerance and genetic diversity of wheat varieties using agronomic and molecular markers. *Molecular Biology Reports*, 51(1), 432.
- Guo, Y., Qu, Y., Fan, R., Sun, F., Chen, Q., Shi, J.,... & Yan, G. (2023). Regulating drought tolerance in cotton by the expression of a specific allele of heat shock protein 70. *Industrial Crops and Products*, 202, 116820. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116820>
- Gupta, A., Rico-Medina, A., & Caño-Delgado, A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368(6488), 266-269. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aaz7614>
- Hassan, K. M., Ajaj, R., Abdelhamid, A. N., Ebrahim, M., Hassan, I. F., Hassan, F. A.,... & Ali, M. A. (2024). Silicon: A Powerful Aid for Medicinal and Aromatic Plants against Abiotic and Biotic Stresses for Sustainable Agriculture. *Horticulturae*, 10(8), 806.



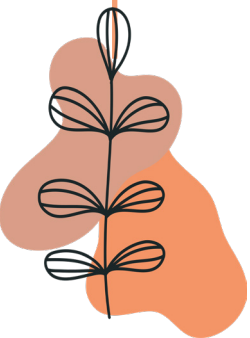
- He, X., Xu, L., Pan, C., Gong, C., Wang, Y., Liu, X., & Yu, Y. (2020). Drought resistance of *Camellia oleifera* under drought stress: Changes in physiology and growth characteristics. *PLoS One*, 15(7), e0235795. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>
- Herrera-Viedma, E., Martínez, M. A., & Herrera, M. (2016). Bibliometric tools for discovering information in database. In *Trends in Applied Knowledge-Based Systems and Data Science: 29th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, IEA/AIE 2016, Morioka, Japan, August 2-4, 2016, Proceedings 29* (pp. 193-203). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42007-3_17
- Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N., Hazrat, A., Khan, A. H., Hayat, K.,... & Ullah, A. (2021). Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 926-944. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10174-5>
- Jia, C., Guo, B., Wang, B., Li, X., Yang, T., Li, N.,... & Yu, Q. (2022). The LEA gene family in tomato and its wild relatives: genome-wide identification, structural characterization, expression profiling, and role of SILEA6 in drought stress. *BMC Plant Biology*, 22(1), 596. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03953-7>
- Johnson, S. N., Chen, Z. H., Rowe, R. C., & Tissue, D. T. (2022). Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1030620. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620>
- Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Khan, A., Brestic, M., Wang, H.,... & Xie, W. (2024). Silicon-induced modulation of photosynthetic pigments, osmolytes, and phytohormonal regulation boosted the drought tolerance in *Elymus sibiricus* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(4), 998-1011. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11155-0>
- Khatun, M., Sarkar, S., Era, F. M., Islam, A. M., Anwar, M. P., Fahad, S.,... & Islam, A. A. (2021). Drought stress in grain legumes: Effects, tolerance mechanisms and management. *Agronomy*, 11(12), 2374. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122374>
- Klunklin, W., & Savage, G. (2017). Effect on quality characteristics of tomatoes grown under well-watered and drought stress conditions. *Foods*, 6(8), 56. <https://doi.org/10.3390/foods6080056>
- Kovács, S., Kutasy, E., & Csajbók, J. (2022). The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. *Plants*, 11(9), 1223. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>



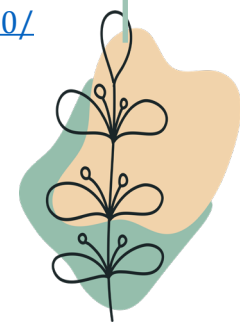
- Li, C., Han, H., Ablimiti, M., Liu, R., Zhang, H., & Fan, J. (2022). Morphological and physiological responses of desert plants to drought stress in a man-made landscape of the Taklimakan desert shelter belt. *Ecological Indicators*, 140, 109037. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109037>
- Liang, G., Liu, J., Zhang, J., & Guo, J. (2020). Effects of drought stress on photosynthetic and physiological parameters of tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 145(1), 12-17. <https://doi.org/10.21273/JASHS04725-19>
- Liu, Y., Wang, M., Yu, N., Zhao, W., Wang, P., Zhang, H.,... & Lu, H. (2024). Trends and insights in dengue virus research globally: a bibliometric analysis (1995–2023). *Journal of Translational Medicine*, 22(1), 818. <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05561-5>
- López-Pérez, M. C., Pérez-Labrada, F., González-García, Y., & Juárez-Maldonado, A. (2024). Silicon induced positive response at biochemical and gene expression level in tomato plants inoculated with *Fusarium oxysporum*. *Polibotánica*, (57), 213-236. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.57.13>
- Luqman, M., Shahbaz, M., Maqsood, M. F., Farhat, F., Zulfiqar, U., Siddiqui, M. H.,... & Haider, F. U. (2023). Effect of strigolactone on growth, photosynthetic efficiency, antioxidant activity, and osmolytes accumulation in different maize (*Zea mays* L.) hybrids grown under drought stress. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2262795. <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2262795>
- Maceda, A., Trejo, C., & Terrazas, T. (2024). Water flow in two Cactaceae species: standardization of the method and test under different drought conditions. *Brazilian Journal of Botany*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40415-024-01008-9>
- Magwanga, R. O., Lu, P., Kirungu, J. N., Lu, H., Wang, X., Cai, X.,... & Liu, F. (2018). Characterization of the late embryogenesis abundant (LEA) proteins family and their role in drought stress tolerance in upland cotton. *BMC genetics*, 19, 1-31. <https://doi.org/10.1186/s12863-017-0596-1>
- Malik, M. A., Wani, A. H., Mir, S. H., Rehman, I. U., 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. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.021>
- Mehta, S., Gogna, M., Singh, B., Patra, A., Singh, I. K., & Singh, A. (2020). Silicon: a plant nutritional “non-entity” for mitigating abiotic stresses. *Plant Stress Biology: Strategies and Trends*, 17-49. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9380-2_2



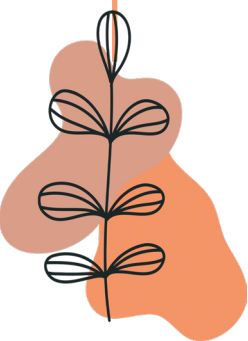
- Mir, R. A., Bhat, B. A., Yousuf, H., Islam, S. T., Raza, A., Rizvi, M. A.,... & Zargar, S. M. (2022). Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. *Frontiers in plant science*, 13, 819658. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>
- Misra, V., Solomon, S., Mall, A. K., Prajapati, C. P., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Ansari, M. I. (2020). Morphological assessment of water stressed sugarcane: A comparison of waterlogged and drought affected crop. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(5), 1228-1236. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.007>
- Moraes, S. P. D. O., Menezes, B. S. D., Araújo, F. S., Escobar, M. E. O., & Oliveira, T. S. D. (2024). Silicon absorption by plants in response to the environment. *Revista Ceres*, 71, e71026. <https://doi.org/10.1590/0034-737X2024710026>
- Naikwade, P. V. (2023). Plant responses to drought stress: Morphological, physiological, molecular approaches, and drought resistance. In *Plant Metabolites under Environmental Stress* (pp. 149-183). Apple Academic Press.
- Niether, W., Glawe, A., Pfohl, K., Adamtey, N., Schneider, M., Karlovsky, P. y Pawelzik, E. (2020). El efecto del estrés hídrico del suelo a corto y largo plazo en la respuesta fisiológica de tres cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Plant Growth Regulation*, 92, 295-306.
- Oguz, M. C., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., & Yildiz, M. (2022). Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia*, 2(4), 180-197. <https://doi.org/10.3390/physiologia2040015>
- Panja, S., Gupta, A. D., & Dey, N. (2024). Impact of Drought Stress on Grains Filling in Rice and its Management: A Review. *Agricultural Reviews*, 45(2). 10.18805/ag.R-2369
- Park, H. Y., Suh, C. H., Woo, S., Kim, P. H., & Kim, K. W. (2022). Quality reporting of systematic review and meta-analysis according to PRISMA 2020 guidelines: results from recently published papers in the Korean Journal of Radiology. *Korean journal of radiology*, 23(3), 355. 10.3348/kjr.2021.0808
- Patmi, Y. S., & Pitoyo, A. (2020). Effect of drought stress on morphological, anatomical, and physiological characteristics of Cempo Ireng cultivar mutant rice (*Oryza sativa* L.) strain 51 irradiated by gamma-ray. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1436, No. 1, p. 012015). IOP Publishing. 10.1088/1742-6596/1436/1/012015



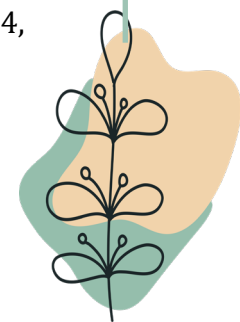
- Polania, J. A., Salazar-Chavarría, V., Gonzalez-Lemes, I., Acosta-Maspons, A., Chater, C. C., & Covarrubias, A. A. (2022). Contrasting Phaseolus crop water use patterns and stomatal dynamics in response to terminal drought. *Frontiers in Plant Science*, 13, 894657. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.894657>
- Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, 13(13), 1808. <https://doi.org/10.3390/plants13131808>
- Rahman, M. A., Woo, J. H., Song, Y., Lee, S. H., Hasan, M. M., Azad, M. A. K., & Lee, K. W. (2022). Heat shock proteins and antioxidant genes involved in heat combined with drought stress responses in perennial rye grass. *Life*, 12(9), 1426. <https://doi.org/10.3390/life12091426>
- Rajanna, G. A., Suman, A., & Venkatesh, P. (2023). Mitigating Drought Stress Effects in Arid and Semi-Arid Agro-Ecosystems through Bioirrigation Strategies—A Review. *Sustainability*, 15(4), 3542. <https://doi.org/10.3390/su15043542>
- Rajora, N., Thakral, V., Geetika, Vats, S., Padalkar, G., Sudhakaran, S.,... & Deshmukh, R. (2023). Understanding aquaporins regulation and silicon uptake in carrot (*Daucus carota*). *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 32(1), 51-62. <https://doi.org/10.1007/s13562-022-00780-7>
- Rakkammal, K., Maharajan, T., Shriram, R. N., Ram, P. J., Ceasar, S. A., & Ramesh, M. (2023). Physiological, biochemical and molecular responses of finger millet (*Eleusine coracana*) genotypes exposed to short-term drought stress induced by PEG-6000. *South African Journal of Botany*, 155, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.053>
- Saeed, A., Ahmed, H. G. M. D., Zeng, Y., Fatima, N., Hussain, G. S., Akram, M. I.,... & Mushtaq, M. A. (2024). Genetic evaluation and breeding strategies under water deficit environment to develop the drought tolerant wheat germplasm. *Polish J Environ Stud*, 33, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/188056>
- Saha, G., Mostofa, M. G., Rahman, M. M., & Tran, L. S. P. (2021). Silicon-mediated heat tolerance in higher plants: A mechanistic outlook. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.051>
- Salgotra, R. K., & Chauhan, B. S. (2023). Ecophysiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to drought and high temperature. *Agronomy*, 13(7), 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071877>



- Salleh, S. Z. (2022). Bibliometric and content analysis on publications in digitization technology implementation in cultural heritage for recent five years (2016–2021). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 25, e00225. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00225>
- Salleh, S. Z. (2022). Bibliometric and content analysis on publications in digitization technology implementation in cultural heritage for recent five years (2016–2021). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 25, e00225.
- Sarshad, A., Talei, D., Torabi, M., Rafiei, F., & Nejatkah, P. (2021). Morphological and biochemical responses of *Sorghum bicolor* (L.) Moench under drought stress. *SN Applied Sciences*, 3(1), 81. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03977-4>
- Sato, H., Mizoi, J., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2024). Complex plant responses to drought and heat stress under climate change. *The Plant Journal*, 117(6), 1873-1892.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y.,... & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shah, B., Yadav, S. P. S., Shrestha, M., Khadka, A., Dahal, K., Neupane, B., & Bhandari, S. (2024). Drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.): Impact, performance and recent trends. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 38(1), 169-181. <https://dergipark.org.tr/en/pub/selcukjafsci/issue/84294/1318632>
- Shivaraj, S. M., Mandlik, R., Bhat, J. A., Raturi, G., Elbaum, R., Alexander, L.,... & Sonah, H. (2022). Outstanding questions on the beneficial role of silicon in crop plants. *Plant and Cell Physiology*, 63(1), 4-18. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab145>
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., & Ahmad, P. (2021). Silicon and plants: current knowledge and future prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 906-925. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>
- Stadnik, B., Tobiasz-Salach, R., & Mazurek, M. (2022). Effect of Silicon on Oat Salinity Tolerance: analysis of the epigenetic and physiological response of plants. *Agriculture*, 13(1), 81. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010081>
- 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>



- Teimoori, N., Ghobadi, M., & Kahrizi, D. (2023). Improving the growth characteristics and grain production of *Camelina* (*Camelina sativa* L.) under salinity stress by silicon foliar application. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 3(1), 1-13. https://atic.razi.ac.ir/article_2620.html
- Thakral, V., Sudhakaran, S., Jadhav, H., Mahakalkar, B., Sehra, A., Dhar, H.,... & Deshmukh, R. (2024). Unveiling silicon-mediated cadmium tolerance mechanisms in mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek): Integrative insights from gene expression, antioxidant responses, and metabolomics. *Journal of Hazardous Materials*, 474, 134671. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134671>
- Tian, Z., Li, K., Sun, Y., Chen, B., Pan, Z., Wang, Z.,... & Du, X. (2024). Physiological and transcriptional analyses reveal formation of memory under recurring drought stresses in seedlings of cotton (*Gossypium hirsutum*). *Plant Science*, 338, 111920. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111920>
- Urmi, T. A., Islam, M. M., Zumur, K. N., Abedin, M. A., Haque, M. M., Siddiqui, M. H.,... & Hoque, M. A. (2023). Combined effect of salicylic acid and proline mitigates drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) through the modulation of physiological attributes and antioxidant enzymes. *Antioxidants*, 12(7), 1438. <https://doi.org/10.3390/antiox12071438>
- Wang, H., Teng, L., Mao, X., He, T., & Fu, T. (2024). Comparing the Effects of Lime Soil and Yellow Soil on Cadmium Accumulation in Rice during Grain-Filling and Maturation Periods. *Plants*, 13(15), 2018. <https://doi.org/10.3390/plants13152018>
- Wang, M., Wang, R., Mur, L. A. J., Ruan, J., Shen, Q., & Guo, S. (2021). Functions of silicon in plant drought stress responses. *Horticulture Research*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1>
- Xu, J., Guo, L., & Liu, L. (2022). Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, 201, 104974. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104974>
- Xu, K., Zhao, Y., Zhao, Y., Feng, C., Zhang, Y., Wang, F.,... & Li, H. (2022). Soybean F-box-like protein GmFBL144 interacts with small heat shock protein and negatively regulates plant drought stress tolerance. *Frontiers in plant science*, 13, 823529. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.823529>
- Yan, S., Weng, B., Jing, L., & Bi, W. (2023). Effects of drought stress on water content and biomass distribution in summer maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14, 1118131.



- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
- Yang, X., Wang, B., Chen, L., Li, P., & Cao, C. (2019). The different influences of drought stress at the flowering stage on rice physiological traits, grain yield, and quality. *Scientific reports*, 9(1), 3742. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40161-0>
- Zamorano, D., Franck, N., Pastenes, C., Wallberg, B., Garrido, M., & Silva, H. (2021). Improved physiological performance in grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. Cabernet Sauvignon facing recurrent drought stress. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 27(3), 258-268. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12482>

