



PARAMETROS AGROPRODUCTIVOS Y VALOR NUTRICIONAL EN PLANTAS DE CACAHUATE EN RESPUESTA A LA BIOESTIMULACIÓN CON SILICIO †

[AGROPRODUCTIVE PARAMETERS AND NUTRITIONAL VALUE IN PEANUT PLANTS IN RESPONSE TO SILICON BIOSTIMULATION]

Luis Tarquino Llerena-Ramos¹, Juan José Reyes-Pérez¹,
Erika Vanessa Castro Klinger², Juan Antonio Torres-Rodríguez¹,
Sergio Rodríguez-Rodríguez³ and María A. Sariñana-Navarrete^{4*}

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Av. Quito. km 1.5 vía a Santo Domingo. Quevedo. 120501 Los Ríos, Ecuador. llerenamos@uteq.edu.ec;

jreyes@utrq.edu.ec; jatorres@uteq.edu.ec

²Universidad Técnica “Luis Vargas Torres” de Esmeraldas. Extensión San Mateo – Mutile. Nuevos Horizontes. Esmeralda, Ecuador. erika.castro.klinger@utelvt.edu.ec

³Universidad de Granma. Carretera Bayamo-Manzanillo km 17. 85149 Bayamo, Granma, Cuba. sfrodriquez1964@gmail.com

⁴Universidad Tecnológica de Rodeo, Academia de Agricultura Sustentable y Protegida. Carretera Federal Panamericana km 159.4. 35760, Rodeo, Durango, México. est_primo23@hotmail.com

SUMMARY

Background. Peanuts (*Arachis hypogaea* L.) are a legume recognized for their high value in macro and micronutrients, whose combination makes it a functional food in various diets. In addition, the use of silicon as a biostimulant, and its relationship with the symbiosis established in legumes, make it a beneficial element of interest in peanut cultivation. **Objective.** To evaluate the edaphic application of silicon (Si) on morphological changes, yield, proximal seed composition, as well as the profitability index of peanut crops. Si was used at a dose of 28, 35 and 42 kg/ha, and a control group (without Yes). The change in crop growth, yield and its components, pod quality, proximal composition, and B/C ratio of Si use were evaluated. **Results.** The results propose a positive Si footprint in the crop, by significantly increasing the height of the plants (9.75%), an improvement in the quality of the pods, an increase in yield (11%), a significant change in the proximal composition (more protein, lipids and ash, and lower moisture index), and an increase in profitability (16.47% higher than the ordinary index). Additionally, an advance in the number of days needed for flowering to occur was noted. **Implications.** This could be due to the interaction of Si with the symbiosis that occurs between legumes and nitrogen-fixing bacteria, in addition to the biostimulant response of plants to Si. **Conclusions.** The Si promoted growth, productivity, and also generated a positive economic footprint in peanut cultivation.

Keywords: *Arachis hypogaea* L; biostimulants; proximal composition; earliness; proteins; yield.

RESUMEN

Antecedentes. El cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) es una leguminosa reconocida por su alto valor en macro y micronutrientes, cuya combinación lo convierten en un alimento funcional en diversas dietas. Además, el uso de silicio como bioestimulante, y la relación de este con la simbiosis que se establecen en las leguminosas, le convierten en un elemento benéfico de interés en el cultivo de cacahuete. **Objetivo.** Evaluar la aplicación edáfica de silicio (Si) sobre los cambios morfológicos, el rendimiento, la composición proximal de la semilla, así como el índice de rentabilidad del cultivo de cacahuete. **Metodología.** Se empleó Si a una dosis de 28, 35 y 42 kg/ha, y un grupo control (sin Si). Se evaluó el cambio en el crecimiento del cultivo, el rendimiento y sus componentes, calidad de la vaina, la composición proximal y la relación B/C del uso de Si. **Resultados.** Los resultados proponen una huella positiva del Si en el cultivo, al incrementar significativamente la altura de las plantas (9.75%), una mejora en la calidad de las vainas, un incremento del rendimiento (11%), un cambio significativo en la composición proximal (más proteína, lípidos y ceniza, y menor

† Submitted March 10, 2025 – Accepted April 27, 2025. <https://doi.org/10.56369/tsaes.6232>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = L.T. Llerena-Ramos: <https://orcid.org/0000-0001-8927-7417>; J.J. Reyes-Pérez: <https://orcid.org/0000-0001-5372-2523>; E.V. Castro Klinger: <https://orcid.org/0000-0001-9922-5936>; J.A. Torres-Rodríguez: <https://orcid.org/0000-0001-8927-7417>; S. Rodríguez-Rodríguez: <https://orcid.org/0000-0003-2923-5092>; M.A. Sariñana-Navarrete: <https://orcid.org/0000-0002-0936-1692>

índice de humedad), y un aumento en la rentabilidad (16.47% mayor al índice ordinario). Adicionalmente, se notó un adelanto en el número de días necesarios para que ocurra la floración. **Implicaciones.** Lo anterior podría deberse a la interacción del Si con la simbiosis que ocurre entre las leguminosas y las bacterias fijadoras de nitrógeno, además de la respuesta bioestimulante de las plantas al Si. **Conclusiones.** El Si promovió el crecimiento, productividad, y además, generó una huella económica positiva en el cultivo de cacahuate.

Palabras clave: *Arachis hypogaea* L.; bioestimulantes; composición proximal; precocidad; proteínas; rendimiento.

INTRODUCCIÓN

Los bioestimulantes de plantas se han utilizado y comercializado en la agricultura, que, con el avance tecnológico, el desarrollo de bioestimulantes es cada vez mayor, haciendo énfasis en aquellos productos que promueven el crecimiento de las plantas (Jiang *et al.*, 2024). Los bioestimulantes clasificados como “sustancia inorgánica, compuestos orgánicos e inoculante microbiano”, como el Silicio (Si), también se ha mostrado como un elemento benéfico, al inducir respuestas positivas en el crecimiento de las plantas, y al brindar protección ante condiciones de estrés biótico y abiótico (Luyckx *et al.*, 2017). En la agricultura, el Si puede utilizarse a través de 1) enmiendas al suelo con Si utilizando no más de 500 kg/ha; 2) fertilizantes de Si principalmente como dióxido de silicio (SiO₂), silicato de sodio (Na₂SiO₃), o silicato de potasio (K₂SiO₃), aplicados en un rango de 50-500 kg/ha; y 3) bioestimulantes de Si diseñados para aplicarse al follaje en dosis menores a 10 kg/ha (Grankina *et al.*, 2023). El Si puede ser absorbido en forma de SiO₂, a través de acuaporinas codificadas por el gen *Lsi1*, que garantiza la absorción del Si de la solución del suelo; y por transportadores codificados por el gen *Lsi2*, los cuales se ubican en la membrana plasmática, garantizando el movimiento interno del Si; sin embargo, es mayormente biodisponible en su forma de ácido ortosilícico (Si(OH)₄) (Mandlik *et al.*, 2020; Pavlovic *et al.*, 2021; El Moukhtari *et al.*, 2022).

En el caso particular de las Fabáceas, evidencias proponen que el Si mejora la simbiosis rizobio-leguminosas, al incrementar la cantidad de nódulos formados en las raíces, incrementar la actividad de enzimas nitrogenasas, y mejorar la actividad de rizobios de “baja eficiencia”, es decir, aquellos cuya tasa de fijación es baja (Putra *et al.*, 2022; Hosseini-Nasr *et al.*, 2023). Al respecto, los hallazgos de Shamsheeripour *et al.*, (2022) evidencian un incremento significativo en la biomasa seca, longitud de la raíz, absorción de nitrógeno, y un incremento en la nodulación en cuatro cultivares de *Glicine max* L. al ser cultivadas en condiciones de suelo con fertilización edáfica enriquecida con Si. Por su parte Hosseini-Nasr *et al.* (2023) encontraron que el uso de K₂SiO₃ en alfalfa en condiciones ordinarias y bajo estrés salino, se mejoraron las características morfológicas y fisiológicas de las plantas, así como una mejora en el índice de crecimiento, y la eficiencia en cepas no rizobianas. La evidencia de la relación Si-

microorganismo-planta es cada vez más fuerte, tal como lo demuestra Coquerel *et al.* (2023), al señalar un incremento en el crecimiento de plantas de *Trifolium incarnatum*, así como abundancia de enzimas nitrogenasas, y una alta fijación de N₂ como respuesta a la suplementación con 1.7 mM de Si.

El cacahuate (*Arachis hypogaea* L.) perteneciente a la familia de las Fabáceas, se considera una de las oleaginosas mayormente cultivadas en el mundo, ocurriendo una mayor producción en Norte América, Sur América, África y Asia (Tillman and Stalker 2009; Zhang *et al.*, 2020), con orígenes en Sur América (Li *et al.*, 2022). El año 2018, el consumo de cacahuate oscilo entre las 42.6 millones de toneladas métricas a nivel mundial, 10 veces más que los frutos secos (Parilli-Moser *et al.*, 2022). El enriquecido contenido de macronutrientes como proteínas, lípidos y carbohidratos; y de micronutrientes como vitaminas, minerales, y otros fitonutrientes (Toomer, 2017), catalogan al maní como una fuente excepcional de componentes nutritivos y fitoquímicos con efecto positivo en la salud humana (Parilli-Moser *et al.*, 2022). Además, dentro del contexto agronómico, los nódulos radicales formados por los rizobios proporcionan 40 millones de toneladas de nitrógeno en todo el mundo cada año, fijado por simbiosis, jugando un importante papel en la sostenibilidad agrícola (Shao *et al.*, 2020). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta de plantas de *A. hypogaea* a la fertilización edáfica con Si, mediante la medición de rasgos de crecimiento de las plantas, el rendimiento del cultivo, y la valoración de las características bromatológicas de la semilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en el campo experimental “La María”, en la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (01° 06’ 24” Sur, 79° 29’ 70” Oeste, 75 MSNM). Las condiciones climáticas de la región se caracterizan por presentar una temperatura media anual de 24.9 °C, humedad relativa media anual 84%, precipitación media anual 2295.1 mm, entrando en la categoría de Tropical Húmedo, y una zona ecológica BH-T (INAMHI, 2024).

Material vegetal y diseño del experimento

Se utilizó semilla de cacahuete INIAP 382. Para la siembra se prepararon surcos a una distancia de 0.50 m en una superficie total de 260 m², fue necesario el empleo de arado a 0.30 m de profundidad, y rastra doble. La siembra fue manual, considerando una densidad de plantación de 100000 plantas por hectárea. Las condiciones de fertilidad del suelo del sitio experimental fueron: pH, 5.6; NH₄, 5 ppm; P, 6 ppm; K, 132.39 ppm; Ca, 2003 ppm; Mg, 230.85 ppm; S, 3 ppm; Zn, 8.2 ppm; Cu, 5.4 ppm; Fe, 151 ppm; Mn, 7.9 ppm; B, 0.25; MO, 2.4%; clase textural, Franco. Se empleó SiO₂ comercial (SIO-DEM+, 85% p/p, DEMARAGRO), a una dosis de 28, 35 y 42 kg/ha (Dong et al., 2018). Cada tratamiento se conformó de tres repeticiones de cinco plantas, teniendo un total de 15 plantas por tratamiento, en un arreglo experimental completamente al azar. La aplicación de los tratamientos se realizó durante la fase de crecimiento, desarrollo vegetativo y durante el inicio de la fase reproductiva, a los 15, 25 y 35 días después de la siembra (dds) respectivamente. Para el tratamiento control (sin Si) se utilizó agua desionizada sin adición de algún otro mineral.

Manejo agronómico del cultivo

Durante la etapa experimental se utilizó fertilizante 10-30-10 (Agro Tropico; 50 kg/ha) aplicado a los 8 días después de la emergencia, así como actividades fitosanitarias de manejo y control de plagas y malezas. Para el control de malezas se utilizó Pendimethalin (Gramilaq 400) a 2.0 L/ha preemergencia, y Clethodim (Centurion, UPL OpenAgTM) a 1.0 L/ha a los 18 dds. El control de *Ceratomyxa fascialis* se llevó a cabo utilizando Clorpirifó (Lorsban 75WG) a 0.8 L/ha a los 40 dds.

Valoración de índices morfológicos

Para evaluar los cambios morfológicos de las plantas se consideró la evaluación de la altura de la planta, y los días transcurridos para que ocurra la floración. La altura de la planta se evaluó a los 30 (AP-30), 50 (AP-50) y 70 (AP-70) dds, utilizando un flexómetro (FCN-55M, Truper ®). Los resultados se reportaron en cm. Para la ocurrencia de la floración, se registraron los días transcurridos desde la fecha de siembra, hasta cuando el 50% + 1 de las plantas de cada tratamiento hubo florecido. Para estimar la altura de la planta se consideraron 9 plantas por tratamiento, y para la ocurrencia de la floración el total de plantas de cada tratamiento.

Calidad de la vaina y rendimiento

Se consideraron 9 plantas por tratamiento para la valoración de la calidad de las vainas y el rendimiento.

Para estimar la longitud de la vaina, se tomaron 10 vainas por planta y utilizando un calibrador digital (500-192-30 Mutitoyo Co.) se tomó la lectura de la longitud polar. Los resultados se reportaron en cm. Estas mismas vainas se consideraron para cuantificar el número de semillas por vaina. La evaluación del rendimiento se llevó a cabo considerando las vainas totales por planta, el peso de 100 semillas por planta, y el rendimiento por planta. Los resultados se reportaron en g, y g/planta respectivamente. Adicionalmente, se calculó el rendimiento por unidad de superficie, para ello, se consideró la densidad de plantación y el rendimiento por planta. Los resultados se expresaron en kg/ha.

Composición proximal de la semilla

Proteína

La estimación de proteína se realizó mediante la cuantificación de nitrógeno total por el método Kjeldahl, empleando el factor de corrección 6.25. Los resultados se expresaron en porcentaje (%). Rápidamente, 5 g de muestra se añadieron a un matraz que contenía H₂SO₄ concentrado en presencia de un catalizador. La mezcla se calentó hasta la total digestión de la muestra, se dejó enfriar, se filtró y se llevó a un volumen final de 50 mL. Se añadió H₃BO₃ al 2%. A 5 mL de la mezcla se le añadió NaOH al 40% y se llevó a destilación. Finalmente, el resultado de la destilación se tituló con HCl al 0.01 M (Sanni *et al.*, 2024)

Lípidos

El cálculo del contenido de lípidos totales se llevó a cabo por el método Soxhlet (Sanni *et al.*, 2024), empleando éter de petróleo como solución extractante. Los resultados se expresaron en porcentaje (%).

Humedad

El contenido de humedad se valoró mediante el método basado en la pérdida de peso. Para ello, en un recipiente limpio (P1) se colocaron las 100 semillas utilizadas en la variable descrita en el apartado 2.5 (P2), y se metieron a un horno de secado a 105 °C hasta peso constante (P3). El contenido de humedad se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad} = \frac{P2 - P3}{P2 - P1} * 100$$

Los resultados se expresaron en porcentaje (%).

Cenizas

La estimación del contenido de ceniza se realizó mediante el método de calcinación en mufla.

Rápidamente, en un crisol de porcelana limpio y seco (C1) se depositó una muestra de cacahuete y se registró el peso (C2). Posteriormente, el crisol con la muestra se introdujo a un horno de mufla a una temperatura entre 500-600 °C hasta que se eliminó la materia orgánica, aproximadamente 4 h. El contenido de ceniza se calculó empleando la siguiente fórmula:

$$\text{Ceniza} = \frac{C2 - C3}{C3 - C1} * 100$$

Los resultados se expresaron en porcentaje (%)

Análisis económico

La estimación de la relación beneficio/costo se estimó considerando el costo total de la producción de cada uno de los tratamientos, y los ingresos generados por la comercialización de las vainas; y determina cuanto se obtiene por cada valor monetario invertido (Arévalo-Briones *et al.*, 2016). Para el cálculo de la relación B/C se utilizó la siguiente fórmula:

$$B/C = \frac{\text{I. B.}}{\text{C. T. P}}$$

Donde:

B/C: relación beneficio-costo

I.B.: ingreso bruto

C.T.P.: costo total de producción

Análisis estadístico

Para valorar la influencia del Si en las diferentes dosis evaluadas, los datos recolectados en las evaluaciones realizadas se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), y un análisis de comparación de medias por el método Tukey con una significancia de 0.05%. Previo al ANOVA, se realizó una prueba de distribución Shapiro-Wilk para verificar la distribución normal de los datos colectados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Valoración de índices morfológicos

El uso de Si modificó significativamente la altura de las plantas de cacahuete. Los cambios observados se logran percibir en la primer medición de la altura a los 30 dds, realizada 15 días después de la primer aplicación de los tratamientos de Si. Al emplear 0.28 g de Si por planta se notó un incremento del 9.75% en la altura a los 30 dds, el cual sube en 14.40% y llega a un incremento final de 18.95% en la última medición a los 70 dds, esto con respecto a plantas que no recibieron Si. Esta tendencia de crecimiento favorable también se documentó en los tratamientos con 35 y 42 kg/ha, con incrementos de entre el 24 y 35% (Figura 1).

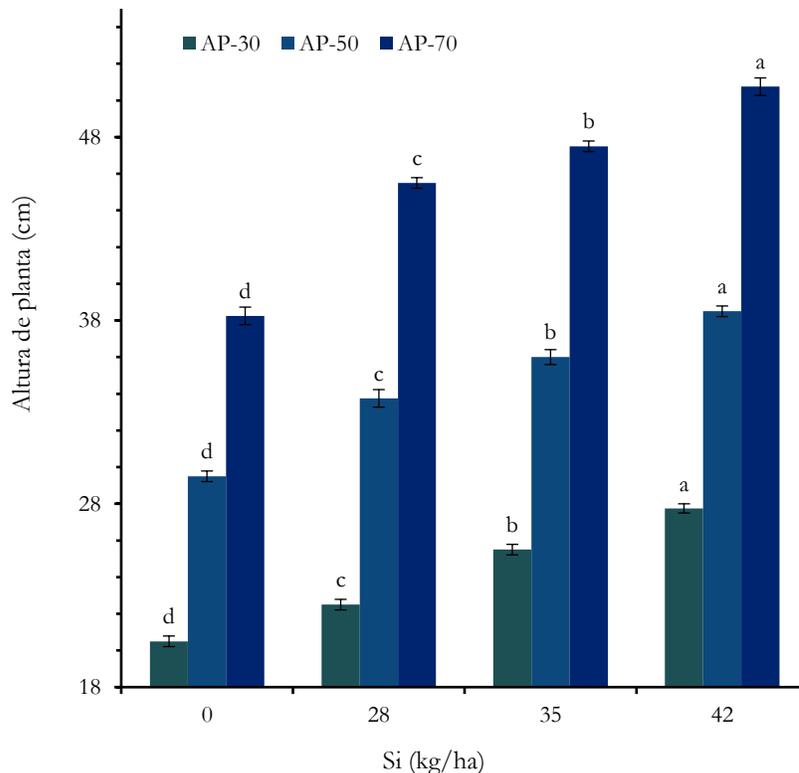


Figura 1. Altura de plantas de *A. hypogaea* con suplementación de Si en diferentes periodos de tiempo. Diferentes letras entre columnas indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey $p \leq 0.05$). $n=9 \pm$ error estándar.

La respuesta de las plantas de cacahuate al Si también se reflejó al reducir el periodo de días necesarios para que ocurra la floración. El uso de 42 kg/ha favoreció positivamente la precocidad de estas al reducir en 13.29% el periodo para generar flor, pues se tuvieron plantas que florecieron 5.75 días antes, comparado con aquellas que no recibieron Si; es decir, se presentó más del 50% de la floración a los 37.5 dds, comparado con la floración de las plantas del tratamiento control, cuya floración mayoritaria se presentó a los 43.25 dds. Con el resto de los tratamientos se observó una reducción del periodo de 2 y 4 días (Figura 2).

Aunque el Si no tiene un papel directo en el metabolismo de las plantas, la absorción y transporte de Si ha sido caracterizado en monocotiledóneas, sin embargo, este mismo mecanismo es limitado de información en las dicotiledóneas (Souri *et al.*, 2021). En este estudio el Si generó efectos positivos en el crecimiento físico como lo es la altura, y en la disminución de los días necesarios para la floración, en el cultivo de cacahuate. Esta evidencia sugiere la presencia de los transportadores de Si presentes, en general, en el sistema vascular de las plantas de cacahuate, permitiendo absorberlo, transportarlo, y metabolizarlo en las células, depositándolo principalmente en la epidermis (Sharma *et al.*, 2023).

Los resultados de la presente investigación pudieron deberse al incremento en la intercepción de radiación

fotosintéticamente activa (PAR), dado que se ha evidenciado la deposición de Si en la epidermis (Ma and Yamaji 2008; Souri *et al.*, 2021), favoreciendo y manteniendo la rigidez de los tejidos, en este caso, los folíolos de la planta de cacahuate, logrando incrementar el área de intercepción de la luz y por consecuente mayor actividad fotosintética. De forma similar, Bakhat *et al.* (2023) reportan un incremento en la altura de plantas de berenjena, así como otros atributos de crecimiento, como respuesta a la aplicación de Si, y en contraste, señalan un efecto negativo del Si en las plantas al ser aplicado en el suelo, lo cual, este último caso difiere con los resultados encontrados en este estudio. Otros atributos de crecimiento también se han visto favorecidos por el uso de Si. Así lo reporta Dong *et al.* (2018), cuyos resultados al probar Si en cacahuate, se obtuvo una mejora en la producción de biomasa. Las investigaciones previas a las de este estudio, y los resultados generados en esta investigación, respaldan las aseveraciones que se realizan acerca de la importancia del Si en el metabolismo de las plantas, sumado al efecto bioestimulante.

En el caso de la floración, Jalilzadeh Khoie *et al.* (2024) reportan una reducción en el periodo de días necesarios para la formación de la yema floral hasta la apertura en la especie ornamental *Rosa hybrida* por el uso de silicato de potasio, resultados que coinciden con los reportados en esta investigación.

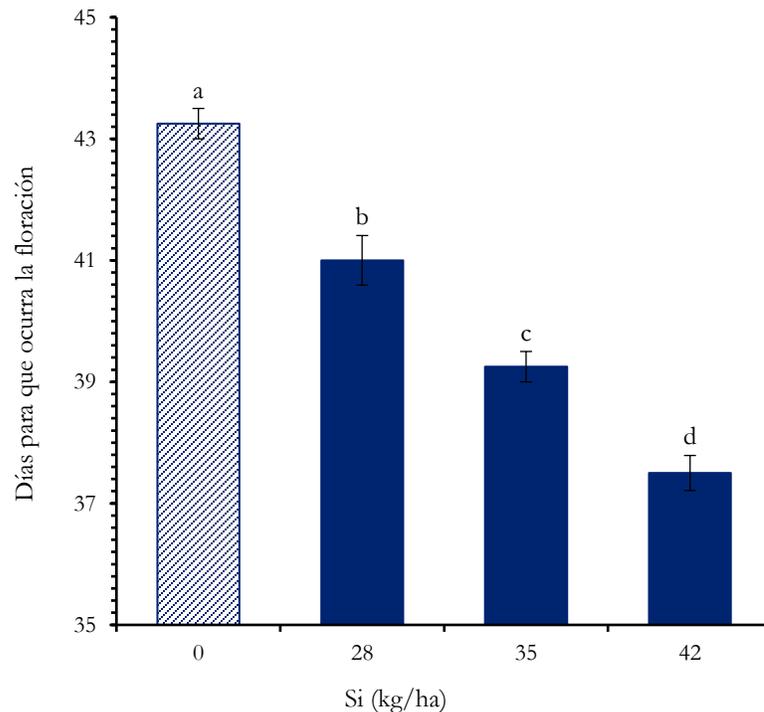


Figura 2. Proyección del periodo de días necesarios para que ocurra la floración en plantas de cacahuate con aplicación de Si. Diferentes letras entre columnas indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey $p \leq 0.05$).

Calidad de las vainas y rendimiento

Las plantas de cacahuete desarrolladas en bajo un sistema convencional (sin Si) generaron semillas de aproximadamente 0.37 g c/u, con un promedio de 2.95 granos por cada vaina. Las vainas generadas fueron de 3.21 cm de longitud, y en total cada planta generó un promedio de 20 vainas. Con la adición de Si, se notó un cambio en las variables antes mencionadas, cuantificando semillas de 9-17% de mayor peso; un incremento en los granos de las vainas de 20-37%; y un notorio cambio en las dimensiones de las vainas, al incrementar hasta 0.96 cm utilizando 42 kg/ha de Si (Tabla 1).

Los cambios observados en la calidad de la vaina y la semilla se vieron reflejados en el aumento en el rendimiento por unidad de superficie. El rendimiento incrementó 11.70% al utilizar 28 kg/ha de Si como complemento a la fertilización, lo que representó un aumento de 270 kg/ha, que plantas cultivadas sin Si. El incremento más notorio se cuantificó en las plantas que recibieron 42 kg/ha de Si, al incrementar 25.53% el rendimiento por unidad de superficie, logrando 600 kg/ha más que las plantas sin Si (Tabla 1).

La fertilización con Si ha generado una huella positiva en los cultivos, generalmente aplicado a cereales como trigo, arroz, y maíz, suplementado como silicato de potasio (K_2SiO_3), sal de silicato de sodio ($Na_2Si_3O_7$), o en complemento con otros elementos benéficos como en selenio (Se) (Rea *et al.*, 2022), en los que se señala, es absorbido por medios activos, y pasivos. Sin embargo, en las dicotiledóneas, se muestra la absorción de Si por medios pasivos vía los transportadores de eflujo *Lsi1* y *Lsi2*, el cual una vez metabolizado, mejora el crecimiento y desarrollo, incrementa la tolerancia a estrés abiótico, altera la expresión genética, mejora la fijación y asimilación de carbono (Irfan *et al.*, 2023). En este estudio la aplicación de Si favoreció los atributos de calidad de la vaina de cacahuete, y el rendimiento y sus componentes, lo cual podría suponer un efecto del Si en la mejora de los atributos fotosintéticos, responsables de la producción de biomasa, crecimiento y desarrollo de las plantas. Al respecto Rastogi *et al.* (2021) proponen la interacción de Si con los canales de absorción de magnesio (Mg) y potasio (K), exponiendo una regulación de los genes de los canales de

acuaporinas a la alza, para mayor absorción de estos elementos, esenciales contribuyentes en el proceso fotosintético.

En este mismo contexto, Kovács *et al.* (2022) señalan entre otros beneficios, el incremento en el rendimiento de diversas especies de cultivos por el uso de Si, tales como incremento de vida de anaquel para hortalizas y ornamentales, calidad del grano para cultivos de cereales. Esta respuesta ha sido documentada en el cultivo de maíz en dos ciclos de producción, dónde se notó un incremento en el contenido de granos por mazorca, aumento en el peso del grano, y en el rendimiento del grano, así como una correlación positiva de estos parámetros con el contenido de clorofila (Lamlom *et al.*, 2024). Sin embargo, estimar la dosis apropiada para el cultivo de cacahuete, es necesaria para estimar el consumo sustentable de este elemento como bioestimulante.

Composición proximal

El uso de Si en plantas de cacahuete influyó significativamente en la composición proximal de las semillas cultivadas. Se tuvo un incremento del 5.61% de proteína en las semillas obtenidas de plantas que recibieron 28 kg/ha. Este incremento también se cuantificó en el porcentaje de proteína de las semillas de los tratamientos de 35 y 42 kg/ha, con 8.67 y 8.97% respectivamente, más proteína que la estimada en las semillas obtenidas de plantas que no recibieron Si. (Figura 3a). Por otra parte, las grasas aumentaron de entre 2.35 a 8.00% en las semillas de plantas cultivadas con Si (Figura 3c). Respecto al contenido de humedad en la semilla las valoraciones realizadas mostraron diferencias significativa entre las semillas de plantas que recibieron Si respecto a las semillas de plantas sin Si. El porcentaje de humedad de las semillas obtenidas de plantas sin Si resultó en 8.40%, mientras que este valor disminuye en los tratamientos de 28, 35 y 42 kg/ha, con 8.20, 7.86 y 7.27% respectivamente (Figura 3b). Finalmente, se encontró una diferencia significativa en el porcentaje total de ceniza en las semillas. Los resultados reflejan que el Si influyó en este parámetro, al incrementar entre 9.32 y 27.98% el contenido de ceniza respecto al control, con valores en semilla de entre 2.93-3.43% de ceniza en los tratamientos de Si, y 2.68% de ceniza en las semillas control (Figura 3c).

Tabla 1. Componentes de rendimiento y de calidad de la semilla de cacahuete en plantas expuestas a Si.

Tratamiento Si (kg/ha)	Peso 100 semillas (g)	Granos/Vaina	Longitud Vaina (cm)	Vainas/Planta	Rendimiento/planta (g)	Rendimiento (kg/ha)
0	37.75±0.25 ^c	2.95±0.05 ^d	3.21±0.04 ^c	20.00±0.41 ^d	23.50±0.28 ^c	2350.00±28.86 ^c
28	41.50±1.19 ^b	3.55±0.05 ^c	3.52±0.05 ^b	22.00±0.40 ^c	26.25±0.25 ^b	2625.00±25.00 ^b
35	41.00±0.10 ^b	3.80±0.00 ^b	3.68±0.04 ^b	24.05±0.41 ^b	27.25±0.25 ^b	2725.00±25.00 ^b
42	44.50±0.28 ^a	4.05±0.05 ^a	4.17±0.05 ^a	26.00±0.40 ^a	29.50±0.28 ^a	2950.00±28.86 ^a

Diferentes letras entre columnas indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey $p \leq 0.05$). n=9±error estándar.

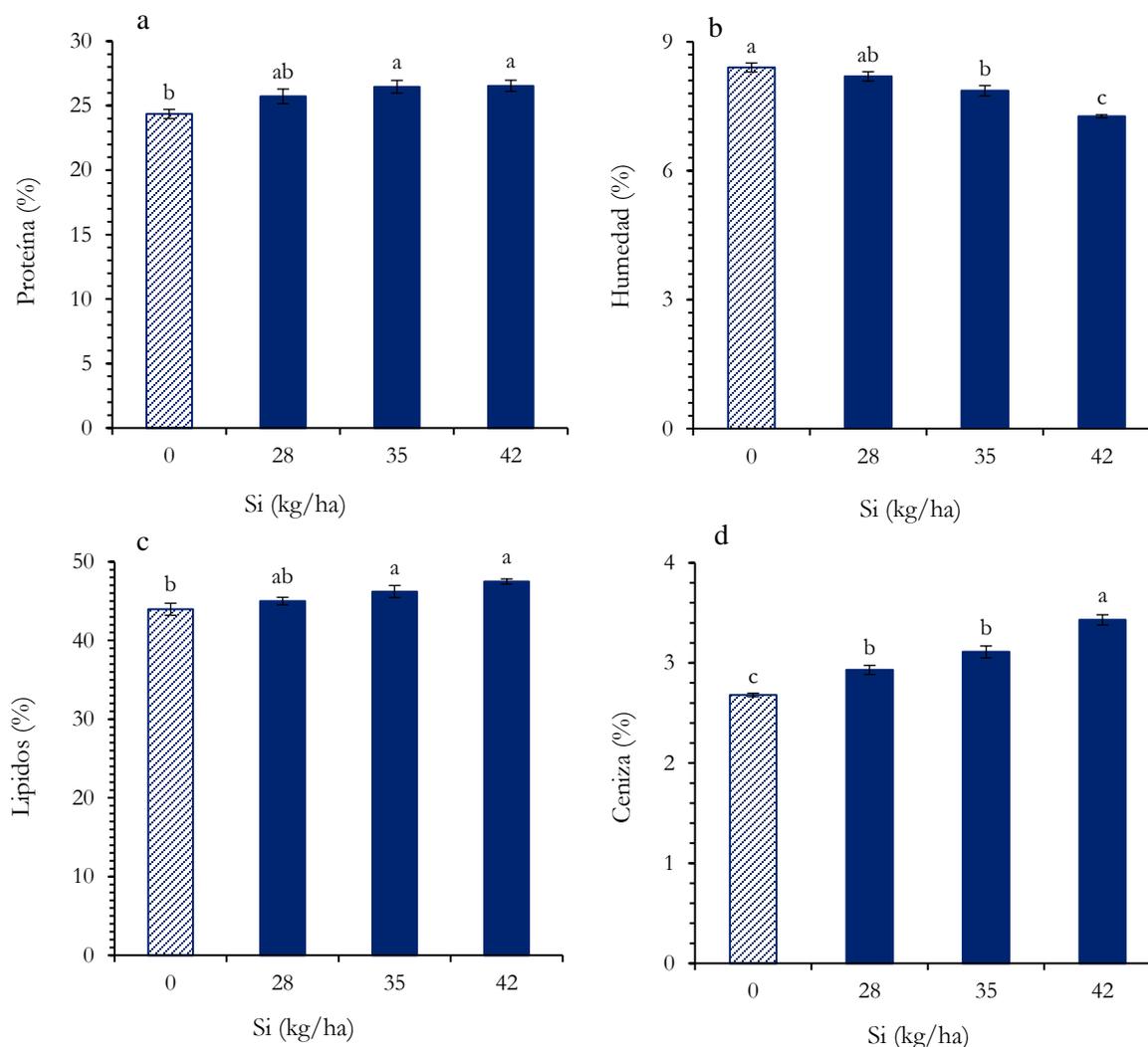


Figura 3. Influencia del Si en la composición proximal de semillas de cacahuete. Diferentes letras entre columnas indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey $p \leq 0.05$).

Las semillas de cacahuete presentan características similares a las semillas oleaginosas, por su contenido de nutrientes y ácidos grasos, sin embargo, aunque su principal distintivo sea el contenido de ácidos grasos saturados, cuenta con antioxidantes como tocoferoles; aminoácidos como lisina, metionina, y treonina; 32 proteínas diferentes en su composición, que en algunas ocasiones pueden tener un efecto alérgico; alta cantidad de vitaminas B, E, y fibra, convirtiéndoles en semillas con alto valor nutricional (Çiftçi and Suna 2022). En cacahuete, la composición proximal puede verse modificada entre variedades, aunque generalmente se tienen valores aproximados de 4.3-5.1% de humedad, 22.20-26.50% de proteínas, 34.60-45.70% de lípidos, y de entre 2.30-2.60% de cenizas (Cho *et al.*, 2023). En este estudio, el porcentaje de proteínas, lípidos, humedad y ceniza de las semillas de cacahuete que no recibieron tratamiento de Si, se encuentran dentro del parámetro reportado en la

literatura. Sin embargo, las semillas de cacahuete obtenidas de plantas tratadas con Si, superan el valor promedio de estos valores. Lo que podría indicar, además de la absorción y transporte, la incorporación del Si en el metabolismo de las plantas. Khan *et al.* (2023) reportan un incremento en la producción de solutos orgánicos en el cultivo de maíz suplementado con Si, mejorando significativamente la composición proximal del grano. Lo antes mencionado concuerda con los resultados logrados en esta investigación, además de, indicar alto valor nutricional como consecuencia del nivel de ceniza.

Análisis económico

En análisis de rentabilidad mostrado en la Tabla 2, expone una buena relación B/C resultante de la comercialización realizada. Es evidente el incremento en la rentabilidad al mostrarse superior al 70% al

utilizar Si en el ciclo productivo, dando como resultado una relación B/C superior a 2.5, además de que el costo de producción no es superior al 2% del valor del costo de producción convencional. Estos resultados favorecen la percepción del uso de bioestimulantes en la agricultura, ya que además de generar una huella positiva en cuanto a la producción, y protección del cultivo, también se ve favorecida el área económica, al suscitar una rentabilidad de producción superior a la rentabilidad convencional.

El incremento de la relación B/C observada puede ser debida al incremento en el rendimiento del cacahuate por efecto de la aplicación de Si, y al bajo costo de producción que se generó por la adición de este elemento benéfico. Al respecto, se ha reportado una

relación B/C de 2.08 en el cultivo de arroz, como respuesta a la aplicación de 120 kg/ha de Si, además de un incremento aproximado del 2% del costo de producción (Jinger *et al.*, 2023). Esta tendencia también se documentó en tomate de cáscara con una relación B/C de 1.16 al aplicar Si al suelo y vía foliar (Alfita-Vásquez *et al.*, 2021), y una relación B/C de 1.76 por fertilización edáfica enriquecida con Si (Prajapat *et al.*, 2022). Lo anterior sugiere una respuesta específica de cada especie cultivable, sin embargo, se mantiene la tendencia positiva en la respuesta de las plantas a la fertilización enriquecida con Si, lo que posiciona a este elemento como un aliado en la producción de cultivos y en la búsqueda de suplementos que mejoren la calidad del órgano de interés comercial.

Tabla 2. Estimación de la rentabilidad y del beneficio-costo como resultado del uso de Si como bioestimulante.

Tratamientos Si (kg/ha)	Rendimiento (kg/ha)	IB (\$)	CT (\$)	BN (\$)	B/C (\$)	R (%)
00	1474.20	4127.76	1864.00	2263.76	1.21	54.84
28	2350.00	6580.00	1887.80	4692.20	2.49	71.31
35	2652.00	7425.60	1893.75	5531.85	2.92	74.50
42	2985.60	8359.68	1899.70	6459.98	3.40	77.28

IB: ingreso bruto; CT: costo total; BN: beneficio neto; B/C: relación beneficio/costo; R: rentabilidad.

CONCLUSIÓN

El uso de Si en el cultivo de cacahuate mejoro las propiedades agronómicas y de calidad de las vainas, así como mostrar una prometedora rentabilidad económica, al incrementar significativamente el rendimiento, sin evidenciar excesivos gastos de producción. Finalmente, es evidente la precocidad generada en el cultivo, por lo que analizar variaciones fenológicas más específicas se considera indispensable.

Agradecimientos

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por el apoyo otorgado a través del Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCIYT) 10ma Convocatoria, a través del proyecto PFOC 10-01-2024 “Respuesta de soya, frejol y arroz a la inoculación de rizobios bajo condiciones del Litoral Ecuatoriano”.

Funding. Project PFOC 10-01-2024.

Conflict of interest. The authors declare there are no competing interests.

Compliance with ethical standards. This work does not require approval by a bioethical committee.

Data availability. Data is available from L.T. Llerena-Ramos and J.J. Reyes-Pérez.

Author contribution statement (CRediT). **L.T. Llerena-Ramos** – Conceptualization, Funding acquisition, Project administration, Writing-Review and editing., **J.J. Reyes-Pérez** – Visualization, Validation, Investigation., **E.V. Castro Klinger** – Investigation, Methodology., **J.A. Torres-Rodríguez** – Supervision, Data Curation., **S. Rodríguez-Rodríguez** – Formal analysis, Software, Writing-Original Draft., **M.A. Sariñana-Navarrete** – Writing-Original Draft, Writing-Review and editing.

REFERENCES

- Alafita-Vásquez, G., Hernández-Barrios, M., Teoba-Domínguez, S., Zulueta-Rodríguez, R., Hernández-Montiel, L.G., Alemán-Chávez, I. and Lara-Capistrán, L., 2021. Economic profitability analysis of husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Hornem.) under different silicon dioxide concentrations. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i10.2002>
- Arévalo-Briones, K.P., Pastrano-Quintana, E. and Armijos-Jumbo, V., 2016. Relación beneficio-costo por tratamiento en la

- producción orgánica de las hortalizas (Cilantro, Lechuga, Cebolla Roja, Cebolla de Rama) en el cantón Santo Domingo de Los Colorados. *Revista Publicando*, 3(7), pp. 503–528.
- Bakhat, H.F., Bibi, N., Hammad, H.M., Shah, G.M., Abbas, S., Rafique, H.M., Mohamed, A.K.S.H. and Maqbool, M.M., 2023. Effect of Silicon Fertilization on Eggplant Growth and Insect Population Dynamics. *Silicon*, 15(8), pp. 3515–3523. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02279-1>.
- Cho, M., Myat, L., Nang, K.K. and Kyi, M., 2023. Evaluation of proximate and mineral compositions of four different types of peanut seed variety in Myanmar. *Agpe The Royal Gondwana Research Journal*, 04(05), pp. 23–31.
- Çiftçi, S. and Suna, G., 2022. Functional components of peanuts (*Arachis Hypogaea* L.) and health benefits: A review. *Future foods*, 5, p. 100140. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100140>
- Coquerel, R., Arkoun, M., Dupas, Q., Leroy, F., Lâiné, P. and Etienne, P., 2023. Silicon Supply Improves Nodulation and Dinitrogen Fixation and Promotes Growth in *Trifolium incarnatum* Subjected to a Long-Term Sulfur Deprivation. *Plants*, 12(12), p. 2248. <https://doi.org/10.3390/plants12122248>
- Dong, Z., Li, Y., Xiao, X., Chen, Y. and Shen, X., 2018. Silicon effect on growth, nutrient uptake, and yield of peanut (*Arachis hypogaea* L.) under aluminum stress. *Journal of Plant Nutrition*, 41(15), pp. 2001–2008. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1485163>
- El Moukhtari, A., Lamsaadi, N., Oubenali, A., Mouradi, M., Savoure, A. and Farissi, M., 2022. Exogenous Silicon Application Promotes Tolerance of Legumes and Their N₂ Fixing Symbiosis to Salt Stress. *Silicon*, 14(12), pp. 6517–6534. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01466-w>
- Grankina, A., Bocharnikova, E. and Matichenkov, V., 2022. Silicon-based Biostimulators for Sustainable Agriculture. In: M. Hasanuzzaman, B. Hawrylak-Nowak, T. Islam and M. Fujita, eds. *Biostimulants for Crop Production and Sustainable Agriculture*. CABI GB. pp. 85–94. <https://doi.org/10.1079/9781789248098.0006>
- Hosseini-Nasr, F., Etesami, H. and Alikhani, H.A., 2023. Silicon Improves Plant Growth-Promoting Effect of Nodule Non-Rhizobial Bacterium on Nitrogen Concentration of Alfalfa Under Salinity Stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), pp. 496–513. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01061-x>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2024. Anuario meteorológico del Cantón Mocache: Estación Experimental Tropical Pichilingue. Mocache, Los Ríos Ecuador. pp. 12
- Irfan, M., Maqsood, M.A., Rehman, H. ur, Mahboob, W., Sarwar, N., Hafeez, O.B.A., Hussain, S., Ercisli, S., Akhtar, M. and Aziz, T., 2023. Silicon Nutrition in Plants under Water-Deficit Conditions: Overview and Prospects. *Water*, 15(4), p. 739. <https://doi.org/10.3390/w15040739>
- Jalilzadeh Khoie, E., Jabbarzadeh, Z., Norouzi, P., Barin, M. and Razavi, M., 2024. Silicon spray affect floricultural traits and leaf elemental nutrient concentrations of Rose ‘Beverly Watson’. *Journal of Plant Nutrition*, 47(1), pp. 145–156. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2262513>
- Jiang, Y., Yue, Y., Wang, Z., Lu, C., Yin, Z., Li, Y. and Ding, X., 2024. Plant Biostimulant as an Environmentally Friendly Alternative to Modern Agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(10), pp. 5107–5121. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c09074>
- Jinger, D., Dhar, S., Dass, A., Sharma, V.K., Jhorar, P., Paramesh, V., Gupta, G., Parihar, M., Kumar, D. and Singh, S., 2023. Combined Fertilization of Silicon and Phosphorus in Aerobic Rice-Wheat Cropping and its Impact on System Productivity, Water Use Efficiency, Soil Health, Crop Resilience, and Profitability. *Silicon*, 15(17), pp. 7609–7620. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02598-x>
- Khan, W.-D., Sharif, F., Naeem, M.A., Farooq, M.A., Siddiq, Z. and Imran, M., 2023. Chitosan Polymerized Silica Composite as a Potential Silicon Source: Modulation on Antioxidant Enzymes, Ionic Homeostasis, and Grain Quality in Maize Plants Under Na⁺ Stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(4), pp. 2374–2388. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10711-4>

- Kovács, S., Kutasy, E. and Csajbók, J., 2022. The Multiple Role of Silicon Nutrition in Alleviating Environmental Stresses in Sustainable Crop Production. *Plants*, 11(9), p. 1223.
<https://doi.org/10.3390/plants11091223>
- Lamlom, S.F., Abdelghany, A.M., Ren, H., Ali, H.M., Usman, M., Shaghaleh, H., Hamoud, Y.A. and El-Sorady, G.A., 2024. Revitalizing maize growth and yield in water-limited environments through silicon and zinc foliar applications. *Heliyon*, 10(15).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35118>
- Li, H., Li, C., Song, X., Liu, Y., Gao, Q., Zheng, R., Li, J., Zhang, P. and Liu, X., 2022. Impacts of continuous and rotational cropping practices on soil chemical properties and microbial communities during peanut cultivation. *Scientific reports*, 12(1), p. 2758.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-06789-1>
- Luyckx, M., Hausman, J.-F., Lutts, S. and Guerriero, G., 2017. Silicon and Plants: Current Knowledge and Technological Perspectives. *Frontiers in plant science*, 8, p. 411.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>
- Ma, J.F. and Yamaji, N., 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and molecular life sciences*, 65, pp. 3049–3057.
<https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>
- Mandlik, R., Thakral, V., Raturi, G., Shinde, S., Nikolić, M., Tripathi, D.K., Sonah, H. and Deshmukh, R., 2020. Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. *Journal of experimental botany*, 71(21), pp. 6703–6718.
<https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>
- Parilli-Moser, I., Hurtado-Borroso, S., Guasch-Ferré, M., Lamuela-Raventós, R.M., 2022. Effect of Peanut Consumption on Cardiovascular Risk Factors: A Randomized Clinical Trail and Meta-Analysis. *Frontiers in Nutrition*, 9, 859978.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.853378>
- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E.A. and Nikolic, M., 2021. Interactions of Silicon with Essential and Beneficial Elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, p. 697592.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Prajapat, B.S., Kaushik, M.K., Sharma, S.K., Chaudhary, R. and Bairwa, D.S.D.D., 2022. Effect of Active Silica on Growth and Profitability of Maize under Organic Farming. *Indian Journal of Ecology*, 49(1), pp. 124–128.
<https://doi.org/10.55362/IJE/2022/3488>
- Putra, R., Waterman, J.M., Mathesius, U., Wojtalewicz, D., Powell, J.R., Hartley, S.E. and Johnson, S.N., 2022. Benefits of silicon-enhanced root nodulation in a model legume are contingent upon rhizobial efficacy. *Plant and Soil*, 477(1), pp. 201–217.
<https://doi.org/10.1007/s11104-022-05358-9>
- Rastogi, A., Yadav, S., Hussain, S., Kataria, S., Hajjhashemi, S., Kumari, P., Yang, X. and Brestic, M., 2021. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants? *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, pp. 40–48.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.004>
- Rea, R.S., Islam, M.R., Rahman, M.M., Nath, B. and Mix, K., 2022. Growth, Nutrient Accumulation, and Drought Tolerance in Crop Plants with Ailicon Application: A Review. *Sustainability*, 14(8), p. 4525.
<https://doi.org/10.3390/su14084525>
- Sanni, J.A., Sanni, G.O., Awoniyi, R.R., Osanyinlusi, R., Richards, Y.E., Adesina, G.I., Adenuga, O.O., Apata, S.A. and Ekun, O.E., 2024. Effects of Processing on the Proximate Composition, Mineral Content and the Phytochemical Analysis of Groundnut Seeds (*Arachis hypogaea*). *Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry*, 13(1), pp. 63–71.
<https://doi.org/10.14421/biomedich.2024.131.63-71>
- Shamshiripour, M., Moteszarehadeh, B., Rahmani, H.A., Alikhani, H.A. and Etesami, H., 2022. Optimal Concentrations of Silicon Enhance the Growth of Soybean (*Glycine Max* L.) Cultivars by Improving Nodulation, Root System Architecture, and Soil Biological Properties. *Silicon*, 14(10), pp. 5333–5345.
<https://doi.org/10.1007/s12633-021-01273-3>
- Shao, S., Chen, M., Liu, W., Hu, X., Wang, E.-T., Yu, S. and Li, Y., 2020. Long-term monoculture reduces the symbiotic rhizobial biodiversity of peanut. *Systematic and Applied Microbiology*, 43(5), p. 126101.
<https://doi.org/10.1016/j.syapm.2020.126101>

- Sharma, S., Mushtaq, M., Sudhakaran, S., Thakral, V., Raturi, G., Bansal, R., Kumar, V., Vats, S., Shivaraj, S.M. and Deshmukh, R., 2023. Silicon Uptake, Transport, and Accumulation in Plants. In: S. Padney, D.K. Tripathi, V.P. Singh, S. Sharma and D.K. Chauhan, eds. *Beneficial Chemical Elements of Plants: Recent Developments and Future Prospects*. Wiley Online Library. pp. 205–226. <https://doi.org/10.1002/9781119691419.ch9>
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N. and Ahmad, P., 2021. Silicon and Plants: Current Knowledge and Future Prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, pp. 906–925. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>
- Tillman, B.L. and Stalker, H.T., 2010. Peanut. In: J. Vollmann and I. Rajcan, eds. *Oil crops*. Springer. pp. 287–315. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77594-4_9
- Toomet, O., 2017. Nutritional chemistry of the peanut (*Arachis hypogaea*). *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 58(17), pp. 3042-3053. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1339015>
- Zhang, J., Yun, G., Feng, G.U.O., Li, X.-G. and Wan, S., 2020. Research progress on the mechanism of improving peanut yield by single-seed precision sowing. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(8), pp. 1919–1927. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62763-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62763-2)