



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN/RESEARCH ARTICLE

EFECTO DEL NANOPRIMING CON ÓXIDO DE MAGNESIO SOBRE EL DESARROLLO DE *Vigna unguiculata* (FABACEAE)

Effect of Nanopriming with Magnesium Oxide on the development of *Vigna unguiculata* (Fabaceae)

Santiago DURÁN-FERNÁNDEZ^{1*}, Oscar Darío BERMÚDEZ-ZAMBRANO², Jorge Enrique RODRÍGUEZ-PÁEZ³,
Edier Humberto PÉREZ¹, Leidy Rocío NIÑO-CAMACHO¹.

¹ Grupo de Agroquímica, Departamento de Química, Universidad del Cauca, Calle 5 No. 4-70 Popayán, Colombia, santiagoduran@unicauca.edu.co, ehperez@unicauca.edu.co, leidynino@unicauca.edu.co.

² Grupo de Estudios Sobre Diversidad Vegetal – SACHAWAIRA, Departamento de Biología, Universidad del Cauca, Calle 5 No. 4-70 Popayán, Colombia, odbermudez@unicauca.edu.co.

³ Grupo de Ciencia y Tecnología de Materiales Cerámicos – CYTEMAC, Departamento de Física, Universidad del Cauca, Calle 5 No. 4-70 Popayán, Colombia, jnpaez@unicauca.edu.co.

* For correspondence: santiagoduran@unicauca.edu.co

Recibido: 18 de junio de 2024. **Revisado:** 11 de septiembre de 2024. **Aceptado:** 01 de diciembre de 2024

Editor asociado: Susana Raquel Feldman

Citation/ citar este artículo como: Durán-Fernández, S. Bermúdez-Zambrano, O. D. Rodríguez-Páez, J. R. Pérez, E. H. y Niño-Camacho, L. R. (2025). Efecto del nanopriming con óxido de magnesio sobre el desarrollo de *Vigna unguiculata* (Fabaceae). *Acta Biol. Colomb.*, 30(1), 95-104. <https://doi.org/10.15446/abc.v30n1.113233>

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el efecto de nanopartículas de óxido de magnesio (MgO-NPs) sobre el desarrollo de *Vigna unguiculata*. Para ello se sintetizaron, por una ruta química, MgO-NPs que se caracterizaron utilizando: espectroscopía IR, difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía EDAX. Los resultados indicaron que la única fase cristalina presente en el sólido sintetizado fue MgO tipo periclase, con alta pureza química y tamaño nanométrico (< 100 nm). Al evaluar el efecto de MgO-NPs sobre *V. unguiculata*, se observó que redujeron el número de días a floración (hasta 70.5 ± 6.0 días) e incrementaron el número acumulado de vainas por planta (hasta 7.0 ± 0.8 vainas). Además, las nanopartículas de este óxido provocaron disminución en la masa seca de tallos. De acuerdo con los resultados, las MgO-NPs suministradas a *V. unguiculata* mediante nanopriming, pueden llegar a ser una forma eficiente de proporcionar un elemento esencial como el Mg, desempeñando así su función como nanofertilizante.

Palabras clave: Fotoasimilados, nanotecnología, nutrición mineral, precocidad, semillas.

ABSTRACT

This work evaluated the effect of magnesium oxide nanoparticles (MgO-NPs) on the development of *Vigna unguiculata*. MgO-NPs were synthesized using a chemical route and characterized with IR spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and EDAX spectroscopy. The results indicated that the only crystalline phase present in the synthesized solid was periclase-type MgO, with high chemical purity and nanoscale size (< 100 nm). When evaluating the effect of MgO-NPs on *V. unguiculata*, it was observed that they reduced the number of days to flowering (up to 70.5 ± 6.0 days) and increased the accumulated number of pods per plant (up to 7.0 ± 0.8 pods). Additionally, these oxide nanoparticles caused a decrease in stem dry mass. According to the results, MgO-NPs supplied to *V. unguiculata* through nanopriming can become an efficient way to provide an essential element like Mg, thus serving their function as nanofertilizer.

Keywords: Mineral nutrition, nanotechnology, photoassimilates, precocity, seeds.

INTRODUCCIÓN

La reducida disponibilidad de alimentos en algunas regiones del mundo, sumada al crecimiento de la población, la disminución del área cultivable, la sobreexplotación de los suelos y el cambio climático constituyen retos que debe afrontar la agricultura (Aljanabi, 2021; Sharma *et al.*, 2022; Glotra *et al.*, 2023). Por tanto, es necesario encontrar alternativas que contribuyan a resolver esta compleja problemática. Una de estas alternativas es el cultivo de plantas como algunas fabáceas, que sirven para la alimentación y la mejora de la fertilidad del suelo (Monteoliva *et al.*, 2023).

El frijol caupí (*Vigna unguiculata*) es una fabácea importante cultivada en África, Suramérica, Estados Unidos, México, Asia, Sur y Sudeste de Europa. Las semillas de *V. unguiculata* constituyen una fuente valiosa de proteína y minerales dietéticos. Además, las legumbres inmaduras y hojas son usadas en diferentes recetas gastronómicas y en su conjunto la parte aérea es empleada para la alimentación animal (Belay *et al.*, 2017), por lo que se considera una planta multipropósito (Kebede y Bekeko, 2020).

V. unguiculata tiene gran capacidad de adaptación a condiciones ambientales desfavorables, como escasa disponibilidad hídrica y de nutrientes en el suelo (Kebede y Bekeko 2020). Además, hace una contribución significativa a los agroecosistemas, mediante la fijación simbiótica de nitrógeno atmosférico (Belay *et al.*, 2017) y, por su rápido crecimiento, permite la cobertura del suelo ayudando de esta forma a reducir la erosión (Boukar *et al.*, 2019). A pesar de las cualidades que posee *V. unguiculata*, existen factores que limitan su productividad, como son: la reducida disponibilidad de semillas mejoradas para su establecimiento como cultivo, el ataque ocasionado por plagas, entre otros (Belay *et al.*, 2017; Kebede y Bekeko, 2020).

Por otro lado, el magnesio (Mg) es un elemento esencial para las plantas (Guo *et al.*, 2015) y el más limitante en la agricultura (Salcido-Martínez *et al.*, 2020). Este elemento desempeña múltiples e importantes funciones como: átomo central en la molécula de clorofila (Ghorbanian *et al.*, 2019), elemento determinante en la eficiencia de uso de nitrógeno (Cakmak, 2013); regulador en la síntesis de ATP, ADN, ARN (Cowan, 2002), proteínas (Havlin *et al.*, 2017) y en la actividad de enzimas que actúan como fosfotransferasas, ATPasas (Maathuis, 2009) o que están involucradas en la asimilación de carbono (Jaghdani *et al.*, 2021), así como regulador de la distribución y transporte de fotoasimilados (Moreira *et al.*, 2015). Adicionalmente, el Mg está funcionalmente involucrado en la respuesta de las plantas a condiciones de estrés biótico o abiótico (Zirek y Uzal, 2020; Fujikawa *et al.*, 2021).

Una posible alternativa para promover el desarrollo de la agricultura y garantizar su sostenibilidad es la nanotecnología. Esta tecnología ha surgido como un campo promisorio del conocimiento que facilita la elaboración de nanofertilizantes, insumos que constituyen una excelente opción para el suministro de elementos esenciales que promueven el

desarrollo y la productividad de las plantas, con la ventaja adicional que pueden ser aplicados en dosis y frecuencia menor con relación a fertilizantes convencionales (Salcido-Martínez *et al.*, 2020) contribuyendo así a reducir la contaminación ambiental causada por agroquímicos.

De manera complementaria, el priming es una técnica para el tratamiento de semillas, que consiste en realizar la inmersión de éstas en agua (hidropriming) o soluciones que contengan sales (halopriming); manitol, sorbitol o polietilenglicol (osmopriming); elementos esenciales para la nutrición mineral (nutripriming) o en suspensiones de nanopartículas denominada específicamente nanoprimer (Thakur *et al.*, 2022). El propósito es que ocurra el proceso de imbibición de las semillas, sin alcanzar el surgimiento de la radícula o la germinación, seguido por un tratamiento de secado a temperatura moderada hasta alcanzar la humedad inicial de las semillas (Amir *et al.*, 2024). Posteriormente, éstas se almacenan y conservan en condiciones ambientales adecuadas (Farooq *et al.*, 2019).

En el caso específico de *V. unguiculata*, Arun *et al.* (2020) realizan el tratamiento de semillas mediante priming empleando ácido giberélico (AG_3), cloruro de calcio, molibdato de amonio, bromuro de potasio, nitrato de magnesio y sulfato de cinc. Transcurridos 60 días, las plantas obtenidas presentaron un incremento en altura, masa seca total y número de vainas como efecto del tratamiento con priming.

En cuanto a la técnica de nanoprimer, Srinivasan *et al.* (2017) informan sobre el efecto de diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de cobre (CuO-NPs) y óxido de cinc (ZnO-NPs). Los resultados indican que el tratamiento de semillas de *V. unguiculata* con CuO-NPs o ZnO-NPs, en condiciones de invernadero, ocasiona un aumento en el porcentaje de germinación, la longitud y la biomasa de las plántulas obtenidas.

Aun siendo el magnesio un elemento esencial para las plantas, son insuficientes las evidencias del efecto de MgO-NPs como tratamiento de priming en *V. unguiculata*. Por tanto, este trabajo tiene como objetivo determinar el efecto de MgO-NPs aplicadas, como priming en el desarrollo de plantas de *V. unguiculata*, bajo condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Síntesis de MgO-NPs

Las MgO-NPs se sintetizaron utilizando el método poliol (Ammar y Fiévet, 2020). Inicialmente se disolvió ~10,64 g de acetato de magnesio ($(CH_3COO)_2Mg \cdot 4H_2O$ - PanReac) en 200 mL de etilenglicol ($C_2H_6O_2$ - Merck), manteniendo la suspensión en agitación constante, a 350 revoluciones por minuto (rpm). A continuación, se adicionó ácido nítrico (HNO_3 Honeywell $\geq 65\%$) hasta obtener un pH de cuatro (4) en el sistema. Posteriormente, se añadió lentamente hidróxido de amonio (NH_4OH Merck 25 %), empleando un

valorador volumétrico (Metrohm), para propiciar reacciones de hidrólisis y condensación entre las especies químicas de Mg, al interior del sistema. Después, para favorecer la eliminación del solvente, la solución se calentó en una plancha (Fischer Scientific) a una temperatura de 150 °C, hasta obtener una resina amarilla. Esta resina, se colocó en un horno (Haceb) a una temperatura de 300 °C, durante dos horas, obteniéndose un precalcinado (Agredo-Trochez *et al.*, 2022; Granda-Ruiz *et al.*, 2023). Considerando resultados previos (Granda-Ruiz *et al.*, 2023), para obtener el óxido de interés, el precalcinado se trató térmicamente a 500 °C en una mufla (Terrigeno), durante seis horas.

El sólido obtenido se caracterizó utilizando espectroscopia IR para determinar los principales grupos funcionales presentes en él (Socrates, 2004). Para realizar el análisis, en un mortero de ágata se mezcló homogéneamente 10 mg del polvo cerámico sintetizado con 100 mg de bromuro de potasio (KBr – Fischer Brand grado espectroscópico 99 %). Esta mezcla se sometió a presión, utilizando un troquel de acero inoxidable, para obtener una pastilla traslúcida. Esta pastilla se colocó en el portamuestra del espectrofotómetro Nicolet IR-200, equipado con el software EZOMINIC 32, y la absorbancia de la muestra fue registrada realizando un barrido entre 400 y 4000 cm⁻¹ (Agredo-Trochez *et al.*, 2022; Granda-Ruiz *et al.*, 2023).

Para identificar las fases cristalinas presentes en la muestra sintetizada, se utilizó DRX (Cullity y Stock, 2014). El difractograma del sólido se obtuvo utilizando el difractómetro D8 ADVANCE con geometría Da Vinci. Además, se empleó microscopía electrónica de barrido (MEB) para determinar la morfología y el tamaño de las partículas primarias, así como su estado de aglomeración (Hawkes y Spence, 2019). Para esto, se utilizó un microscopio JEOL JSM 6490 LV, con un voltaje de aceleración de 20 kV. Adicionalmente, se realizó un análisis de la composición química elemental del sólido utilizando espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDAX) (Agredo-Trochez *et al.*, 2022).

Material vegetal

Las semillas de *V. unguiculata* usadas en este trabajo fueron proporcionadas por el Programa de Pastos y Forrajes del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Estas se encuentran identificadas en el banco de germoplasma institucional como accesión 24477, caracterizada por ser multipropósito. Las semillas fueron sometidas a tratamientos de nanopriming y posteriormente sembradas en suelo, obteniéndose plantas que permanecieron bajo condiciones de invernadero.

Estructuración de los tratamientos para realizar nanopriming

A partir de MgO-NPs sintetizadas, se prepararon suspensiones acuosas en concentraciones de 50, 100, 250, 500,

750, 1000 y 2000 mg L⁻¹, cantidades definidas con base en trabajos previos (Vijai *et al.*, 2020; Pathak *et al.*, 2021) y empleándose como testigo absoluto agua desionizada. Estas suspensiones se depositaron en Erlenmeyers de 200 mL, los cuales se colocaron en un baño de ultrasonido (ELMA), por 15 minutos, previo a la inmersión de las semillas.

Selección de las semillas y aplicación de los tratamientos de nanopriming

Para la realización de este trabajo se seleccionaron 800 semillas de *V. unguiculata* con masa de 0.200 ± 0.010 g. A continuación, en cada Erlenmeyer que contenía un tratamiento constituido por una suspensión de MgO-NPs, se colocó un grupo de 100 semillas donde permanecieron en inmersión por cuatro horas (Al-Salhy y Rasheed, 2020), con suministro de aire proveniente de un compresor – PRETUL (Oliveira *et al.*, 2022), esto con el objetivo de propiciarle oxígeno a las semillas y también evitar la formación de aglomerados de nanopartículas.

Siembra de las semillas en sustrato y establecimiento en invernadero

Las semillas sometidas a nanopriming fueron sembradas en suelo, depositado en materas con una capacidad de un 1 kg. En cada matera se sembraron tres semillas expuestas a un tratamiento y cada tratamiento contó con diez materas, correspondientes a réplicas (Voko *et al.*, 2022). Posteriormente, las materas se establecieron en un invernadero ubicado en la Universidad del Cauca. Durante el desarrollo del ensayo las materas fueron irrigadas con agua de grifo cada tres días, y transcurridos 15 días de sembradas las semillas se efectuó un raleo conservando una planta por réplica (Tankari *et al.*, 2021).

Muestreo y caracterización de suelo

El suelo empleado en este ensayo se muestreó en la Finca Dagua, Corregimiento La Capilla, Municipio de Cajibío, Cauca (2°35.285' N; 76°37.894' O, 1789 msnm). Para ello, se realizó una retícula de 20 x 20 m, en la que se extrajeron muestras de suelo con una pala y un barreno cada 5 m. Adicionalmente, se extrajeron al azar tres muestras en el terreno para determinar la densidad aparente. Posteriormente, se determinó el pH del suelo mediante el método de pasta saturada, la textura usando el método de pipeta, N total empleando el método de Kjeldahl; K, Ca, Na, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu, utilizando espectrofotometría de absorción atómica; S y P mediante método turbidimétrico y colorimétrico, respectivamente, en un espectrofotómetro Uv-Vis (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006). Las características determinadas para el suelo con base en la metodología descrita están consignadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del suelo

Propiedad determinada	Promedio	D.E.	Unidad
Textura: arenosa-franca			
Densidad aparente	0.74	0.19	g cm^{-3}
Humedad de campo	57.54	1.60	%
Humedad higroscópica	26.23	0.09	%
pH	6.49		
N total	5.001	1.082	%
P	107.146	7.281	mg kg^{-1}
K	4.805	0.656	mg kg^{-1}
Ca	16.983	1.725	mg kg^{-1}
Na	21.326	3.055	mg kg^{-1}
Mg	3.727	0.228	mg kg^{-1}
S	28.180	3.820	mg kg^{-1}
Fe	122.100	2.186	mg kg^{-1}
Zn	1.413	0.270	mg kg^{-1}
Mn	0.588	0.080	mg kg^{-1}
Cu	0.698	0.024	mg kg^{-1}

w

Evaluación de variables, diseño experimental y análisis estadístico de datos

Para determinar el efecto del nanopriming con MgO-NPs sobre el desarrollo de plantas de *V. unguiculata* se evaluaron como variables: el tiempo transcurrido hasta el inicio del

proceso de floración (días a floración), la masa seca de tallos, masa seca de raíces y el número acumulado de vainas por planta, las cuales se estimaron transcurridos 90 días de sembradas las semillas en el sustrato (Estrada-Domínguez *et al.*, 2018). Este trabajo fue realizado siguiendo un diseño experimental completamente al azar. Los datos provenientes de las variables fueron sometidos a la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y prueba de Levene para homogeneidad de varianzas (Dean *et al.*, 2017). Con base en los resultados de estas pruebas, los datos provenientes de las variables masa seca de tallos y masa seca de raíces fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) y separación de medias empleando la prueba de Bonferroni, con una significancia estadística de $p < 0.05$ (Dean *et al.*, 2017). En tanto que los datos correspondientes a las variables días a floración y número acumulado de vainas por planta, fueron sometidos a la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con una significancia estadística de $p < 0.05$, debido a que éstos no cumplieron los supuestos del ANOVA (Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar, 2012).

RESULTADOS

Caracterización de los sólidos sintetizados

En los espectros infrarrojos (IR), tanto de la muestra precalcina (a 300 °C) como la calcinada (a 500 °C), se observó una banda ancha entre 400 y ~900 cm^{-1} , donde se encontraban las bandas características del MgO (Fig. 1a). Adicionalmente, apareció una banda a ~3450 cm^{-1} correspondiente a los grupos hidroxilo, y otra banda ancha de poca intensidad entre ~1350 y 1650 cm^{-1} . También se pudo observar una banda a los ~1620 cm^{-1} asociada al agua (Fig. 1a). Por otra parte, el difractograma de rayos X (Fig. 1b) reveló

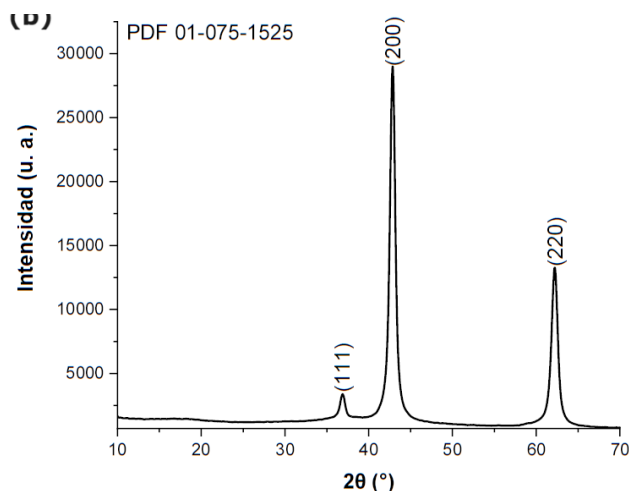
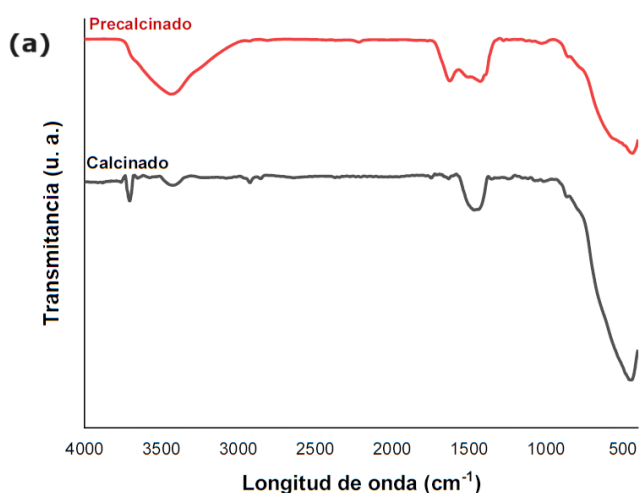


Fig. 1. Espectros IR de la muestra de precalcina a 300 °C y del sólido calcinado a 500 °C (a) y difractograma de rayos X del sólido tratado térmicamente (b).

que la única fase cristalina presente en el sólido tratado a 500 °C era el MgO tipo periclase (PDF 01-075-1525).

La micrografía del sólido sintetizado (Fig. 2a) muestra aglomeración de las partículas primarias, con un tamaño nanométrico (< 100 nm), y los resultados de la composición química destacan la presencia de Mg y O, principalmente (Fig. 2b).

Evaluación del efecto del nanopriming sobre el desarrollo de las plantulas de *V. unguiculata*

La exposición de semillas de *V. unguiculata* a tratamientos de nanopriming con MgO-NPs en concentraciones de 50, 100, 250, 500, 750, 1000 y 2000 mg L⁻¹ redujo la masa seca promedio de tallos en las plantas (Fig. 3a).

Por otra parte, la imbibición de semillas de *V. unguiculata* en suspensiones de MgO-NPs con diferentes concentraciones no causó efecto sobre la masa seca promedio de las raíces (Fig. 3b). No obstante, conllevó a que las variables días a floración (Fig. 3c) y número acumulado de vainas por planta (Fig. 3d) presentaran diferencias significativas entre tratamientos.

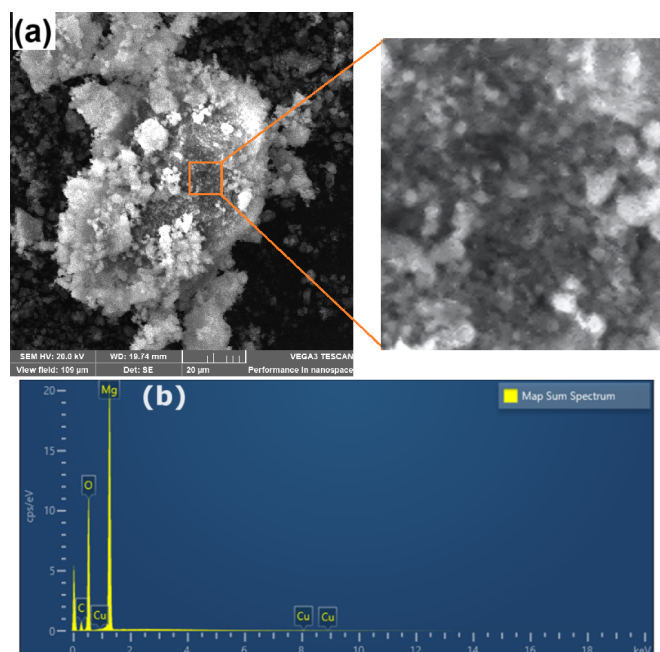


Fig. 2. Micrografía al microscopio electrónico de barrido (a) y composición química elemental (b), de la muestra sintetizada a 500 °C.

La exposición de semillas de *V. unguiculata* a concentraciones de 50, 100, 250, 500, 750 y 1000 mg L⁻¹ de MgO-NPs como tratamiento de nanopriming, indujo precocidad en la floración de las plantas (Fig. 3c). En particular, el tratamiento con 100 mg L⁻¹ de MgO-NPs permitió que las plantas alcanzaran la floración en el menor tiempo observado, 70.5 ± 6.0 días.

En cuanto al número acumulado de vainas por planta se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. En este sentido, las plantas de *V. unguiculata* provenientes de semillas sometidas a nanopriming con concentraciones de 500, 750 y 1000 mg L⁻¹ de MgO-NPs alcanzaron el mayor número de vainas por planta, con valores promedio de (6.7 ± 0.5), (7.0 ± 0.8) y (5.8 ± 0.9), respectivamente (Fig. 3d).

DISCUSIÓN

En este trabajo, como resultado novedoso, es posible establecer el efecto causado por la inmersión de semillas de *V. unguiculata* en suspensiones acuosas de MgO-NPs en concentraciones de 50, 100, 250, 500, 750, 1000 y 2000 mg L⁻¹, técnica conocida en la literatura como nanopriming (Pereira *et al.*, 2021). La respuesta observada para las variables masa seca de tallos, días a floración y número de vainas por planta, permite inferir la existencia de una relación fuente-sumidero, en la que se produce una traslocación de fotoasimilados del tallo a las vainas, de modo que el incremento en el número acumulado de vainas, como efecto causado por los tratamientos de nanopriming con MgO-NPs ocasiona como consecuencia una disminución en la masa seca de tallos en las plantas de *V. unguiculata* (Aluko *et al.*, 2021). Desde luego, para que ocurra el desarrollo de vainas es necesario que previamente suceda el proceso de floración, al cual también contribuye el tallo aportando fotoasimilados, que en el caso particular de este trabajo facilitan el desarrollo temprano de flores (Wang *et al.*, 2020).

Una relación fuente-sumidero establecida con la participación del magnesio, es ilustrada por He *et al.* (2020) mediante un trabajo realizado con plántulas de banano (*Musa acuminata*), donde la deficiencia de magnesio ocasiona reducción en el contenido de glucosa y fructosa en los tejidos; acumulación de sacarosa, amilosa y amilopectina en las hojas, acompañada de descenso en el crecimiento de las plántulas. Además, esta condición deficitaria de magnesio causa disminución en la cantidad de sacarosa, amilosa y amilopectina en el pseudotallo, rizoma y raíces. Como condición particular, la aplicación foliar de magnesio a plantas de *M. acuminata* deficientes en este elemento, permite el restablecimiento a la normalidad en su crecimiento y contenido característico de carbohidratos.

De manera complementaria, en el desarrollo de las plantas, la transición de la fase vegetativa a la reproductiva se produce con el inicio del proceso de floración. Este proceso conlleva la formación de órganos con una marcada fuerza de sumidero (flores, frutos y semillas), lo que ocasiona la traslocación

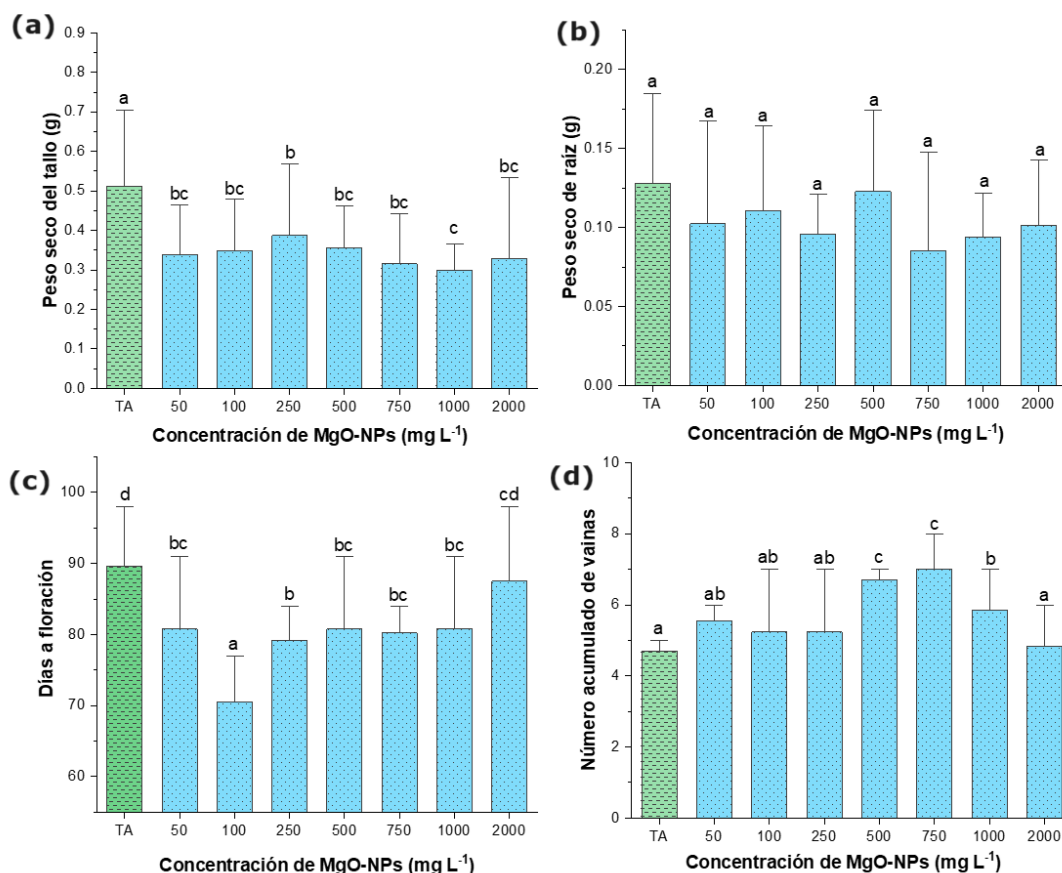


Fig. 3. Masa seca de tallos (a), masa seca de raíces (b), días a floración (c) y número acumulado de vainas por planta (d), estimados en plantas de *V. unguiculata* obtenidas de semillas tratadas con MgO-NPs en concentraciones de 0 (TA), 50, 100, 250, 500, 750, 1000 y 2000 mg L⁻¹. [El asterisco (*) indica que el tratamiento es estadísticamente diferente a TA, ns indica que con relación a TA no existe diferencia significativa ($p < 0.05$) y la línea sobre la barra corresponde a la desviación estándar, $n = 10$].

hacia ellos de fotoasimilados suministrados por órganos fuente (León-Burgos *et al.*, 2021). En este sentido, para que ocurra el proceso de translocación, es indispensable que en la estructura vegetal que actúa como fuente se lleve a cabo el fenómeno de carga. Este fenómeno implica el transporte de protones a través de la membrana plasmática, evento que se realiza con la participación de la enzima H-ATPasa, cuya actividad es regulada por el Mg, que a su vez participa en la síntesis de ATP (Hawkesford *et al.*, 2023).

Por otro lado, el almidón constituye el carbohidrato de reserva en las plantas, y la sacarosa es fundamentalmente el compuesto como se transportan los fotoasimilados. En consecuencia, para su movilización el almidón debe ser transformado metabólicamente en sacarosa, proceso en que participan enzimas como la α -amilasa (Li *et al.*, 2022). Esta enzima puede ser activada como efecto del tratamiento de semillas mediante nanopriming (Hasanaklou *et al.*, 2023). Por consiguiente, los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que, tanto en semillas de *V. unguiculata* expuestas a MgO-NPs como en plantas obtenidas a partir de éstas, pudo incrementar la actividad de la α -amilasa. Esta

condición permite la translocación más eficiente de fotoasimilados durante los procesos de germinación de semillas, establecimiento de plántulas y transición de la fase vegetativa a reproductiva en las plantas (Thakur *et al.*, 2022).

Con base en lo observado, es posible que en plantas de *V. unguiculata* provenientes de semillas tratadas mediante priming con MgO-NPs, ocurra con mayor eficiencia la translocación de fotoasimilados, lo que explica la reducción en la masa seca de tallos para provocar la precocidad en la floración e incremento en el número acumulado de vainas por planta (Fig. 3). En concordancia con estos resultados, Janeclare *et al.* (2021) indican que el calcio y Mg provocan precocidad e incremento en el número de flores y frutos en tomate (*Solanum lycopersicum*).

En cuanto a la posible participación del Mg en la floración, esta ha sido mencionada por Abbass *et al.* (2020), quienes aplican magnesio quelatado (MgEDTA) a *Fressia hybrida* mediante aspersión foliar en concentraciones de 100 y 200 mg L⁻¹. Como resultado relevante, se observa que la dosis de 100 mg L⁻¹ disminuye significativamente el número

de días requeridos para el inicio del proceso de floración, además incrementa el número de flores por inflorescencia y planta, con relación a plantas que no reciben tratamiento con magnesio.

Adicionalmente, un mecanismo que puede explicar la inducción temprana de la floración causada como efecto de la aplicación de MgO-NPs, es la influencia que éstas tienen sobre la expresión de dos micro ARNs: miR156 y miR172 (Owusu Adjei *et al.*, 2021). A su vez, la cantidad relativa de estos micro ARNs regula la expresión postranscripcional del gen *DOG1*, encargado de determinar el tiempo de floración (Huo *et al.*, 2016).

Con relación a la concentración de Mg presente en el suelo empleado para la realización de este ensayo (3,727 mg kg⁻¹, Tabla 1), indica que presenta una condición de deficiencia para los requerimientos (75 mg kg⁻¹) de *V. unguiculata* (Soniya *et al.*, 2021). Por tanto, el Mg suministrado a las semillas mediante el tratamiento con nanopriming, aporta la cantidad requerida para permitir el desarrollo de las plantas de *V. unguiculata* (Kumar *et al.*, 2021).

Finalmente, el priming, como técnica para el acondicionamiento o tratamiento de semillas puede causar modificaciones de naturaleza molecular, celular, bioquímica y fisiológica. Estas modificaciones promueven la germinación, sincronizan y facilitan el establecimiento de plántulas, reducen su ciclo de desarrollo e incrementan la productividad de los cultivos (Hussain *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

Este trabajo permite establecer que el tratamiento de semillas de *Vigna unguiculata* mediante nanopriming con MgO-NPs, induce precocidad en la floración de esta especie y regula el transporte de fotoasimilados promoviendo el desarrollo de frutos (vainas). Estos hallazgos facilitan la orientación de futuras investigaciones, encaminadas a favorecer el desarrollo y la productividad de especies importantes para la seguridad alimentaria y la fertilidad del suelo. Asimismo, con base en estos resultados es posible disminuir la dosis y frecuencia de aplicación de fertilizantes, e incrementar su periodo de disponibilidad para las plantas, contribuyendo así a reducir el impacto ambiental sobre los agroecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sistema General de Regalías, específicamente al Proyecto de Jóvenes Investigadores e Innovadores en el Departamento del Cauca, por el otorgamiento de una beca-pasantía a Santiago Durán Fernández. Asimismo, agradecen a la Universidad del Cauca y específicamente, al Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales Cerámicos (CYTEMAC) por proporcionar los reactivos y equipos necesarios para realizar la síntesis de nanopartículas. También manifiestan su agradecimiento al Grupo de Estudios Sobre Diversidad Vegetal

(SACHAWAIRA) por gestionar la adecuación de espacios para la realización de la parte experimental de este trabajo y al Grupo de AGROQUÍMICA por proporcionar los reactivos y equipos para caracterizar el suelo empleado.

PARTICIPACIÓN DE AUTORES

Conceptualización y diseño de la investigación: Oscar Darío Bermúdez-Zambrano, Jorge Enrique Rodríguez Páez y Santiago Durán Fernández.

Adquisición de datos: Santiago Durán Fernández y Oscar Darío Bermúdez-Zambrano.

Análisis e interpretación de datos: Oscar Darío Bermúdez-Zambrano, Jorge Enrique Rodríguez Páez, Santiago Durán Fernández, Edier Humberto Pérez y Leidy Rocío Niño Camacho.

Redacción del manuscrito: Santiago Durán Fernández, Oscar Darío Bermúdez-Zambrano, Jorge Enrique Rodríguez Páez y Edier Humberto Pérez.

Aprobación de la versión del documento a publicar: Santiago Durán Fernández, Oscar Darío Bermúdez-Zambrano, Jorge Enrique Rodríguez Páez, Edier Humberto Pérez y Leidy Rocío Niño Camacho.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia, ni relaciones personales que puedan haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

REFERENCIAS

- Abbass, J. A., Al-Zurfi, T. H., Hnoosh, L. J. H., Ali, A. A. and Abbas, A. A. (2020). Roles of spraying amino acids and chelated magnesium on growth, flowering and production of corms of *Fressia hybrida*. *Scientific Papers Series B. Horticulture*, 64(2), 281–285.
- Agredo-Trochez, Y. A., Molano-Cabezas, A. C., Arciniegas-Grijalba, P. A. and Rodríguez-Páez, J. E. (2022). Nanoparticles of magnesium oxyhydroxide and copper oxide: Synthesis and evaluation of their *in vitro* fungicidal activity on the fungus *Omphalia* sp. *Inorganic Chemistry Communications*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.110085>
- Aljanabi, H. A. Y. (2021). Effects of nano fertilizers technology on agriculture production. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25(4), 6728–6739.
- Al-Salhy, S. J. K. and Rasheed, A. A. (2020). Effect of mung bean seed priming methods and duration on seed germination on seed germination and seedling vigor. *Plant Archives*, 20(1), 27–31.
- Aluko, O. O., Li, C., Wang, Q. and Liu, H. (2021). Sucrose utilization for improved crop yields: a review article. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 4704. <https://doi.org/10.3390/ijms22094704>

- Amir, M., Prasad, D., Khan, F. A., Khan, A. and Ahmad, B. (2024). Seed priming: An overview of techniques, mechanisms, and applications. *Plant Science Today*, 11(1), 553-563.
- Ammar, S. and Fiévet, F. (2020). Polyol Synthesis: A versatile wet-chemistry route for the design and production of functional inorganic nanoparticles. *Nanomaterials*, 10(6), 1217. <https://doi.org/10.3390/nano10061217>
- Arun, M. N., Hebbar, S. S., Bhanuprakash, K., Senthivel, T., Nair, A. K. and Pandey, D. P. (2020). Influence of seed priming and different irrigation levels on growth parameters of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) walp]. *Legume Research*, 43(1), 99-104. <https://doi.org/10.18805/LR-3945>
- Belay, F., Gebreslasie, A. and Meresa, H. (2017). Agronomic performance evaluation of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] varieties in Abergelle District, Northern Ethiopia. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 9(8), 139-143.
- Boukar, O., Togola, A., Chamarthi, S., Belko, N., Ishikawa, H., Suzuki, K. and Fatokun, C. (2019). Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] Breeding. In Al-Khayri, J., Jain, S. and Johnson, D. (eds) *Advances in Plant Breeding Strategies: Legumes* (pp. 201-243). Springer International. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23400-3_6
- Cakmak, I. (2013). Magnesium in crop production, food quality and human health. *Plant and Soil*, 368(1-2), 1-4. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1781-2>
- Cowan, J. A. (2002). Structural and catalytic chemistry of magnesium-dependent enzymes. *BioMetals*, 15(3), 225-235. <https://doi.org/10.1023/A:1016022730880>
- Cullity, B. D. and Stock, S. R. (2014). *Elements of X-Ray diffraction*. Tercera edición. Pearson.
- Dean, A. M., Voss, D. and Draguljić, D. (2017). *Design and analysis of experiments* (Segunda edición). Cham-Suiza: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>
- Estrada-Domínguez, V., Márquez-Quiroz, C., de la Cruz-Lázaro, E., Osorio-Osorio, R. and Sánchez-Chávez, E. (2018). Biofortificación de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) con zinc: efecto en el rendimiento y contenido mineral. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 20, 4149-4160. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.986>
- Farooq, M., Usman, M., Nadeem, F., Rehman, H. U., Wahid, A., Basra, S. M. A. and Siddique, K. H. M. (2019). Seed priming in field crops: Potential benefits, adoption and challenges. *Crop and Pasture Science*, 70(9), 731-771. <https://doi.org/10.1071/CP18604>
- Fujikawa, I., Takehara, Y., Ota, M., Imada, K., Sasaki, K., Kajihara, H., Sakai, S., Jogaiah, S. and Ito, S. ichi. (2021). Magnesium oxide induces immunity against *Fusarium* wilt by triggering the jasmonic acid signaling pathway in tomato. *Journal of Biotechnology*, 325, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.11.012>
- Ghorbanian, A. R., Khoshgoftarmansh, A. H. and Zahedi, M. (2019). The effect of foliar-applied magnesium on root cell membrane H⁺-ATPase activity and physiological characteristics of sugar beet. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25(5), 1273. <https://doi.org/10.1007/S12298-019-00695-Z>
- Glotra, A., Singh, M. and Maneesha. (2023). Nanofertilizers: A review on the futuristic technology of nutrient management in agriculture. *Agricultural Reviews*, 44(2), 238-244. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2469>
- Granda-Ruiz, J. V., Cajas-Salazar, N. and Rodriguez-Paez, J. E. (2023). Magnesium oxyhydroxide nanoparticles: Synthesis, characterization and evaluation of their genotoxicity in *Vicia faba* L. *Materials Science and Engineering: B*, 298, 116896. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116896>
- Guo, W., Chen, S., Hussain, N., Cong, Y., Liang, Z. and Chen, K. (2015). Magnesium stress signaling in plant: Just a beginning. *Plant Signaling & Behavior*, 10(3). <https://doi.org/10.4161/15592324.2014.992287>
- Gutierrez-Pulido, H. y de la Vara-Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3a ed.). Mc Graw Hill.
- Hasanaklou, N. T., Mohagheghi, V., Hasanaklou, H. T., Ma'mani, L., Malekmohammadi, M., Moradi, F. and Dalvand, Y. (2023). Seed nano-priming using silica nanoparticles: effects in seed germination and physiological properties of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/S40538-023-00445-0>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. R. and Beaton, J. D. (2017). *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management* (octava edición). Uttar Pradesh-India: Pearson.
- Hawkes, P. W. and Spence, J. C. H. (2019). *Springer handbook of microscopy* (1a ed.; P. W. Hawkes and J. C. H. Spence, Eds.). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00069-1>
- Hawkesford, M. J., Cakmak, I., Coskun, D., De Kok, L. J., Lambers, H., Schjoerring, J. K. and White, P. J. (2023). Functions of macronutrients. *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*, 201-281. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00019-8>
- He, H., Jin, X., Ma, H., Deng, Y., Huang, J. and Yin, L. (2020). Changes of plant biomass partitioning, tissue nutrients and carbohydrates status in magnesium-deficient banana seedlings and remedy potential by foliar application of magnesium. *Scientia Horticulturae*, 268, 109377. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109377>
- Huo, H., Wei, S. and Bradford, K. J. (2016). *DELAY OF GERMINATION1 (DOG1)* regulates both seed dormancy and flowering time through microRNA pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15). <https://doi.org/10.1073/pnas.1600558113>
- Hussain, S., Hussain, S., Khaliq, A., Ali, S. and Khan, I. (2019). Physiological, biochemical, and molecular aspects of seed priming. In Hasanuzzaman, M. and Fotopoulos, V. (eds) *Priming and pretreatment of seeds and seedlings* (pp. 43-62). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8625-1_3

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. IGAC.
- Jaghdani, S., Jahns, P. and Tränkner, M. (2021). Mg deficiency induces photo-oxidative stress primarily by limiting CO₂ assimilation and not by limiting photosynthetic light utilization. *Plant Science*, 302, 110751. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110751>
- Janeclare, W. W., Omami N, E., Opile W, R., Ochuodho O, J. and Oluko S, P. (2021). Effect of calcium and magnesium on flowering and fruiting of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 2454–6194.
- Kebede, E. and Bekeko, Z. (2020). Expounding the production and importance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1), 1769805. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1769805>
- Kumar, S., Rahman, S., Rahman, F. H. and Pramanik, S. (2021). Nanofertilizers-a potential alternative to chemical fertilizers. *Agriculture & Environment*, 2(6), 31–37.
- León-Burgos, A. F., Beltrán Cortes, G. Y., Barragán Pérez, A. L. and Balaguera-López, H. E. (2021). Distribución de fotoasimilados en los órganos vertederos de plantas Solanaceas, caso tomate y papa. Una revisión. *Ciencia y Agricultura*, 18(3), 79–97. <https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n3.2021.13566>
- Li, G., Zhou, C., Yang, Z., Zhang, C., Dai, Q., Huo, Z. and Xu, K. (2022). Low nitrogen enhances apoplastic phloem loading and improves the translocation of photoassimilates in rice leaves and stems. *Plant And Cell Physiology*, 63(7), 991–1007. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcac066>
- Maathuis, F. J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.PBI.2009.04.003>
- Monteoliva, M. I., Ruiz, O. A. and Li, F. (2023). Editorial: Legumes and their microbiome in climate change mitigation. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1–3.
- Moreira, W. R., da Silva Bispo, W. M., Rios, J. A., Debona, D., Nascimento, C. W. A. and Rodrigues, F. Á. (2015). Magnesium-induced alterations in the photosynthetic performance and resistance of rice plants infected with *Bipolaris oryzae*. *Scientia Agrícola*, 72(4), 328–333. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0312>
- Oliveira, T. F., Santos, H. O. dos, Ribeiro, J. B., Pereira, W. V. S., Pereira, A. A. S. and Cunha Neto, A. R. da. (2022). Priming *Urochloa ruziziensis* (R.Germ. & Evard) seeds with signaling molecules improves germination. *Journal of Seed Science*, 44(e202244044). <https://doi.org/10.1590/2317-1545v44e202244044>
- Owusu Adjei, M., Zhou, X., Mao, M., Xue, Y., Liu, J., Hu, H., Luo, J., Zhang, H., Yang, W., Feng, L. and Ma, J. (2021). Magnesium oxide nanoparticle effect on the growth, development, and microRNAs expression of *Ananas comosus* var. *bracteatus*. *Journal of Plant Interactions*, 16(1), 247–257. <https://doi.org/10.1080/17429145.2021.1931720>
- Pathak, A., Kaur, R. and Thakur, N. (2021). Germination studies and biochemical profile in seeds of wheat exposed to magnesium nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 12(12), 6638–6641.
- Pereira, A. D. E. S., Oliveira, H. C., Fraceto, L. F. and Santaella, C. (2021). Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 11(2), 1–29. <https://doi.org/10.3390/NANO11020267>
- Salcido-Martínez, A., Sánchez, E., Licón-Trillo, L., Pérez-Álvarez, S., Palacio-Márquez, A., Amaya-olivas, N. I. and Preciado-Rangel, P. (2020). Impact of the foliar application of magnesium nanofertilizer on physiological and biochemical parameters and yield in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(4), 2167–2181. <https://doi.org/10.15835/nbha48412090>
- Sharma, S., Singh, S., Bahuguna, A., Yadav, B., Barthwal, A., Khatana, R. N. S., Pandey, A., Thakur, R., Jatav, H. S. (2022). Nanotechnology: an efficient tool in plant nutrition management. En *Ecosystem Services: Types, Management and Benefits* (pp. 165–188).
- Socrates, G. (2004). *Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts*. John Wiley & Sons.
- Soniya, V. P., Bhindhu, P. S. and Sureshkumar, P. (2021). Critical level of magnesium for cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] in ultisols of Kerala. *Legume Research*, 44(9), 1060–1065. <https://doi.org/10.18805/LR-4267>
- Srinivasan, R., Maity, A., Singh, K. K., Ghosh, P. K., Kumar, S., Srivastava, M. K., Radhakrishna, A., Srivastava, R. and Kumari, B. (2017). Influence of copper oxide and zinc oxide nano-particles on growth of fodder cowpea and soil microbiological properties. *Range Management and Agroforestry*, 38(2), 208–214.
- Tankari, M., Wang, C., Ma, H., Li, X., Li, L., Sothar, R. K., Cui, N., Zaman-Allah, M., Hao, W., Liu, F. and Wang, Y. (2021). Drought priming improved water status, photosynthesis and water productivity of cowpea during post-anthesis drought stress. *Agric. Water Manag.*, 245, 106565. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106565>
- Thakur, M., Tiwari, S., Kataria, S. and A and, A. (2022). Recent advances in seed priming strategies for enhancing planting value of vegetable seeds. *Scientia Horticulturae*, 305, 111355. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111355>
- Vijai, K., Anugraha, A. R., Kannan, M., Singaravelu, G. and Govindaraju, K. (2020). Bio-engineered magnesium oxide nanoparticles as nano-priming agent for enhancing seed germination and seedling vigor of green gram (*Vigna radiata* L.). *Materials Letters*, 271, 127792. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127792>
- Voko, M. P., Kulkarni, M. G., Ngoroyemoto, N., Gupta, S., Finnie, J. F. and Van Staden, J. (2022). Vermicompost leachate, seaweed extract and smoke-water alleviate drought stress in cowpea by influencing phytochemicals,

- compatible solutes and photosynthetic pigments. *Plant Growth Regulation*, 97(2), 327–342. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00815-y>
- Wang, R., Gui, Y., Zhao, T., Ishii, M., Eguchi, M., Xu, H., Li, T. and Iwasaki, Y. (2020). Determining the relationship between floral initiation and source–sink dynamics of tomato seedlings affected by changes in shading and nutrients. *HortScience*, 55(4), 457–464. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14753-19>
- Zirek, N. S. and Uzal, O. (2020). The developmental and metabolic effects of different magnesium doses in pepper plants under salt stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(2), 967–977. <https://doi.org/10.15835/nbha48211943>