



EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL DE CHÍA EN RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN ORGANO-MINERAL Y USO DE MICORRIZA

NUTRIENT EXTRACTION BY CHIA IN RESPONSE TO ORGANO-MINERAL FERTILIZATION AND USE OF MYCORRHIZA

Lucila González-Molina¹, Eduardo Espitia-Rangel¹, Mónica G. Lozano-Contreras², Martha B. G. Irizar-Garza¹ y Esaú del C. Moreno-Pérez^{*3}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. ²INIFAP, Campo Experimental Mocochoá, Mocochoá, Yucatán, México. ³Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnía, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (esaump10@yahoo.com.mx)

RESUMEN

La chía (*Salvia hispanica* L.) es un cultivo de gran importancia nutracéutica; sin embargo, la información sobre la extracción y requerimiento nutrimental (REQNUT) del cultivo es escasa. El objetivo del presente estudio fue determinar las curvas de extracción de los macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) y determinar el REQNUT de chía bajo fertilización órgano-mineral y uso de micorriza. La fase experimental se llevó a cabo en Coatlinchán, Texcoco, Estado de México en condiciones de temporal. El diseño experimental fue bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas. La parcela grande tuvo los tratamientos con micorriza (CM) y sin micorriza (SM), mientras que la parcela chica, los tratamientos de fertilización órgano-mineral (OM) suministrada con fuente orgánica (40 %) y química (60 %). La combinación de estos factores resultó en los siguientes tratamientos: OM-CM, CM, OM-SM y SM. La extracción de los macronutrientes se determinó en siete muestreos a través del ciclo de cultivo. En madurez fisiológica se midieron las variables materia seca, rendimiento de grano e índice de cosecha, las cuales fueron superiores en los tratamientos CM con respecto a los SM en 50.2, 8.8 y 44.6 %, respectivamente. La mayor extracción de macronutrientes fue durante las etapas de máximo crecimiento vegetativo y llenado de grano, a los 85 y 127 días después de la siembra, respectivamente. El orden de la extracción de N, P, K, Ca y Mg fue el siguiente: OM-CM > OM-SM > SM > CM, mientras que el REQNUT para producir una tonelada de grano fue mayor en los tratamientos SM que en los CM; por ejemplo, para el N (kg t⁻¹) fue el siguiente: OM-SM (121) > SM (85) > OM-CM (55) > CM (50). Los resultados mostraron un efecto sinérgico del uso de micorriza y la fertilización órgano-mineral en la extracción y requerimiento nutrimental del cultivo de chía.

Palabras clave: *Salvia hispanica*, chía, extracción nutrimental, fertilización órgano-mineral, micorriza.

SUMMARY

Chia (*Salvia hispanica* L.) is highly important as a nutraceutical crop; however, information on the extraction and nutrient requirement (NUTREQ) of the crop is scarce. The objective of this study was to ascertain extraction curves of macro-nutrients (N, P, K, Ca and Mg) and determine the NUTREQ of chia under organo-mineral fertilization and use of mycorrhiza. The experimental phase was conducted in Coatlinchán, State of Mexico under rainfed conditions. The experimental design was randomized complete blocks under a split-plot array. The whole plot contained the treatments (T) with mycorrhiza (CM) and without mycorrhiza (SM), while the split plot had the treatments with organo-mineral fertilization (OM) supplied with organic (60

%) and chemical (40 %) surces. The combination of these factors resulted in the following treatments: OM-CM, CM, OM-SM and SM. The extraction of macro-nutrients was determined in seven samplings through the crop cycle. At physiological maturity the traits dry matter, grain yield and harvest index were measured, which were higher in CM treatments compared to SM by 50.2, 8.8 and 44.6 %, respectively. The greatest macronutrient extraction occurred during the stages of maximum vegetative growth and grain filling, 85 and 127 days after planting, respectively. The order of N, P, K, Ca and Mg extraction was OM-SM > SM > OM-CM > CM, while the NUTREQ to produce a ton of grain was higher in MS treatments than in CM; for example, for N (kg t⁻¹) it was as follows: OM-SM (121) > SM (85) > OM-CM (55) > CM (50). Results showed a synergistic effect of mycorrhizal use and organo-mineral fertilization in the extraction and nutrient requirement of the chia crop.

Index words: *Salvia hispanica*, chia, mycorrhiza, nutrient extraction, organo-mineral fertilization.

INTRODUCCIÓN

En México, la chía (*Salvia hispanica* L.) fue el tercer cultivo más importante de la cultura azteca durante la época prehispánica, antes que el amaranto (*A. hypochondriacus* L.) y después que el maíz y frijol (Muñoz *et al.*, 2013) por el uso de sus semillas en el ámbito alimenticio (harina, aceite), medicinal, artístico y religioso (Cahill, 2003). La chía ha recuperado interés por sus propiedades nutracéuticas (Cahill, 2003), ya que es fuente de proteína (15 a 25 %), grasa (30 a 33 %), fibra (18 a 30 %), carbohidratos (90 a 93 %) minerales y vitaminas (Ixtaina *et al.*, 2008).

A pesar de su importancia nutracéutica, este cultivo presenta baja productividad; a nivel mundial, el rendimiento de grano va de 600 a 1200 kg ha⁻¹ (Capitani *et al.*, 2012) con un promedio de 357 kg ha⁻¹, menor que los 500 kg ha⁻¹ reportados en México (Peperkamp, 2015). Según Sosa-Baldivia *et al.* (2017), el cultivo de chía tiene potencial para producir más de 3 t ha⁻¹, pero su productividad es mucho menor debido a la escasa tecnología de producción, en particular por la fertilización inadecuada. En la literatura

se reportan estudios basados en el uso de dosis de fertilización (Ayerza y Coates, 2006; da Silva *et al.*, 2020 Sosa-Baldivia y Ruiz, 2018) que no están basadas en una curva de extracción o consumo de nutrientes del cultivo, donde se registre la demanda nutrimental para completar su ciclo de producción (Bertsch, 2009).

Actualmente se promueve la implementación de sistemas de producción alternativos a los convencionales, como los agroecológicos que, además del cuidado del ambiente, se enfocan en mantener el rendimiento y la viabilidad económica (Basso *et al.*, 2022); en estos sistemas se incluyen prácticas que reducen la cantidad de fertilizantes químicos mediante el uso de micorrizas y abonos orgánicos. Los biofertilizantes a base de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son conocidos porque incrementan la habilidad de las plantas para absorber los nutrimentos, e indirectamente, las protegen del ataque por patógenos (Requena *et al.*, 2001); además, permiten incrementar el rendimiento y son de bajo costo, lo que los hace factibles para su uso en la producción agrícola.

Considerando que en México no existe un programa de fertilización con base al REQNUT de la chía Pinta, se llevó a cabo el presente estudio con el objetivo de determinar las curvas de extracción nutrimental de los macronutrimentos N, P, K, Ca y Mg, y precisar el requerimiento nutrimental (REQNUT) bajo fertilización órgano-mineral y uso de micorriza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localidad de estudio

La investigación se llevó a cabo en 2020 en el Campo Experimental Valle de México del INIFAP, en Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, ubicado en las coordenadas 19° 26' 56" N y 98° 52' 20" O y altitud de 2250 msnm. El suelo presentó una textura franco arcillo arenosa, con pH 6.9, 2.1 % de materia orgánica y conductividad eléctrica de 0.13 dS m⁻¹. El contenido mineral del suelo y su interpretación, de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000), fue: N-NO₃ 35 mg kg⁻¹, considerado como medio, P 29 mg kg⁻¹ (medio), K 390 mg kg⁻¹ (moderado), Ca 1960 mg kg⁻¹ (medio), Mg 648 mg kg⁻¹ (moderadamente alto), Fe 13 mg kg⁻¹ (moderadamente alto), Cu 1 mg kg⁻¹ (medio), Zn 2 mg kg⁻¹ (medio) y Mn 38 mg kg⁻¹ (alto). De acuerdo con Bertsch (2009), los estudios de extracción nutrimental son válidos en una localidad, ya que permiten conocer la cantidad en kg de nutrimento extraído para producir una tonelada de grano por hectárea, y pueden servir como referencia en los programas de fertilización para otras localidades o regiones donde se produce chía, siempre que se utilice el mismo material vegetal; además,

normalmente este tipo de estudios son puntuales debido a su alto costo.

Material vegetal

Se utilizó la colecta de chía Pinta (*Salvia hispanica* L.) proveniente del Estado de Puebla, México. La semilla es de color pardo grisáceo con mancha de contornos muy irregulares de color castaño.

Diseño y unidad experimental

El experimento se estableció en condiciones de temporal, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas con tres repeticiones. La parcela grande tuvo los tratamientos con micorriza (CM) y sin micorriza (SM), y la parcela chica los tratamientos con la fertilización órgano-mineral (OM) y sin ésta. La combinación de los niveles de estos factores dio como resultado los tratamientos OM-CM, CM, OM-SM y SM (Testigo). La unidad experimental se formó de cuatro surcos de 0.8 m de ancho por 4 m de largo.

Aplicación de los tratamientos y variables respuesta

Para la siembra se usaron 4 kg ha⁻¹ de semilla. Por cada unidad experimental (12.8 m²), 5 g de semilla se combinaron con 2.5 kg de estiércol de caballo y 2.5 kg de vermicomposta. La siembra se realizó en forma mateada, en la parte baja del surco se colocó un puñado de la mezcla cada 30 cm, sin tapar con suelo. Un mes después se hizo un aclareo para dejar dos plantas por mata. En los tratamientos con micorriza, previo a la siembra, la semilla se inoculó con Micorriza INIFAP^{MR} a una dosis de 2 kg ha⁻¹. Para la fertilización órgano-mineral se usó la dosis de fertilización 60-00-00, las 60 unidades de N (kg ha⁻¹) se cubrieron con 40 % de fuente orgánica (lombricomposta) y 60 % química (urea). Se evaluaron las variables: rendimiento, producción de materia seca total e índice de cosecha.

Extracción nutrimental

La curva de extracción de los nutrimentos N, P, K, Ca y Mg se obtuvo en los tratamientos de estudio en las etapas siguientes:

- 1) Muestreo del material vegetal. Cada 15 días se cortaron tres plantas al azar por parcela al nivel del suelo de los tres surcos centrales, se separaron en hojas, tallos, inflorescencias y grano, se colocaron en bolsa de papel.

- 2) Determinación de materia seca (MS). Se determinó el peso fresco (g) por órgano de las tres plantas (P1) con una báscula, de éstas, se tomó una submuestra fresca de 200 g (P2), misma que fue colocada en una estufa de secado por convección (Binder ED400, Binder Inc., Nueva York, EUA) a 65 °C hasta alcanzar peso constante (P3). Con esta información se estimó la materia seca (MS) (Montes *et al.*, 2006) de cada órgano por planta:

$$MS (g) = [(P3 / P2) \times P1] / 3$$

- 3) Determinación de macronutrientos. La materia seca de las submuestras de 200 g fue triturada en un molino de acero inoxidable (Thomas Wiley Mill ED-5, Swedesboro, New Jersey, EUA) y de ésta se obtuvo una submuestra de 0.5 g, la cual se sometió a digestión húmeda con 5 mL de una mezcla de ácido sulfúrico y ácido perclórico 4:1 v/v y 3 mL de peróxido de hidrógeno 30 %, todo esto se colocó en una plancha de digestión a 200 °C. Una vez hecha la digestión, se aforó a 50 mL con agua destilada, y de ahí se realizaron las determinaciones de N por el método de Microkjeldahl, el P se cuantificó mediante el método del molibdo vanadato amarillo a 420 nm en un espectrofotómetro (Thermo Electron Scientific Genesys 10S, Thermo Fisher Scientific Waltham, Massachusetts, EUA), ambas determinaciones fueron atendiendo la metodología de Chapman y Pratt (1973), K por flamometría (Sherwood M410, Cambridge, Inglaterra) y Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica (GBC Avanta Techlab, Lima, Perú).
- 4) Cálculo de la extracción nutrimental. Por a) estructura vegetal y b) total (Pineda-Pineda *et al.*, 2008). La extracción de nutrimentos se estimó mediante las ecuaciones siguientes:

$$\text{Por estructura vegetal (g) = Concentración del nutrimento (\%) \times MS (g) / 100}$$

$$\text{Extracción total por muestreo de materia seca (kg ha}^{-1}\text{) = } \sum \text{Extracción de nutrimento por estructura vegetal (tallo, hoja, inflorescencia y grano) (g) \times 75,000 plantas / 1000}$$

Rendimiento, materia seca e índice de cosecha

En madurez fisiológica se determinó el rendimiento de grano (kg ha⁻¹), la materia seca (kg ha⁻¹) e índice de cosecha (IC), utilizando tres plantas por repetición; el promedio se multiplicó por una densidad de población de 75,000 plantas por ha.

$$IC (\%) = (MS \text{ de grano} / MS \text{ total aérea}) \times 100$$

Requerimiento nutrimental y eficiencia de uso de macronutrientos

Se obtuvieron el requerimiento nutrimental (REQNUT) y la eficiencia en el uso de cada macronutriente (EUN) (Castellanos *et al.*, 2000):

$$\text{REQNUT (kg del nutrimento por Mg de grano) = Extracción del nutrimento (kg ha}^{-1}\text{) / RMA (Mg ha}^{-1}\text{)}$$

Donde RMA (kg ha⁻¹) es el rendimiento máximo alcanzable; para este valor se consideraron los obtenidos en los tratamientos.

$$\text{EUN = Rendimiento de grano (kg ha}^{-1}\text{) / nutrimento total absorbido (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), pruebas de distribución normal y homocedasticidad con el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2013). El modelo estadístico empleado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_k + A_i + \epsilon_{ik} + B_j + AB_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde Y_{ijk} : valor de la AB correspondiente al bloque k del nivel i de A y nivel j de B, μ : media poblacional, β_k : efecto del bloque k en β , A_i : efecto de nivel i en A, B_j : efecto del nivel j en B, AB_{ij} : interacción AB correspondiente al nivel de i de A y nivel j de B, ϵ_{ik} : error experimental correspondiente al bloque k del nivel i en A en la parcela grande, ϵ_{ijk} : error experimental correspondiente al bloque k del nivel i de A y nivel j de B en la parcela chica, i: 1, 2, ... a número de niveles de A, j 1, 2, ... b número de niveles de B; k: 1, 2, ...r número de repeticiones de A.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento, materia seca e índice de cosecha

Hubo efecto altamente significativo para la variable rendimiento con el uso de micorriza, y efecto significativo para fuente de fertilización. Para índice de cosecha, hubo efecto significativo con el uso de micorriza (Cuadro 1). Cabe mencionar que las variables evaluadas presentaron distribución normal y varianzas homogéneas.

Los resultados mostraron un efecto estadísticamente significativo en la chíá inoculada con micorriza con respecto a la no inoculada para rendimiento de grano e índice de cosecha, con diferencias del orden del 50.2 y 44.6 %, respectivamente (Cuadro 2). El incremento en el

rendimiento con el uso de micorriza, se explica porque los HMA desarrollan una asociación simbiótica con las raíces de las plantas; los HMA sobreviven con productos de la fotosíntesis de las plantas, mientras que en las raíces se desarrollan estructuras como esporas, arbusculos e hifas, que mejoran la absorción de nutrientes y agua, lo que promueve el crecimiento vegetal e incrementa el rendimiento (Mitra *et al.*, 2019). En maíz inoculado con un consorcio de HMA nativo la MS acumulada a los 70 días después de la siembra aumentó en 11 % en relación con el maíz sin inocular (López-Castillo *et al.*, 2024). En relación con el IC, los valores de los tratamientos inoculados CM estuvieron entre los reportados por Sosa-Baldivia *et al.* (2017) para la misma variedad (29 a 31 %), lo que puso de manifiesto el efecto de la micorriza en la expresión del potencial productivo de la variedad.

Con respecto al efecto de la fertilización órgano-mineral más uso de micorriza en el cultivo de chía (Cuadro 3) solo hubo diferencias estadísticas para el rendimiento de grano a favor del tratamiento OM-CM. Moghith *et al.* (2021), al inocular la semilla de chía con esporas de HMA e incorporar composta en dosis de 23 t ha⁻¹ en la preparación del suelo y fertilizar con fosfato monoamónico, encontraron que se mejoró el crecimiento y se incrementó el rendimiento de semilla de chía, e incluso la composición química del aceite.

Ashour *et al.* (2021) también encontraron un incremento significativo en el rendimiento de chía con el uso de HMA y la aplicación foliar de 50 ppm de ácido naftalenacético (ANA) con respecto a solo el uso de la aplicación foliar de ANA. Estos resultados corroboran que ambos, micorriza y fertilización órgano-mineral, solas o combinadas favorecen la producción de chía debido a: i) la adición de materia orgánica mejora la fertilidad química, física y biológica del suelo (Kalantari *et al.*, 2010); ii) la fertilización química aumenta la disponibilidad nutricional para las plantas; y iii) el uso de micorrizas mejora la absorción de agua y nutrientes del suelo.

Acumulación de materia seca aérea por estructura vegetal

En las Figuras 1A y B se presenta la distribución relativa de la MS por estructura vegetativa en relación con la MS total: A) durante el desarrollo del cultivo (promedio de los tratamientos del estudio) y B) en la etapa de madurez fisiológica (de cada tratamiento). Las etapas fenológicas que se presentaron en el ciclo del cultivo fueron las siguientes: vegetativa (0 a 85 dds), floración (99 a 113 dds), llenado de grano (127 dds) y madurez fisiológica (141 dds). Durante el ciclo de cultivo predominó la acumulación de MS en los tallos (56 a 64 %) y en las hojas (12 a 44 %),

Cuadro 1. Cuadrados medios de rendimiento, materia seca e índice de cosecha en el cultivo de chía.

Fuente de variación	GL	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Materia seca (kg ha ⁻¹)	Índice de cosecha (%)
Micorriza (M)	1	2,000,335 **	817,238	469.37*
Bloques	2	4327	1,515,648	29.56
Fertilización (F)	1	438,127*	1,822,681	15.03
M × F	1	514,647	5,138,996	13.71
Error	4	50,553	3,733,661	57.21
Total	9			
CV (%)		18.46	33.9	34.65

*, **: significativo al 0.05 y 0.01, respectivamente. GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación. M × F: interacción micorrizas x fertilización química.

Cuadro 2. Comparación de medias de variables de rendimiento con el uso de micorriza en el cultivo de chía.

Tratamiento	Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	Materia seca (kg ha ⁻¹)	Índice de cosecha (%)
Sin micorriza	809.65 b	5437.70 a	15.57 b
Con micorriza	1626.21 a	5959.60 a	28.08 a
DSH (0.05)	141.97	2746.50	8.88

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, P ≤ 0.05). DSH: Diferencia significativa honesta.

Cuadro 3. Comparación de medias de variables de rendimiento con el uso de micorriza y fertilización órgano-mineral en el cultivo de chíá.

Tratamiento	Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	Materia seca (kg ha ⁻¹)	Índice de cosecha (%)
OM-CM	2020.38 a	7003.70 a	30.27 a
CM	1228.04 b	4915.50 a	25.89 a
SM	825.66 b	5702.30 a	15.62 a
OM-SM	793.63 b	5173.00 a	15.62 a
DSH (0.05)	429.00	4117.1	15.47

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). OM-CM: órgano-mineral con micorriza, CM: con micorriza, SM: sin micorriza, OM-SM: órgano-mineral sin micorriza, DSH: diferencia significativa honesta.

seguidos de las inflorescencias (12 a 21 %) y el grano (11 %). En el periodo entre el máximo crecimiento vegetativo y la madurez fisiológica los tallos y las hojas pasaron de 64 a 56 % y de 36 a 12 %, respectivamente, lo que indicó una removilización de fotoasimilados de los tallos (8 %) y de las hojas (24 %) hacia las inflorescencias y grano. También hubo disminución de la MS en hojas, como consecuencia de un incremento de la senescencia de las hojas a partir del inicio de la floración (Figura 1 A). En cereales, se sabe que la translocación de asimilados de los órganos vegetativos que ocurre antes de la floración constituye una fuente importante de asimilados para el grano (Royo *et al.*, 1999). En la etapa de madurez fisiológica, la acumulación de la MS en los distintos órganos, de mayor a menor, fue la siguiente: tallos (49 a 62 %) > inflorescencia (17 a 19 %) > grano (13 a 20%) > hojas (8 a 12 %). Sobresale la mayor acumulación de la MS en el grano y en la espiga, en el tratamiento OM-CM con 25 %, seguido de 19, 16 y 15 % de los tratamientos CM, OM-SM y SM, respectivamente (Figura 1 B).

Dinámica de extracción nutrimental

Las curvas de extracción nutrimental de N, P, K, Ca y Mg mostraron que las etapas de mayor extracción fueron durante el máximo crecimiento vegetativo (85 dds) previo a la floración y el llenado del grano (127 dds) (Figura 2 A, B, C, D y E). El tratamiento OM-CM fue el de mayor extracción de macronutrientes, seguido de OM-SM, CM y SM, lo que confirma el beneficio del uso de micorriza con la fertilización órgano-mineral. Este efecto favorable de la extracción de los macronutrientes en los tratamientos con micorriza se puede explicar por la relación simbiótica entre las raíces y los HMA que sobreviven con productos de la fotosíntesis de las plantas, mientras que en las raíces se desarrollan estructuras como esporas, arbuscúlos e hifas que mejoran la absorción de nutrientes y el agua (Mitra *et al.*, 2019). La absorción de nutrientes por los HMA

incluye a los iones fosfato inmóviles del suelo, así como N, S, K, Ca, Fe, Cu y Zn (Smith *et al.*, 2011). Al respecto, Ashour *et al.* (2021) mencionaron que la absorción y acumulación de N, P, K, Ca y Mg en las semillas de chíá, de plantas inoculadas con HMA fueron significativamente más altos, en la mayoría de los casos, en comparación con las plantas no inoculadas. En el estudio de López-Castillo *et al.* (2024), en maíz inoculado con un consorcio de HMA, también se encontró un efecto positivo en la concentración de N, P y K sobre la MS acumulada a los 70 días después de la siembra en relación con el testigo sin inocular. Por su parte, Alloush y Clark (2001) indicaron que las fuentes de nutrición orgánicas como el estiércol, la composta y los residuos de cultivos, no suprimen los HMA; por el contrario, pueden estimularlos; sin embargo, según Jordan *et al.* (2000), el uso excesivo de enmiendas orgánicas, especialmente las ricas en P, como la gallinaza, puede afectar negativamente.

En lo que respecta a la distribución relativa promedio de las extracciones de N por estructura vegetal en relación con la extracción total, durante el ciclo del cultivo (Figura 3A), se presentó en el orden siguiente: hojas (15 a 72 %) > tallos (12 a 33 %) > inflorescencia (4 a 32 %) y grano (44 %). Al final del ciclo del cultivo se acumuló en el orden siguiente: grano (41 %) > inflorescencia (32 %) > hojas (15 %) > tallo (12 %). La translocación del N hacia la inflorescencia y el grano, de la etapa vegetativa a la madurez fisiológica, hacia los frutos (grano) se presentó en mayor proporción en las hojas (52 %) que en los tallos (21 %). Los resultados son congruentes con el hecho de que, durante la senescencia de las hojas, la mayoría del N es translocado al grano, siendo el principal suministro para la producción de proteína de esta estructura (Mason, 2001) y la removilización de N antes de la floración, desde los órganos vegetativos puede representar del 50 al 100 % del N almacenado en el grano (Kichey *et al.*, 2007), dependiendo de la especie, genotipo y condiciones de crecimiento (Fang *et al.*, 2024).

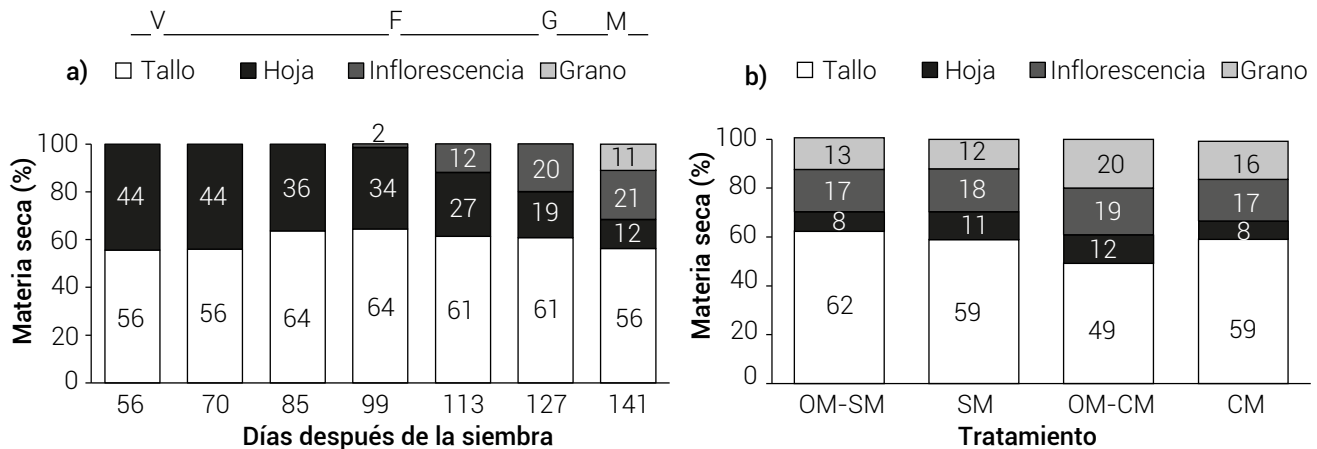


Figura 1. Distribución porcentual relativa de la materia seca por estructura vegetativa del cultivo de chía: A) durante el desarrollo el cultivo, B) en la etapa de madurez fisiológica entre tratamientos. Etapas fenológicas: V: vegetativa, F: floración, G: llenado de grano, M: madurez fisiológica.

En cuanto al P (Figura 3B), en la etapa de mayor crecimiento vegetativo, los tallos tuvieron una proporción de 56 % mientras que las hojas 44 %. Al final del ciclo del cultivo, este elemento se acumuló en el orden siguiente: grano (40 %) e inflorescencia (30 %) > tallos (22 %) > hojas (8 %). Similar a la dinámica del N, en P, se presenta la translocación de los tallos y hojas hacia la inflorescencia y grano a partir de la floración y llega a sumar hasta un 70 %. De acuerdo con Fageria y Jones (2010), el P desempeña un papel importante en las reacciones de transferencia de energía y metabolismo de las proteínas, así como en la división celular durante la floración y fecundación (Hawkesford *et al.*, 2012).

El K, durante el ciclo del cultivo se acumuló principalmente en los tallos (68 a 73 %), seguido de las hojas (7 a 32 %), inflorescencia (2 a 16 %) y grano (8 %). Al final del ciclo del cultivo, este elemento se acumuló en el siguiente orden decreciente: tallo > inflorescencia > grano > hojas (Figura 3C). El K es importante en las funciones relacionadas con la activación enzimática, neutralización de cargas negativas, en el mantenimiento de la turgencia de la planta, y por lo tanto, en el crecimiento expansivo (Hawkesford *et al.*, 2012); grandes cantidades de este elemento son transportadas en la savia del xilema y se distribuyen hacia los tallos y hojas (Ahmad y Maathuis, 2014).

Durante el desarrollo del cultivo, las estructuras que presentaron mayores proporciones de Ca fueron los tallos (43 a 54 %) y las hojas (22 a 57 %), al final del ciclo se acumuló en el orden siguiente: tallos (52 %) > hojas (22 %) > inflorescencia (15 %) > grano (11 %) (Figura 3D). La dinámica del Ca se explica por su movilidad alta en el flujo

de la transpiración de la planta, que promueve el movimiento ascendente de la savia vía xilema; así, los órganos de mayor transpiración, como las hojas y tallos, presentan niveles de concentración de Ca mayores que en los frutos y estructuras de almacenamiento que transpiran menos (Taiz y Zeiger, 2002). De acuerdo con los mismos autores, el Ca presenta limitada movilidad vía floema por su baja concentración en los tubos cribosos y por la facilidad de formar compuestos insolubles con otros compuestos orgánicos, lo que dificulta su movimiento de las hojas a las estructuras reproductivas.

La acumulación del Mg a lo largo del desarrollo del cultivo fue mayor en las hojas (23 a 65 %) que en los tallos, inflorescencias y grano (Figuras 3E). Según Mengel y Kirkby (2001), y Taiz y Zeiger (2002), la mayor acumulación del Mg se presenta en las hojas, puesto que es donde se sintetiza gran cantidad de clorofila y otros pigmentos. Según Taiz y Zeiger (2002), el Mg es un elemento móvil, se distribuye vía xilema desde las raíces a las hojas, mientras que por el floema se redistribuye de las hojas senescentes hacia los órganos reproductivos.

Extracción y requerimiento nutricional de N, P, K, Ca y Mg bajo fertilización y uso de micorriza

En el Cuadro 4 se muestran tanto las extracciones como los requerimientos nutricionales de los tratamientos CM y SM para producir una tonelada de grano en el cultivo de chía. Las extracciones de los macronutrientes en estudio mostraron el siguiente en orden de mayor a menor: OM-CM > OM-SM > SM > CM.

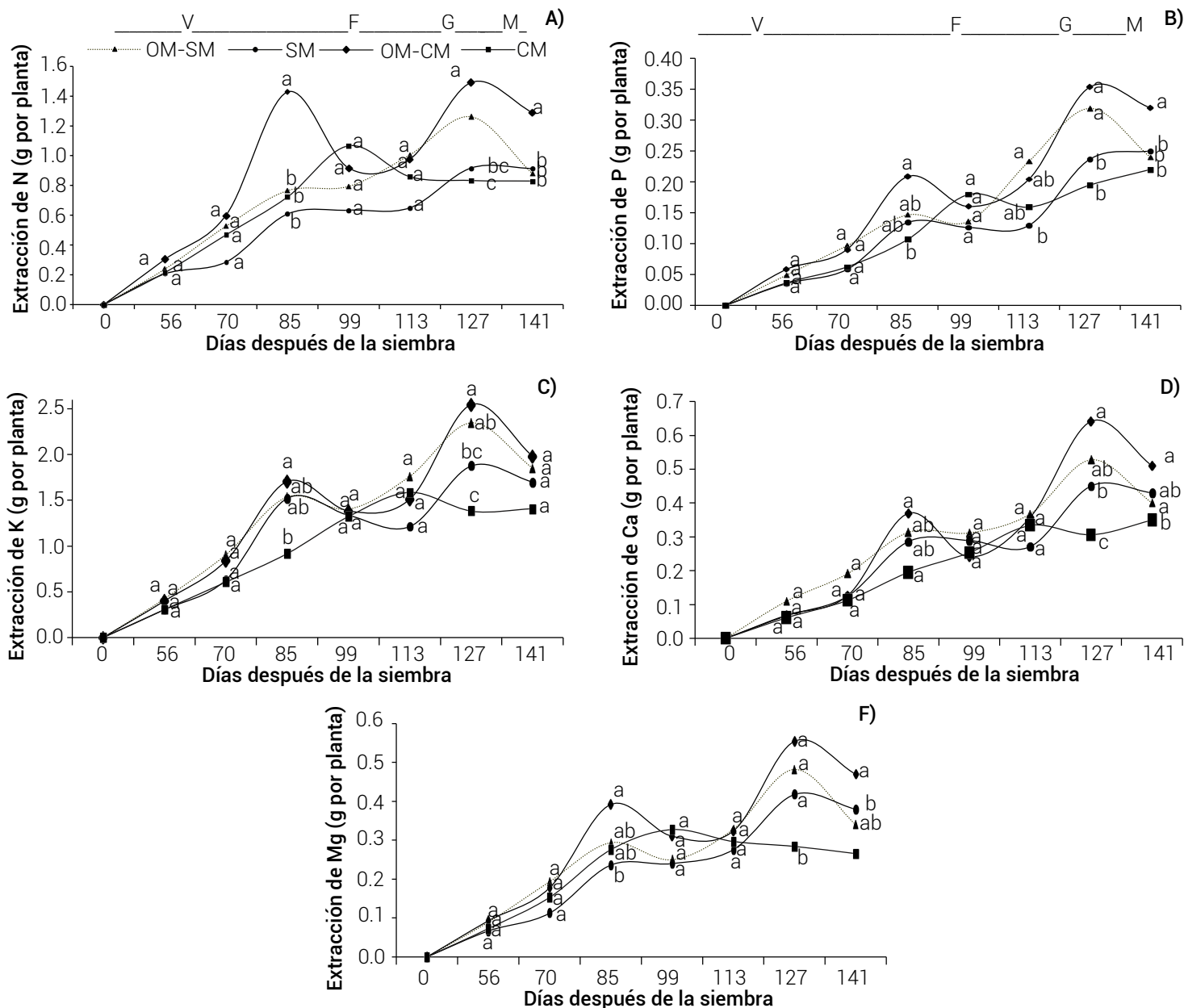


Figura 2. Curvas de extracción nutrimental de A) N, B) P, C) K, D) Ca, E) Mg de los tratamientos del estudio en chí, durante el ciclo de cultivo. Etapas fenológicas: V: vegetativa, F: floración, G: llenado de grano, M: madurez fisiológica.

En relación con el REQNUT para producir una tonelada de grano, este fue mayor en los tratamientos SM que en los CM. Lo anterior reflejó una mejor eficiencia en la extracción de nutrientes con el uso de micorizas; por ejemplo, para el caso del N, el REQNUT de los tratamientos CM y OM-CM, disminuyó en 41 y 35 %, respectivamente, con respecto al tratamiento SM. Para el caso del N, Sosa-Baldivia et al. (2017) reportaron una eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) de 19.9 kg de grano por kg nitrógeno en chí pinta bajo condiciones de riego; en el presente estudio, bajo condiciones de temporal, en el tratamiento OM-CM y CM por cada kg de N extraído

se obtuvieron 18 y 20 kg de grano de chí, respectivamente. La diferencia de la EUN de chí entre los tratamientos de OM-CM y SM, fue de 31, 4, 22, y 18 kg de grano por cada kg de P, K, Ca y Mg aplicado, respectivamente, lo que indicó una eficiencia en la absorción de estos macronutrientes con el uso de la semilla micorrizada y fertilización órgano-mineral. Algunos estudios han registrado que con el uso de HMA aplicados con un 50 % de la dosis recomendada de N y P se incrementó el crecimiento vegetativo del hinojo (*Foeniculum vulgare* Miller) comparado con los tratamientos de fertilización química (Dadkhah, 2012).

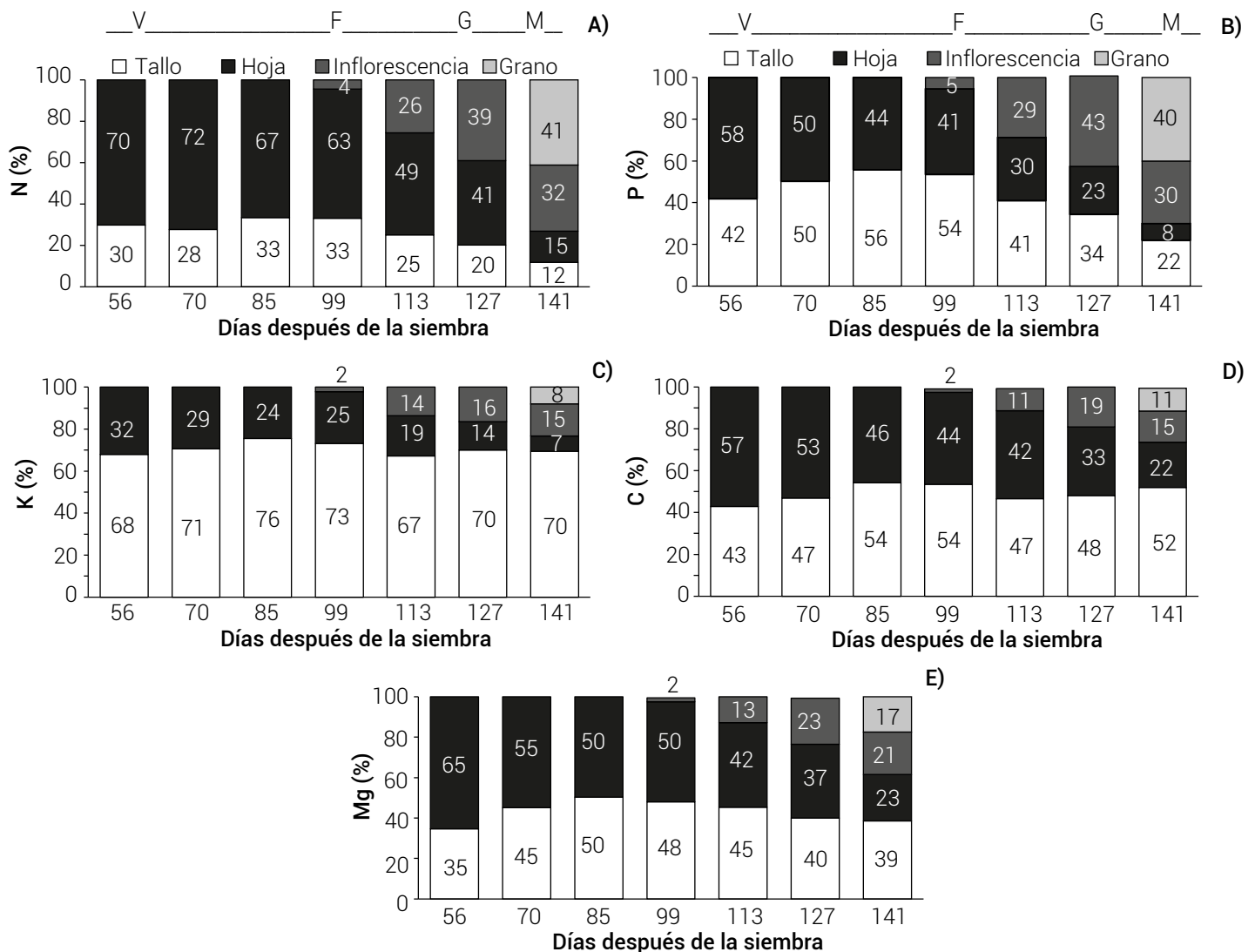


Figura 3. Distribución porcentual promedio de extracciones: A) N, B) P, C) K, D) Ca, E) Mg por estructura vegetativa de chíá, durante el ciclo de cultivo. Etapas fenológicas: V: vegetativa, F: floración, G: llenado de grano, M: madurez fisiológica.

CONCLUSIONES

El cultivo de chíá presenta mayor extracción de N, P, K, Ca y Mg en etapa de máximo crecimiento vegetativo y durante llenado de grano. En madurez fisiológica, en el grano se acumula más del 40 % de N y de P, en el tallo se acumula hasta 70 % de K, y en tallos y hojas 70 % de Mg y Ca. Las extracciones de N, P, K, Ca y Mg son mayores con fertilización órgano-mineral, con y sin micorriza. El requerimiento nutricional para producir una tonelada de grano fue mayor en los tratamientos sin micorriza que en los micorrizados. Existe un efecto sinérgico de la micorriza y la fertilización órgano-mineral en la extracción y requerimiento de macronutrientes en el cultivo de chíá.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad I. and F. J. M. Maathuis (2014) Cellular and tissue distribution of potassium: physiological relevance, mechanisms and regulation. *Journal of Plant Physiology* 171:708-714, <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.10.016>
- Alloush G. A. and R. B. Clark (2001) Maize response to phosphate rock and arbuscular mycorrhizal fungi in acidic soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32:231-254, <https://doi.org/10.1081/CSS-100103004>
- Ashour H. A., S. E. A. Esmail and A. B. El-Attar (2021) Responses of different quality parameters of chia to arbuscular mycorrhiza and plant growth regulator. *Advances in Horticultural Science* 35:139150, <https://doi.org/10.36253/ahsc-10641>
- Ayerza R. y W. Coates (2006) Chíá: Redescubriendo un Olvidado Alimento de los Aztecas. Editorial del Nuevo Extremo. Buenos Aires, Argentina. 232 p.

Cuadro 4. Extracción y requerimiento nutrimental de N, P, K, Ca y Mg bajo fertilización con y sin micorriza y con fertilización órgano-mineral en el cultivo de chíá.

Nut	Tratamiento	RG		Extracción		REQNUT (kg t ⁻¹)	EUN (kg kg ⁻¹)
		Pl (g)	(t ha ⁻¹)	Pl (g)	(kg ha ⁻¹)		
N	OM-CM	23.1	2.02	1.49	111.8	55.3	18
	OM-SM	10.8	0.79	1.28	95.9	120.9	8
	SM	11.2	0.83	0.94	70.2	85.1	12
	CM	12.4	1.23	0.83	62.0	50.4	20
P	OM-CM	23.1	2.02	0.35	26.5	13.1	76
	OM-SM	10.8	0.79	0.33	24.6	31.0	32
	SM	11.2	0.83	0.24	18.2	22.0	45
	CM	12.4	1.23	0.19	14.5	11.8	85
K	OM-CM	23.1	2.02	2.58	193.5	95.8	10
	OM-SM	10.8	0.79	2.39	179.0	225.5	4
	SM	11.2	0.83	1.85	138.6	167.8	6
	CM	12.4	1.23	1.38	103.5	84.3	12
Mg	OM-CM	23.1	2.02	0.56	41.8	20.7	48
	OM-SM	10.8	0.79	0.49	36.9	46.5	21
	SM	11.2	0.83	0.42	31.8	38.5	26
	CM	12.4	1.23	0.28	21.2	17.3	58
Ca	OM-CM	23.1	2.02	0.64	48.0	23.8	42
	OM-SM	10.8	0.79	0.53	39.5	49.7	20
	SM	11.2	0.83	0.45	34.0	41.2	24
	CM	12.4	1.23	0.31	23.0	18.7	53

Nut: nutrimento, Pl: planta, RG: rendimiento de grano, REQNUT: requerimiento nutrimental (kg por tonelada de grano), EUN: eficiencia de uso del nutrimento.

Basso N. C. F., C. M. Babeski, L. B. Heuser, N. G. Zardin, W. J. A. Bandeira, I. R. Carvalho, ... and J. A. G. da Silva (2022) The production without pesticides in the control of oat foliar diseases: resistance inducer by silicon and potassium and escape zone. *Research, Society and Development* 11:e47611831191, <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31191>

Bertsch F. (2009) Absorción de Nutrientes por los Cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 307 p.

Cahill J. P. (2003) Ethnobotany of chia, *Salvia hispanica* L. (Lamiaceae). *Economic Botany* 57:604-618, [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2003\)057\[0604:EOCSHL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2003)057[0604:EOCSHL]2.0.CO;2)

Capitani M. I., V. Spotorno, S. M. Nolasco and M. C. Tomás (2012) Physicochemical and functional characterization of by-products from chia (*Salvia hispanica* L.) seeds of Argentina. *LWT-Food Science and Technology* 45:94-02, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.07.012>

Castellanos J. Z., J. X. Uvalle B. y A. Aguilar S. (2000) Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª. edición. Intagri. Celaya, Guanajuato, México. 210 p.

Chapman H. D. y P. E. Pratt (1973) Método de Análisis de Suelos, Plantas y Agua. Trad. del inglés por A. Contin. Ed. Trillas. México, D. F. 195 p.

da Silva T. R. B., S. C. de Melo, A. B. Nascimento, L. Ambrosano, J. C. Bordin, C. Z. Alves, ... and G. D. da Silva (2020) Response of chia (*Salvia hispanica*) to sowing times and phosphorus rates over two crop cycles. *Heliyon* 6:e05051, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05051>

Dadkhah A. (2012) Effect of chemicals and biofertilizers on yield, growth parameters and essential oil contents of funnel (*Foeniculum vulgare* Miller.). *Journal of Medicinal Plants and By-Products* 1:101-105, <https://doi.org/10.22092/jmpb.2012.108473>

- Fageria N. K., V. C. Baligar and C. A. Jones (2010) Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 586 p, <https://doi.org/10.1201/b10160>
- Fang L., P. C. Struik, C. Girousse, X. Yin and P. Martre (2024) Source–sink relationships during grain filling in wheat in response to various temperature, water deficit, and nitrogen deficit regimes. *Journal of Experimental Botany* 75:6563–6578, <https://doi.org/10.1093/jxb/erae310>
- Hawkesford M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I. S. Møller and P. White (2012) Functions of macronutrients. In: Mineral Nutrition of Higher Plants. Third edition. P. Marschner (ed.). Academic Press. New York, USA. pp:135–189, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Ixtaina V. Y., S. M. Nolasco and M. C. Tomás (2008) Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Industrial Crop and Products* 28:286–293, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.03.009>
- Jordan N. R., J. Zhang and S. Huerd (2000) Arbuscular-mycorrhizal fungi, potential roles in weed management. *Weed Research* 40:397–410, <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2000.00207.x>
- Kalantari S., S. Hatami, M. M. Ardalan, H. A. Alikhani and M. Shorafa (2010) The effect of compost and vermicompost of yard leaf manure on growth of corn. *African Journal of Agricultural Research* 5:1317–1323, <https://doi.org/10.5897/AJAR.9000694>
- Kichey T., B. Hirel, E. Heumez, F. Dubois and J. Le Gouis (2007) In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Research* 102:22–32, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.01.002>
- López-Castillo N. G., L. A. Serrano-López, J. O. Armenta-Ayala, L. L. Cázarez-Flores, J. E. Zazueta-López, A. González-Balcázar, ... and A. Angulo-Castro (2024) Infectivity and effectiveness of an arbuscular mycorrhizal fungi native inoculum on the growth and absorption of macroelements in maize (*Zea mays* L.) plants. *Agro Productividad* 17:205–213, <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i11.3137>
- Mason M. (2001) Nitrogen. In: Soil Guide. A Handbook for Understanding and Managing Agricultural Soils. Bulletin No. 4343. G. A. Moore (ed.). Department of Agriculture Western Australia. Perth, Australia. pp:164–167.
- Mengel K., E. A. Kirkby, H. Kosegarten and T. Appel (2001) Principles of Plant Nutrition. 5th edition. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 849 p, <https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2>
- Mitra D., N. Uniyal, P. Panneerselvam, A. Senapati, A. N. Ganeshamurthy, Vikas and D. Jain (2019) Role of mycorrhiza and its associated bacteria on plant growth promotion and nutrient management in sustainable agriculture. *International Journal of Life Sciences and Applied Sciences* 1:1–10.
- Moghith W. A. S. M. Youssef, M. A. A. El-Wahab, Y. F. Y. Mohamed and E. M. A. ElGhait (2021) Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and some phosphorus sources on growth, seeds yield, chemical compositions, oil productivity and fixed oil constituents of chia (*Salvia hispanica* L.) Plant. *Annals of Agricultural Science, Moshthohor* 59:541–562, <https://doi.org/10.21608/assjm.2021.195345>
- Montes J. M., H. F. Utz, W. Schipprack, B. Kusterer, J. Muminovic, C. Paul and A. E. Melchinger (2006) Near-infrared spectroscopy on combine harvesters to measure maize grain dry matter content and quality parameters. *Plant Breeding* 125:591–595, <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2006.01298.x>
- Muñoz L. A., A. Cobos, O. Diaz and J. M. Aguilera (2013) Chia seed (*Salvia hispanica*): an ancient grain and a new functional food. *Food Reviews International* 29:394–408, <https://doi.org/10.1080/87559129.2013.818014>
- Peperkamp M. (2015) CBI Tailored Intelligence: chia from Bolivia, 'a modern super seed in a classic pork cycle? CBI Ministry of Foreign Affairs. The Hague, Netherlands. 16 p.
- Pineda-Pineda J., E. Avitia-García, A. M. Castillo-González, T. Corona-Torres, L. A. Valdez-Aguilar y J. Gómez-Hernández (2008) Extracción de macronutrientes en frambueso rojo. *Terra Latinoamericana* 26:333–340.
- Requena N., E. Pérez-Solís, C. Azcón-Aguilar, P. Jeffries and J. M. Barea (2001) Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems *Applied and Environmental Microbiology* 67:495–498, <https://doi.org/10.1128/AEM.67.2.495-498.2001>
- Royo C., J. Voltas and I. Romagosa (1999) Remobilization of pre-anthesis assimilates to the grain for grain only and dual purpose (forage and grain) triticale. *Agronomy Journal* 91:312–316, <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100020021x>
- SAS Institute (2013) The SAS system for Windows. Release 9.4 SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Smith S. E., I. Jakobsen, M. Grønlund and F. A. Smith (2011) Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology* 156:1050–1057, <https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>
- Sosa-Baldivia A. and G. Ruiz I. (2018) Inadequate nitrogen fertilization: main cause of the low seed yield on the chia crop (*Salvia hispanica* L.). *Biomedical* 2:2225–2256, <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2018.02.000670>
- Sosa-Baldivia A., G. Ruíz-Ibarra, J. Rana, G. Gordillo-Sobrino, H. West, M. Sharma, ... y R. R. Robles-de la Torre (2017) Respuesta de cuatro cultivares de chíá (*Salvia hispanica* L.) a la fertilización nitrogenada en el Petacal, Jalisco, México. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 28:8–13, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29305.06245>
- Taiz L. and E. Zeiger (2002) Plant Physiology. Third edition. Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts, USA. 690 p.