



**Centro de Investigación en Alimentación y
Desarrollo, A.C.**

**BIOFORTIFICACIÓN CON NANOFERTILIZANTES DE
MAGNESIO EN FRIJOL: CRECIMIENTO, PRODUCCIÓN Y
CALIDAD NUTRICIONAL**

Por:

Ing. Alondra Salcido Martínez

TESIS APROBADA POR LA

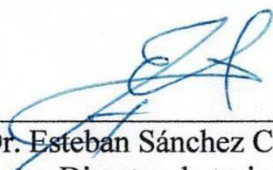
COORDINACIÓN DE TECNOLOGÍA DE PRODUCTOS HORTOFRUTÍCOLAS Y
LÁCTEOS

Como requisito parcial para obtener el grado de


MAESTRA EN CIENCIAS

APROBACIÓN


Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de Alondra Salcido Martínez la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Ciencias.




Dr. Esteban Sánchez Chávez
Director de tesis



Dra. Sandra Pérez Álvarez
Co-Directora de tesis



Dra. Celia Chávez Mendoza
Integrante del comité de tesis



Dr. Ezequiel Muñoz Márquez
Integrante del comité de tesis

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en la tesis "Biofortificación con Nanofertilizantes de Magnesio en Frijol: Crecimiento, Producción y Calidad Nutricional" es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial de la autora Alondra Salcido Martínez, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita de quien ocupe la titularidad de la Dirección General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del director(a) de tesis.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.
Coordinación de Programas Académicos

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'G. Cairé Juvera', written over a horizontal line.

Dra. Graciela Cairé Juvera
Directora General

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado en este tiempo bajo el programa nacional de becas de posgrado con la clave CVU No. 1150977.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD, A.C.) por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de formarme en mis estudios de posgrado, así como facilitar instalaciones de calidad para el desarrollo tanto del proyecto como de lo académico y finalmente, pero igual de importante, por el apoyo a través de sus docentes para formarme como investigadora.

Al Dr. Esteban Sánchez Chávez, mi director de tesis, por ser pilar en esta investigación, por brindarme sus enseñanzas, su paciencia, pero sobre todo por su confianza brindada al permitirme ser parte de su equipo. Mi respeto y admiración siempre.

A mi comité de tesis integrado por la Dra. Sandra Pérez Álvarez, la Dra. Celia Chávez Mendoza y el M.C. Ezequiel Muñoz Márquez, por siempre estar al pendiente de mi formación, brindando siempre consejos para mejorar y no dejarme sola en cada etapa de la maestría.

A cada uno de los docentes que, a lo largo del camino, tomaron parte en mi formación de posgrado; agradezco por sus enseñanzas que me ayudaron a enriquecer mi proyecto, pero sobre todo como persona. Así mismo, a todo el personal y alumnado del CIAD Unidad Delicias por hacer mi travesía más amena, y compartir conmigo momentos especiales.

Al equipo de trabajo del Laboratorio de Fisiología y Nutrición Vegetal, que más que mis compañeros de posgrado se convirtieron en mis buenos amigos; agradezco de forma infinita su ayuda y colaboración para con mi proyecto, gracias por nunca dejarme sola y apoyarme más allá de lo laboral.

A Raúl, por creer desde el principio en mí y en mis capacidades aun cuando yo misma dudo de

ellas, por nunca dejarme sola, alentarme a ser mejor, a no estresarme, a vivir la vida y pese a la distancia estar al pie del cañón, pero sobre todo por tu amor infinito.

También agradezco a mis amigas por siempre estar y no dejarme sola, adoptarme en su hogar, motivarme.

Y, sobre todo, a Dios, a quien le debo y agradezco, por tanto.

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres, Nora y Oscar, por ser el motor de mi vida, por su amor, apoyo incondicional, pero sobre todo por creer en mí.

A mis hermanos, Aileen y Eduardo, por hacer más bonita mi vida.

A mis abuelos Juanita y Enrique, espero sean unos abuelitos muy orgullosos.

A mis tíos Rafa † y Caro, gracias por estar en mi vida.

A Raúl, por su infinito amor, apoyo y paciencia en estos dos años.

CONTENIDO

APROBACIÓN	2
DECLARACIÓN INSTITUCIONAL	3
AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	6
CONTENIDO	7
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE CUADROS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. ANTECEDENTES	16
2.1. Importancia del Magnesio en la Planta.....	16
2.1.1. Fisiología del Magnesio en la Planta.....	16
2.1.2. Deficiencia y Toxicidad del Magnesio en la Planta.....	17
2.2. Importancia del Magnesio en la Salud Pública	18
2.3. Biofortificación como Alternativa para Mejorar la Calidad Nutricional de los Cultivos	19
2.3.1. Sulfato de Magnesio	20
2.4. Nanotecnología.....	21
2.4.1. Nanofertilizantes	21
2.5. Cultivo del Frijol	22
2.5.1. Biofortificación en Frijol.....	22
3. HIPÓTESIS	23
4. OBJETIVOS	24
4.1. Objetivo General.....	24
4.2. Objetivos Específicos	24
5. MATERIALES Y MÉTODOS	25
5.1. Manejo del Cultivo	25
5.2. Diseño experimental y tratamientos	25
5.3. Caracterización de fuentes de magnesio	27
5.3.1. Nanofertilizante de Mg.....	27
5.3.2. Sulfato de Mg.....	27
5.4. Muestreo Vegetal.....	27
5.5. Análisis Vegetal.....	28
5.5.1. Biomasa Total, Foliar, Raíz y Frutos	28
5.5.2. Rendimiento.....	28

CONTENIDO (continuación)

5.5.3. Actividad Nitrato Reductasa “ <i>in vivo</i> ”	29
5.5.4. Pigmentos Fotosintéticos	29
5.5.5. Índice de Clorofila.....	30
5.5.6. Actividad Fotosintética.....	30
5.5.7. Cuantificación de Aminoácidos Solubles.....	31
5.5.8. Determinación de Proteínas Solubles.....	31
5.5.9. Determinación de Contenido de Magnesio.....	32
5.5.10. Cálculo de Parámetros de Eficiencia de Mg (MgUE).....	32
5.5.11. Patrón de Distribución de Mg en Plantas de Frijol	33
5.5.12. Grado de Biofortificación de Mg en Frutos de Frijol.....	33
5.5.13. Determinación de la Calidad Nutricional en Frutos de Frijol.....	34
5.6. Análisis Estadístico.....	35
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
6.1. Biomasa Total, Foliar, Raíz y Frutos.....	36
6.2. Rendimiento	38
6.3. Actividad Nitrato Reductasa “ <i>in vivo</i> ”	39
6.4. Pigmentos Fotosintéticos	40
6.5. Índice de Clorofila	43
6.6. Actividad Fotosintética	44
6.7. Aminoácidos y Proteínas Solubles	45
6.8. Concentración de Mg en Hoja, Fruto, Raíz, Tallo y Total.....	46
6.9. Eficiencia de Uso de Mg (MgUE).....	48
6.10. Patrón de Distribución de Mg en Plantas de Frijol.....	50
6.11. Grado de Biofortificación de Mg en Frutos de Frijol	53
6.12. Calidad Nutricional en Frutos de Frijol	54
7. CONCLUSIONES.....	58
8. RECOMENDACIONES	59
9. REFERENCIAS	60
10. ANEXOS.....	69
10.1. Correlación Entre las Distintas Variables del Experimento, Después de la Aplicación de MgSO ₄ y NanoMg [®] en Frijol Ejotero cv. Strike	69
10.2. Correlación Entre los Distintos Minerales, Después de la Aplicación de MgSO ₄ y NanoMg [®] en Frijol Ejotero cv. Strike	72

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diseño experimental y tratamientos	26
2. Nanofertilizante comercial PHC [®] Nano Mg, utilizado para aplicación foliar en experimento en cultivo de frijol ejotero (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cv. Strike.....	27
3. Efecto de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike, sobre: A) Biomasa total en peso seco, B) Biomasa foliar en peso seco, C) Biomasa radicular en peso seco y D) Biomasa de frutos en peso seco.....	37
4. Efecto de la aplicación los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike, sobre: rendimiento en peso fresco.....	38
5. Efecto de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike, sobre: nitrato reductasa endógena.	40
6. Efecto de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike, sobre: A) Clorofila “a”, B) Clorofila “b”, C) Clorofila total, D) Carotenos.	42
7. Efecto de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike sobre los valores SPAD. Fecha de medición 1 (5 de septiembre de 2022, prefloración), 2 (12 de septiembre de 2022, floración), 3 (25 de septiembre de 2022, llenado de frutos) y 4 (4 de octubre de 2022, maduración de frutos)	43
8. Actividad fotosintética en los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike.	44
9. Concentración de aminoácidos solubles, en los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike.....	46
10. Concentración de proteínas solubles, en los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike.....	46
11. Efecto de la aplicación foliar de los diferentes tratamientos de MgSO ₄ y NanoMg [®] sobre la concentración de magnesio en plantas de frijol ejotero cv. Strike en: A) fruto, B) hoja, C) raíz y D) tallo.	53
12. Patrón de distribución de Mg (fruto, tallo, raíz y hoja) en función a la aplicación foliar de nanofertilizante de magnesio (NanoMg [®]) y sulfato de magnesio (MgSO ₄) en frijol ejotero cv. Strike	54

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Descripción de los tratamientos: fuente y dosis.....	26
2. Efecto de la aplicación foliar de $MgSO_4$ y NanoMg [®] sobre el contenido de Mg en frijol ejotero cv. Strike.	48
3. Efecto de la aplicación foliar de $MgSO_4$ y NanoMg [®] sobre parámetros de uso eficiente de magnesio (UEMg), contenido total de magnesio (TMgC), magnesio total acumulado (TMgA), eficiencia en utilización de magnesio (MgUtE), eficiencia en absorción de magnesio (MgUpE) y eficiencia de utilización total de magnesio (MgUE total) en frijol ejotero cv. Strike.	49
4. Grado de biofortificación logrado por la aplicación de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y nanofertilizante de magnesio (NanoMg [®]) en frijol ejotero cv. Strike.	53
5. Concentración de macronutrientes en el fruto del frijol cv. Strike después de la aplicación de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y nanofertilizante de magnesio (NanoMg [®]).	56
6. Concentración de micronutrientes en el fruto del frijol cv. Strike después de la aplicación de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y nanofertilizante de magnesio (NanoMg [®]).	57

RESUMEN

La deficiencia de magnesio (Mg) es un problema muy extendido en los humanos, como resultado de la disminución de nutrientes en alimentos, a consecuencia de su deficiencia en suelos agrícolas. Una estrategia novedosa para combatir la deficiencia de nutrientes es la biofortificación de cultivos y el empleo de nanofertilizantes, los cuales podrían optimizar la productividad y calidad nutricional de los cultivos. Por ello, este estudio tuvo como objetivo incrementar el contenido de Mg en los frutos de frijol ejotero cv. Strike mediante la aplicación de nanofertilizantes de magnesio, así como, evaluar su efecto en el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional, en contraste con la aplicación de sulfato de magnesio. El experimento se realizó bajo condiciones de malla sombra en Delicias, Chihuahua, durante el periodo agosto-octubre, 2022. Se empleó un diseño completamente al azar, con dos fuentes de magnesio: nanofertilizante de magnesio (NanoMg[®]) y sulfato de magnesio (MgSO₄) a dosis de 50, 100 y 200 ppm, así como, un control sin aplicación, generando siete tratamientos con seis repeticiones cada uno. Las variables evaluadas fueron: biomasa, rendimiento, actividad nitrato reductasa, índice de clorofila, pigmentos fotosintéticos, actividad fotosintética, aminoácidos y proteínas solubles, parámetros de uso eficiente de Mg, patrón de distribución y grado de biofortificación de Mg. Los resultados obtenidos indican que, para biomasa total, destacaron NanoMg[®] y MgSO₄ a 200 ppm, con incrementos mayores a 90% en comparación al control. El máximo rendimiento lo favoreció NanoMg[®] a 200 ppm, con valores superiores a 300% con relación al control. El patrón de distribución del Mg en las plantas, para los tratamientos de NanoMg[®] fue el siguiente: raíz>hoja>tallo>fruto; mientras que para los tratamientos de MgSO₄ fue: hoja>raíz>tallo>fruto. El tratamiento más eficiente en incrementar el contenido de Mg y, por ende, favorecer su presencia en el fruto, fue NanoMg[®] a 200 ppm, el cual logró una biofortificación de 120% con respecto al control. Así, al consumir 100 g de frijol ejotero cv. Strike biofortificado por NanoMg[®], se logra satisfacer la ingesta diaria recomendada de este mineral del humano. En general, aunque ambas fuentes de Mg son beneficiosas para el crecimiento y producción del frijol, el tratamiento con nanofertilizante destaca al mejorar la mayoría de los parámetros evaluados (biomasa, rendimiento, clorofila, concentración de Mg, grado de biofortificación). Finalmente, se concluye que, para biofortificación los nanofertilizantes son la mejor opción, ofreciendo una alternativa sustentable al incrementar

productividad y calidad en frutos de frijol ejotero cv. Strike.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., sulfato de magnesio, nanopartículas, nanotecnología, uso eficiente de magnesio, biofortificación.

ABSTRACT

Magnesium (Mg) deficiency is a widespread problem in humans because of nutrient depletion in foodstuffs due to deficiency in agricultural soils. A novel strategy to combat nutrient deficiency is the biofortification of crops and the use of nanofertilizers, which could optimize the productivity and nutritional quality of crops. Therefore, the objective of this study was to increase the Mg content in the fruits of green bean cv. Strike through the application of magnesium nanofertilizers, as well as to evaluate its effect on growth, yield, and nutritional quality, in contrast to the application of magnesium sulfate. The experiment was conducted under shade net conditions in Delicias, Chihuahua, during the period august-october, 2022. A completely randomized design was used, with two magnesium sources: magnesium nanofertilizer (NanoMg[®]) and magnesium sulfate (MgSO₄) at doses of 50, 100 and 200 ppm, as well as a control without application, generating seven treatments with six replicates each. The variables evaluated were biomass, yield, nitrate reductase activity, chlorophyll index, photosynthetic pigments, photosynthetic activity, amino acids and soluble proteins, Mg use efficiency parameters, distribution pattern and degree of Mg biofortification. The results obtained indicate that, for total biomass, NanoMg[®] and MgSO₄ at 200 ppm stood out, with increases greater than 90% compared to the control. The maximum yield was favored NanoMg[®] at 200 ppm, with values higher than 300% compared to the control. The distribution pattern of Mg in plants for NanoMg[®] treatments was as follows: root>leaf>stem>fruit; while for MgSO₄ treatments it was: leaf>root>stem>fruit. The most efficient treatment in increasing Mg content and, therefore, favoring its presence in the fruit, was NanoMg[®] at 200 ppm, which achieved a biofortification of 120% with respect to the control. Thus, by consuming 100 g of snap bean cv. Strike biofortified by NanoMg[®], the daily needs of humans are met. In general, although both Mg sources are beneficial for bean growth and production, the treatment with nanofertilizer stands out by improving most of the parameters evaluated (biomass, yield, chlorophyll, Mg concentration, degree of biofortification). Finally, it is concluded that, for biofortification, nanofertilizers are the best option, offering a sustainable alternative to increase productivity and fruit quality of green bean cv. Strike.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., magnesium sulfate, nanoparticles, nanotechnology, efficient use of magnesium, biofortification.

1. INTRODUCCIÓN

La deficiencia de magnesio (Mg) es un problema muy extendido en los humanos, y a su vez una problemática poco reconocida en el mundo (DiNicolantonio *et al.*, 2018). La falta de Mg tiene efectos adversos en la salud, aumentando el riesgo de enfermedades cardiovasculares, patológicas, predisposición a la diabetes y cáncer (Barbagallo *et al.*, 2021). Esto como resultado de una ingesta promedio dietética inadecuada, derivada de la importante disminución de macro y micronutrientes en los alimentos, consecuencia de su alta deficiencia en los suelos agrícolas (DiNicolantonio *et al.*, 2018; Shinde *et al.*, 2018).

Actualmente, el Mg es denominado como "el elemento olvidado", ya que no se determina ni monitorea en los pacientes (Fiorentini *et al.*, 2021); además, no se considera en los programas de fertilización agronómica, pese a diversos estudios que evidencian que el Mg mejora la productividad y la calidad de cultivos (Yan y Hou, 2018; Lu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020).

Una estrategia novedosa para combatir la deficiencia de nutrientes es la biofortificación de cultivos. Esta consiste en aumentar las concentraciones de elementos críticos en la parte comestible de las plantas, logrando así producir cultivos de alto valor nutritivo (Buturi *et al.*, 2021). Sin embargo, los fertilizantes convencionales que son utilizados con fines de biofortificación, poseen tamaños de más de 100 nanómetros, por lo que, se pierden fácilmente por sublimación y lixiviación, además de traer consigo un alto impacto ambiental (Elemike *et al.*, 2019).

Para resolver este problema, la nanotecnología es la vía más factible y eficiente, al brindar soluciones a los inconvenientes de la biofortificación agronómica. Esta ciencia ofrece nanofertilizantes, que son productos compuestos por nanopartículas que mejoran la eficiencia nutricional en las plantas, siendo eficaces en proporciones bajas (por su capacidad de penetrar barreras biológicas), favoreciendo el desarrollo sostenible, con un método comparativamente más sencillo que otros y potencialmente adecuado para obtener resultados inmediatos (Echeverría-Machado, 2019; Majumdar y Keller, 2021).

Aunque no se espera que la biofortificación erradique por completo la deficiencia de Mg, complementa otras intervenciones para proporcionar el macronutriente a las personas, y así, lograr cumplir la dosis diaria recomendada (200-400 mg/día) que actualmente no se satisface y así evitar la predisposición a múltiples enfermedades (Barbagallo *et al.*, 2021; Buturi *et al.*, 2021).

En años recientes, se han reportado varios estudios donde los nanofertilizantes han proporcionado efectos positivos en diversos cultivos. Algunos de ellos, indican que la aplicación de nanofertilizantes de magnesio permiten mayor movilidad de los nutrientes y capacidad de absorción (Delfani *et al.* 2014). Además, que generan mayor cantidad de biomasa y rendimiento en plantas de frijol (Salcido-Martínez *et al.* 2020). Por su parte, Ciscomani-Larios *et al.* (2021) y Amaya-Olivas *et al.* (2023) reportan un aumento de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante en frijol ejotero.

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es un alimento básico de importancia mundial gracias a su amplia distribución y su alto valor nutritivo. Esta legumbre representa 36% de la ingesta diaria de proteínas de la población mexicana (Anaya *et al.*, 2021), además de ser bajo en grasa, rico en fibra, vitaminas, compuestos bioactivos y minerales (Teixeira-Guedes *et al.*, 2019). Este cultivo con la aplicación de nanofertilizantes, puede ser aprovechado como vehículo para disminuir la carencia de Mg en las personas. Este elemento es el cuarto mineral más común en el cuerpo humano; es esencial para la salud, y necesario para el funcionamiento de más de 300 enzimas (DiNicolantonio *et al.*, 2018); toma parte importante de muchos procesos que realiza el cuerpo en la función fisiológica del cerebro, el corazón y los músculos esqueléticos, sistema nervioso, los niveles de azúcar en la sangre y la presión sanguínea; además tiene propiedades antiinflamatorias, ayuda a formar proteína, masa ósea y ADN, y actúa como antagonista del ion Ca^{2+} (de Baaij *et al.*, 2015). Por otro lado, la adecuada absorción de Mg por las plantas es importante, ya que es clave en su crecimiento y desarrollo, al desempeñar un papel crucial en la manipulación de compuestos como ATP, ARN y ADN; modular las corrientes iónicas; ser el átomo central de la molécula de clorofila; fungir como cofactor de muchas enzimas; entre otras (Mitra, 2015).

A pesar de los beneficios que se reportan, la cantidad de estudios sobre la influencia de la biofortificación con nanofertilizantes de Mg sobre el crecimiento, producción y calidad nutricional en frijol son limitados. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue incrementar el contenido de magnesio en los frutos de frijol ejotero cv. Strike mediante la aplicación de nanofertilizantes de magnesio, así como, evaluar su efecto en el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional en contraste con la aplicación del fertilizante convencional a base de sulfato de magnesio.

2. ANTECEDENTES

2.1. Importancia del Magnesio en la Planta

El magnesio (Mg) es uno de los macronutrientes esenciales para todos los organismos vivos, particularmente importante para las plantas en su crecimiento y reproducción. En el citosol, es el catión divalente libre más abundante, su nivel está estrictamente regulado debido a su papel fundamental en la fotosíntesis y en las corrientes iónicas de la membrana (Marschener, 2012; Yan *et al.*, 2018).

Entre sus funciones se encuentran: ser componente de la clorofila (átomo central), fungir como cofactor de muchas enzimas (ARN polimerasa, ATPasas, proteína quinasas, fosfatasas, carboxilasas y glutatión sintetasa), necesario para la agregación de ribosomas. Además, está involucrado en reacciones de fotosíntesis claras y oscuras, implicado también en procesos de transducción de señales basados en calcio (Ca^{2+}) y la regulación de la porción de carbohidratos a través del complejo Mg-ATP, es regulador del equilibrio catión-anión en las células y como ion osmóticamente activo que regula la turgencia de la célula junto con el ion Potasio (K^+) (Guo *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2017).

2.1.1. Fisiología del Magnesio en la Planta

Las plantas adquieren el Mg del ambiente y lo distribuyen dentro de su organismo en forma iónica a través de transportadores permeables al Mg. Sin embargo, es absorbido en proporciones más bajas que el K o el calcio (Ca). Se cree que el Mg se mueve a favor de un gradiente electroquímico. En este transporte la competencia de iones puede jugar un rol principal y la absorción de Mg que se ve seriamente afectado por un exceso de otras especies catiónicas especialmente K y nitratos. El contenido de Mg en tejidos vegetales está generalmente alrededor de 0.1 a 0.4% de la materia seca, dependiendo del cultivo que se trate. Del magnesio total presente en la célula, el 90% forma

un complejo con ATP citoplásmico (Mengel y Kirkby, 2000; Mitra, 2015).

En general, las raíces poseen una pobre habilidad para absorber Mg en comparación al K, lo que deja ver que existe una falta de algún tipo de mecanismo especial de absorción que transporte al Mg. Sin embargo, no solo la absorción sino también la translocación de Mg de las raíces a las partes superiores de las plantas puede restringirse por la presencia del K y el Ca (Mengel y Kirkby, 2000).

El Mg modula las corrientes iónicas a través del cloroplasto y las membranas vacuolares y, por lo tanto, podría regular el equilibrio iónico en la apertura tanto celular como estomática. También, participa en la formación de la clorofila y es un elemento esencial para la estructura normal del cloroplasto. Contrario a lo que se pensaba, la falta de contenido de clorofila en las hojas no se debe a la falta de magnesio necesario para la síntesis de moléculas de clorofila, sino a la obstrucción de la síntesis de proteínas (Bo y Ying, 2018). En el floema, el Mg es muy móvil y puede ser trasladado desde las hojas maduras a las más jóvenes y a los ápices; su presencia modula las corrientes iónicas (Mengel y Kirkby, 2000), además de regular la distribución de la energía de excitación entre el cloroplasto PSII (fotosistema dos) y PSI (fotosistema uno) y aumentar la relación de producción de fluorescencia relativa de PSII a PSI, para que las plantas puedan convertir más energía luminosa en energía química (Bo y Ying, 2018).

El Mg presenta una alta movilidad en el floema y la aplicación de fertilizantes de Mg puede acrecentar eficientemente su concentración en hojas, y sumideros (tubérculos, frutos, semillas y granos) (Buturi *et al.*, 2021).

2.1.2. Deficiencia y Toxicidad del Magnesio en la Planta

La escasez de magnesio se está convirtiendo en una preocupación importante en un sistema de cultivo intensivo en el que los suelos solo se fertilizan con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Así mismo, alrededor del 90 al 98% del Mg del suelo se combina en la estructura de red cristalina de los minerales y no está directamente disponible para las plantas (Chaudhry *et al.*, 2021).

En general, los iones Mg, son susceptibles a la lixiviación, ya que no se adsorben con tanta fuerza en minerales arcillosos o materia orgánica debido a su gran radio de hidratación, en consecuencia,

la insuficiencia de Mg afecta el crecimiento de las raíces de las plantas y, por lo tanto, la absorción de agua y nutrientes (Marschner, 2012). Cuando el contenido de clorofila en las plantas es bajo disminuye considerablemente la tasa fotosintética, los rendimientos y la calidad de la cosecha; las plantas con deficiencia de magnesio presentan clorosis intervenal en hojas viejas que se inicia desde la punta de la lámina foliar hacia la base (Molina, 2000).

También, la privación de Mg provoca una rápida absorción de Ca y activa la señalización de Ca/calcineurina (Wiesenberger *et al.*, 2007). Las concentraciones bajas de magnesio pueden convertirse en un factor limitante para la comunicación intracelular funcional (Gebert *et al.*, 2009; Marschner, 2012). En suelos con pH alcalinos, la disponibilidad de Mg se reduce debido a la formación de carbonato de magnesio y yeso (Chaudhry *et al.*, 2021). Además, los niveles más altos de K y/o de nitratos restringen la absorción de Mg (Mengel y Kirkby, 2000). Las plantas pueden mostrar síntomas de deficiencia de Mg en presencia de altos niveles de otros cationes como el Ca y el K en el suelo (Yan *et al.*, 2018).

Los síntomas visuales por deficiencia de magnesio se aprecian generalmente en las hojas viejas, aunque la sintomatología puede diferir entre las plantas, poseen características similares comunes entre ellas. La carencia se manifiesta con una clorosis en toda la hoja o parte de ella, mientras las venas continúan verdes. Después, la clorosis se torna en un amarillo muy claro o translúcido. Posterior a ello, adquiere una tonalidad oscura, llegando a morir por necrosis. Las plantas carentes de Mg son más sensibles al frío y sequía (Heidari *et al.*, 2021).

Por otro lado, aunque es rara la toxicidad por Mg, a concentraciones altas, provoca síntomas como hojas de color cobrizo, disminución del contenido de almidón y reducción del crecimiento (Buturi *et al.*, 2021).

2.2. Importancia del Magnesio en la Salud Pública

El Mg es el cuarto mineral más común en el cuerpo humano con un contenido que oscila los 25 g. Es esencial para la salud, y necesario para el funcionamiento de más de 300 enzimas (DiNicolantonio *et al.*, 2018). Este elemento, toma parte importante de muchos procesos que realiza el cuerpo, como lo son: la función fisiológica del cerebro, el corazón, los músculos

esqueléticos, el sistema nervioso; además, regula los niveles de azúcar en la sangre y la presión sanguínea. Igualmente, tiene propiedades antiinflamatorias, ayuda a formar proteína, masa ósea y ADN, y actúa como antagonista del ion Ca^{2+} (de Baaij *et al.*, 2015).

Según diversos informes, durante los últimos 60 años, el contenido de este macronutriente en frutas y verduras disminuyó entre un 20% y un 30%. Por otro lado, más del 80% del Mg se pierde al procesar o refinar alimentos (Worthington, 2001). Aunado a ello, la dieta en el hemisferio occidental se basa en esa línea alimenticia (alimentos ultra procesados y refinados), en consecuencia, el incremento de personas con deficiencias de dicho macronutriente (de Baaij *et al.*, 2015).

La Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) del 2006, encontró en los adultos mexicanos concentraciones séricas bajas de magnesio siendo para mujeres de 36.3 % y para hombres de 31% (Mejía, 2013; DiNicolantonio *et al.*, 2018). Mientras que la ENSANUT del 2012 reveló que existe una alta prevalencia de ingesta inadecuada de varios nutrientes con función antioxidante, incluyendo la vitamina A, C, E y el Mg, en la población mexicana adulta (Castellano *et al.*, 2018).

La deficiencia de Mg aumenta el riesgo de numerosos tipos de enfermedades como inflamación crónica de bajo grado, que es la puerta para enfermedades cardiovasculares, problemas de corazón, hipertensión, accidentes cerebrovasculares, afecciones patológicas, resistencia a la insulina, diabetes, predisposición a la osteopenia, la osteoporosis y las fracturas, y mortalidad temprana (DiNicolantonio *et al.*, 2018; Mercola, 2022).

Las dosis de Mg requeridas cambian, dependiendo la etapa de vida en que se encuentren las personas: infantes, 150-200 mg/día; niños, 200-250 mg/día; adultos, 250-300 mg/día; mujeres lactantes, 400 mg/día (DiNicolantonio *et al.*, 2018).

A menudo se denomina el catión "olvidado" en la salud humana. Lo que les cuesta a las naciones de todo el mundo una cantidad incalculable de costos y sufrimiento de atención médica, por lo que debe considerarse una crisis de salud pública (Elin, 2011).

2.3. Biofortificación como Alternativa para Mejorar la Calidad Nutricional de los Cultivos

Las dietas humanas frecuentemente poseen menos de los nutrientes esenciales requeridos, lo que

conduce a la desnutrición; para hacer frente a esta amenaza global, es imprescindible fortalecer los cultivos (Elemike *et al.*, 2019).

La biofortificación, consiste en incrementar el contenido de ciertos elementos en la parte comestible de la planta para mejorar el valor nutricional de los alimentos (Bouis *et al.*, 2011). En agronomía, consiste en emplear fertilizantes de elementos minerales que faltan en la dieta con el fin de aumentar sus concentraciones en los cultivos, añadiéndolos por vía edáfica, solución nutritiva o foliar (Ngigi *et al.*, 2019; Cakmak y White 2020). El objetivo de la biofortificación es producir cultivos básicos accesibles, sostenibles y de alto valor nutritivo, capaces de reducir las consecuencias de las deficiencias de nutrientes con la dieta ordinaria (Elemike *et al.*, 2019; Buturi *et al.*, 2021), proporcionando una solución a mediano y largo plazo para el problema de deficiencia en plantas y desnutrición humana de nutrientes. A su vez, esta técnica se muestra como una solución sostenible, precisa y comparativamente más sencilla que otros métodos. Además, es potencialmente adecuada para obtener resultados inmediatos (Buturi *et al.*, 2021; Palacio-Márquez *et al.*, 2021).

Sin embargo, no se espera que la biofortificación erradique por completo las deficiencias de elementos minerales, pero complementa otras intervenciones para proporcionar nutrientes a las personas (Buturi *et al.*, 2021).

2.3.1. Sulfato de Magnesio

Como fertilizante, el Sulfato de Magnesio ($MgSO_4$) es la forma más positiva, en especial en suelos con un pH mayor de seis (Veneros, 2010). Provee azufre y magnesio para toda clase de cultivos y cuenta con certificado de aplicación en agricultura ecológica (Zumba, 2020). Diversos estudios mencionan sus efectos benéficos. Ejemplo de ello, es un trabajo realizado en plantas de frijol ejotero cv. Strike, donde se demostró que la calidad nutricional de los frutos se puede mejorar mediante biofortificación con sulfato de magnesio (Ciscomani-Larios *et al.*, 2021). En tomate (*Lycopersicon esculentum*), para la variedad H1534, se reportó mayor contenido de Mg después de la aspersión foliar de $MgSO_4$ (Coelho *et al.*, 2022).

2.4. Nanotecnología

El uso de fertilizantes químicos es una práctica antigua y ha elevado extraordinariamente el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, generalmente poseen tamaños de más de 100 nm, por lo que se pierden fácilmente debido a la lixiviación y la volatilización. Además, arrastran al desequilibrio mineral del suelo, destruyen su estructura, fertilidad y en general el ecosistema, que son serios impedimentos a largo plazo (Elemike *et al.*, 2019).

Con el fin de aumentar la eficiencia de la absorción de nutrientes de los cultivos y, por lo tanto, lograr la biofortificación ha habido numerosos intentos no exitosos con este fin. Al respecto, la nanotecnología, esta ciencia creciente de manipulación de materia a escala atómica y molecular, aplicada a la agricultura podría aumentar la productividad, de esta manera reducir el uso de los productos químicos peligrosos y las pérdidas de nutrientes, así como el impacto ambiental (Miguel y Pérez, 2020).

2.4.1. Nanofertilizantes

Los nanofertilizantes son productos compuestos por nanopartículas o que emplean la nanotecnología para mejorar la eficiencia nutricional en las plantas. Es decir, se utilizan formulaciones con algún tipo de material nanoestructurado, con tamaños nanométricos, equivalentes a la mil millonésima parte de un metro ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) (Miguel y Pérez, 2020).

Ya existe evidencia exitosa de aumento en el rendimiento de cultivos y nutrientes como resultado de una biofortificación con nanofertilizantes, ejemplo de ello es la biofortificación a base del micronutriente zinc en el cultivo de trigo (Zou *et al.*, 2012); aplicación de nanopartículas de Mg en *Stevia rebaudiana* Bertoni, aumentando la producción de esteviósidos (Desai *et al.*, 2017). Además de estudios que se inclinan por los nanofertilizantes, ejemplo de ello: la aplicación de nano magnesio a razón de 20 ppm, con la cual se logró mejorar el contenido de clorofila total en trigo. Así mismo, otra investigación realizada en guisantes de ojos negros (*Vigna unguiculata* ssp.), mostró que la aplicación de nanopartículas de magnesio en comparación con magnesio común presentó mayor movilidad y capacidad de absorción (Delfani *et al.*, 2014).

2.5 Cultivo del Frijol

En México, el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) perteneciente a la familia *Fabacea*, es la especie de mayor importancia económica y social, ya que es base en la alimentación mayoritaria (Sangerman-Jarquín *et al.*, 2010). Se estima que esta legumbre representa 36% de la ingesta diaria de proteínas de la población mexicana (Anaya *et al.*, 2021), además de ser bajo en grasa, rico en fibra, vitaminas y minerales, y compuestos bioactivos (Teixeira Guedes *et al.*, 2019). En México, los principales estados productores de frijol son Zacatecas (35%), Sinaloa (12%), Durango (10%) y Chihuahua (8%) (SADER, 2022).

El consumo de *P. vulgaris*, está asociado con una menor mortalidad por cáncer (Papandreou *et al.*, 2019), contribuye en la reducción del riesgo de desarrollar obesidad y diabetes tipo 2 (Moreno-Valdespino *et al.*, 2020), y provee beneficios a la salud cardiovascular (Blekkenhorst *et al.*, 2018). Su alto consumo se debe a su fácil acceso, beneficios nutricionales, cuestiones culturales e incluso por la extensión de tierra que se utiliza para su producción (Flores, 2015; Morales-De Casas y Márquez, 2020).

2.5.1 Biofortificación en Frijol

Por los problemas crecientes en carencias nutricionales, es importante hacer un énfasis en el mejoramiento nutricional de alimentos. Un cultivo estratégico es el frijol, que actualmente es una de las leguminosas de mayor importancia a nivel mundial y fuente de nutrientes para Latinoamérica y África. En tal cultivo, se pueden incrementar las cantidades biodisponibles de nutrientes esenciales para las dietas de las personas (Sida-Arreola y Sánchez-Chávez, 2016).

Existen distintas investigaciones donde se logró la biofortificación del frijol, como: la biofortificación con nanofertilizante de magnesio en frijol ejotero cv. Strike (Salcido-Martínez, *et al.*, 2020); biofortificación en frijoles comunes con sulfato de magnesio a dosis de 100 ppm (Ciscomani-Larios *et al.*, 2021).

3. HIPÓTESIS

La biofortificación con nanofertilizante de magnesio tendrá mayor efecto en el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional del frijol ejotero cv. Strike en comparación con el fertilizante convencional sulfato de magnesio.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Utilizar nanofertilizantes de magnesio en el frijol ejotero cv. Strike para incrementar su contenido en los frutos, así como, evaluar su efecto en el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional.

4.2. Objetivos Específicos

Estudiar el efecto de la aplicación foliar de nanofertilizante de Mg y Sulfato de Magnesio en parámetros fisiológicos y de calidad nutricional en las plantas de frijol ejotero cv. Strike.

Analizar el patrón de distribución del magnesio en las plantas tratadas con diferentes dosis del nanofertilizante y del sulfato de magnesio.

Evaluar el grado de biofortificación del Magnesio en las plantas tratadas a distintas dosis con las dos fuentes.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Manejo del Cultivo

El experimento se realizó bajo condiciones de malla sombra en el municipio de Delicias, Chihuahua durante los meses de agosto-octubre del 2022. Se sembraron de forma directa cuatro semillas de frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Strike en macetas plásticas de 13.4 L de capacidad, rellenas de sustrato vermiculita y perlita en relación 2:1. Después de la germinación, se dejaron solamente dos plantas por maceta. Las plantas se regaron cada tercer día con 500 mL por maceta de solución nutritiva completa compuesta de macro y micronutrientes con la siguiente formulación: 6 mM NH_4NO_3 , 1.6 mM K_2HPO_4 , 0.3 mM K_2SO_4 , 4 mM CaCl_2 , 1 μM ZnSO_4 , 5 μM Fe-EDDHA, 2 μM MnSO_4 , 0.25 μM CuSO_4 , 0.3 μM Na_2MoO_4 , 0.5 μM H_3BO_3 ; manteniendo un pH de 6.0-6.1 (Sánchez, 2006). Una vez llegada la etapa de floración, aproximadamente a los 30 días después de la siembra, el riego se incrementó a 1000 mL por maceta.

5.2 Diseño Experimental y Tratamientos

Se usó un diseño completamente al azar (DCA), o de un solo factor, siendo este la fuente de magnesio. Los tratamientos consistieron en la aplicación de nanofertilizante de magnesio y sulfato de magnesio a dosis de 50, 100 y 200 ppm, así como un control sin aplicación, generando un total de siete tratamientos con seis repeticiones cada uno. Finalmente, se contó con 42 unidades experimentales con dos plantas cada una (Figura 1). Los tratamientos se aplicaron vía foliar al azar de manera semanal a través de números aleatorios generados en Microsoft Excel (Cuadro 1) al inicio de cada etapa fenológica del cultivo (primer par de hojas verdaderas, prefloración, floración, formación de frutos). Para las corridas experimentales en laboratorio, también se realizaron de forma aleatoria para cumplir con el supuesto de independencia de los datos.

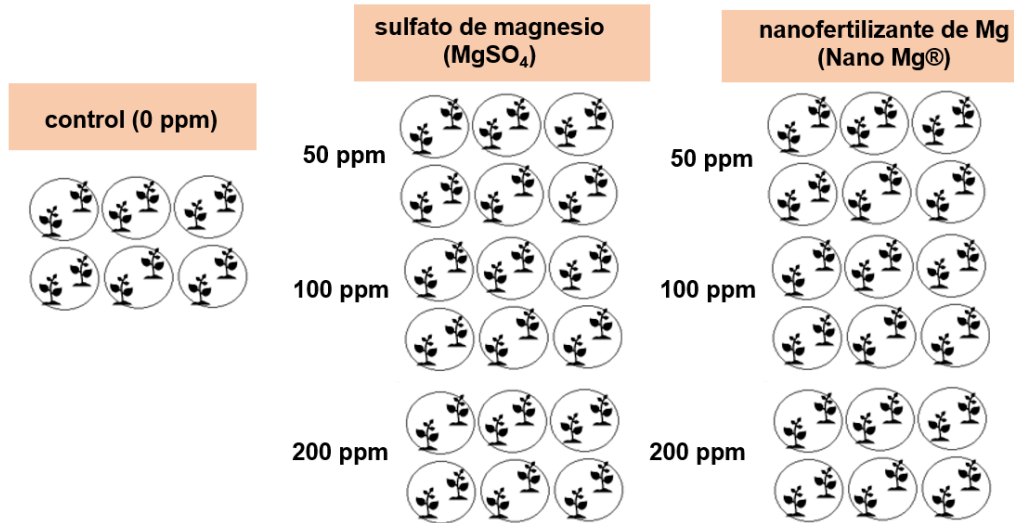


Figura 1. Diseño experimental y tratamientos.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos: fuente y dosis.

Fuente de Mg	Dosis (ppm)	Repeticiones	Clave
control	0	6	0
sulfato de magnesio	50	6	50 MgSO ₄
sulfato de magnesio	100	6	100 MgSO ₄
sulfato de magnesio	200	6	200 MgSO ₄
nanofertilizante de magnesio	50	6	50 NanoMg [®]
nanofertilizante de magnesio	100	6	100 NanoMg [®]
nanofertilizante de magnesio	200	6	200 NanoMg [®]

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \xi_{ij}$$

y_{ij} = observación tomada bajo el i -ésimo tratamiento y j -ésima repetición

μ = media global

τ_i = efecto del tratamiento i -ésimo

ξ_{ij} = Componente del error aleatorio asociado al i -ésimo tratamiento y la j -ésima repetición

5.3 Caracterización de Fuentes de Magnesio

5.3.1 Nanofertilizante de Magnesio

El material que se aplicó como nanofertilizante es el producto comercial PHC[®] Nano Mg (Figura 2), que es una suspensión, donde el Mg se encuentra disponible en forma iónica. El contenido de Mg es de 30% p/v.



Figura 2. Nanofertilizante comercial PHC[®] Nano Mg, utilizado para aplicación foliar en experimento en cultivo de frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Strike.

5.3.2 Sulfato de Magnesio

El material que se aplicó como fuente convencional fue el sulfato de magnesio (MgSO₄), grado reactivo de la marca JT Baker. Su peso molecular es de 246.48 g/mol y una pureza del 99.45%.

5.4 Muestreo Vegetal

A los sesenta días después de la germinación de las semillas de frijol ejotero cv. Strike y llegada la madurez fisiológica, se tomaron muestras. Las plantas se seccionaron en raíz, tallo, hoja y fruto. El material fresco, se utilizó para determinar el rendimiento, índice de clorofila (en campo),

actividad fotosintética (en campo) y pigmentos fotosintéticos; mientras que el material seco se aprovechó para determinar la biomasa (total, radicular, de fruto, foliar y de tallo), así como, para el análisis mineral, grado de biofortificación y patrón de distribución del Mg. Previamente, se lavó todo el material vegetal con agua corriente para eliminar residuos ambientales, después se realizaron dos enjuagues más con agua destilada y tridestilada.

5.5. Análisis Vegetal

5.5.1. Biomasa Total, Foliar, Raíz y Frutos

Se determinó la producción de biomasa en peso fresco por separado de cada órgano vegetal (hoja, tallo, fruto y raíz) al momento de la cosecha, utilizando una balanza analítica (AND HR-120, San José, California, USA). La biomasa total se obtuvo con la suma de los pesos secos de cada órgano analizado. Posteriormente, se sometieron a un proceso de descontaminación, para ello se limpiaron con abundante agua desionizada. Luego, se introdujeron a un horno de laboratorio de aire forzado de 13,9 pies cúbicos (Shel-lab 1380FX, Oregon, United States) a una temperatura de 70 ° C y hasta su total desecación (24 h), para finalmente proceder a pesar y obtener la biomasa en gramos planta de peso seco (g planta^{-1} p.s.).

5.5.2. Rendimiento

El rendimiento se obtuvo con el peso promedio del fruto por planta. La producción total se expresó como gramos por planta de peso fresco (g planta^{-1} p.f.).

5.5.3. Actividad Nitrato Reductasa “*in vivo*”

La actividad de nitrato reductasa (NR) “*in vivo*” (EC 1.6.6.1) se determinó utilizando una adaptación de la metodología propuesta por Sánchez *et al.* (2004) y Mauriño *et al.* (1986). Se tomó el material fresco y se obtuvieron taleolas del limbo foliar de diámetro de 7 mm. Se pesaron entre 0.125-0.150 g y se colocaron en 10 mL de medio de infiltración (Buffer de fosfato potásico 100 mM, pH 7.5 y propanol al 1% (v/v)). Seguidamente las muestras se sometieron a un proceso de vacío (aproximadamente 0.8 bar) durante 10 min y en la oscuridad. Después de 10 min, se liberó el vacío y las muestras se incubaron a 30° C en la oscuridad durante 1 h. Posteriormente, los tubos se introdujeron en un baño de agua a 100 ° C durante 15 min para detener la actividad NR. Para la determinación de la actividad se tomó 1 mL de alícuota, 2 mL de sulfanilamida al 1% disuelta en HCl 1.5 M (1 g de sulfanilamida + 20 mL de HCl al 35% todo disuelto en 100 mL de agua) y 2 mL de NNEDA (N-1-naftil-etilendiamida) al 0.02%, disuelta en HCl 0.2 N (20 g NNEDA disueltos en 100 mL de HCl 0.2 N). Tras 20 min, se procedió a la lectura de la absorbancia a 540 nm frente a una curva patrón de NO₂⁻ entre 0.025-2 µg mL⁻¹, siguiendo el método propuesto por Hageman y Hucklesby (1971). La actividad NR fue expresada como µmol de NO₂⁻ formados* g p.f.⁻¹ * h⁻¹.

5.5.4. Pigmentos Fotosintéticos

La determinación de pigmentos fotosintéticos se basó en la metodología descrita por Wellburn (1994). De las hojas frescas se obtuvieron taleolas de 7 mm hasta reunir un peso aproximado de 0.125 g registrando el peso y número de taleolas. Se añadió 10 mL de metanol puro (99%) (CH₃COH) a cada tubo y se sellaron con cinta Parafilm de laboratorio. Se dejaron reposar en oscuridad durante 24 h. Una vez transcurrido ese tiempo, se agitaron las muestras en un vortex y se procedió a la lectura en un espectrofotómetro Genesis 10S UV-VIS (Thermo Scientific, Waltham, Massachusetts, USA) a tres longitudes de onda: 666, 653 y 470 nm. Se preparó un blanco con metanol puro. Las concentraciones de pigmentos fotosintéticos se expresaron como µg.cm² de peso fresco y se calcularon siguiendo las siguientes fórmulas:

$$\text{Chl } a = [15.65 (A666) - 7.34 (A653)] \dots [1]$$

$$\text{Chl } b = [27.05 (A653) - 11.21 (A666)] \dots [2]$$

$$\text{Carotenos} = [(1000 * A470) - 2.86 (\text{Chl } a) - 129.2 (\text{Chl } b)] / 221 \dots [3]$$

Donde:

Chl *a*: clorofila “*a*”

Chl *b*: clorofila “*b*”

A: absorbancia

5.5.5. Índice de Clorofila

La cuantificación del índice de clorofila se realizó mediante el clorofilómetro portátil SPAD-502 por sus siglas en inglés Soil Plant Analysis Development (Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japón). Es un método no destructivo que evalúa cuantitativamente la intensidad del verde de la hoja “*in situ*”. Las lecturas se efectuaron en horas de alta luz alrededor de las 10 a.m., obteniéndose cuatro medidas al azar por unidad experimental, en zonas libres de nervaduras. Los resultados se expresaron como unidades SPAD (Shrestha *et al.*, 2012).

5.5.6. Actividad Fotosintética

Cuando la planta alcanzó la madurez fisiológica, se midió la actividad fotosintética en las hojas (Kocal *et al.*, 2008). En cada planta se seleccionó una hoja sana de color homogéneo y libre de

daños y se midió manipulando el medidor portátil LI-COR 6400 (Lincoln, Nebraska, USA). Se utilizó una concentración de 400 μmol por mol de CO_2 en la celda de referencia, mientras que la celda de muestra se mantuvo a alrededor de 380 μmol por mL de CO_2 . El déficit de presión de vapor del aire en la cámara de muestra fue inferior a 1.5 y la temperatura del bloque que albergaba la lámina era de 25 °C. La actividad fotosintética se expresó como μmol de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

5.5.7. Cuantificación de Aminoácidos Solubles

El método utilizado para la determinación de aminoácidos se basa en el propuesto por Yemm y Cocking (1995) con el reactivo de ninhidrina con adaptaciones (Sánchez *et al.*, 2004) a nuestro experimento. Se pesó aproximadamente 0.5 g de material vegetal y se homogenizó con 5 mL de tampón fosfato 50 mM a pH 7.0 sobre un estrato de hielo para mantener la muestra fría. El homogenizado se filtró con una malla y posteriormente se centrifugó a 12,000 g durante 15 min. El sobrenadante fue utilizado para la cuantificación de los aminoácidos y proteínas solubles. Posteriormente, en un tubo de ensayo se pusieron 100 μL de sobrenadante y se le agregó 1.5 mL del reactivo de ninhidrina. La mezcla se introdujo en un baño maría a 100°C durante 20 min. Seguido, se preparó una curva de glicina. Transcurridos los 20 min, se pasaron las muestras a un recipiente con hielo. A continuación, se le añadieron 8 mL de propanol al 50% a cada uno de los tubos con muestra y a los tubos de la curva y se dejaron reposar por 30 min. Posteriormente, se procedió a su lectura a una longitud de onda de 570 nm, frente a la curva patrón de glicina. La concentración de aminoácidos solubles se expresó como mg g^{-1} de peso fresco.

5.5.8. Cuantificación de Proteínas Solubles

Las proteínas solubles se determinaron después del homogenizado de 0.5 g de muestra fresca en tampón KH_2PO_4 frío 50 mM a pH 7 y centrifugación de 12,000 g, a 4°C durante 15 min. El sobrenadante también se utilizó para la determinación de aminoácidos. El contenido de proteína

soluble se midió con el reactivo de Bradford (Kruger, 2009). Se tomó 1 mL de reactivo de Bradford en un tubo de ensayo y se agregaron 20 μL de albumina de suero bovino (BSA) de cada uno de los tubos con concentración conocida, correspondientes a cada punto de la curva. Posteriormente, se leyó a una absorbancia de 595 nm frente a la curva patrón. La proteína soluble se expresó como mg g^{-1} de peso fresco.

5.5.9. Determinación de Contenido de Magnesio

El contenido de magnesio se determinó utilizando el método propuesto por Wolf (1982). En el cual, se pesó un gramo de muestra seca y se adicionaron 25 mL de mezcla triácida (88.9% HNO_3 , 8.9% HCl y 2.2% H_2SO_4) y se colocó en una estufa digestora a 300 °C. La muestra resultante se completó hasta 50 mL con agua destilada (muestra principal). La lectura de magnesio Mg se realizó mediante espectrofotómetro de absorción atómica (AAS, iCE 3000 Series, Thermo Scientific, Waltham, MA, EE. UU.). En el caso del Mg se realizó una dilución 0.5:50 para la lectura. La concentración de Mg se expresó en $\text{mg}/100 \text{ g}$ de peso seco.

5.5.10. Cálculo de Parámetros de Eficiencia de Mg (MgUE)

Los parámetros de MgUE se calcularon de la siguiente manera: la acumulación total de Mg (TMgA) se calculó como la concentración total de Mg multiplicada por la biomasa total de la planta (Elliott y Läuchli 1985).

La eficiencia de absorción de Mg (MgUpE) se calculó como TMgA dividido entre el peso seco de la raíz (mg/g^{-1} p.s.) (Elliott y Läuchli, 1985).

$$MgUpE = \frac{TMgA}{raíz\ p.s.} \dots [4]$$

La eficiencia de utilización de Mg (MgUtE) se calculó como tejido foliar p.s. dividido entre la concentración de Mg ($\text{g}^2 \text{ L p.s. mg}^{-1} \text{ Mg}$) (Siddiqi y Glass, 1981).

$$MgUtE = \frac{\text{tejido foliar p.s.}}{\text{concentración Mg}} \dots [5]$$

La eficiencia de utilización de Mg total (MgUE total) se calculó sumando la eficiencia de utilización más la eficiencia de absorción.

$$MgUE \text{ total} = MgUtE + MgUpE \dots [6]$$

5.5.11. Patrón de Distribución de Mg en Plantas de Frijol

Indicador empleado para determinar la distribución de los nutrientes en los diferentes órganos de la planta. Para ello se analizó la concentración de magnesio en cada órgano de las plantas de frijol ejotero, dichas concentraciones se sumaron por tratamientos. Posteriormente, se determinó un total, el cual representó el cien por ciento y, finalmente, en base a la concentración de magnesio en cada uno de los órganos se obtuvieron los porcentajes para promediarlos según las fuentes de aplicación.

5.5.12. Grado de Biofortificación de Mg en Frutos de Frijol

El grado de biofortificación se expresó como porcentaje y se determinó de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$GB = \left(\frac{MgF * 100}{MgC} \right) - 100 \dots [7]$$

Donde:

GB: grado de biofortificación

MgF: Contenido de Mg en el fruto de plantas con aplicación foliar de Mg

MgC: Contenido de Mg en el fruto del tratamiento control

5.5.13. Determinación de la Calidad Nutricional en Frutos de Frijol

El P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu, fueron determinados según la metodología de Wolf (1982). Para ello, se pesó un gramo de muestra seca de fruto seco y se añadieron 25 mL de mezcla triácida de H₂SO₄, HCl y HNO₃ (2.2%, 8.9% y 88.9% respectivamente). Luego de ello, se colocaron en un horno digestor a 300 °C. La muestra resultante, se aforó a 50 mL con agua desionizada (muestra principal). La lectura de los minerales se realizó utilizando la espectrofotometría de absorción atómica (Aas, iCE 3000 Series, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA.). En el caso de los macronutrientes K, Ca y Mg, se realizó una dilución a 1:100 para su lectura.

La concentración del P total fue determinada siguiendo el método del metavanadato de amonio (NH₄VO₃). Se tomaron 0.5 mL de la muestra principal, al que se le añadió un mL de reactivo fósforo más 3.5 mL de agua destilada, se agitó y se dejó reposar durante una hora para su posterior lectura. La lectura se realizó en un espectrofotómetro (Genesis 10s UV/Vis, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA.), a 430 nm frente a una curva estándar de K₂HPO₄. La concentración de P fue expresada como porcentaje.

El N y el % de proteína, se determinaron utilizando la metodología propuesta por Calvo *et al.* (2008), con el equipo Flash 2000 (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA).

5.6. Análisis Estadístico

Los datos fueron sometidos a un análisis de Shapiro-Wilks para evaluar la normalidad, además se evaluó la homogeneidad de varianza utilizando la prueba de Barlett, así como la independencia de los datos, la cual se garantizó con la aleatorización durante todo el experimento (aplicación de tratamientos, muestreo y análisis de datos). Después de haber cumplido los supuestos anteriores, se realizó un análisis de varianza ($\alpha= 0.05$) para un diseño completamente al azar o de un factor. Cuando existieron diferencias significativas se efectuó una prueba de separación de medias por el método de LSD de Fisher con una significancia del 95%. Además, para las variables que mostraron una posible relación, se realizó un análisis de correlación de Pearson ($\alpha= 0.05$) (ANEXOS). Todos los análisis se efectuaron mediante el paquete estadístico SAS versión 8 (SAS, 2004).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Biomasa Total, Foliar, Raíz y Frutos

El Mg tiene un impacto importante en el desarrollo y la productividad de los cultivos (Wang *et al.*, 2020). En el presente estudio, se observó la mayor acumulación de biomasa total en 200 MgSO₄, con un incremento del 100% con respecto al control sin aplicación (Figura 3), aunque sin diferencias significativas con 200 NanoMg[®]. Además, dicha dosis sobresale también en biomasa foliar y radicular (Figura 3). En general, se pueden apreciar incrementos significativos para biomasa total desde 50 MgSO₄, mientras que, para NanoMg[®], solo se presentan diferencias estadísticas respecto al control a dosis altas (Figura 3). Estos resultados concuerdan con los reportados por Neuhaus *et al.* (2014), donde la aplicación foliar de MgSO₄ a 200 mM en plantas de trigo aumentó el rendimiento por maceta de manera significativa. Para los tratamientos de NanoMg[®], se observó una tendencia creciente conforme la dosis se incrementó (similar a lo observado para MgSO₄). No obstante, es apreciable que, para biomasa foliar, radicular y total, su comportamiento es ligeramente inferior a los tratamientos de MgSO₄.

Con respecto a la biomasa de fruto, todos los tratamientos superaron al testigo, destacando el tratamiento 200 NanoMg[®] aunque, sin ser estadísticamente diferente a 200 MgSO₄ y 100 NanoMg[®], superando estos al control en más de 90%. Estos resultados son similares a lo reportado por Mahawar *et al.* (2017) para el cultivo de frijol mungo (*Vigna radiata* L.) donde el peso fresco promedio de frutos después de 28 días de crecimiento y la longitud promedio de la raíz mostraron un aumento dependiente de la concentración de nanopartículas de óxido de magnesio, siendo la dosis de 100 mg L⁻¹ superior a la dosis de 50 mg L⁻¹. Así mismo, Kanjana (2020), reportó el mayor peso de cápsulas de algodón al aplicar Mg en tamaño nano, en comparación con el fertilizante MgSO₄.

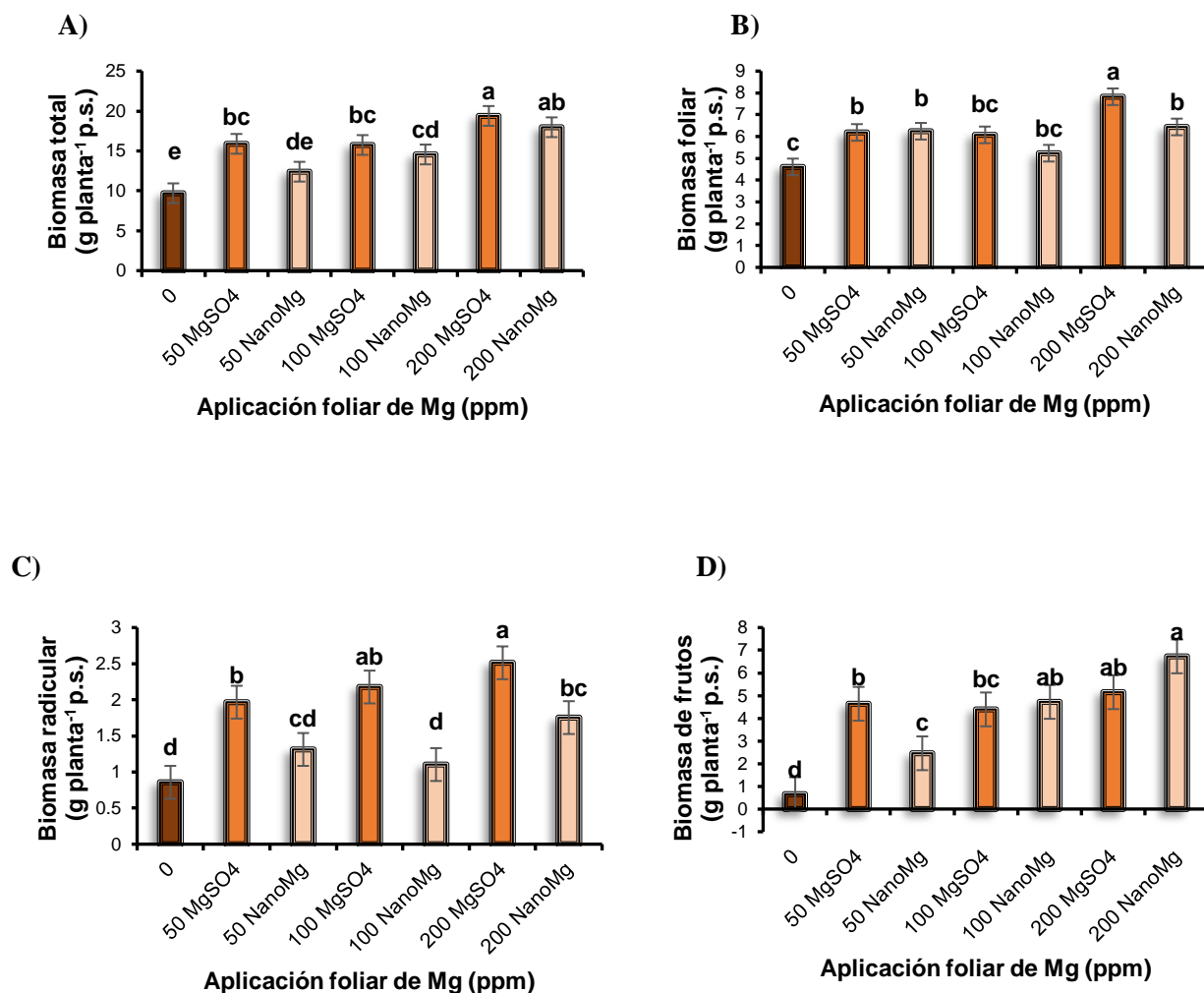


Figura 3. Efecto de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO₄ y NanoMg[®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike, sobre: A) Biomasa Total en peso seco, B) Biomasa foliar en peso seco, C) Biomasa radicular en peso seco y D) Biomasa de frutos en peso seco. Las letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según prueba de LSD (P < 0.05).

El efecto ligeramente superior (7, 17 y 30%, correspondiente a biomasa total, foliar y radicular, respectivamente) del MgSO₄ para las variables de biomasa sobre el NanoMg[®] (Figura 3), puede deberse al efecto ejercido en conjunto con su acompañante el sulfato (SO₄). El S, es un nutriente esencial para las plantas y se considera el cuarto nutriente principal después del N, P y K (Mitra, 2015). Entre las funciones del S destacan el promover el crecimiento y la fijación de N por las leguminosas (el N es un factor clave para el crecimiento y la productividad en la mayoría de los cultivos) (Mengel y Kirkby, 2000). En general, la tasa de crecimiento de los cultivos se ve modificada por la aplicación de nitrógeno, y su uso puede depender en gran medida del suministro

de Mg y S a las plantas (Karooki *et al.*, 2021).

En el caso de la biomasa de frutos, la mejora en el rendimiento proporcionada por el NanoMg[®] con respecto al MgSO₄ a dosis medias, puede atribuirse a su más eficiente papel en la translocación de fotoasimilados de las hojas a las partes de las plantas en crecimiento activo, gracias a su tamaño nanométrico (Kanjana, 2020).

6.2 Rendimiento

La fertilización con Mg mejora el rendimiento de los cultivos, por lo que su aplicación es una medida importante para impulsar la producción de estos cultivos (Wang *et al.*, 2020). En el presente experimento, todos los tratamientos superaron al control, destacó la dosis de 200 NanoMg[®] (Figura 4), superando al control en 392% en rendimiento, sin ser estadísticamente diferente a 200 MgSO₄. Estos resultados concuerdan con las tendencias para biomasa de frutos (Figura 3), con una correlación positiva y altamente significativa entre ambas variables (Anexo 1: $r=0.6796$, $p<0.0001$), además de superar la media nacional determinada para zonas áridas por Salinas-Ramírez *et al.* (2012), en un 54%. Se pueden apreciar incrementos significativos con respecto al control desde dosis bajas (50 ppm) en ambas fuentes de Mg.

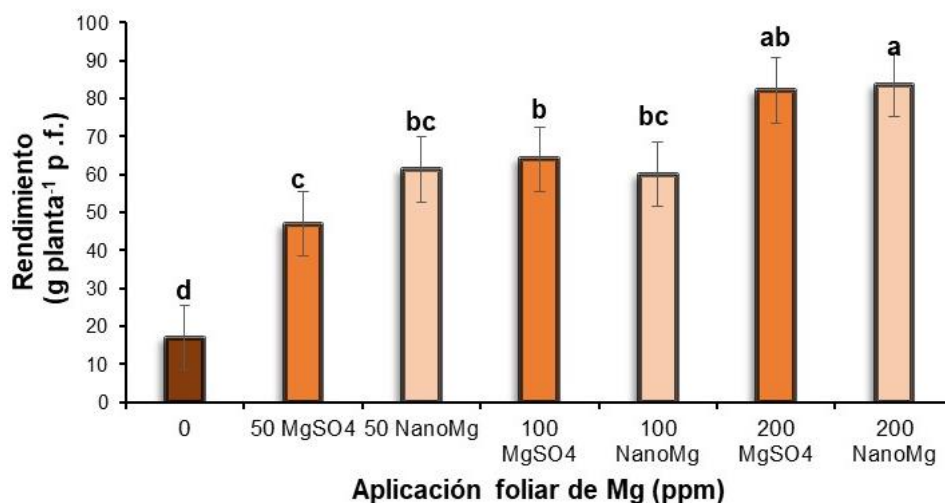


Figura 4. Efecto de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO₄ y NanoMg[®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike, sobre el rendimiento en peso fresco. Las letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según prueba de LSD ($P < 0.05$).

El incremento en el rendimiento por efecto de la aplicación de 200 NanoMg[®], se debe a la importancia del Mg, como elemento central de la clorofila, el cual es indispensable para el metabolismo del Carbono (C) y del N. Su presencia promueve la síntesis de clorofila e incrementa la actividad de la Rubisco, enzima encargada de la fijación de CO₂, por lo tanto, provoca un aumento en la tasa de fotosíntesis. Además, el Mg tiene un efecto directo y positivo en el uso eficiente del N al regular la absorción, asimilación y distribución de este. Como consecuencia directa, aumentan las tasas de formación de productos fotosintéticos, los cuales se ven reflejados en mayores proporciones de biomasa y rendimiento. También, la aplicación de Mg puede mejorar los niveles de hormonas de crecimiento vegetal en la planta (Mahawa *et al.*, 2017; Hauer-Jákli y Tränkner, 2019; Khodadadi *et al.*, 2021). Por último, diversos estudios sugieren que el suministro del Mg a nanoescala, es absorbido más fácilmente por las plantas (Echeverría-Machado, 2019).

6.3. Actividad Nitrato Reductasa “*in vivo*”

La reducción de nitrato a nitrito, el paso inicial en la asimilación de Nitrógeno es catalizada por la enzima nitrato reductasa (NR), postulándose como un importante indicador del estado de nutrición por nitrógeno de la planta (Sánchez *et al.*, 2004; Meloni *et al.*, 2017). En nuestro estudio, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos. En el caso del nanofertilizante, tuvo un comportamiento con tendencia creciente y en su dosis más alta (200 ppm) logró ser estadísticamente diferente al control (Figura 5). Por su parte, la NR endógena para el MgSO₄ también mostró una tendencia creciente conforme incrementó el contenido de Mg, teniendo un efecto positivo con respecto al control en 100 MgSO₄ y 200 MgSO₄ (Figura 5). Las dosis más altas en ambas fuentes fueron estadísticamente iguales y lograron incrementos de cerca del 93% en la actividad de la NR con respecto al control. En general, estos resultados son coherentes con la tendencia de los datos obtenidos para biomasa y rendimiento (Figura 3 y 4), sin embargo, no existe correlación significativa (Anexo 1: $p > 0.05$) entre ellos.

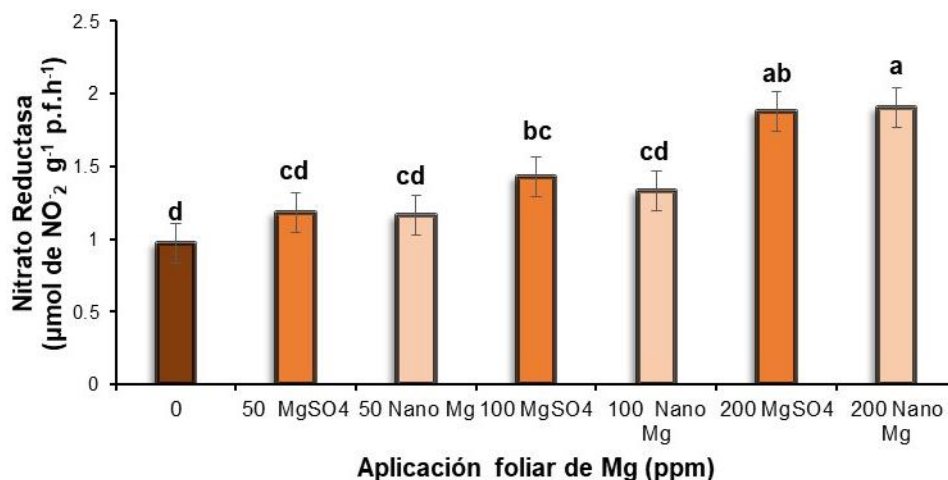


Figura 5. Efecto de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO₄ y NanoMg[®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike, sobre la actividad Nitrato Reductasa endógena. Las letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según prueba de LSD (P <0.05).

Stagnari y Pisante (2009), en su trabajo sobre frijol francés reportan una acumulación de nitrato más alta con las dosis más altas de magnesio. La inducción de la NR, solo se logra en presencia de CO₂ y por la luz fotosintéticamente activa absorbida por la clorofila; en ambos casos, el Mg juega un rol importante de manera indirecta, permitiendo por una parte la absorción de CO₂ (al activar a la Rubisco) y, por otro lado, al formar parte de la clorofila (responsable de la absorción de luz) (Lillo, 1994).

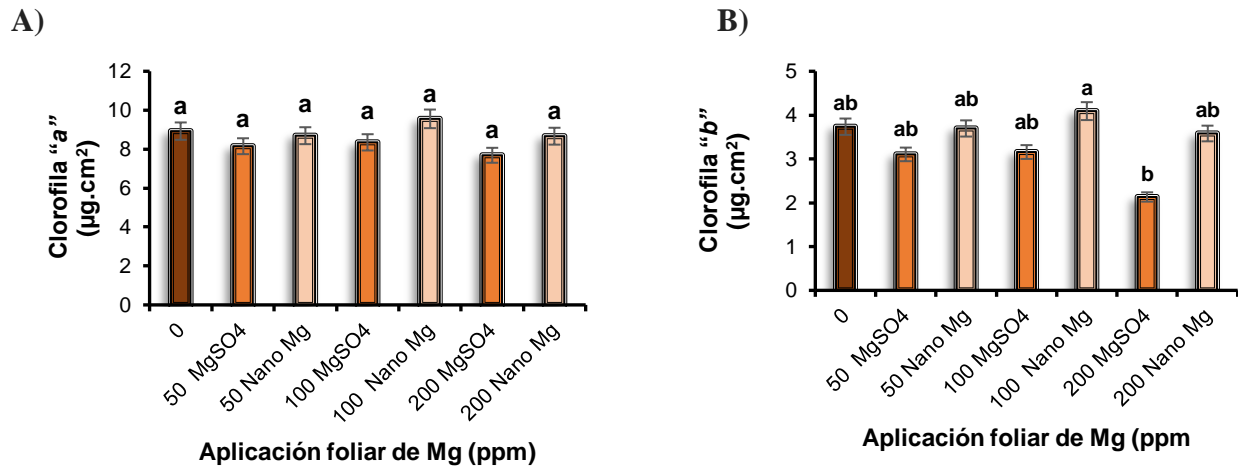
6.4 Pigmentos Fotosintéticos

El estudio de la concentración de pigmentos fotosintéticos en plantas es un buen indicador del estado fisiológico de los cultivos (Bautista-Diaz *et al.*, 2021). En el presente estudio, la clorofila “a” y total no presentaron diferencias estadísticas significativas (p>0.05) entre tratamientos. Sin embargo, es apreciable que 100 NanoMg[®] estuvo por encima del resto, superando al control con 7 y 8% respectivamente. Un estudio en el cultivo de la vid encontró que la mayor cantidad de clorofila “a” fue propiciada por la aplicación de nanopartículas de magnesio en comparación con los otros tratamientos de Mg (quelato y sulfato de magnesio) (El-Ezz *et al.*, 2022).

La clorofila “b”, fue el pigmento con menor participación, encontrando diferencias estadísticas

significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, donde 200 MgSO_4 , fue el que obtuvo los valores más bajos en comparación con el control (57%) (Figura 6). Este resultado es similar a lo encontrado por Shimoda *et al.* (2012), quienes mencionan que los bajos niveles de clorofila “b” en *Arabidopsis*, se deben a su conversión en clorofila “a” para la protección contra especies reactivas de oxígeno durante la senescencia de las plantas. Es probable que al aplicar MgSO_4 a dosis altas, haya más presencia de especies reactivas de oxígeno, en comparación con la aplicación de NanoMg[®].

En el caso de los carotenos, no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre los tratamientos, sin embargo, se puede observar que 100 NanoMg[®] supera al resto, dejando abajo al control con un 5%. Lo anterior, es similar a lo reportado por Mahawar *et al.* (2017), donde el contenido de carotenoides aumentó con la adición de nanopartículas de Mg a dosis de 100 mg L^{-1} .



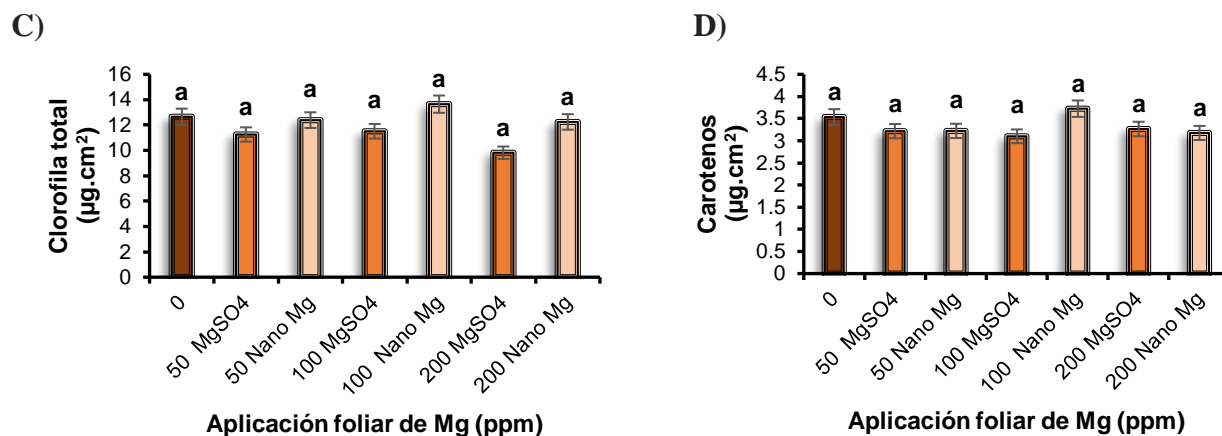


Figura 6. Eficiencia de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO₄ y NanoMg[®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike, sobre: A) Clorofila “a”, B) Clorofila “b”, C) Clorofila total, D) Carotenos. Las letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según prueba de LSD (P < 0.05).

El comportamiento de la clorofila “a”, se debe probablemente a que el nanofertilizante aplicado en forma nanométrica le permite tener mayor movilidad y capacidad de absorción, tomando en cuenta que el Mg es un componente estructural de la clorofila (es el átomo central) y es necesario para su biosíntesis (Mitra, 2015; Tränkner *et al.*, 2018). Por otro lado, Verbrugge y Hermans (2013), mencionan que entre un 10 y 20% del Mg total puede estar unido a ese pigmento con una proporción aún mayor en caso de agotamiento de Mg, lo que explicaría por qué 200 MgSO₄ es inferior al resto.

Para los resultados de clorofila “b”, diversos estudios mencionan que el primer paso de la senescencia de las hojas es la degradación de la clorofila, con una transición de la clorofila “b” en clorofila “a”, con la finalidad de evitar la toxicidad de la fotooxidación. Es posible que al aplicar MgSO₄ a dosis altas, el Mg se integre fácilmente en la clorofila “a”, y no en la clorofila “b”, y en consecuencia los complejos captadores de luz queden desprotegidos. Por otro lado, es probable que al aplicar NanoMg[®], el Mg sea fácil de absorber por las plantas y de incorporarse a la clorofila “a” (que se encuentra en todos los complejos proteicos de la clorofila) y a la clorofila “b” (ubicada solo en los complejos captadores de luz) (Luo *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2022).

6.5 Índice de Clorofila

Los valores de SPAD de la hoja se consideran un indicador del estado del nitrógeno y clorofila de las plantas, al evaluar cuantitativamente la intensidad de verde de la hoja (Mendoza-Tafolla *et al.*, 2019). En el presente estudio, tanto los tratamientos de NanoMg[®] como de MgSO₄ favorecieron el verdor, presentando un aumento sustancial de este con respecto al control, destacando el tratamiento 200 MgSO₄ con un 9.5% de incremento, seguido de 100 NanoMg[®] a con un 6% de incremento (Figura 7).

Por otro lado, resaltar que el control desde su primera lectura de valores SPAD, hasta la última, incrementó en un 36%, mientras que 200 MgSO₄ aumentó en un 37% (Figura 7). Estos resultados coinciden con lo encontrado por Altarugio *et al.* (2017) para el cultivo de soya sometida a aspersion foliar de Mg, donde las unidades SPAD mostraron una tendencia creciente por el incremento de clorofila. Asimismo, la ausencia de diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$) entre tratamientos, probablemente se debe a que el Mg no solo es rápidamente absorbido por las hojas, sino que también es móvil en el floema, por lo que es redistribuido a otros compartimentos de la planta (Mitra, 2015).

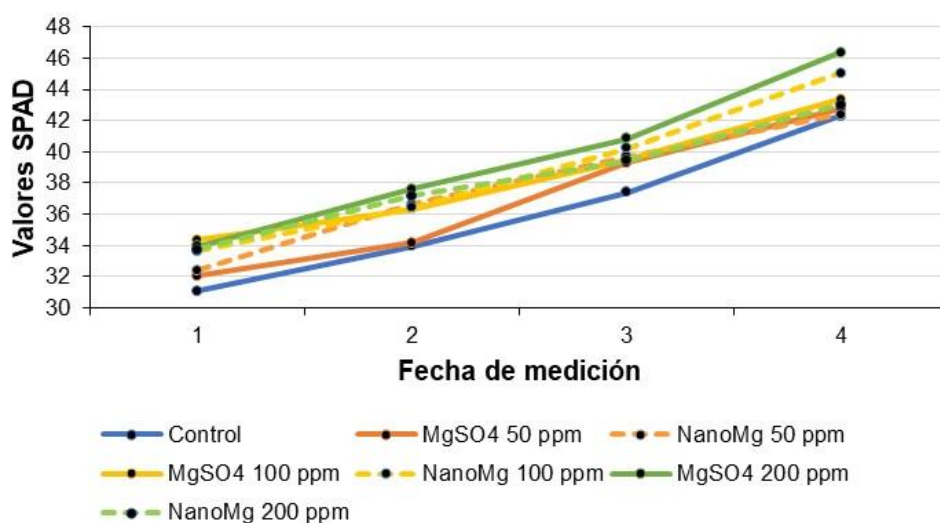


Figura 7. Efecto de la aplicación de los diferentes tratamientos de MgSO₄ y NanoMg[®] aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike sobre los valores SPAD. Fecha de medición 1 (5 de septiembre de 2022, prefloración), 2 (12 de septiembre de 2022, floración), 3 (25 de septiembre de 2022, llenado de frutos) y 4 (4 de octubre de 2022, maduración de frutos).

6.6 Actividad Fotosintética

Un proceso fisiológico vital de las plantas es la actividad fotosintética, la cual se relaciona en gran medida con la producción agronómica (Sánchez-Chávez *et al.*, 2011). En la presente investigación se obtuvieron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos para la actividad fotosintética. Para el nanofertilizante de magnesio, se observan incrementos de actividad para las dosis de 50, 100 y 200 ppm en comparación al control de 32.5%, 24.5% y 13.59% respectivamente (Figura 7). Pese a dicho aumento, se puede apreciar una tendencia a disminuir conforme aumenta la dosis. Por otro lado, el $MgSO_4$ presenta una tendencia al alza respecto al control de 19.33%, 38.39%, y 38.85% (correspondientes a las dosis de 50, 100 y 200 ppm) (Figura 8). En comparación con la biomasa total (Figura 3), para el nanofertilizante se ve el comportamiento inverso al de la actividad fotosintética, sin embargo, aunque su correlación es baja (Anexo 1: $r = 0.32358$) es significativa ($p < 0.05$). En algunos estudios, tal disminución en la actividad fotosintética en el cultivo de frijol se atribuye a la llegada del periodo de cosecha, encontrando la mayor actividad en la etapa de floración (Palacio-Márquez *et al.*, 2021).

Por su parte, el sulfato de magnesio presenta una tendencia similar a la vista para biomasa total y rendimiento (Figura 3 y 4), pero sin existir una correlación (Anexo 1). Esto coincide con los resultados obtenidos en trigo al aplicar $MgSO_4$, donde se mejoró la capacidad fotosintética y se logró mantener una tasa más alta durante el llenado del grano (Ba *et al.*, 2020).

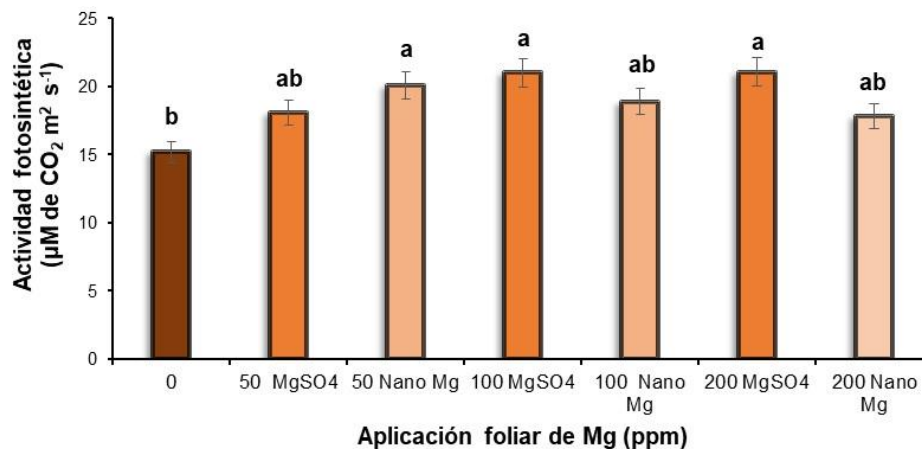


Figura 8. Actividad fotosintética en los diferentes tratamientos de $MgSO_4$ y Nanofertilizante de Magnesio (NanoMg[®]) aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike. Las letras minúsculas muestran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según prueba de LSD ($P < 0.05$).

El incremento en la aplicación de magnesio de ambas fuentes al parecer tiene un efecto positivo tanto en la activación como en la actividad de la enzima Rubisco, mejorando así la asimilación de CO₂, reflejado en el alto valor de biomasa y rendimiento (Jaghdani *et al.*, 2021).

6.7 Aminoácidos y Proteínas Solubles

Los aminoácidos y proteínas son los principales productos de la asimilación de nitrógeno en las plantas, donde contribuyen al contenido nutricional y a distintas actividades metabólicas (Gutiérrez-Ruelas *et al.*, 2021; Agüero-Esparza *et al.*, 2022). El magnesio es necesario para la agregación de ribosomas, orgánulo encargado de la síntesis proteica (Mitra, 2015).

Para aminoácidos, se observan diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, obteniendo el menor contenido en las plantas tratadas con 200 NanoMg[®] y el control, sin diferencia estadística significativa ($p > 0.05$) entre ellos. Mientras que el valor más elevado de esta variable la presentó el tratamiento 200 MgSO₄, aunque sin diferencia estadística significativa ($p > 0.05$) con el resto de los tratamientos (Figura 9). En algunas especies como espinacas o plantas de té, se ha reportado el aumento de aminoácidos después de la aplicación de magnesio (Verbruggen y Hermans, 2013; Yan y Hou, 2018).

Para proteínas, el nanofertilizante no presentó diferencias estadísticas con respecto al control, sin embargo, 200 NanoMg[®], obtuvo un incremento del 62.58% (Figura 10). Resultados similares fueron reportados en un estudio para el cultivo de papa, donde la aplicación de magnesio no tuvo influencia significativa en el contenido proteico en los tubérculos (Karooiki *et al.*, 2021). Mientras que, para MgSO₄ se encontraron diferencias significativas, presentando un comportamiento en forma de campana, donde los valores más altos fueron para la dosis de 100 y 200 MgSO₄, superando en más de 250% al control. Esto puede deberse a que las altas concentraciones de MgSO₄, estabilizan las proteínas o disminuyen su solubilidad (Arkawa *et al.*, 1990).

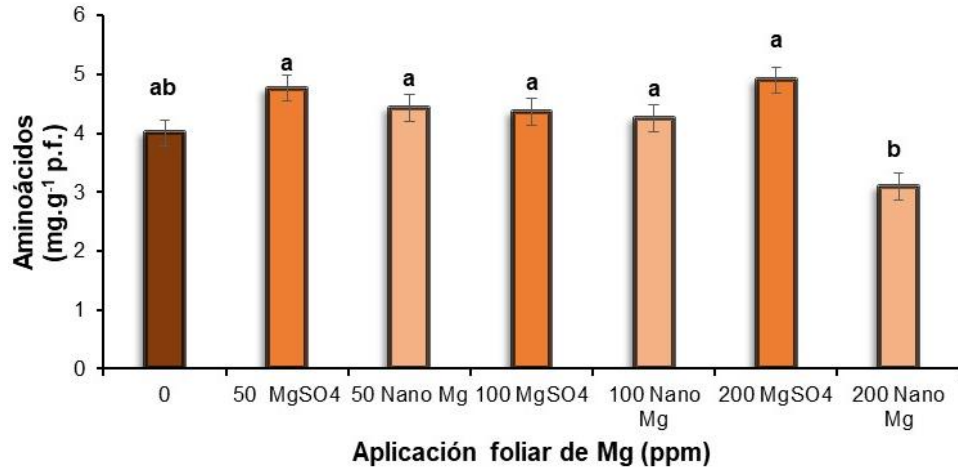


Figura 9. Concentración de aminoácidos solubles, en los diferentes tratamientos de MgSO₄ y Nanofertilizante de Magnesio (NanoMg[®]) aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike. Las letras muestran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según prueba de LSD (P <0.05).

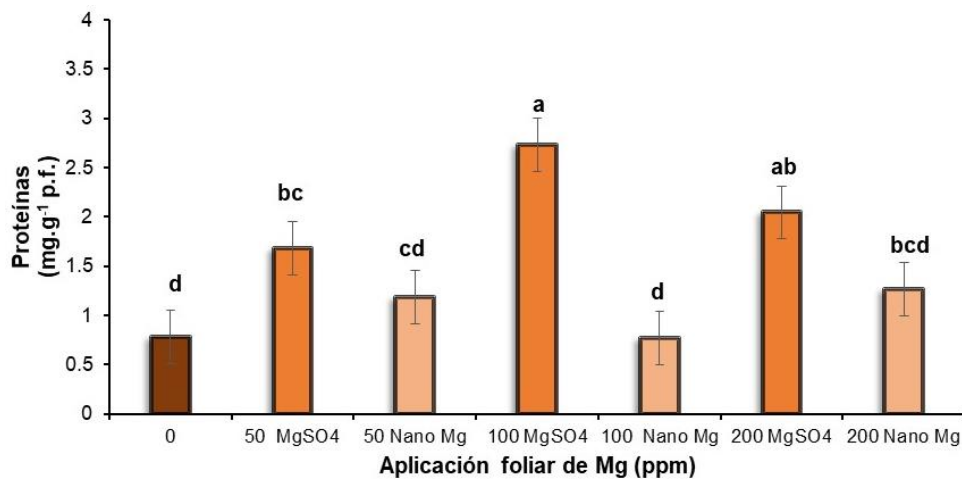


Figura 10. Concentración de proteínas solubles, en los diferentes tratamientos de MgSO₄ y Nanofertilizante de Magnesio (NanoMg[®]) aplicados vía foliar en plantas de frijol ejotero cv. Strike. Las letras muestran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según prueba de LSD (P <0.05).

6.8 Concentración de Mg en Hoja, Fruto, Raíz, Tallo y Total

Para que las plantas adquieran y mantengan altas concentraciones de magnesio, es necesario un sistema de transporte de este elemento altamente eficaz para su absorción, almacenamiento y translocación (Chen *et al.*, 2018). Los resultados del presente estudio mostraron diferencias

estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, observándose incrementos con respecto al control con todas las dosis de $MgSO_4$ y NanoMg[®] (Cuadro 2). Las mayores concentraciones en hoja se encontraron en el tratamiento con 200 $MgSO_4$, sin diferencia estadística con el tratamiento de 200 NanoMg[®], superando al control en 80 y 79%, respectivamente. Estos resultados concuerdan con Nehaus *et al.* (2014), donde la aplicación foliar de 200 mM $MgSO_4$ sobre *Vicia faba*, resultó en un incremento de la concentración de Mg.

Con respecto al fruto, al incrementar la dosis en cada tratamiento, la concentración de Mg fue mayor (Cuadro 2). La concentración más alta de Mg fue para el tratamiento de 200 NanoMg[®], superando al tratamiento de 200 $MgSO_4$ en 29%, y al control en más de 118%.

La concentración de Mg en hoja y fruto presentaron una correlación altamente significativa (Anexo 1: $r = 0.88218$, $p < 0.0001$), algo similar a lo reportado por Wang *et al.* (2020), donde se apreció una correlación lineal positiva significativa entre el rendimiento del cultivo y la concentración de Mg en las hojas en hortalizas, frutas y gramíneas. Este comportamiento puede deberse a que el Mg presenta una alta movilidad en el floema y la aplicación de fertilizantes de Mg puede incrementar eficientemente su concentración en hojas y sumideros (Buturi *et al.*, 2021).

Con relación a la raíz, la mayor concentración se presentó en el tratamiento 50 NanoMg[®], sin presentar diferencias estadísticas con la dosis de 100 NanoMg[®] y 50 $MgSO_4$. Se puede apreciar que, en ambos tratamientos al incrementar la dosis, la concentración de Mg en raíz disminuye. Esto puede deberse a que el Mg se entrega a diferentes tejidos de la planta con la distribución preferencial a los tejidos en desarrollo – como en este caso, el Mg es dirigido hacia hojas y frutos, por lo que disminuye en raíz - (Chaudhry *et al.*, 2021). Por su parte, en el tallo la mayor concentración de Mg se presentó en 200 $MgSO_4$.

Con respecto a la concentración de Mg total, destaca 200 NanoMg[®] con un 63% de incremento con respecto al control. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Setareh *et al.* (2021), donde al aumentar el suministro de Mg en *Spinacia oleracea* aumentó su concentración en hojas. En general, los valores que sobresalieron se encontraron en los tratamientos de $MgSO_4$ y NanoMg[®] con la dosis más alta (200 ppm), reflejado en la producción de biomasa (Figura 3), así como, en el rendimiento (Figura 4).

Cuadro 2. Efecto de la aplicación foliar de MgSO₄ y NanoMg[®] sobre el contenido de Mg en frijol ejotero cv. Strike.

Aplicación foliar de Mg	Contenido de Mg (mg/100 g)				
	Hoja	Raíz	Fruto	Tallo	Total
Control - 0 ppm	738 d	1,130 d	241 e	398 d	2,506 d
MgSO ₄ - 50 ppm	1,130 c	1,732 ab	414 d	564 b	3,840 bc
MgSO ₄ - 100 ppm	1,259 b	1,623 b	445 bc	580 b	3,907 abc
MgSO ₄ - 200 ppm	1,331 a	1,282 c	455 b	643 a	3,711 c
Nano Mg - 50 ppm	1,154 c	1,798 a	427 cd	599 b	3,979 ab
Nano Mg - 100 ppm	1,108 c	1,708 ab	438 bc	508 c	3,762 c
Nano Mg - 200 ppm	1,320 ab	1,641 b	526 a	587 b	4,073 a

*Letras diferentes por columna muestran diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. LSD ($P \leq 0.05$).

6.9 Eficiencia de Uso de Mg (MgUE)

La eficiencia de uso de magnesio (MgUE) es un parámetro importante que indica la eficiencia relativa de la fertilización agrícola (Wang *et al.*, 2020). Los índices que complementan este término son eficiencia de absorción (MgUpE) y eficiencia de utilización (MgUtE) (Ramírez-Estrada *et al.*, 2022). En el presente estudio, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en la eficiencia de uso de Mg entre los tratamientos aplicados (Cuadro 3). Respecto al contenido total de magnesio (TMgC) los valores más altos se registraron en 200 MgSO₄, sin diferencias estadísticas ($p > 0.05$) con 200 NanoMg[®] y 100 MgSO₄, incrementando con respecto al control en 223, 187 y 165 % respectivamente, datos que coinciden con los mejores valores en biomasa y rendimiento (Figura 3 y 4). Estos resultados contrastan con los reportados con Wang *et al.* (2020), quienes reportan que las eficiencias de uso de Mg mostraron un patrón diferente a los rendimientos, debido a las variaciones en la absorción o utilización de este.

El segundo parámetro analizado fue la eficiencia de absorción de magnesio (MgUpE). Se mostró mayor capacidad de toma de Mg en ambos tratamientos (NanoMg[®] y MgSO₄) cuando a las plantas se les suministraron dosis altas de Mg. El tratamiento de 200 MgSO₄ sobresalió del resto, incrementando en más de 200% con respecto al control, mientras que, 100 y 50 MgSO₄ también dejaron atrás a la dosis de 0 ppm en más de un 100%. Mientras que, para el nanofertilizante, la dosis con mejor eficiencia de absorción fue 200 NanoMg[®]. Esto puede deberse a que las plantas

han desarrollado marcos de transporte de alta eficiencia para la captación de Mg, con la finalidad de mantener una concentración constante más alta en un tejido determinado (Chaudhry *et al.*, 2021).

En relación con la eficiencia de utilización de magnesio (MgUtE), los resultados muestran que el Mg es aprovechado de mejor manera si se aplica en cantidades menores (Cuadro 3), destacando las dosis de 50 ppm de ambas fuentes de Mg, sin embargo, su índice de recuperación es más bajo. Con respecto al magnesio total acumulado (TMgA), este tiene en cuenta la distribución del magnesio, no solo su cantidad. De acuerdo con los resultados del presente experimento, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos con respecto a las dosis de magnesio foliar aplicado, siendo el tratamiento más favorecido 200 MgSO₄, incrementando en más de 400% con respecto al control, pero sin ser estadísticamente diferente de 100 MgSO₄ y de 200 NanoMg[®]. Se puede observar que, independientemente del tratamiento aplicado, el TMgA tiende a incrementar conforme aumentan las dosis.

En resumen, es apreciable que a dosis altas se permite mayor absorción y acumulación de magnesio, pero la eficiencia de utilización disminuye. Probablemente se deba a que el Mg excedente se reserva en la vacuola con la finalidad de mantener el equilibrio de Mg citosólico y del cloroplasto, y para estar posteriormente disponible para recuperación, mejorando su carga en el xilema en las raíces y su distribución a los órganos sumideros. Por lo tanto, se ve reflejado en mayor biomasa y rendimiento (Chaudhry *et al.*, 2021). Estos resultados apoyan lo dicho por Cakmaka y Kirkby (2008), quienes mencionan que se necesitan cantidades suficientemente altas de Mg durante la etapa de crecimiento reproductivo para mantener y maximizar el transporte de los órganos fuente.

Cuadro 3. Efecto de la aplicación foliar de MgSO₄ y NanoMg[®] sobre parámetros de uso eficiente de magnesio en frijol ejotero cv. Strike. TMgC se expresó como mg g⁻¹ p.s.; TMgA se expresó en mg Mg; MgUpE se expresó en mg Mg g⁻¹ p.s.; Mg UtE se expresó en g² p.s. mg⁻¹ Mg.

Tratamiento	Contenido total de magnesio (TMgC)	Magnesio total acumulado (TMgA)	Eficiencia en absorción de magnesio (MgUpE)	Eficiencia en utilización de magnesio (MgUtE)	Uso eficiente de magnesio total (MgUE total)
Control - 0 ppm	5.735 d	27.153 d	24.004 d	0.450 a	24.454 d
MgSO ₄ - 50 ppm	14.148 bc	89.154 b	50.781 bcd	0.284 bcd	51.064 bcd
MgSO ₄ - 100 ppm	15.194 abc	96.734 ab	57.639 bc	0.270 cd	57.909 bc
MgSO ₄ - 200 ppm	18.552 a	151.206 a	116.348 a	0.208 d	116.556 a

Nano Mg - 50 ppm	12.206 c	84.373 b	45.857 bcd	0.364 b	46.221 bcd
Nano Mg - 100 ppm	11.612 c	62.944 bc	36.082 bc	0.341 bc	36.423 cd
Nano Mg - 200 ppm	16.446 ab	112.317 ab	66.822 b	0.252 d	65.795 b

*Letras diferentes muestran diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. LSD ($P \leq 0.05$).

Los resultados indican que 200 NanoMg[®] permitió obtener mayor concentración total y acumulación de Mg. Este elemento forma parte de la clorofila, cuyos niveles se vieron favorecidos, permitiendo así más captación de energía luminosa. En consecuencia, altos rendimientos. Esto corrobora que la aplicación de nanofertilizantes vía foliar produce resultados fisiológicos favorables. Por su parte el sulfato de magnesio obtuvo resultados positivos con la dosis de 200 MgSO₄, logrando buenos niveles en pigmentos fotosintéticos a excepción de la clorofila “b” (que obtuvo el nivel más bajo), también permitió los mayores valores de uso eficiente de Mg, incrementando la biomasa, así como, resultando en rendimientos equiparables a los del NanoMg[®].

6.10 Patrón de Distribución de Mg en Plantas de Frijol

Para determinar la repartición de los nutrientes en los diferentes órganos de la planta, el patrón de distribución es un buen indicador (Yamaji y Ma, 2014). En el presente estudio, el patrón de distribución del Mg en las plantas de frijol presentó la siguiente repartición para los tratamientos de NanoMg[®]: fruto 12.91 %, tallo 14.40 %, raíz 40.98 % y hoja 32.41 % (Figura 12).

Mientras que, para los tratamientos de MgSO₄ el patrón de distribución fue el siguiente: fruto 12.27%, tallo 17.34%, raíz 34.54 % y hoja 35.86% (Figura 11 y 12).

En el caso del control, el patrón de distribución fue: raíz 45%, hoja 29%, tallo 16% y fruto 10% (Figura 11).

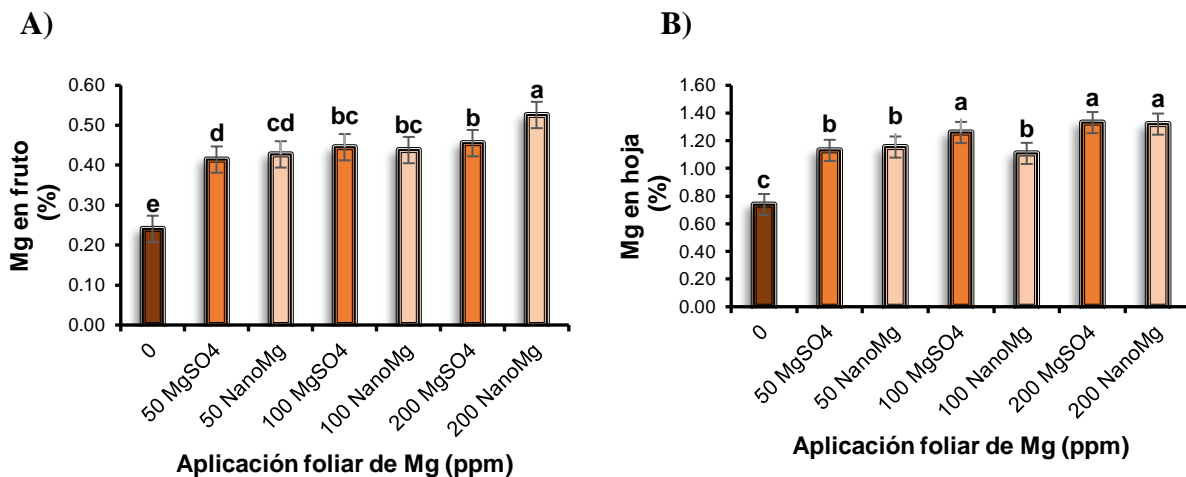
El patrón de distribución de Mg muestra que en todas las dosis de aplicación estudiadas con el tratamiento de NanoMg[®], la mayor concentración de magnesio se dio en las raíces, seguido de las hojas, después tallos y por último los frutos (R>H>T>F) (Figura 11 y 12). Esto es similar a lo apreciado para el control (Figura 11) y a lo reportado por Hawesford *et al.* (2012), donde se

menciona que las concentraciones de Mg en las células de la endodermis de píceas fueron mayores, seguidas de las células del mesófilo. Asimismo, Jaghdani *et al.* (2021), reportan mayor concentración de Mg en las raíces en comparación con las hojas y brotes en el cultivo de espinaca (*Spinacia oleracea*), mismo caso reportado para *Brassica rapa* (Blasco *et al.*, 2015).

Por su parte, el patrón de distribución de Mg en las dosis de aplicación 50 MgSO₄ y 100 MgSO₄, mostraron el mismo comportamiento que el visto en el tratamiento de NanoMg[®] (R>H>T>F). Sin embargo, en 200 MgSO₄ este patrón cambió, encontrándose la mayor concentración de Mg en las hojas, seguido de las raíces, después tallos y por último los frutos (H> R>T>F) (Figura 10 y 11). Lo anterior, se asemeja a lo mencionado por Mitra (2015), donde se señala que la concentración total de Mg en las vacuolas del mesófilo de cebada es alta, representando hasta 7 mM. De igual forma, Blasco *et al.* (2015) señalan que la concentración de Mg en los tejidos aéreos aumenta con suministros altos de Mg en *Brassica rapa*.

Para el control, su comportamiento difiere de lo que se reporta en la literatura, donde es común encontrar que el Mg tiende a trasladarse hacia los brotes y después a las raíces (Kashem y Kawai, 2007).

En general, las concentraciones de Mg se vieron favorecidas con ambas fuentes de Mg, observándose un patrón de distribución similar. Además, los tratamientos en dosis altas permitieron una mayor utilización total de Mg (Cuadro 3), mejorando así los parámetros agronómicos de biomasa y rendimiento (Figura 3 y Figura 4, respectivamente).



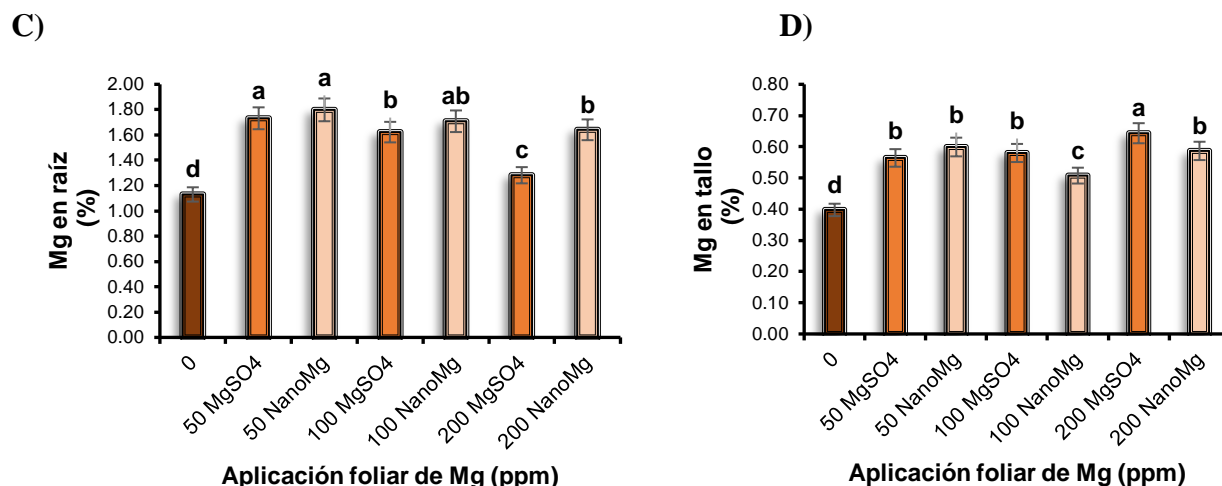


Figura 11. Efecto de la aplicación foliar de los diferentes tratamientos de MgSO₄ y NanoMg[®] sobre la concentración de magnesio en plantas de frijol ejotero cv. Strike en: A) fruto, B) hoja, C) raíz y D) tallo. Las letras diferentes muestran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según prueba de LSD (P < 0.05).

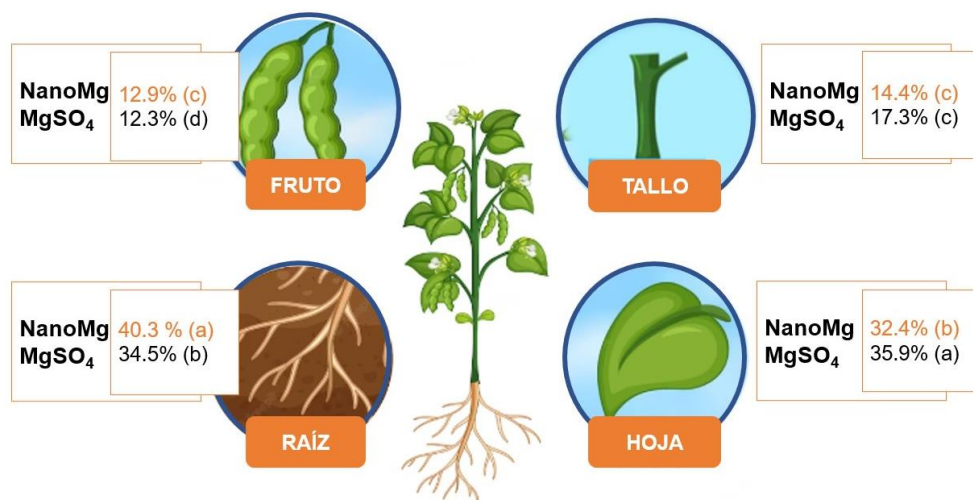


Figura 12. Patrón de distribución de Mg (fruto, tallo, raíz y hoja) en función a la aplicación foliar de nanofertilizante de magnesio (NanoMg[®]) y sulfato de magnesio (MgSO₄) en frijol ejotero cv. Strike. Las letras diferentes en tono naranja muestran diferencias estadísticas significativas entre órganos del tratamiento NanoMg[®]; mientras que, las letras diferentes en tono negro muestran diferencias estadísticas significativas entre órganos del tratamiento MgSO₄, ambas según prueba de LSD (P < 0.05).

Los mayores porcentajes de acumulación en la raíz de Mg pueden deberse a que, las concentraciones excedentes son dirigidas a las vacuolas de las células de la endodermis, con la finalidad de servir como reserva para mantener la homeostasis de Mg en otras células (Hauer-Jákli, y Tränkner, 2019).

6.11. Grado de Biofortificación de Mg en Furtos de Frijol

La biofortificación consiste en aumentar el valor nutricional de los cultivos alimenticios a través de prácticas agronómicas o la biotecnología (Buturi *et al.*, 2021; Palacio-Márquez *et al.*, 2022). En el presente estudio, se obtuvieron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos destacando 200 NanoMg[®], incrementando en 121% en relación con el control (Cuadro 4). Otro tratamiento sobresaliente fue 200 MgSO₄, con 92% de eficiencia con respecto al control (Cuadro 4). En general, es apreciable que, al incrementar la dosis de aplicación, el grado de biofortificación también aumenta, lo que se relaciona con la tendencia observado para biomasa de frutos y total (Figura 3). Kumssa *et al.* (2019), indican que la aplicación foliar de Mg incrementó su contenido en ryegrass italiano (*Lolium multiflorum* L.), conforme aumentó la tasa de aplicación de fertilizantes de Mg para todos los cultivares, con incrementos de 85 al 140 %, con una tasa de aplicación de 1500 μ M de MgCl₂. Mientras que en tomates (*Lycopersicon esculentum* L.) biofortificados con Mg, mostraron un aumento en el contenido de Mg del 2.1% con respecto al control (Coelho *et al.*, 2022).

Cuadro 4. Grado de biofortificación logrado por la aplicación de sulfato de magnesio (MgSO₄) y nanofertilizante de magnesio (NanoMg[®]) en frijol ejotero cv. Strike.

Tratamiento (ppm)	mg/100 g	Grado de biofortificación (%)
Control 0	241	-
MgSO ₄ 50	414	70.83 d
MgSO ₄ 100	445	87.5 bc
MgSO ₄ 200	455	91.67 b
NanoMg [®] 50	427	79.17 cd
NanoMg [®] 100	438	83.33 bc
NanoMg [®] 200	526	120.83 a

*Letras diferente muestran diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. LSD ($P \leq 0.05$).

En base a estos resultados, se postula que los principales indicadores de crecimiento como lo son biomasa y rendimiento fueron favorables para las dosis altas de NanoMg[®] (200 ppm). El 200 MgSO₄, también presentó resultados favorables, manteniéndose a la par del nanofertilizante en la

misma dosis. Sin embargo, la dosis bajas (50 NanoMg[®] y 50 MgSO₄), también presentaron resultados favorables con respecto al control, con grados de biofortificación de más de 70%. Con ello se puede demostrar que los nanofertilizantes pueden actuar igual e incluso superar a una fuente convencional como lo es el sulfato de magnesio. Sin embargo, la respuesta a la aplicación de estas dos fuentes de Mg puede diferir entre cultivos, además de otros factores.

Los resultados obtenidos en este estudio superan la concentración de Mg en semillas de poblaciones nativas de frijol originarias de cuatro regiones de Oaxaca en más del 64% (Espinoza-García *et al.*, 2016). Así mismo, la biofortificación con Mg -aún en dosis bajas- permitió doblar la concentración de magnesio en el frijol ejotero cv. Strike en contraste con el máximo de concentración reportado para frijol negro (220 mg/100g) y dejando por debajo a 104 variedades de genotipos existentes en México (Gutierrez-Ruelas *et al.*, 2018).

La dosis diaria recomendada de ingesta de Mg varía según la etapa de vida, sin embargo se encuentra dentro del rango de 200-400 mg/día (DiNicolantonio *et al.*, 2018; Barbagallo *et al.*, 2021). Por lo que, al consumir 100 g de frijol ejotero cv. Strike biofortificado por NanoMg[®] y MgSO₄ desde dosis bajas logran satisfacer las necesidades diarias del ser humano. Sin embargo, Armendáriz *et al.* (2016), mencionan que el contenido de Mg se puede reducir hasta en 50 % a consecuencia de la cocción. Por ende, la mejor fuente para lograr biofortificar con Mg es 200 NanoMg[®], ya que es la más eficiente para incrementar el contenido de Mg y su presencia en el fruto pese a posibles pérdidas por cocción.

6.12. Calidad Nutricional en Frutos de Frijol

La calidad nutricional, es una variable de suma importancia que se debe de considerar, ya que establece la funcionalidad de los alimentos en la dieta (Hermosillo, 2012).

La productividad de un cultivo está relacionada con un apropiado aporte de N. En las plantas, los productos finales de la asimilación de N son las proteínas, las cuales son necesarias para un adecuado crecimiento del cuerpo humano. Los resultados de esta investigación no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en la acumulación de N en los frutos con respecto al control (Cuadro 5). Pese a ello, en todas las dosis y en ambas formas de aplicación, se observó

un declive de hasta 5% en la dosis máxima comparación con el control. En las dosis que se encontró mayor rendimiento (200 NanoMg[®] y 200 MgSO₄), fueron las que menor concentración tuvieron de dicho nutriente, posiblemente debido al gasto energético en la producción de frutos. Esto resultados se relaciona con lo mencionado por Karooki *et al.* (2021), para el cultivo de papa, donde las aplicaciones de mayores cantidades de Mg condujeron a una disminución del contenido de N. También, se asemejan a los encontrados por Kleiber *et al.* (2012), quienes reportan que el N acumulado en bulbos de cebolla después de la aplicación de Mg a dosis de 50 g Mg· m⁻², fue mayor que para dosis más altas.

En el caso de las proteínas, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, observándose un descenso en su contenido con respecto al control, conforme incrementó la dosis de Mg. Esto concuerda con lo señalado para los tubérculos de papa, donde la nutrición con Mg ya sea como tratamiento foliar o del suelo, no tuvo una influencia significativa en el contenido proteico (Karooki *et al.* 2021). Dicha caída fue menos marcada para los tratamientos con MgSO₄ en comparación con NanoMg[®]. Esto puede deberse al ion sulfato; el azufre apoya la utilización de N, a la par que estimula los rendimientos (Zlámlová *et al.*, 2016). Para fósforo, también se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos, observándose un decremento con respecto al control para los tratamientos de NanoMg[®], aunque la diferencia entre los tratamientos de esta fuente de Mg no fue estadísticamente significativa. Mientras que, para MgSO₄, los valores superaron al control, aunque, de igual manera, la diferencia entre estos tratamientos no fue estadísticamente significativa. Estos datos se igualan a lo mencionado para el cultivo de trigo, donde la aplicación de Mg tuvo una influencia positiva en la absorción de P por la planta (Rathore y Tarafdar, 2015).

Con relación al potasio (K), se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$) entre tratamientos, destacando los tratamientos de MgSO₄ con un aumento del 12-17% respecto al control. Por su parte, para NanoMg[®], se aprecian incrementos solo al aplicar dosis altas (200 ppm) superando al control en un 10% (Cuadro 5). Esto se relaciona con lo mencionado por Karooki *et al.* (2021), quienes reportan un efecto positivo del aumento de la nutrición de Mg sobre un el K en el cultivo de papa.

En el caso del mineral calcio (Ca), no se encontraron diferencias con respecto al control con ambas fuentes de Mg (Cuadro 5). Aunque, múltiples estudios reportan lo contrario, acentuando el efecto antagónico entre Mg y Ca, donde el Ca disminuye gradualmente a medida que incrementa el Mg

(Kleiber *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2020). Sin embargo, también existen investigaciones que encontraron una relación positiva entre ambos nutrientes, como Karooki *et al.* (2021), en cultivo de papa o Kleiber *et al.* (2012) en cebolla.

Por su parte, en el micronutriente zinc (Zn), el análisis estadístico mostro diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), es apreciable que existe un decremento con respecto al control de hasta 15%, con la dosis máxima de aplicación (Cuadro 6). Esto concuerda con los resultados para el cultivo de pimiento (Lu *et al.*, 2020) y para el cultivo de trigo (Rathore y Tarafdar, 2015).

El cobre (Cu) es un elemento de transición activo redox con papeles en fotosíntesis, respiración, metabolismo de C y N, y protección contra el estrés oxidativo (Marschener, 2012). En relación con este mineral, también hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), es apreciable que cuando la dosis de Mg de ambas fuentes incrementa, su absorción se ve favorecida con respecto al control, aunque esto solo es significativo tras aplicar 200 MgSO₄, diferenciándose del control y superando su concentración en un 37% (Cuadro 6). Estos datos concuerdan con lo reportado por Rathore y Tarafdar (2015), para el cultivo de trigo.

Con respecto al ion manganeso (Mn), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, presentando una disminución en su concentración en el fruto conforme la dosis de Mg con ambas fuentes se incrementó (Cuadro 6). Esto puede deberse al efecto antagónico entre ambos iones (Marschener, 2012).

En cuanto al hierro (Fe), también se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), apreciándose un incremento con respecto al control al aplicar 200 NanoMg[®], mientras que, para MgSO₄, se aprecian diferencias con respecto al control con 50 MgSO₄ (Cuadro 6). Estos resultados coinciden con lo encontrado por Rathore y Tarafdar (2015), en donde la aplicación de Mg tuvo una influencia positiva sobre la absorción de dicho nutriente en el cultivo de trigo.

Cuadro 5. Concentración de macronutrientes en el fruto del frijol cv. Strike después de la aplicación de sulfato de magnesio (MgSO₄) y nanofertilizante de magnesio (NanoMg[®]).

Dosis (ppm)	Concentración (g 100 g ⁻¹ de peso seco)					
NanoMg [®]	N	P	K	Ca	Mg	Proteína %
0	3.643 a	0.208 abc	3.2333 c	0.433 ab	0.241 e	28.21 a
50	3.550 a	0.193 abc	3.2800 c	0.497 a	0.427 cd	22.07 a
100	3.552 a	0.183 bc	3.2208 c	0.481 a	0.438 bc	17.96 b

200	3.446 a	0.134 c	3.5675 b	0.444 ab	0.526 a	17.633 b
MgSO₄	N	P	K	Ca	Mg	Proteína%
0	3.643 a	0.208 abc	3.2333 c	0.433 ab	0.241 e	28.21 a
50	3.555 a	0.320 a	3.7050 ab	0.433 ab	0.414 d	21.92 ab
100	3.542 a	0.231 abc	3.6250 ab	0.381 b	0.445 bc	21.23 b
200	3.518 a	0.292 ab	3.78250 a	0.483 a	0.455 b	20.78 b
Significancia	NS	*	***	*	*	*

*Letras diferentes por columna indican diferencias significativas entre tratamientos. LSD ($P \leq 0.05$).

Cuadro 6. Concentración de micronutrientes en el fruto del frijol cv. Strike después de la aplicación de sulfato de magnesio (MgSO₄) y nanofertilizante de magnesio (NanoMg®).

Dosis		Concentración (g 100 g⁻¹ de peso seco)			
NanoMg®	Zn	Cu	Mn	Fe	
0	29.000 b	12.250 c	56.583 a	72.000 b	
50	20.75 d	11.833 c	46.333 b	82.167 ab	
100	22.92 cd	12.417 bc	48.167 ab	73.417 b	
200	24.50 c	12.583 bc	44.250 b	90.500 a	
MgSO₄	Zn	Cu	Mn	Fe	
0	29.000 b	12.250 c	56.583 a	72.000 b	
50	25.417 c	14.500 b	47.167 b	92.167 a	
100	33.500 a	13.833 bc	56.500 a	76.083 b	
200	25.000 c	16.750 a	48.500 ab	84.833 ab	
Significancia	***	**	*	*	

*Letras diferentes por columna indican diferencias significativas entre tratamientos. LSD ($P \leq 0.05$).

Algunos autores mencionan que dosis de Mg más allá los requeridos para el rendimiento máximo rara vez inducen una mayor mejora de la calidad del producto (Zlámlová *et al.*, 2016). Sin embargo, Marschener (2012), indica que, por lo general, las altas concentraciones de Mg mejoran la calidad nutricional. Para este trabajo, se pudo apreciar que ciertos minerales se vieron beneficiados (como el K o el Cu), lo que puede deberse al papel del Mg en regular las vías de transporte de iones (Shaul, 2002).

7. CONCLUSIONES

Las dosis y fuentes más eficientes para incrementar el crecimiento de plantas de frijol ejotero cv. Strike fueron 200 NanoMg[®] y 200 MgSO₄, las cuales favorecieron la acumulación de biomasa total y el rendimiento. También favorecieron el índice de clorofila y la actividad fotosintética, además de influir de manera positiva en la asimilación de nitrógeno (MgSO₄), beneficiando la síntesis de aminoácidos y proteínas solubles.

Con respecto al patrón de distribución del Mg en las plantas de frijol, se presentó la siguiente repartición para los tratamientos de NanoMg[®]: raíz>hoja>tallo>fruto; mientras que para los tratamientos de MgSO₄ el patrón de distribución fue: hoja>raíz>tallo>fruto.

El tratamiento más eficiente en incrementar el contenido de Mg y, por lo tanto, favorecer su presencia en el fruto fue 200 NanoMg[®], el cual logró una biofortificación de más de 120% con respecto al control. Por lo que, al consumir 100 g de frijol ejotero cv. Strike biofortificado por NanoMg[®], se podrían satisfacer las necesidades diarias recomendadas del ser humano pese a la cocción.

Con relación a la calidad nutricional de los frutos de frijol ejotero cv. Strike, después de la aplicación de ambas fuentes de Mg, se observó que la absorción de minerales como el K y Cu se vieron beneficiados, mientras que, para el resto no hubo cambios significativos.

En conclusión, la forma y dosis de Mg que podría mejorar la calidad nutricional y ser óptimas para futuros programas de biofortificación en frijol fue 200 NanoMg[®], ya que permitió mayor rendimiento y acumulación de Mg en los frutos, además de ser eficiente para la mayoría de los parámetros determinados. Mientras que, si lo que se busca es solo mejorar variables agronómicas, sin fines de biofortificación, 200 MgSO₄ proporciona buenos resultados.

8. RECOMENDACIONES

Existe una amplia complejidad en las relaciones entre el ambiente y las plantas, las cuales escapan al control simple. Por muchos conocimientos que se tengan sobre un cultivo, no es posible predecir con exactitud su comportamiento. La investigación bajo hidroponía es muy noble, nos permite obtener respuestas, basado en el control de la parte experimental y de diversas variables de respuesta como lo son: fertilización o riego.

Dentro de sus bondades se encuentran: reducir incidencia de patógenos y no tener problemas con malezas. Además, de poder observar el efecto real (en este caso) de aplicar cantidades crecientes de Mg como nanofertilizante y como sulfato sobre la fisiología de la planta y como se manifiesta en el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional. Esto gracias al control que se posee sobre la cantidad de nutrientes, agua, pH, aplicaciones de tratamientos, entre otros.

Sin embargo, pese a sus bondades y positivos resultados, la biofortificación de frijol con nanofertilizantes de Mg podría comportarse de forma distinta en campo. Esto debido a la interacción con múltiples factores bióticos y abióticos, así como, la forma de aplicación. Es por ello que, es necesario trasladar los experimentos a campo para validar los resultados obtenidos. Asimismo, hay que recalcar que las dosis y formas de aplicación más adecuadas pueden variar entre los distintos cultivos.

Otro aspecto importante, es considerar trabajar con las variedades de frijol más consumidas en las diversas regiones de México, las cuales poseen altas concentraciones de nutrientes, y serían perfectos candidatos para futuros programas de biofortificación por ser la base de la alimentación de los mexicanos.

Finalmente, se sugiere realizar una investigación donde se evalúe la biodisponibilidad del Mg, para conocer la cantidad o parte de éste que es absorbida y se hace disponible y es aprovechada en el cuerpo humano.

9. REFERENCIAS

- Agüero-Esparza, M., Villalobos-Cano, O., Sánchez, E., Pérez-Álvarez, S., Sida-Arreola, J.P., Palacio-Márquez, A., Ramírez-Estrada, C.A. (2022). Effectiveness of foliar application of biostimulants and nanoparticles on growth, nitrogen assimilation and nutritional content in green bean. *Notulae Scientia Biologicae*. 14(3): 11261.
- Aguilar-Pérez, K.M., Avilés-Castrillo, J.I., Ruiz-Pulido, G. (2020). Nano-sorbent materials for pharmaceutical-based wastewater effluents-An overview. *Case Stud. Chem. and Environ. Eng.* 2: 100028.
- Altarugio, L.M., Loman, M.H., Nirschl, M.G., Silvano, R.G., Zavaschi, E., Carneiro, L. de M., Otto, R. (2017). Yield performance of soybean and corn subjected to magnesium foliar spray. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 52(12): 1185–1191.
- Amaya-Olivas, N.I., Sánchez, E., Hernández-Ochoa, L., Ojeda-Barrios, D.L., Ávila-Quezada, G.D., Flores-Córdova, M.A., Chávez-Flores, D., Ayala-Soto, J.G., Salcido-Martínez, A., Ramírez-Estrada, C.A. (2023). Biofortification with magnesium nanofertilizer on bioactive compounds and antioxidant capacity in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 51(1): 12830.
- Anaya-López, J.L., Ibarra-Pérez, F.J., Rodríguez-Cota, F.G., Ortega-Murrieta, P.F., Acosta-Gallegos, J.A., Chiquito-Almanza, E. (2021). Leguminosas De Grano En México: Variedades Mejoradas De Frijol Y Garbanzo Desarrolladas Por El INIFAP. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*. 12(25): 63-75.
- Araméndiz-Tatis, H., Cardona-Ayala, C.E., Combatt-Caballero, E.M. (2016). Contenido Nutricional de Líneas de Fríjol Caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) Seleccionadas de una Población Criolla. *Información tecnológica*. 27(2): 53-60.
- Arakawa, T., Bhat, R., Timasheff, S.N. (1990). Preferential interactions determine protein solubility in three-component solutions: the magnesium chloride system. *Biochemistry*. 29(7): 1914–1923.
- Ba, Q., Zhang, L., Chen, S. (2020). Effects of foliar application of magnesium sulfate on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and its translocation, and carbohydrate metabolism in grain during wheat grain filling. *Cereal Research Communications*. 48: 157–163.
- Babu, S., Singh, R., Yadav, D., Rathore, S.S., Raj, R., Avasthe, R., Yadav, S.K., Das, A., Yadav, V., Yadav, B., Shekhawat, K., Upadhyay, P.K., Yadav, D.K., Singh, V.K. (2022). Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability, *Chemosphere*. 292: 133451.
- Barbagallo M, Veronese N, Dominguez LJ. (2021). Magnesium in Aging, Health and Diseases. *Nutrients*. 13(2):463.
- Bautista-Díaz, J., Cruz-Álvarez, O., Hernández-Rodríguez, O.A., Sánchez-Chávez, E., Jacobo-Cuellar, J.L.; Preciado-Rangel, P., Ojeda-Barrios, D.L. (2021). Zinc sulphate or zinc nanoparticle applications to leaves of green beans. *Folia Hortic*. 33(2): 365-375.

- Bilal, M., Barcelo, D., Iqbal, H.M. (2021). Occurrence, environmental fate, ecological issues, and redefining of endocrine disruptive estrogens in water resources. *Sci. Total Environ.* 800: 149635.
- Blasco, B., Graham N. S., Broadley M.R. (2015). Antioxidant response and carboxylate metabolism in *Brassica rapa* exposed to different external Zn, Ca, and Mg supply. *Journal of Plant Physiology.* 176: 16-24.
- Blekkenhorst, L.C., Sim, M., Bondonno, C.P., Bondonno, N.P., Ward, N.C., Prince, R.L., Devine, A., Lewis, J.R., Hodgson, J.M. (2018). Cardiovascular health benefits of specific vegetable types: a narrative review. *Nutrients* 10(5): 1-24.
- Bo, Y., Ying, H. (2018). *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 170(2): 022168.
- Bouis, H.E., Hotz, C., McClafferty, B., Meenakshi, J.V., Pfeiffer, W.H. (2011). Biofortification: A new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food Nutr. Bull.* 32: 31–40.
- Buturi, C.V., Mauro, R.P., Fogliano, V., Leonardi, C., Giuffrida, F. (2021). Mineral Biofortification of Vegetables as a Tool to Improve Human Diet. *Foods*, 10(2): 223.
- Cakmak, I., Kirkby, E.A. (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiol. Plant.* 133(4): 692–704.
- Cakmak, I., White, P.J. (2020). Magnesium in crop production and food quality. *Plant Soil.* 457: 1–3.
- Castellanos-Gutiérrez, A., Sánchez-Pimienta, T.G., Carriquiry, A. (2018). Higher dietary magnesium intake is associated with lower body mass index, waist circumference and serum glucose in Mexican adults. *Nutr J.* 17: 114.
- Cedeño-Zambrano, J.R., García-Párraga, J.V., Solórzano-Cobeña, C.M., Jiménez-Flores, L.A.J., Ulloa-Cortazar, S.M., López-Mejía, F.X., Avellán-Vásquez, L.E., Bracho-Bravo, B.Y., Sánchez-Urdaneta, A.B. (2022). Fertilización Con Magnesio En Plátano ‘Barraganete’ (Musa Aab) Ecuador. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida.* 35(1): 8-19.
- Chaudhry, A.H., Nayab, S., Hussain, S.B., Ali, M., Pan, Z. (2021). Current Understandings on Magnesium Deficiency and Future Outlooks for Sustainable Agriculture. *International Journal of Molecular Sciences.* 22(4): 1819.
- Chen, Z.C., Peng, W.T., Li, J., Liao, H. (2018). Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. *Semin. Cell Dev. Biol.* 74: 142–152.
- Ciscomani-Larios, J.P., Sánchez-Chávez, E., Jacobo-Cuellar, J.L., Sáenz-Hidalgo, H.K., Orduño-Cruz, N., Cruz-Alvarez, O., Ávila-Quezada, G.D. (2021). Biofortification efficiency with magnesium salts on the increase of bioactive compounds and antioxidant capacity in snap beans. *Ciência Rural.* 51(6): e20200442.
- Coelho, A.R.F., Luís, I.C., Marques, A.C., Pessoa, C.C., Daccak, D., Silva, M.M., Simões, M. et al. (2022). Mineral Interaction in Biofortified Tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.) with Magnesium. *IECHo. MDPI.* 16: 16.
- de Baaij, J.H., Hoenderop, J.G., Bindels, R.J. (2015). Magnesium in man: implications for health and disease. *Physiol Rev.* 95(1): 1-46.
- Delfani, M., Baradaran-Firouzabadi, M., Farrokhi, N., Makarian, H. (2014). Some Physiological

- Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 45: 530-540.
- Desai, V., Singh, D.B., Desai, H.G., Suthar. (2017). Effect of magnesium nanoparticles on physiology and stevioside in *Stevia rebaudiana Bertoni*. 4(9): 642-646.
- Dhlamini, B., Paumo, H.K., Katata-Seru, L., Kutu, F.R. (2020). Sulphate-supplemented NPK nanofertilizer and its effect on maize growth. *Mater. Res. Express*. 7(9): 095011.
- DiNicolantonio, J.J., O’Keefe, J.H., Wilson, W. (2018). Subclinical magnesium deficiency: a principal driver of cardiovascular disease and a public health crisis. *Open heart*. 5(1): e000668.
- Dong, D., Yang, Z., Ma, Y., Li, S., Wang, M., Li, Y., Liu, Z. (2022). Expression of a Chlorophyll b Reductase Gene from *Zoysia japonica* Causes Changes in Leaf Color and Chlorophyll Morphology in *Agrostis stolonifera*. *Int. J. Mol. Sci*. 23(11): 6032.
- Echeverría-Machado, I. (2019). El tamaño sí importa: Los nanofertilizantes en la era de la agricultura de precisión. *Desde el Herbario CICY*. 11: 69–75.
- Elemike, E., Uzoh, I., Onwudiwe, D., Babalola, O. (2019). The Role of Nanotechnology in the Fortification of Plant Nutrients and Improvement of Crop Production. *Applied Sciences*. 9(3): 499.
- El-Ezz, S.F.A., A.L.A., Al-Harbi, N.A., Al-Qahtani, S.M., Allam, H.M., Abdein, M.A., Abdelgawad, Z.A.A. (2022). Comparison of the Effects of Several Foliar Forms of Magnesium Fertilization on ‘Superior Seedless’ (*Vitis vinifera* L.) in Saline Soils. *Coatings*. 12(2): 201.
- Elin, R.J. (2011). Re-evaluation of the concept of chronic, latent, magnesium deficiency. *Magnesium Research*. 24(4): 225–227.
- Elliott, G.C., Läuchli, A. (1985). Phosphorus efficiency and phosphate-iron interaction in maize. *Agron J*. 77(3): 399–403.
- Espinoza-García, N., Martínez-Martínez, R., Chávez-Servia, J.L., Vera-Guzmán, A.M., Carrillo-Rodríguez, J.C., Heredia-García, E., Velasco-Velasco, V.A. (2016). Contenido de minerales en semilla de poblaciones nativas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista fitotecnia mexicana*. 39(3): 215-223.
- FAO. (2021). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Lograr que los sistemas agroalimentarios sean más resilientes a las perturbaciones y tensiones. Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de: <https://www.fao.org/publications/sofa/sofa-2021/es/>
- Fiorentini, D., Cappadone, C., Farruggia, G., Prata, C. (2021). Magnesium: Biochemistry, Nutrition, Detection, and Social Impact of Diseases Linked to Its Deficiency. *Nutrients*, 13(4): 1136.
- Flores, M.L. (2015). El cultivo del frijol. *Revista Digital Universitaria*. 16(2): 1-11.
- Gebert, M., Meschenmoser, K., Svidová, S., Weghuber, J., Schweyen, R., Eifler, K., Lenz, H., Weyand, K., Knoop, V. (2009). A rootexpressed magnesium transporter of the MRS2/MGT gene family in *Arabidopsis thaliana* allows for growth in low-Mg²⁺ environments. *Plant*

- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal*. 4(2): 83–91.
- Gutiérrez Ruelas, N.J., Sánchez Chávez, E., Ojeda Barrios, D.L., Hernández Rodríguez, O.A. (2018). Cap. 1 Caracterización nutricional de la biodiversidad de frijol en México con potencial a Biofortificar con micronutrientes. En Sánchez Chávez, E., Romero Monreal, L.R., Hernandez Figueroa, K.I. (Eds.), *Biofortificación con micronutrientes en frijol* (pp.1-38). Plácio Cuadros, Granada, España.
- Gutiérrez-Ruelas, N.J., Palacio-Márquez, A., Sánchez, E., Muñoz-Márquez, E., Chávez-Mendoza, C., Ojeda-Barrios, D.L., Flores-Córdova, M.A. (2021). Impact of the foliar application of nanoparticles, sulfate and iron chelate on the growth, yield and nitrogen assimilation in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 49(3): 12437.
- Hauer-Jákli, M., Tränkner, M. (2019). Critical Leaf Magnesium Thresholds and the Impact of Magnesium on Plant Growth and Photo-Oxidative Defense: A Systematic Review and Meta-Analysis From 70 Years of Research. *Front. Plant Sci*. 776 (10):1-15
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lamber, H., Schjoerring, J., Moller, I.S., *et al.* (2012). “Functions of macronutrients,” in Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd Edn, ed P. Marschner (London: Academic Press. 135–189.
- Heidari P., Abdullah, F.S., Poczai, P. (2021). Magnesium transporter Gene Family: Genome-Wide Identification and Characterization in *Theobroma cacao*, *Corchorus capsularis*, and *Gossypium hirsutum* of Family Malvaceae. *Agronomy*. 11(8): 1651.
- Hermosillo, M.A. (2012). Biofortificación con selenio: influencia en la capacidad antioxidante y calidad nutricional del frijol. [Tesis doctoral inédita]. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.
- Jaghdani S.J., Jahns P., Tränkner M. (2021). The impact of magnesium deficiency on photosynthesis and photoprotection in *Spinacia oleracea*. *Plant Stress*. 2: 1040.
- Kashem, M.A., Kawai, S. (2007). Alleviation of cadmium phytotoxicity by magnesium in Japanese mustard spinach. *Soil Science and Plant Nutrition*: 53(3), 246–251.
- Kanjana, D. (2020). Foliar application of magnesium oxide nanoparticles on nutrient element concentrations, growth, physiological, and yield parameters of cotton. *J. Plant Nutr.* 43(20): 3035-3049.
- Karooki, A., Yavarzadeh, M., Akbarian, M.M., Askari, A.A. (2021). Effects of Nanofertilizers (Mg and Fe) and Planting Data on Productivity and Quality of Potato Tubers in Cold Desert Climate. *Revista Agrogeoambiental*. 13(1): 107-116.
- Kleiber, T., Golcz, A., Krzesiński, W. (2012). Effect of Magnesium Nutrition of Onion (*Allium cepa* L.). Part I. Yielding and Nutrient Status. *Ecological Chemistry and Engineering S*. 19(1): 97–105.
- Kocal, N., Sonnewald, U., Sonnewald, S. (2008). Cell wall-bound invertase limits sucrose export and is involved in symptom development and inhibition of photosynthesis during compatible interaction between tomato and *Xanthomonas campestris* pv *vesicatoria*. *Plant Physiol.*, 148(3): 1523-1536.

- Kruger, N.J. (2009). The Bradford Method for Protein Quantitation. In: Walker, J.M. (eds) The Protein Protocols Handbook. Springer Protocols Handbooks. Humana Press, Totowa, NJ. 17-24.
- Kumssa, D.B., Lovatt, J.A., Graham, N.S., Palmer, S., Hayden, R., Wilson, L., Broadley, M.R. (2019). Magnesium biofortification of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) via agronomy and breeding as a potential way to reduce grass tetany in grazing ruminants. *Plant and Soil*. 457(1-2): 25–41.
- Lillo, C. (1994). Light regulation of nitrate reductase in green leaves of higher plants. *Physiologia Plantarum*. 90(3): 616–620.
- Lu, M., Liu, D., Shi, Z., Gao, X., Liang, Y., Yao, Z., Chen, X. (2020). Nutritional quality and health risk of pepper fruit as affected by magnesium fertilization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 101(2): 582-592.
- Lu, W., Teng, Y., He, F., Wang, X., Qin, Y., Cheng, G., Xu, X. (2022). OsChlC1, a Novel Gene Encoding Magnesium-Chelating Enzyme, Affects the Content of Chlorophyll in Rice. *Agron MDPI AG*. 13(1): 129.
- Luo, F., Cheng, S.C., Cai, J.H., Wei, B.D., Zhou, X., Zhou, Q., Ji, S.J. (2019). Chlorophyll degradation and carotenoid biosynthetic pathways: Gene expression and pigment content in broccoli during yellowing. *Food Chem*. 1(297): 124964.
- Majumdar, S., Keller, A.A. (2021). Omics to address the opportunities and challenges of nanotechnology in agriculture. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 51(22): 2595-2636.
- Marschener, P. (Ed.). (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. San Diego, California, Estados Unidos de America: Academic Press.
- Mauriño, S.G., Echevarria, C., Mejias, J.A., Vargas, M.A., Maldonado, J.M. (1986). Properties of the in vivo nitrate reductase assay in maize, soybean, and spinach leaves. *J. Plant Physiol*. 124: 0123-130.
- Mahawar, H., Prasanna, R., Simranjit, K., Thapa, S., Kanchan, A., Singh, R., Nain, L. (2017). Deciphering the mode of interactions of nanoparticles with mung bean (*Vigna radiata* L.). *Israel Journal of Plant Sciences*. 1–9.
- Mejía-Rodríguez, F., Shamah-Levy, T., Villalpando, S., García-Guerra, A., Méndez-Gómez, H.I. (2013). Iron, zinc, copper and magnesium deficiencies in Mexican adults from the National Health and Nutrition Survey 2006. *Salud Publica Mex [Internet]*. 55(3): 275-84.
- Meloni, D.A., Silva, D.M., Ledesma, R., Bolzón, G.I. (2017). Nutrición mineral y fotosíntesis en plántulas de algarrobo blanco, *Prosopis alba* (Fabaceae), en estrés salino. *Cuadernos de investigación UNED*. 9 (2): 297-304
- Mengel, K., Kirkby, E.A. (2000). *Principios de nutrición vegetal*. Basilea, Suiza: Instituto Internacional de la Potasa.
- Mendoza-Tafolla, R.O., Juarez-Lopez, P., Ontiveros-Capurata, R.E., Sandoval-Villa, M., Iran, A.T., Alejo-Santiago, G. (2019). Estimating nitrogen and chlorophyll status of romaine lettuce using SPAD and at LEAF readings. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca*. 47(3): 751-756.

- Mercola, J. (2022). La deficiencia de magnesio está relacionada con la diabetes y la presión arterial alta. De Mercola. Recuperado de: <https://articulos.mercola.com/sitios/articulos/archivo/2019/11/25/diabetes-por-bajos-niveles-de-magnesio.aspx>
- Miguel-Rojas, C., Pérez-de-Luque, A. (2020). Nanofertilizantes para cereales: situación actual y perspectivas futuras. *Tierras agricultura*. 288: 62-66
- Mitra, G.N. (2015). Magnesium (Mg) Uptake. In: *Regulation of Nutrient Uptake by Plants*. Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2334-4_6
- Molina, E. (2000). Nutrición y fertilización de la naranja. *Informaciones Agronómicas*. 40:6-7
- Morales-De Casas, M.S., Márquez-Linares, M.A. (2020). Percepción de los asesores técnicos en torno a las implicaciones del TLCAN en la producción de frijol de temporal en la Región de los Llanos, Durango. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*. 30(55): e20880.
- Moreno-Valdespino, C.A., Luna-Vital, D., Camacho-Ruiz, R.M., Mojica, L. (2020). Bioactive proteins and phytochemicals from legumes: mechanisms of action preventing obesity and type-2 diabetes. *Food Res.Int.* 130(1): 108905
- Neuhaus, C., Geilfus, C.M., Mühling, K.H. (2014). Increasing root and leaf growth and yield in Mg-deficient faba beans (*Vicia faba*) by MgSO₄foliar fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 177(5): 741–747.
- Ngigi, P.B., Lachat, C., Masinde, P.W., Du Laing, G. (2019). Agronomic biofortification of maize and beans in Kenya through selenium fertilization. *Environmental Geochemistry and Health*. 41: 2577–2591.
- Palacio-Márquez, A., Ramírez-Estrada, C.A., Gutiérrez-Ruelas, N.J., Sánchez, E., Barrios, D.L. O., Chávez-Mendoza, C., Sida-Arreola, J.P. (2021). Efficiency of foliar application of zinc oxide nanoparticles versus zinc nitrate complexed with chitosan on nitrogen assimilation, photosynthetic activity, and production of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientia Horticulturae*. 288: 110297.
- Palacio-Márquez, A., Ramírez-Estrada, C.A., Sánchez, E., Ojeda-Barrios, D.L., Chávez-Mendoza, C., Sida-Arreola, J.P. (2022). Biofortification with nanoparticles and zinc nitrate plus chitosan in green beans: effects on yield and mineral content. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 50(2): 12672.
- Papandreou, C., Becerra-Tomás, N., Bulló, M., Martínez-González, M.A., Corella, D., Estruch, R., Ros, E., Arós, F., Schröder, F., Fito, M. (2019). Legume consumption and risk of all-cause, cardiovascular, and cancer mortality in the PREDIMED study. *Clin Nutr.* 38(1): 348-356.
- Ramírez-Estrada, C.A., Sánchez, E., Flores-Cordova, M.A., Chávez-Mendoza, C., Muñoz-Márquez, E., Palacio-Márquez, A., Hernández-Figueroa, K.I. (2022). Efficiency and assimilation of nitrogen in bean plants through foliar application of zinc and molybdenum nano fertilizer. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca*. 50(2): 12719.
- Rathore, I., Tarafdar, J.C. (2015). Perspectives of Biosynthesized Magnesium Nanoparticles in Foliar Application of Wheat Plant. *Journal of Bionanoscience*. 9(3): 209–214.

- Salinas-Ramírez, N., Escalante-Estrada, J.A., Rodríguez-González, M., Sosa-Montes, E. (2012). Rendimiento y calidad nutrimental de frijol ejotero en dos ambientes. *Rev. Fitotec. Mex.* 35(4): 317-323.
- Salcido-Martínez, A., Sánchez, E., Licon-Trillo, L.P., Pérez-Álvarez, S., Palacio-Márquez, A., Amaya-Olivas, N.I., Preciado-Rangel, P. (2020). Impact of the foliar application of magnesium nanofertilizer on physiological and biochemical parameters and yield in green beans. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca.* 48(4): 2167-2181.
- Sánchez, E. (2006). Caracterización del estado nutricional y fisiológico en plantas de judía (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Strike) sometidas a un estrés por nitrógeno. Tesis doctoral. Pág. 3-11.
- Sánchez, E., Rivero, R.M., Ruiz, J.M., Romero, L. (2004). Changes in biomass, enzymatic activity and protein concentration in roots and leaves of green bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Strike) under high NH_4NO_3 application rates. *Scientia Horticulturae.* 99(3-4): 237–248.
- Sánchez-Chávez, E., Barrera-Tovar, R., Muñoz-Márquez, E., Ojeda-Barrios, D.L., Anchondo-Nájera, Á. (2011). Efecto del ácido salicílico sobre biomasa, actividad fotosintética, contenido nutricional y productividad del chile jalapeño. *Revista Chapingo. Serie horticultura.* 17(1): 63-68.
- Sangerman-Jarquín, D., Acosta-Gallego, J., Schwenstesius de Rindermann, D.H., M.Á., Larqué Saavedra, B. (2010). Consideraciones e importancia social en torno al cultivo del frijol en el centro de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas.* 1(3): 363-380.
- SAS. (2004). The SAS[®] System for Windows[®] (Ver. 9.0).
- Setareh, J.J., Peter, J., Tränkner, M. (2021). The impact of magnesium deficiency on photosynthesis and photoprotection in *Spinacia oleracea*. *Plant Stress.* 2(2021): 100040.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). La importancia de la producción de frijol en México. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-importancia-de-la-produccion-de-frijol-en-mexico>
- Shaul, O. (2002). Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals,* 15: 307-321.
- Shimoda, Y., Ito, H., Tanaka, A. (2012). Conversion of chlorophyll b to chlorophyll a precedes magnesium dechelation for protection against necrosis in *Arabidopsis*. *The Plant Journal.* 72(3): 501–511.
- Shinde, S., Paralikar, P., Ingle, A.P., Rai, M. (2018). Promotion of seed germination and seedling growth of *Zea mays* by magnesium hydroxide nanoparticles synthesized by the filtrate from *Aspergillus niger*. *Arabian Journal of Chemistry.* 13(1): 3172-3182.
- Shrestha, S., Brueck, H., Asch, F. (2012). Chlorophyll index, photochemical reflectance index and chlorophyll fluorescence measurements of rice leaves supplied with different N levels. *J. Photochem. Photobiol. B, Biol.* 113: 7-13.
- Sida-Arreola, J.P., Sánchez-Chávez, E. (2016). Biofortificación del frijol. Estrategia potencial para combatir la desnutrición y mejorar la salud humana. *Ciencia y Desarrollo.* 42(286): 37-43.

- Siddiqi, M.Y., Glass, A.D.M. (1981). Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *J. Plant Nutr.* 4(3): 289–302.
- Singh, D., Heta B., Desai Charmi, V., Desai, H.G., Suthar. (2017). Effect of magnesium nanoparticles on physiology and stevioside in *Stevia rebaudiana* Bertoni. 4(9): 642-646.
- Stagnari, F., Onofri, A., Pisante, M. (2009). Response of French Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Cultivars to Foliar Applications of Magnesium. *Italian Journal of Agronomy.* 4(3): 101-110.
- Sultan, B., Defrance, D., Lizumi, T. (2019). Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models. *Sci. Rep.* 9(1): 12834
- Teixeira-Guedes, C.I., Oppolzer, D., Barros, A.I., Pereira-Wilson, C. (2019). Impact of cooking method on phenolic composition and antioxidant potential of four varieties of *Phaseolus vulgaris* L. and *Glycine max* L. *LWT.* 103: 238- 246.
- Tränkner, M., Tavakol, E., Jákli, B. (2018). Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. *Physiologia Plantarum.* 163(3): 414–431.
- Veneros Terrones, R. (2010). Efecto del sulfato de magnesio en la concentración de sacarosa en el jugo de tallo de *Saccharum officinarum* L. variedades H32 y H38 “caña de azúcar”. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Verbruggen, N., Hermans, C. (2013). Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant Soil.* 368: 87–99.
- Wang, Z., Hassan, M.U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F., Li, X. (2020). Magnesium Fertilization Improves Crop Yield in Most Production Systems: A Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science.* 24(10): 1727.
- Wellburn, A.R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b as well total carotenoids, using various solvents with spectrophotometer of different resolution. *J Plant Physiol.* 144: 307-313.
- Wiesenberger, G., Steinleitner, K., Malli, R., Graier, W.F., Vormann, J., Schweyen, R.J., Stadler, J.A. (2007). Mg²⁺ deprivation elicits rapid Ca²⁺ uptake and activates Ca²⁺/calcineurin signaling in *Saccharomyces cerevisiae*. *Eukaryot Cell.* 6(4): 592-9.
- Wolf, B. (1982). A comprehensive system of leaf analyses and its use for diagnosing crop nutrient status. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 13(12): 1035-1059.
- Worthington, V. (2001). Nutritional Quality of Organic Versus Conventional Fruits, Vegetables, and Grains. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine.* 7(2): 161–173.
- Yamaji, N., Ma, J.F. (2014). The node, a hub for mineral nutrient distribution in graminaceous plants. *Trends in Plant Science.* 19(9): 556–563.
- Yan, Y.W., Mao, D.D., Yang, L., Qi, J.L., Zhang, X.X., Tang, Q.L., Li, Y.P., Tang, R.J., Luan, S. (2018). Magnesium Transporter MGT6 Plays an Essential Role in Maintaining Magnesium Homeostasis and Regulating High Magnesium Tolerance in *Arabidopsis*. *Front. Plant Sci.* 9:274.
- Yemm, E.W., Cocking, E.C., Ricketts, R.E. (1955). The determination of amino acids with ninhydrin. *Analyst.* 80(948): 209-214.

- Yan, B., Hou, Y. (2018). Effect of Soil Magnesium on Plants: a Review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 170: 022168.
- Zlámálová, T., Elbl, J., Baroň, M., Bělíková, H., Lampíř, L., Hlušek, J., Lošák, T. (2016). Using foliar applications of magnesium and potassium to improve yields and some qualitative parameters of vine grapes (*Vitis vinifera* L.). Plant, Soil and Environment. 61(10): 451–457.
- Zou, C.Q., Zhang, Y.Q., Rashid, A., Ram, H., Savasli, E., Arisoy, R.Z., Ortiz-Monasterio, I., Simunji, S., Wang, Z.H., Sohu, V., et al. (2012). Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. Plant Soil. 361: 119–130
- Zumba Lucero, V.R. (2020). Estudio comparativo del sulfato de magnesio en suelo arcilloso en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca*). (Tesis de pregrado). Universidad Agraria del Ecuador, Milagro, Ecuador.

10. ANEXOS

10.1. Correlación Entre las Distintas Variables del Experimento, Después de la Aplicación de Sulfato de Magnesio (MgSO₄) y Nanofertilizante de Magnesio (NanoMg[®]) en Frijol Ejotero cv. Strike.

	Rend	BiomT	END	Chla	Chlb	Chlc	Chlt	AF
Rend	1.000	0.679 <.0001	0.288 0.064	-0.306 0.048	-0.243 0.119	-0.299 0.054	-0.425 0.005	0.351 0.022
BioT	0.679 <.0001	1.000	0.388 0.010	-0.414 0.006	-0.397 0.009	-0.370 0.015	-0.468 0.001	0.323 0.036
END	0.288 0.064	0.388 0.010	1.000	0.0459 0.772	-0.023 0.882	-0.0165 0.917	0.091 0.565	0.103 0.512
Chla	-0.306 0.048	-0.414 0.006	0.045 0.772	1.000	0.763 <.0001	0.924 <.0001	0.833 <.0001	0.068 0.666
Chlb	-0.243 0.119	-0.397 0.009	-0.023 0.882	0.763 <.0001	1.000	0.544 0.0002	0.666 <.0001	-0.102 0.520
Chlc	-0.299 0.054	-0.360 0.015	-0.016 0.917	0.924 <.0001	0.544 0.0002	1.000	0.756 <.0001	-0.162 0.303
Chlbt	-0.425 0.005	-0.468 0.001	0.091 0.565	0.833 <.0001	0.666 <.0001	0.756 <.0001	1.000	-0.062 0.695
AF	0.351 0.022	0.323 0.036	0.103 0.512	-0.102 0.520	-0.162 0.303	-0.101 0.522	-0.062 0.695	1.000
Amino	0.004 0.976	0.080 0.612	-0.224 0.153	-0.339 0.027	-0.398 0.008	-0.146 0.353	-0.345 0.024	0.170 0.280
Prote	0.067 0.672	0.220 0.160	0.131 0.406	-0.366 0.017	-0.366 0.017	-0.354 0.0212	-0.245 0.1173	0.235 0.1343
mgF	0.262 0.093	0.281 0.070	0.553 0.0001	-0.002 0.986	-0.058 0.710	-0.079 0.616	0.018 0.907	0.352 0.022
mgH	0.238 0.129	0.294 0.050	0.596 <.0001	-0.111 0.483	-0.202 0.197	-0.165 0.296	-0.050 0.750	0.352 0.022
MgTl	0.188 0.233	0.179 0.255	0.454 0.002	-0.2683 0.085	-0.321 0.037	-0.289 0.063	-0.181 0.249	0.373 0.014
MgR	-0.050 0.748	-0.179 0.255	0.058 0.712	0.0120 0.939	0.107 0.499	-0.122 0.43	0.013 0.931	0.096 0.542

MgT	0.133	0.093	0.40	-0.077	-0.081	-0.178	-0.037	0.291
	0.398	0.555	0.007	0.627	0.607	0.257	0.815	0.061

	Amino	Prote	mgF	mgH	MgTl	MgR	MgT
Rend	-0.041	0.004	0.262	0.238	0.188	-0.050	0.133
	0.792	0.979	0.093	0.129	0.233	0.748	0.398
BioT	0.113	0.080	0.281	0.294	0.179	-0.179	0.093
	0.475	0.614	0.070	0.050	0.255	0.255	0.555
END	-0.224	-0.224	0.553	0.596	0.454	0.058	0.407
	0.153	0.153	0.0001	<.0001	0.0025	0.712	0.007
Chla	-0.247	-0.336	-0.002	-0.111	-0.268	0.012	-0.077
	0.114	0.029	0.986	0.483	0.085	0.939	0.627
Chlb	-0.279	-0.399	-0.058	-0.202	-0.321	0.107	-0.081
	0.073	0.008	0.710	0.197	0.037	0.499	0.607
Chlc	-0.279	-0.143	-0.079	-0.165	-0.289	-0.122	-0.178
	0.073	0.363	0.616	0.296	0.063	0.438	0.257
Chlbt	-0.151	-0.34	0.0185	-0.050	-0.181	0.013	-0.037
	0.339	0.026	0.907	0.750	0.249	0.931	0.815
AF	0.346	0.172	0.352	0.352	0.373	0.096	0.291
	0.024	0.273	0.022	0.022	0.014	0.542	0.061
Amino	1.000	0.275	-0.145	-0.074	0.152	-0.054	-0.054
		0.077	0.359	0.640	0.335	0.729	0.733
Prote	0.275	1.000	0.299	0.467	0.518	0.006	0.304
	0.077		0.053	0.0018	0.0004	0.967	0.050
mgF	0.228	-0.143	1.000	0.893	0.739	0.538	0.868
	0.145	0.365		<.0001	<.0001	0.0002	<.0001
mgH	0.355	-0.071	0.893	1.000	0.893	0.471	0.882
	0.0209	0.6518	<.0001		<.0001	0.0016	<.0001
MgTl	0.320	0.152	0.739	0.893	1.000	0.482	0.839
	0.038	0.335	<.0001	<.0001		0.001	<.0001
MgR	-0.053	-0.055	0.538	0.471	0.482	1.000	0.82588
	0.735	0.728	0.0002	0.0016	0.0012		<.0001
MgT	-0.054	0.304	0.868	0.882	0.839	0.825	1.000
	0.733	0.050	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	

	Rend	BiomT	END	Chla	Chlb	Chlc	Chlt
TMgC	0.196	0.194	0.407	-0.19	-0.24003	-0.214	-0.108
	0.211	0.217	0.001	0.228	0.1257	0.171	0.494
TMgA	0.134	0.124	0.392	-0.153	-0.211	-0.173	-0.063
	0.394	0.433	0.01	0.33	0.179	0.271	0.689
MgUtE	-0.206	-0.167	-0.441	0.238	0.293	0.207	0.165
	0.189	0.289	0.003	0.128	0.059	0.186	0.295
MgUpE	0.188	0.217	0.441	-0.171	-0.274	-0.144	-0.085
	0.231	0.167	0.003	0.276	0.078	0.36	0.588
MgUET	0.188	0.217	0.441	-0.171	-0.274	-0.144	-0.085
	0.231	0.167	0.003	0.277	0.079	0.36	0.59

	AF	amino	prote	mgF	mgH	MgTl	MgR	MgT
TMgC	0.165	0.02	0.458	0.644	0.818	0.831	0.434	0.747
	0.296	0.895	0.002	<.0001	<.0001	<.0001	0.0041	<.0001
TMgA	0.108	0.066	0.416	0.481	0.681	0.742	0.322	0.602
	0.494	0.676	0.006	0.001	<.0001	<.0001	0.037	<.0001
MgUtE	-0.15	-0.089	-0.43	-0.6	-0.75	-0.773	-0.327	-0.654
	0.34	0.574	0.004	<.0001	<.0001	<.0001	0.0342	<.0001
MgUpE	0.158	0.15	0.469	0.413	0.631	0.697	0.062	0.438
	0.317	0.343	0.001	0.006	<.0001	<.0001	0.6955	0.003
MgUET	0.158	0.15	0.469	0.412	0.63	0.697	0.061	0.437
	0.317	0.342	0.001	0.006	<.0001	<.0001	0.699	0.003

Donde:

Rend= Rendimiento

BioT= Biomasa total

Chla= Clorofila "a"

Chlb= Clorofila "b"

Chlc= Carotenos

Chlt= Clorofila total

AF= Actividad fotosintética

MgUtE= Eficiencia en utilización de magnesio

TMgC= Contenido total de magnesio

MgUpE= Eficiencia en absorción de magnesio

Amino= Aminoácidos solubles

Prote= Proteínas solubles

TMgA= Magnesio total acumulado

END= Nitrato reductasa endógena

MgF= Contenido de Mg fruto

MgH= Contenido de Mg hoja

MgTl= Contenido de Mg tallo

mgR= Contenido de Mg raíz

MgT= Contenido de Mg total

MgUET= Eficiencia de utilización total de magnesio

Con un nivel de significancia de 95% ($p < 0.05$).

10.2. Correlación Entre los Distintos Minerales, Después de la Aplicación de Sulfato de Magnesio (MgSO₄) y Nanofertilizante de Magnesio (NanoMg[®]) en Frijol Ejotero cv. Strike.

	Fe	Zn	Ca	Cu	Mn	P	K	Mg
Fe	1.000	-0.24954 0.1110	0.42604 0.0049	0.37306 0.0150	-0.12997 0.4120	0.13828 0.3825	0.25317 0.1057	0.31527 0.0420
Zn		1.000	-0.46407 0.0020	0.05994 0.7061	0.59488 <.0001	0.07993 0.6148	0.34179 0.0267	-0.24886 0.1120
Ca			1.000	0.09861 0.5344	0.01998 0.9001	0.18209 0.2485	-0.3855 0.3815	0.05166 0.7453
Cu				1.000	-0.10001 0.5286	0.40585 0.0077	0.40644 0.0076	0.12038 0.4476
Mn					1.000	0.06104 0.7010	-0.00866 0.9566	-0.36358 0.0179
P						1.000	0.32572 0.0353	-0.07745 0.6259
K							1.000	0.36180 0.0186
Mg								1.000

Donde:

Fe= Hierro Zn= Zinc Ca= Calcio Cu= Cobre Mg= Magnesio

P= Fósforo K= Potasio Mn=Manganeso

Con un nivel de significancia de 95% ($p < 0.05$).