

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DE LA INCORPORACIÓN DE ALFALFA AL SUELO
COMO FUENTE DE NITRÓGENO PARA LA PRODUCCIÓN DE
LECHUGA (*Lactuca sativa L.*)

Tesis:

Que presenta JUAN MANUEL PÉREZ GÓMEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila

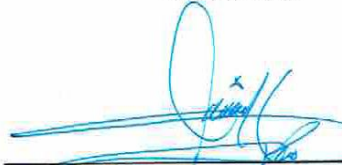
Noviembre, 2022

EVALUACIÓN DE LA INCORPORACIÓN DE ALFALFA AL SUELO
COMO FUENTE DE NITRÓGENO PARA LA PRODUCCIÓN DE
LECHUGA (*Lactuca sativa* L.)

Tesis

Elaborada por JUAN MANUEL PÉREZ GÓMEZ como requisito parcial para
obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de

Asesoría:



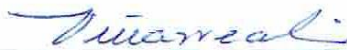
Dr. Armando Hernández Pérez
Asesor Principal



Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor



Dr. Homero Ramírez Rodríguez
Asesor



Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Agradecimientos

Al Creador, Gracias por la vida y la salud. Por darme fuerza para seguir adelante en aquellos momentos difíciles. ¡Gracias infinitamente!

A mis padres, Sra. Antonia Gómez Gómez, Sr. Manuel Pérez Jiménez
Gracias por su amor incondicional, los consejos y los apoyos brindados, sin su ayuda no hubiera sido posible llegar hasta aquí. ¡Muchas gracias!

A mi hermana, Srta. Maribel Pérez Gómez
Gracias por todo hermana, por apoyarme en todo momento, mis logros también son tus logros. ¡Eres una persona maravillosa!

A mis asesores, al Dr. Armando Hernández Pérez, por haberme dado la oportunidad de ser parte de este proyecto de investigación, por los consejos y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo. ¡Gracias!

Al Dr. Alejandro Zermeño González, Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla y Dr. Homero Ramírez Rodríguez, gracias por las enseñanzas, consejos y el apoyo brindado para el desarrollo y conclusión de este proyecto.

A mi Alma Mater, gracias por abrirme sus puertas para realizar mis estudios profesionales. ¡Buitres por siempre!

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por el apoyo económico brindado durante esta etapa de mis estudios.

A mis amigos, compañeros de la generación, Rocío Mendieta, Andrés Cadena, Juan C. Rangel, Solangel Lescieur, gracias por compartir experiencias y conocimientos.

A la persona especial, Ing. Ana Isabel Reyes D., gracias por tu apoyo incondicional.

Dedicatoria

A mis padres

Dedico este trabajo con mucho amor y cariño a mis padres, Sra. Antonia Gómez Gómez y Sr. Manuel Pérez Jiménez, por sus consejos y apoyo en todo momento.

A mis hermanos

Srta. Maribel Pérez Gómez, por el apoyo brindado, consejos y los momentos alegres. Este logro es el resultado de su apoyo a lo largo de mis estudios profesionales.

Índice General

Agradecimientos	ii
Dedicatoria.....	iv
Lista de cuadros.....	vi
Lista de figuras.....	vii
Resumen	viii
Abstract.....	x
Introducción	1
Objetivos.....	2
General.....	2
Específicos	2
Hipótesis	3
Revisión de literatura	4
Nitrógeno	4
El uso de nitrógeno y su impacto en el medio ambiente.....	4
Consumo de fertilizantes nitrogenados en México y en el mundo	5
Fertilización nitrogenada en cultivos hortícolas	5
Alternativa para reducir el uso de los fertilizantes nitrogenados.....	6
Importancia de las plantas leguminosas.....	6
Fijación biológica de nitrógeno (FBN).....	6
Alfalfa.....	7
Cultivo de lechuga y su importancia económica	9
Materiales y métodos.....	10
Localización	10
Material vegetal	10
Tratamiento	11
Determinación de parámetros	11
Análisis estadístico	12
Resultados y discusión	13
Conclusiones	26
Referencias.....	27

Lista de Cuadros

- Cuadro 1.** Efecto de la incorporación de alfalfa y N en el suelo sobre el peso fresco aéreo (PFA), peso seco aéreo (PSA), peso de cogollo (PC), diámetro polar del cogollo (DPC) y diámetro ecuatorial de cogollo (DEC) de lechuga romana var. Capitata..... 13
- Cuadro 2.** Efecto de la adición de la enmienda (alfalfa) y N en el suelo sobre la concentración de los iones: nitrato (NO_3^-), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) en la savia y rendimiento de lechuga romana var. Capitata..... 15

Lista de Figuras

- Figura 1.** Efecto de la interacción entre incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el peso fresco aéreo (PFA) de la lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias..... 16
- Figura 2.** Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el peso seco aéreo (PSA) de lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias..... 17
- Figura 3.** Efecto de la interacción entre incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el diámetro polar de cogollo (DPC) en lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias..... 18
- Figura 4.** Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el diámetro ecuatorial del cogollo (DEC) de lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias. 18
- Figura 5.** Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el peso del cogollo (PC) de lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias..... 19
- Figura 6.** Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N en la concentración de nitrato (NO_3^-) en lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias..... 21
- Figura 7.** Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N en la concentración de potasio (K^+) en lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias..... 22
- Figura 8.** Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N en la concentración de calcio (Ca^{2+}) en lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias..... 23
- Figura 9.** Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el rendimiento de lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias..... 25

Resumen

EVALUACIÓN DE LA INCORPORACIÓN DE ALFALFA AL SUELO
COMO FUENTE DE NITRÓGENO PARA LA PRODUCCIÓN DE
LECHUGA (*Lactuca sativa* L.)

POR

JUAN MANUEL PÉREZ GÓMEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ARMANDO HERNÁNDEZ PÉREZ - ASESOR

SALTILLO, COAHUILA

NOVIEMBRE, 2022

El objetivo de este trabajo de investigación fue determinar la dosis óptima de nitrógeno en combinación con la incorporación de alfalfa en el crecimiento, rendimiento y de la concentración de iones en la savia de la hoja de lechuga. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con un arreglo factorial de 2x5 con nueve repeticiones en cada tratamiento. Los tratamientos consistieron en cinco dosis de nitrógeno (200, 250, 300, 350 y 400 kg ha⁻¹) y dos condiciones de suelo (con y sin alfalfa). El peso fresco aéreo (PFA), peso seco aéreo (PSA), diámetro polar (DPC) y ecuatorial de cogollo (DEC), peso de cogollo (PC) y el rendimiento fue mayor cuando se aplicó una dosis de 200 a 300 kg de N ha⁻¹ con alfalfa. Este efecto fue similar con la dosis de 300 kg de N ha⁻¹ sin la adición de alfalfa. La concentración de nitratos (NO₃⁻) en la savia disminuyó con la adición de alfalfa y con 200 kg de N ha⁻¹, la concentración de potasio (K⁺) fue superior con o sin la adición de alfalfa y 250 kg de N ha⁻¹. Mientras que, la concentración de calcio (Ca²⁺) fue mayor en las plantas que se desarrollaron con o sin alfalfa pero, a una dosis de 400 Kg de N ha⁻¹. La incorporación de alfalfa al suelo es una buena alternativa para mejorar la producción de lechuga y reducir el uso de los fertilizantes nitrogenados.

Palabras clave: Crecimiento, calidad, rendimiento, disminución de nitratos.

Abstract

EVALUATION OF THE INCORPORATION OF ALFALFA TO THE SOIL AS A
SOURCE OF NITROGEN FOR THE PRODUCCIÓN OF LETTUCE (*Lactuca
sativa L.*)

BY

JUAN MANUEL PÉREZ GÓMEZ

MASTER OF SCIENCE IN PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ARMANDO HERNÁNDEZ PÉREZ - ADVISOR

SALTILLO, COAHUILA

NOVEMBER, 2022

The objective of this research work was to determine the optimal dose of nitrogen in combination with the incorporation of alfalfa in the growth, yield and concentration of ions in the sap of the lettuce leaf. The experimental design used was completely randomized with a 2x5 factorial arrangement with nine repetitions in each treatment. The treatments consisted of five doses of nitrogen (200, 250, 300, 350 and 400 kg ha⁻¹) and two soil conditions (with and without alfalfa). Shoot fresh weight (PFA), shoot dry weight (PSA), polar diameter (DPC) and equatorial diameter of bud (DEC), weight of bud (PC) and yield were higher when a dose of 200 to 300 kg of N ha⁻¹ with alfalfa. This effect was similar to the dose of 300 kg of N ha⁻¹ without the addition of alfalfa. The concentration of nitrates (NO₃⁻) in the sap decreased with the addition of alfalfa and with 200 kg of N ha⁻¹, the concentration of potassium (K⁺) was higher with or without the addition of alfalfa and 250 kg of N ha⁻¹. While the concentration of calcium (Ca²⁺) was higher in the plants that were developed with or without alfalfa but, at a dose of 400 kg of N ha⁻¹. The incorporation of alfalfa into the soil is a good alternative to improve lettuce production and reduce the use of nitrogenous fertilizers.

Keywords: Growth, quality, yield, nitrate reduction.

Introducción

El nitrógeno (N) es uno de los macronutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, esto debido a que forma parte de los aminoácidos, ácidos nucleicos, clorofila, aminoenzimas y alcaloides, además, actúa en los procesos de multiplicación y diferenciación celular (Balta *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2020). Sin embargo, el uso excesivo de los fertilizantes nitrogenados está relacionado directamente a problemas de aumento en los costos de producción y de contaminación ambiental; por lo tanto, es indispensable contar con una información que permita establecer las cantidades adecuadas para obtener los máximos rendimientos de los cultivos (Rodríguez *et al.*, 2020). El sector agrícola de México está relacionado en una fuente importante de emisión de gases de efecto invernadero a través de la fertilización nitrogenada que emite óxido nitroso, por lo cual, contribuye con 12.3 % al total de las emisiones de gases de efecto invernadero (González y Camacho, 2017).

Una de las alternativas para reducir el uso de los fertilizantes nitrogenados, es la rotación de las plantas leguminosas fijadoras de N y con el cultivo hortícola de interés. La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una leguminosa que tiene la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico (N²) a través de una asociación simbiótica con las bacterias del género *Rhizobium*, convirtiendo este elemento a una forma asimilable para las plantas (Delgado, 2015; Guzmán y Montero, 2021). Por lo que, esta leguminosa posee una función importante en la agricultura debido a que puede contribuir a la disminución del uso de energía fósil y la emisión de gases de efecto invernadero producido por el uso de los fertilizantes nitrogenados (Ángeles y Cruz, 2015). Asimismo, la fijación biológica de nitrógeno (FBN) representa una importante aportación de N al suelo (Celaya y Castellanos, 2011) y al incorporar los residuos de leguminosas pueden aumentar el contenido de N en el suelo (Magaña *et al.*, 2020). Además, el uso de este tipo de plantas como abonos verdes en cultivos hortícolas contribuye a la reducción del uso excesivo de estos fertilizantes, mejora la fertilidad y disminuye la erosión del suelo, supliendo de esta forma la demanda de N por la

planta (Castro *et al.*, 2018; Magaña *et al.*, 2020), mismo que, contribuye a la mitigación del impacto ambiental causado por la aplicación de dichos fertilizantes. Algunos estudios reportan que el N aportado por la alfalfa regularmente es adecuado para obtener el rendimiento óptimo de algunas gramíneas en el primer ciclo; sin embargo, a veces es necesario suministrar mínimas cantidades de fertilizante nitrogenado para satisfacer la demanda de la planta, además de la aportación de N por esta leguminosa, estudios previos han mostrado que también se puede mejorar la estructura del suelo (Yost *et al.*, 2014). Se estima que el proceso de la FBN en esta leguminosa, a través de la simbiosis, puede llegar de 24 a más de 584 Kg de N ha⁻¹ año⁻¹ y en algunos casos puede abastecer hasta el 90% de los requerimientos de la planta (Ángeles y Cruz, 2015).

Por otra parte, la lechuga es una de las hortalizas más consumidas a nivel mundial, principalmente en forma de ensaladas, ya que esta verdura es baja en calorías, sodio y grasa, además, es una excelente fuente de fibra, hierro, ácido fólico y vitamina C (Kim *et al.*, 2016). Por lo anterior, se planteó el objetivo de determinar la dosis óptima de nitrógeno en combinación con la incorporación de alfalfa en el crecimiento, rendimiento y de la concentración de iones en la savia de la hoja de lechuga.

Objetivos

General

- Determinar el efecto de la dosis de nitrógeno y de la incorporación de alfalfa en el crecimiento, rendimiento y la concentración de iones en la savia de la hoja de lechuga.

Específicos

- Determinar el efecto de la incorporación de alfalfa en el crecimiento y rendimiento de lechuga cv. Capitata
- Determinar el efecto de la incorporación de alfalfa en la concentración de nitratos (NO₃⁻), potasio (K⁺) y calcio (Ca²⁺) en la savia de la hoja de lechuga cv. Capitata.

- Encontrar la dosis óptima de nitrógeno y la incorporación de alfalfa que mejore el crecimiento y rendimiento de lechuga cv. Capitata.
- Obtener la dosis adecuada entre nitrógeno y de la incorporación de alfalfa en las concentraciones de nitratos (NO_3^-), potasio (K^+) y calcio (Ca^{2+}) en la savia de la hoja de lechuga cv. Capitata

Hipótesis

- La incorporación de alfalfa al suelo y el suministro de nitrógeno mejora el crecimiento, rendimiento y la concentración de iones en la savia de la hoja de lechuga cv. Capitata.

Revisión de Literatura

Nitrógeno

El N es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas debido a que forma parte de las moléculas de proteínas, clorofila, alcaloides, aminoenzimas, interviene en la transferencia de información genética, así como en el proceso de la fotosíntesis y en la multiplicación y diferenciación celular (Balta *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2020; Ube, 2021). El N puede ser absorbido por las plantas en forma de nitrato (NO_3^-) o en amonio (NH_4^+), la preferencia de absorción depende de cada especie (Coraspe *et al.*, 2009).

Los niveles de N que reciben las plantas deben de ser los adecuados, puesto que, al emplear cantidades excesivas provoca un crecimiento vegetativo generando mayor cantidad de brotes tiernos, lo cual retrasa el ciclo de desarrollo de la planta, por lo tanto, las plantas se vuelven susceptibles al ataque de plagas y enfermedades, por otro lado, cuando existe deficiencia de N; las plantas tienden a mostrar un crecimiento inadecuado, presencia de clorosis, el amarillamiento de las hojas se manifiesta principalmente de las hojas más viejas a las más jóvenes (Mengel y Kirkby, 2000; Solís, 2019).

El uso de nitrógeno y su impacto en el medio ambiente

El N es indispensable para las plantas, debido al importante papel que cumple, sin embargo, el uso irracional de los fertilizantes químicos en el sector agrícola genera daños severos al medio ambiente e incluso afecta los costos de producción de los cultivos, a pesar de que los fertilizantes nitrogenados han sido uno de los promotores del incremento en el rendimiento de los cultivos, el empleo desmedido en la agricultura conlleva principalmente a la degradación de la calidad del suelo por ensalitramiento debido a la lixiviación del N, así como también, los mantos freáticos se ven afectados por la acumulación de N (Cárdenas *et al.*, 2004) y en consecuencia se produce el fenómeno de eutrofización en los reservorios donde desemboca las corrientes subterráneas (Martínez *et al.*, 2010). Además, estos productos químicos producen la emisión

de óxido nitroso (N_2O) y amoníaco (NH_3) los cuales son gases tóxicos, por lo que, pueden generar graves daños en la salud del consumidor y de los animales, por lo tanto, es necesario implementar alternativas aplicadas a la gestión razonada del N para la producción agrícola de modo que los cultivos puedan alcanzar su óptimo rendimiento (Cárdenas *et al.*, 2004; Orozco, 2008).

Consumo de fertilizantes nitrogenados en México y en el mundo

Actualmente, la agricultura enfrenta el desafío de incrementar la producción alimentaria para satisfacer la demanda debido al crecimiento poblacional, en efecto, la mayoría de los productores optan en hacer uso desmedido de los fertilizantes químicos.

A nivel mundial, el consumo de los fertilizantes químicos en los últimos años, es de 185 millones de toneladas, de los cuales el 60% son nitrogenados, lo que es equivalente a 111 millones de toneladas, 20% fosforados (37 millones de toneladas) y 20% potásicos (37 millones de toneladas) (Calzada y D'Angelo, 2021). Mientras que, en México, el consumo de los fertilizantes nitrogenados en la producción agrícola en el periodo de 2019 – 2021 fue en promedio 3.7 millones de toneladas, y esto representa aproximadamente el 3.3% del consumo total a nivel mundial (BANXICO, 2022).

Dentro de los fertilizantes nitrogenados, los más usados son, principalmente la urea (46% de N), sulfato de amonio (21% de N), nitrato de amonio (33% de N), fosfato monoamónico (11% de N) y fosfato diamónico (18% de N) (INTAGRI, 2017). Por lo anterior, la agricultura intensiva ocasiona la pérdida de nutrientes y salinización del suelo, promueve la resistencia de plagas (Hidalgo, 2017), y para frenar dichos impactos, es necesario buscar alternativas u otras fuentes, de tal forma que el empleo de estos productos químicos sean lo mínimo posible.

Fertilización nitrogenada en cultivos hortícolas

La dosis de fertilización nitrogenada en algunos cultivos hortícolas especialmente se establece a campo abierto, son lo siguiente: Cebolla 170-190 kg de N ha^{-1} , tomate 220-240 kg de N ha^{-1} , pepino 100-120 kg de N ha^{-1} , brócoli 280-320 kg de N ha^{-1} , pimiento 220-280 kg de N ha^{-1} , calabacín 100-120 kg de N ha^{-1} , coliflor 260-300 kg de N ha^{-1} , lechuga 120-140 kg de N ha^{-1} y alcachofa

250-290 kg de N ha⁻¹ (Ramos y Pomares, 2018). Sin embargo, la dosis de este nutriente depende del potencial de rendimiento del suelo, así como también, del nitrógeno almacenado y liberado del suelo, tipo de cultivo y la producción (Ramos y Pomares, 2018; Verhulst y García, 2022), por lo que, en un suelo con muy poca disponibilidad de nitrógeno, las aplicaciones de los fertilizantes nitrogenados tienden a ser mucho mayor.

Alternativa para reducir el uso de los fertilizantes nitrogenados

En la actualidad, la tendencia en el sector agrícola es reducir el uso de los productos químicos, tales como los fertilizantes que pueden contaminar los suelos y aguas, por ello, los agricultores están adoptando las nuevas tecnologías que contribuyen a la reducción del uso de estos productos (Ramos *et al.*, 2021). Estas alternativas son principalmente, el uso de los abonos orgánicos (Pérez *et al.*, 2010) y el empleo de los abonos verdes, especialmente las leguminosas fijadoras de N ya que, puede sustituir total o parcialmente la fertilización nitrogenada en los cultivos (Martín y Rivera, 2015; Castro *et al.*, 2018). Además, el establecimiento y la incorporación de los abonos verdes mejoran la fertilidad de los suelos y sus condiciones físicas (Betancourth, 2021). Es importante recalcar que, el uso de los abonos orgánicos y abonos verdes no sólo se realiza con el propósito de reducir el uso de los fertilizantes químicos, si no también, en garantizar la producción de alimentos sanos para el consumidor final.

Importancia de las plantas leguminosas

Las leguminosas son un grupo de plantas que se usa principalmente como forraje para ganado debido a su alto valor nutricional, además, estas plantas poseen la capacidad de fijar el N ambiental (Delgado, 2015), debido a que el N es un nutriente deficiente en gran parte de los suelos del planeta, estas plantas son de suma importancia porque contribuyen a la nutrición de los cultivos posteriores que no poseen dicha capacidad (Morales, 2016).

Fijación biológica de nitrógeno (FBN)

El proceso de la fijación de N se lleva a cabo a través de la asociación simbiótica con las bacterias del genero *Rhizobium*, en este proceso el N

atmosférico es reducido a amonio (NH_4^+), forma aprovechable por las plantas. Las bacterias infectan las raíces de la planta induciendo la formación de nódulos radicales, en el interior de los nódulos se lleva a cabo la fijación, pero para ello se requiere la intervención de la enzima nitrogenasa, dichas enzimas están localizadas en el interior de los rizobios, las bacterias le ceden a la planta el nitrógeno fijado y a su vez ésta le proporciona al nódulo carbohidratos que producen la energía requerida tal proceso (Morales, 2016).

El potencial de este proceso depende de algunos factores, como el oxígeno presente, disponibilidad de agua y aprovisionamiento de células huésped en moléculas carbonatadas poseedoras de energía (Ballesta, 2007). Generalmente, se estima que los niveles de FBN en las leguminosas varía desde 24 hasta 584 kg de N ha^{-1} , en algunas ocasiones el producto de este proceso es capaz de satisfacer hasta el 90% de los requerimientos de los cultivos (Ángeles y Cruz, 2015). Sin embargo, las cantidades de nitrógeno que pueden fijar estas plantas son muy variadas, ya que depende de ciertos factores, tales como la especie de leguminosa, la efectividad del rizobio, así como las condiciones edafoclimáticas (Calizaya, 2015).

Castro *et al.* (2018) indican que la eficiencia del uso del N fijado por estas plantas es ligeramente menor (10 a 20%) que la del N agregado como fertilizante convencional y al incorporar los residuos de una leguminosa como abono verde la eficiencia del uso está sujeto a la sincronización existente entre el momento de aporte del nutriente y el requerimiento de la planta.

Alfalfa

La alfalfa (*Medicago sativa L.*) es una leguminosa que en México y en todo el mundo se usa principalmente para la alimentación del ganado debido a su alto valor nutritivo, se adapta fácilmente a cualquier ambiente y la superficie cultivada es de 156, 141 hectáreas, los principales productores son los estados de Jalisco, Hidalgo, Guanajuato y Baja California, siendo los estados de Coahuila, Durango, Estado de México y Puebla los que producen en menor proporción (Montemayor *et al.*, 2012; Delgado, 2015; Rojas *et al.*, 2016). Esta planta es muy importante ya que tiene la capacidad de fijar cantidades

considerables de N a través del proceso de FBN, por lo que esta capacidad que posee contribuye en la nutrición de los cultivos, por lo tanto, permite disminuir los costos de producción en cuanto a las labores de fertilización, así como también, mejora las propiedades químicas del suelo (Delgado, 2015).

Algunos autores reportan valores respecto a la cantidad de nitrógeno que puede fijar la alfalfa, por mencionar algunos, Fernández *et al.* (2002) señalan que la alfalfa puede fijar de 200 a 250 kg de N ha⁻¹ año⁻¹, Hardarson *et al.* (1988) encontraron hasta 378 kg de N ha⁻¹ año⁻¹, Aragadvay (2010) señala que fija aproximadamente 200 kg de N ha⁻¹ año⁻¹.

La fijación del nitrógeno atmosférico por parte de esta leguminosa es alrededor de 40 al 80%, al finalizar el proceso puede acumular cantidades significativas de nitrógeno a través de su sistema de enraizamiento (Ramos *et al.*, 2021). Al utilizar esta leguminosa como abono verde o en la rotación de cultivos; proporciona varios beneficios en los cultivos posteriores debido a su aporte de nitrógeno y esto implica una reducción significativa de la aplicación de fertilizantes nitrogenados (González *et al.*, 2022). En relación, existen estudios previos sobre la contribución de esta leguminosa en la producción agrícola, tales como los reportados por Ángeles y Cruz (2015) quienes señalan que en algunas ocasiones la alfalfa es capaz de proveer hasta el 90% de la demanda de N por la planta. Por su parte, Cela *et al.* (2011) encontraron altos rendimientos del grano de maíz al aplicar una dosis de 0 y 150 kg de N ha⁻¹ después de un ciclo de cultivo de alfalfa. Yost *et al.* (2014) indican que el N que aporta la alfalfa normalmente es adecuado para obtener un rendimiento óptimo, como por ejemplo, ellos reportan que algunas especies de gramíneas se pudo alcanzar su máximo rendimiento en el primer ciclo, sin embargo, sugieren que ocasionalmente, es necesario complementar la demanda adicionando mínimas cantidades de fertilizantes nitrogenados. Estos hallazgos nos indican que esta leguminosa cumple una función muy importante en el sector agrícola, así como también para el medio ambiente.

Cultivo de lechuga y su importancia económica

La lechuga (*Lactuca sativa L.*) es una hortaliza de gran importancia económica a nivel nacional e internacional debido a su alta demanda que ha ido incrementándose en los últimos años, esta hortaliza se consume en fresco, ya sea para ensaladas o como decoración en la gastronomía, es recomendada en dietas debido a su bajo contenido de calorías, es rica en antioxidantes, vitaminas y minerales, favorece la digestión y además, posee propiedades diuréticas, y otra de las ventajas de esta hortaliza es que se adapta a cualquier clima debido a su alta resistencia a las heladas (González y Zepeda, 2013; SADER, 2021). En 2020, México obtuvo una producción de 539, 000 toneladas de esta hortaliza, las cuales 261,000 toneladas fueron destinadas a la exportación, siendo Estados Unidos el principal destino de venta. Las variedades que más se produce en México son la romana y la orejona. Se produce en 21 estados del país, Guanajuato es la principal entidad productora con 27.3%, seguido de Zacatecas con 17.8%, mientras que Aguascalientes con 14.8% y Puebla con 14.2%, la mayor producción de esta hortaliza se distribuye en dos periodos: de febrero a abril y de julio a agosto (SADER, 2021).

Respecto a la producción de lechuga a nivel mundial, China es el principal productor con una producción de 13, 434,116 toneladas, mientras que Estados Unidos produce aproximadamente 3, 889,120 e India con 1, 059, 850 toneladas (González y Zepeda, 2013) y México es el noveno productor de lechuga a nivel mundial con una participación de 1.8% (SADER, 2021).

Materiales y Métodos

Localización

La presente investigación se llevó a cabo de agosto de 2019 a septiembre de 2021 en el campo experimental del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México. Las coordenadas geográficas son: 25° 21' 22.5" Latitud Norte, 101° 02' 08.7" Longitud Oeste y altitud 1610 msnm. El suelo en dicho sitio es de textura franco, densidad aparente de 1.03 g cm⁻³ y pH 7.94. La temperatura media anual del sitio es de 16.8°C y clima seco semiárido.

Semillas de alfalfa cv. Gigante se sembró en camas previamente preparadas de un ancho 80 cm, esta actividad se realizó en agosto de 2019 con una densidad de siembra de 30 kg de semilla ha⁻¹, el método de siembra fue al voleo. Se instaló el sistema de riego por goteo, utilizando cintilla marca Toro aqua traxx de calibre 6000, con un distanciamiento entre emisor de 20 cm y un gasto hidráulico de 1.05 L h⁻¹. La frecuencia de riego fue dos veces a la semana por un tiempo de tres horas, durante el ciclo de este cultivo no se aplicó fertilización. Los últimos tres cortes de alfalfa se incorporaron a las camas donde posteriormente se trasplantó las plántulas de lechuga. La incorporación de la leguminosa se realizó en forma manual. Una vez realizada la incorporación de alfalfa en las camas, estas fueron cubiertas con acolchado plástico de polietileno de color negro, cuyas medidas de 1.20 m ancho y de calibre 90, de la marca TACSA.

Material vegetal

Se utilizaron plántulas de lechuga romana var. Capitata, dicha variedad forma un cogollo a través de las hojas internas, así como también, posee hojas anchas y sinuosas, su ciclo de crecimiento es de aproximadamente de 60 días. Se llevó a cabo el trasplante el 20 de julio de 2021, las plántulas tenían 5 hojas, la distancia entre planta fue de 30 cm y entre surcos de 80 cm y la densidad de plantación se ajustó a 50,000 plantas ha⁻¹.

Tratamiento

Los tratamientos consistieron en cinco dosis de N (200, 250, 300, 350 y 400 kg ha⁻¹) y dos condiciones de suelo (con alfalfa y sin alfalfa), la combinación de éstos dio un total de 10 tratamientos. En cada tratamiento se aplicó una dosis de fósforo (P) 150 kg ha⁻¹ y potasio (K) 250 kg ha⁻¹, la fuente de estos nutrimentos fue: sulfato de amonio (20.5-00-00-24), fosfato monoamónico (12-61-0) y nitrato de potasio (12-00-45). La dosis de fertilización fue fraccionada según la etapa fenológica del cultivo. Siete días después del trasplante se inició la fertilización correspondiente a cada tratamiento, mismo que, se efectuó dos veces por semana. La frecuencia de riego dependió de los requerimientos hídricos de las plantas, sin embargo, en promedio el riego se realizó cada dos días con una duración de 2 horas. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con un arreglo factorial de 2x5, cada tratamiento consistió en nueve repeticiones.

Determinación de parámetros

A los 70 días después de trasplante se realizó la medición de las variables, esta actividad se llevó a cabo el 30 septiembre de 2021. Peso fresco aéreo (PFA), se separó la parte aérea de la planta y ésta se pesó con una báscula electrónica de precisión de 0.01 marca Rhino. El peso del cogollo (PC), se retiraron las hojas externas que no forman parte de ésta, dejando solamente la parte comestible y se procedió a pesar con la misma báscula antes mencionada, el diámetro polar (DPC) y ecuatorial cogollo (DEC) se determinaron con la ayuda de un Vernier In-size 1205-3002S. Después, la parte aérea de la planta se colocó en bolsas de papel estraza y se introdujeron a un horno de secado marca BLUE M POM-246F a una temperatura de 65°C durante 72 h y finalmente se registró el peso seco aéreo (PSA).

La determinación de la concentración de los iones: nitrato (NO₃⁻), potasio (K⁺), calcio (Ca²⁺), se seleccionaron tres plantas por repetición en cada tratamiento. La colecta de las muestras se realizó entre 10:00 a 11:00 h y fueron almacenadas en una hielera debidamente identificadas. Las muestras fueron

conformadas de una combinación de la parte externa e interna de la lechuga y la extracción celular de pecíolo se realizó con una prensa de extracción Truper. El extracto celular de pecíolo se le determinó los iones antes señalados con el equipo LAQUAtwin Horiba. El rendimiento ($t\ ha^{-1}$) se obtuvo del PC multiplicado por la densidad de plantación ($50,000\ plantas\ ha^{-1}$).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron en un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey a una alfa de ($p \leq 0.05$), mismo que se realizó con el programa estadístico InfoStat versión 2008.

Resultados y Discusión

El peso fresco aéreo (PFA), peso seco aéreo (PSA), peso de cogollo (PC), diámetro polar (DPC) y ecuatorial de cogollo (DEC) fueron afectados significativamente por la incorporación de alfalfa. Estos mismos parámetros fueron afectados significativamente al suministrar diferentes dosis de N, así como, por la interacción de ambos factores, a excepción del DPC (Cuadro 1).

Las plantas que fueron desarrolladas en el suelo con la adición de alfalfa mostraron un incremento en los parámetros evaluados en comparación con las que se desarrollaron sobre el suelo sin alfalfa (Cuadro 1).

El mayor PFA, PSA, PC y DEC se obtuvieron con la dosis de 300 kg de N ha⁻¹, las dosis superiores e inferiores a ésta; dichas variables mostraron una disminución, mientras que, el DPC fue mayor con 250 kg de N ha⁻¹ en comparación con las dosis superior e inferiores aplicadas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto de la incorporación de alfalfa y N en el suelo sobre el peso fresco aéreo (PFA), peso seco aéreo (PSA), peso de cogollo (PC), diámetro polar del cogollo (DPC) y diámetro ecuatorial de cogollo (DEC) de lechuga romana var. Capitata.

Alfalfa	PFA (g planta ⁻¹)	PSA (g planta ⁻¹)	PC (g planta ⁻¹)	DPC (cm)	DEC (cm)
Con alfalfa	1144.86a	38.66a	777.99a	13.87a	16.47a
Sin alfalfa	752.93b	31.55b	430.21b	10.20b	12.32b
Anova p ≤	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
N (Kg ha ⁻¹)					
200	854.67c	36.77b	520.46b	11.82abc	14.03b
250	1001.55b	34.86b	623.11ab	12.72a	14.64ab
300	1164.94a	41.56a	741.91a	12.65ab	15.40a
350	868.88c	34.31b	624.67ab	11.69bc	14.30ab
400	854.43c	28.05c	510.33b	11.29c	13.60b
Anova p ≤	0.0001	0.0001	0.0001	0.0003	0.0058
Interacción	0.0001	0.0003	0.0171	0.3283	0.0086
C.V. (%)	8.49	11.39	19.50	7.15	8.04

Medias con letra diferente indican efectos significativos según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. Anova = análisis de varianza. Interacción = Alfalfa x N. CV = coeficiente de variación.

Las concentraciones de iones nitrato (NO_3^-) y calcio (Ca^{2+}) en la savia de la lechuga, así como también el rendimiento ha^{-1} ; fueron afectados significativamente por la adición de alfalfa, mientras que el potasio (K^+) no se obtuvo diferencia significativa (Cuadro 2). En estos mismos parámetros se encontraron diferencias significativas con la aplicación de diferentes dosis de N, Asimismo, dichas variables fueron influenciados por la interacción entre los dos factores (Cuadro 2).

Las mayores concentraciones de NO_3^- se registraron en las plantas que se les aplicó 400 kg de N ha^{-1} , mientras que, a las que se les proporcionaron una dosis de 200, 250 y 350 kg de N ha^{-1} mostraron una disminución en la concentración de dicho ion. Con la dosis de 300 kg de N ha^{-1} se obtuvo la menor concentración de NO_3^- en comparación con las demás dosis. La concentración de Ca^{2+} fue superior cuando se adicionó 400 kg de N ha^{-1} , sin embargo, al aplicar una dosis de 200 a 350 kg de N ha^{-1} ; decreció la concentración de este ión. Para el K^+ , se registraron concentraciones superiores con la dosis de 250 kg de N ha^{-1} y las dosis diferentes a ésta, decreció la concentración de este ion (Cuadro 2).

El rendimiento fue mayor con 300 kg de N ha^{-1} , sin embargo, al adicionar dosis superiores e inferiores a ésta; este parámetro tendió a declinar (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de la adición de la enmienda (alfalfa) y N en el suelo sobre la concentración de los iones: nitrato (NO_3^-), calcio (Ca^{2+}), potasio (K^+) en la savia y rendimiento de lechuga romana var. Capitata.

Alfalfa	NO_3^- (ppm)	Ca^{2+} (ppm)	K^+ (ppm)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Con alfalfa	3176.67b	156.60a	1230.00a	38.90a
Sin alfalfa	6280.00a	122.00b	1258.33a	21.51b
Anova p ≤	0.0001	0.0001	0.1798	0.0001
N (Kg ha ⁻¹)				
200	4800.00b	145.00b	1250.00b	26.02b
250	4550.00b	124.25c	1442.50a	31.16ab
300	3800.00c	122.50c	1158.33bc	37.10a
350	4700.00b	79.75d	1120.00c	31.23ab
400	5791.67a	225.00a	1250.00b	25.52b
Anova p ≤	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Interacción	0.0001	0.0001	0.0001	0.0171
C.V. (%)	6.21	7.27	4.49	19.50

Medias con letra diferente indican efectos significativos según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. Anova = análisis de varianza. Interacción = Alfalfa x N. C.V. = coeficiente de variación.

En general, la mayoría de los parámetros evaluados en esta investigación, las plantas que se desarrollaron en el suelo con alfalfa fueron superiores en comparación con las que fueron desarrolladas sin alfalfa.

El PFA fue mayor cuando se aplicó 200 kg de N ha⁻¹ con alfalfa en el suelo, a medida que se incrementaba la dosis de N, el PFA decreció ligeramente. Por otra parte, a las plantas que se les aplicó solo fertilización química, se alcanzó el máximo PFA con la dosis de 300 kg de N ha⁻¹ y dosis superiores e inferiores a ésta se observó una disminución en dicha variable (Figura 1), similar comportamiento se observó en el PSA (Figura 2). En general, las plantas que se desarrollaron en el suelo con la adición de alfalfa fueron superiores en comparación con las que fueron nutridas solamente con la fertilización nitrogenada. Los incrementos en el PFA y PSA de las plantas desarrolladas con alfalfa pueden ser debido a una mayor disponibilidad de N en el suelo aportado por dicha leguminosa, de acuerdo con Magaña *et al.* (2020) indican que, al incorporar residuos de leguminosas puede aumentar el contenido de N en el

suelo, representando una importante aportación de este nutriente (Celaya y Castellanos, 2011), esto contribuye a la reducción de la fertilización nitrogenada en ciertos cultivos, como por ejemplo, en el cultivo de maíz (Cela *et al.*, 2011), Además, el N favorece el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que este elemento ejerce una función estructural e interviene en la multiplicación y diferenciación celular (Rodríguez *et al.*, 2020).

Por otro lado, las reducciones en el PFA y PSA de las plantas que se desarrollaron solamente con la fertilización nitrogenada con las dosis de 200 a 250 kg de N ha⁻¹, posiblemente se debe a que la cantidad de N adicionado no fue suficiente para alcanzar un crecimiento adecuado de las plantas, por consiguiente, disminuye el potencial productivo (Rodríguez *et al.*, 2020). Estudios realizados por Martínez *et al.* (2008) quienes registraron reducciones considerables de peso fresco y seco de los frutos de uchuva nutridas con mínimas cantidades de N.

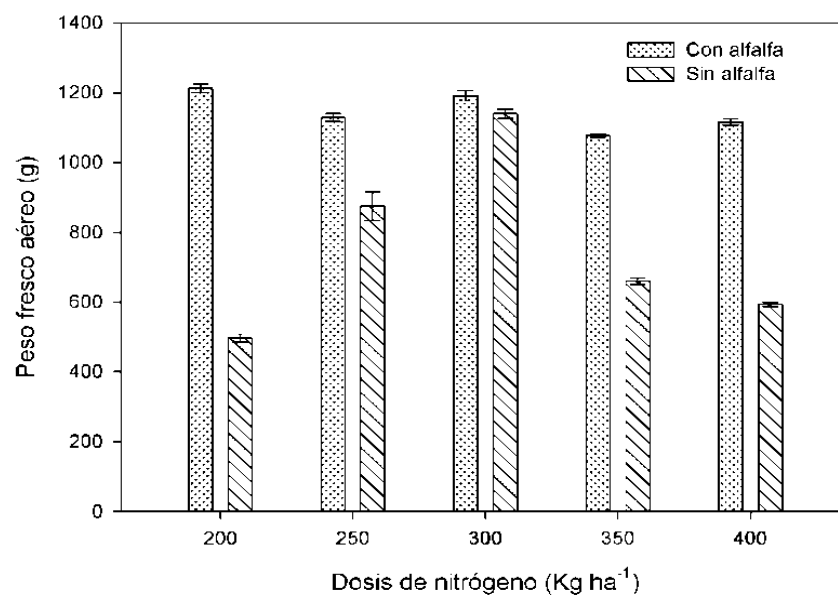


Figura 1. Efecto de la interacción entre incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el peso fresco aéreo (PFA) de la lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

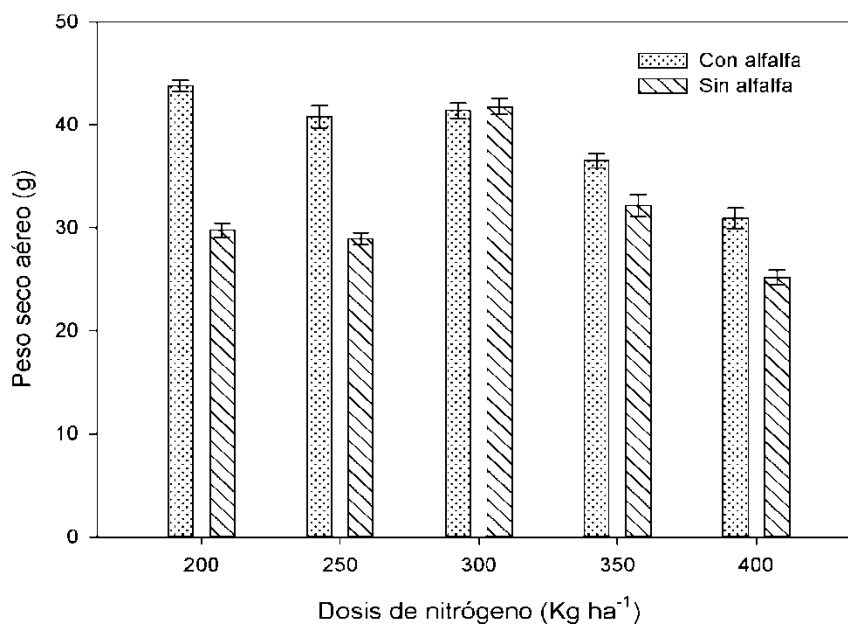


Figura 2. Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el peso seco aéreo (PSA) de lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

El DPC fue superior con 250 kg de N ha⁻¹ en las plantas desarrolladas sobre el suelo con alfalfa, sin embargo, cuando se aumentó la dosis de N; tendió a decrecer ligeramente dicha variable, mientras que en las plantas que fueron desarrolladas solamente con fertilización nitrogenada se encontró mayor DPC 300 kg de N ha⁻¹, asimismo, al aplicar las dosis superiores e inferiores se observó una ligera disminución en esta variable (Figura 3), este comportamiento fue similar en el DEC (Figura 4). Las reducciones en DPC y DEC sobre las plantas que fueron nutridas solamente con fertilización nitrogenada puede estar relacionado por la cantidad de N aplicado, al respecto, Martínez *et al.* (2008) quienes observaron que al aplicar mínimas cantidades de N en la fertilización tuvo un efecto negativo sobre el diámetro polar y ecuatorial de los frutos de uchuva respecto a la fertilización completa e indican que presentaron un crecimiento inadecuado y baja productividad.

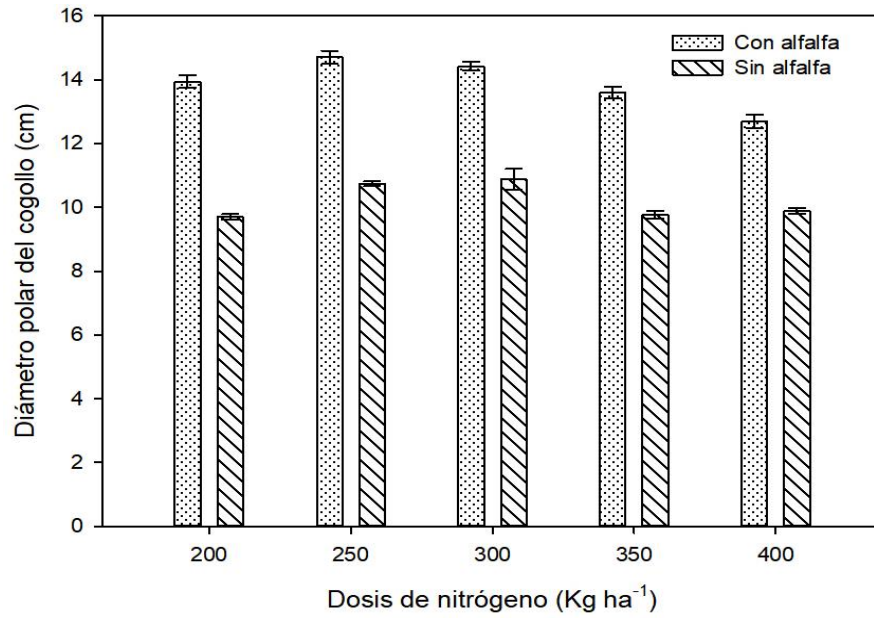


Figura 3. Efecto de la interacción entre incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el diámetro polar de cogollo (DPC) en lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

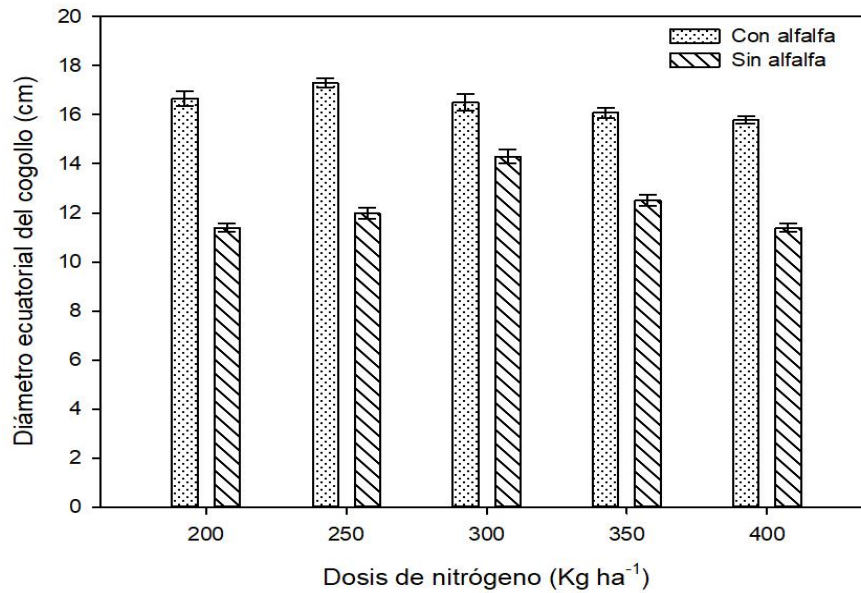


Figura 4. Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el diámetro ecuatorial del cogollo (DEC) de lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

El PC fue superior en las plantas que se desarrollaron en el suelo con alfalfa y con aplicaciones de 200 a 300 kg de N ha⁻¹, sin embargo, al adicionar dosis mayores a éstas; tendió a disminuir dicho parámetro, por otro lado, en las plantas que fueron nutridas solamente con fertilización nitrogenada, se registró el mayor PC con la dosis de 300 kg de N ha⁻¹ y al adicionar dosis inferiores y superiores a ésta mostró un efecto negativo en este parámetro (Figura 5), en general, las plantas que se desarrollaron en el suelo donde se incorporó alfalfa y diferentes dosis de N, tuvieron mayores PC en comparación con las que recibieron solamente fertilización nitrogenada, estos resultados posiblemente se debe a que la alfalfa pudo complementar el N que demanda la planta, al respecto, Samaddar *et al.* (2021) indican que, la alfalfa incrementa la disponibilidad de N del suelo y, por consiguiente, aumenta el rendimiento de los cultivos. Por su parte, Ángeles y Cruz (2015) señalan que, en algunos casos la alfalfa puede abastecer hasta 90% de los requerimientos de N de la planta. Los resultados nos indican que esta leguminosa contribuye a la reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados, ya que se puede alcanzar máximos rendimientos al aplicar mínimas cantidades de N.

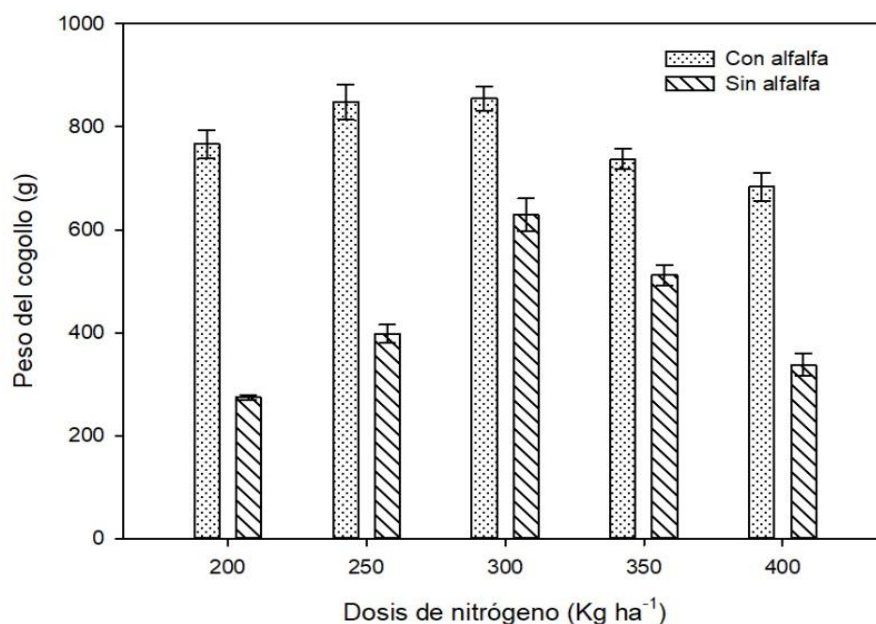


Figura 5. Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el peso del cogollo (PC) de lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

Se registraron menores concentraciones de NO_3^- en la savia con la dosis de $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$ en las plantas que fueron desarrolladas en el suelo con alfalfa, a medida que se incrementaba la dosis de N; la concentración NO_3^- tendía a aumentarse (Figura 6). En general, se encontraron menores concentraciones de NO_3^- en las plantas que se desarrollaron en el suelo con la incorporación de alfalfa en comparación con las que fueron desarrolladas sin ella. La acumulación de NO_3^- en las plantas está en función de la cantidad de N aplicado (Liu *et al.*, 2014) y por el tamaño de la biomasa de las plantas. Estudios realizados por Ollúa *et al.* (2016) quienes señalan que a medida que se aumentaba la dosis de N; la concentración de NO_3^- en la planta de lechuga cv. Brisa tendió a incrementarse, lo cual, coincide con los resultados encontrados en esta investigación con las plantas que fueron desarrolladas en el suelo con la adición de alfalfa. En tanto que, las plantas que se desarrollaron solamente con la fertilización nitrogenada, se encontraron mayores concentraciones de NO_3^- cuando se aplicó una dosis de 200 y $400 \text{ kg de N ha}^{-1}$, pero, al suministrar las dosis superiores a $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$; tendió a disminuir la concentración de dicho ion, donde la concentración más baja se obtuvo con la dosis de $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$ (Figura 6), este comportamiento puede estar relacionado directamente con la biomasa, ya que a las plantas que recibieron menores cantidades de N tuvieron menor biomasa, esto se observó también en las plantas nutridas con altas cantidades de dicho nutriente, en efecto, la concentración de este ion en la savia tiende a ser mayor en estas condiciones. En relación, Ollúa *et al.* (2016) señalan que, al aplicar dosis mayores de $75 \text{ kg de N ha}^{-1}$ en lechuga cv. Dagan; se redujo la concentración de NO_3^- en la savia, por lo cual sugieren que este comportamiento posiblemente se debe a un efecto de dilución debido a que las plantas tenían mayor biomasa.

La mayor concentración de K^+ se registró con la dosis de $250 \text{ kg de N ha}^{-1}$, esto se observó tanto en las plantas que se desarrollaron sobre el suelo con alfalfa y sin ella, por lo que al suministrar dosis superiores e inferiores a ésta, se encontró una ligera reducción en la concentración de dicho ion (Figura 7). Al respecto, Gaona *et al.* (2020) reportan mayores concentraciones de K^+ en las

hojas de granadillas con las dosis altas de N, esto posiblemente se debe al sinergismo existente entre ellos. Sin embargo, las concentraciones de este ión pueden estar afectadas por el fenómeno de concentración-dilución ya que con dosis bajas y altas de N se obtuvieron menor biomasa, mientras que con la dosis de 300 kg de N ha⁻¹ la biomasa fue mayor, por lo tanto, la concentración de dicho ion se vio afectada negativamente.

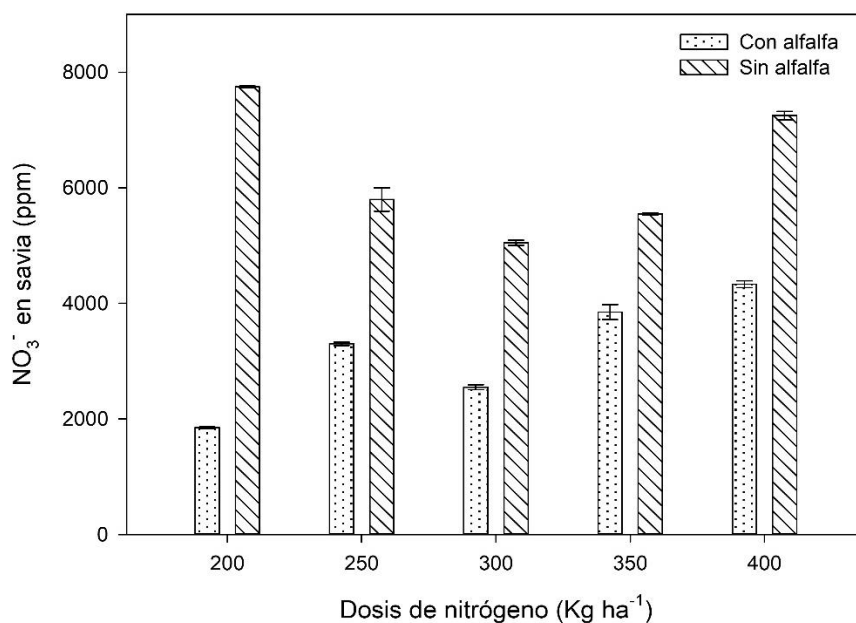


Figura 6. Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N en la concentración de nitrato (NO₃⁻) en lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

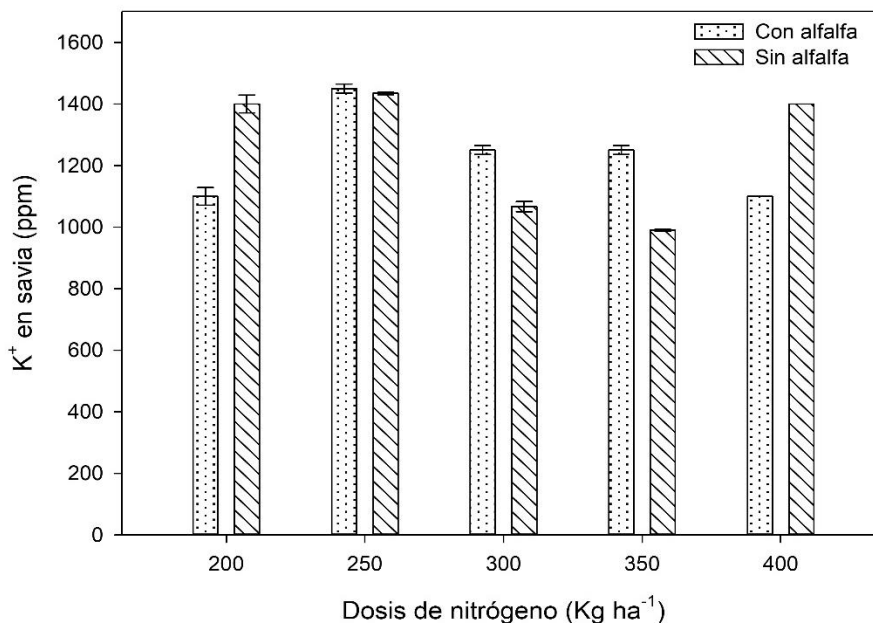


Figura 7. Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N en la concentración de potasio (K^+) en lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

Las concentraciones de Ca^{2+} fueron superiores cuando se adicionó 400 kg de N ha^{-1} , esto se observó tanto en las plantas que se desarrollaron en el suelo con alfalfa y sin ella, sin embargo, al adicionar las dosis de 200 a 350 kg de N ha^{-1} , se encontró una disminución en la concentración de dicho ion (Figura 8). Estudios realizados por Hernández y Rubilar (2012) quienes encontraron reducciones en la concentración foliar de Ca^{2+} en brotes de setos de *Pinus radiata* a medida que incrementaban la dosis de N. Las altas concentraciones de Ca^{2+} con la dosis de 400 kg de N ha^{-1} posiblemente se deben a un efecto de concentración, ya que las plantas nutridas con dicha dosis tenían menor biomasa debido a las altas cantidades de N aplicado.

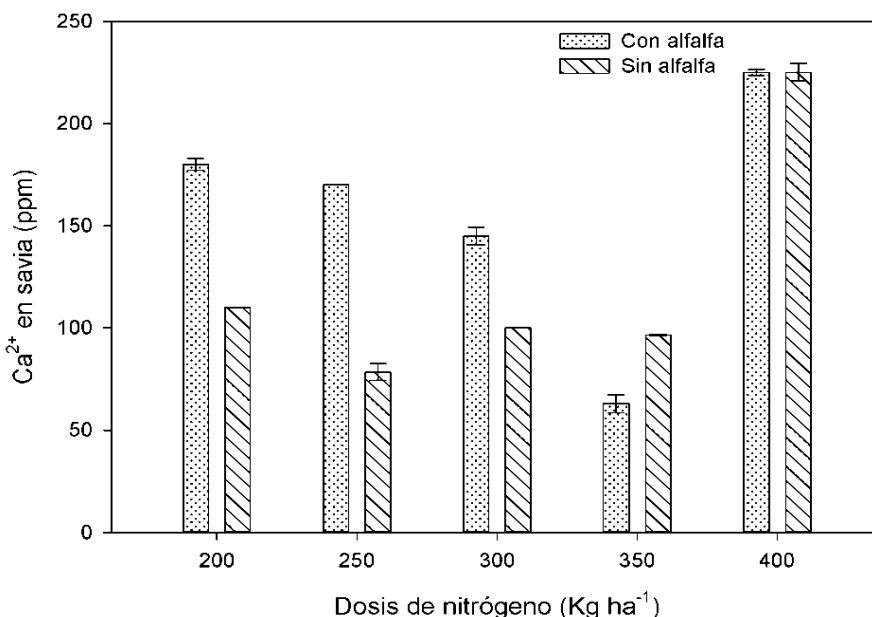


Figura 8. Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N en la concentración de calcio (Ca^{2+}) en lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

El rendimiento fue superior con la dosis de 200 a 300 kg de N ha⁻¹ con alfalfa, sin embargo, al adicionar dosis superiores; tendió a decrecer dicho parámetro (Figura 9), los incrementos en el rendimiento con las dosis mínimas de N puede deberse a que en el suelo hubo suficiente N disponible para las plantas, resultado de la incorporación y fijación de N por la alfalfa. Al respecto, Samaddar *et al.* (2021) indican que la alfalfa incrementa la disponibilidad de N del suelo y, por consiguiente, aumenta el rendimiento de los cultivos. Además, Yost *et al.* (2014) señalan que el N que aporta la alfalfa normalmente es adecuado para obtener un rendimiento óptimo, como por ejemplo, reportan que algunas especies de gramíneas se pudo alcanzar su máximo rendimiento en el primer ciclo, sin embargo, estos mismos autores, sugieren que a veces es necesario complementar la demanda adicionando mínimas cantidades de fertilizantes nitrogenados. Por su parte, Ángeles y Cruz (2015) indican que en algunos casos la alfalfa puede abastecer hasta 90% de los requerimientos de N de la planta, referente a esto, estudios realizados por Cela *et al.* (2011) quienes encontraron altos rendimientos del grano de maíz con la dosis de 0 y 150 kg de

N ha^{-1} después de la alfalfa, dichos hallazgos son similares a los encontrados en este estudio, lo anterior nos indica que el N que proporciona la alfalfa puede abastecer la demanda de este nutriente para el cultivo subsiguiente.

Por otro lado, la disminución encontrada de este parámetro en las plantas que fueron desarrolladas sin alfalfa en el suelo con aplicaciones de 200 y 400 kg de N ha^{-1} puede deberse por la falta y exceso de N; al respecto, estudios realizados por García *et al.* (2021) no hallaron diferencia significativa en el rendimiento de maíz al aplicar dosis de 200 y 400 kg de N ha^{-1} , por lo que sugieren que 400 kg de N ha^{-1} es una dosis excesiva y resulta a un bajo aprovechamiento de N por la planta. Por lo tanto, las aplicaciones de grandes cantidades de N sintético no necesariamente incrementa el rendimiento del cultivo (Sotomayor *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2020). Al respecto, Grijalva *et al.* (2016) observaron un efecto negativo en el rendimiento de trigo al aplicar una dosis de 460 kg de N ha^{-1} . Además, Sánchez *et al.* (2006) indican que las aplicaciones excesivas de N tiene un impacto más negativo sobre la producción de biomasa que cuando este nutriente es deficiente, efecto similar se observó en esta investigación, especialmente en las plantas que fueron nutridas solamente con la fertilización nitrogenada. En esta investigación, a las plantas que fueron nutridas solamente con la fertilización nitrogenada se registró el máximo rendimiento con la dosis de 300 kg de N ha^{-1} , dicho resultado es similar con lo reportado por Grijalva *et al.* (2016) quienes registraron un máximo rendimiento de trigo con una dosis de 230 kg de N ha^{-1} . Por su parte, Rodríguez *et al.* (2020) encontraron mayores rendimientos con una dosis de 200 g de N planta^{-1} en cultivo de maracuyá y dosis inferiores afectó negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas.

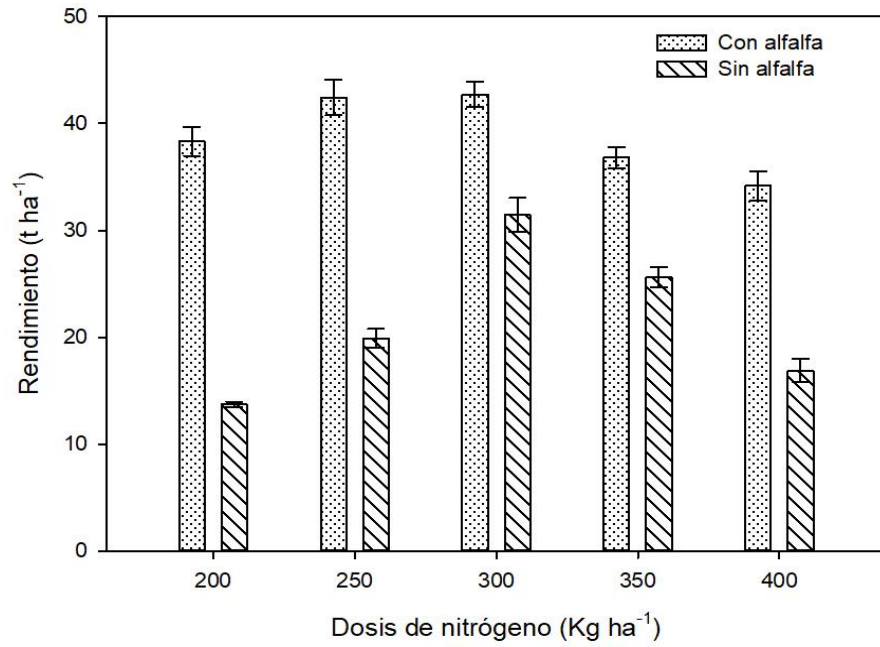


Figura 9. Efecto de la interacción entre la incorporación de alfalfa y diferentes dosis de N sobre el rendimiento de lechuga romana var. Capitata. Las barras indican el error estándar de las medias.

Conclusiones

El uso de la alfalfa favorece el crecimiento, rendimiento y la concentración de iones en las plantas de lechuga. La adición de alfalfa y con la dosis de 200 Kg de N ha⁻¹ disminuye la concentración de NO₃⁻ en la savia de la hoja, la concentración de Ca²⁺ fue mayor en las plantas que se desarrollaron con alfalfa. La incorporación de alfalfa al suelo en combinación con la dosis de 200 y 300 Kg de N ha⁻¹ se incrementó el crecimiento y rendimiento de las plantas de lechuga. Lo anterior sugiere que, la incorporación de alfalfa al suelo es una buena alternativa para mejorar la producción de lechuga y disminuir el suministro de fertilizantes nitrogenados.

Referencias

- Ángeles-Núñez, J. G., & Cruz-Acosta, T. (2015). Aislamiento, caracterización molecular y evaluación de cepas fijadoras de nitrógeno en la promoción del crecimiento de frijol. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 929-942.
- Aragadvay, Y., R. G. (2010). Efecto de la aplicación de diferentes niveles de bacterias *Rizhobium meliloti* con la adición de estiércol de cuy en la producción forrajera del *Medicago sativa* (alfalfa). Tesis de licenciatura. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. Pp: 1-25.
- Ballesta, R., A. (2007). Efecto de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) y del abonado nitrogenado en el maíz (*Zea mays* L.) y el trigo (*Triticum aestivum* L.) en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo en regadío. Tesis doctoral. Universidad de Lleida. Lleida, España. Pp: 1-211.
- Balta, C., R. A., Rodríguez, C., A. M., Guerrero, A., R., Cachique, D., Alva, P., E., Arévalo, L., L., & Loli, O. (2015). Absorción y concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) en suelos ácidos, San Martín, Perú. *Folia Amazónica*, 24(2), 123-130.
- Banco de México (BANXICO). (2022). Estimación de la exposición regional ante cambios en el mercado de fertilizantes nitrogenados. Pp: 1-7.
- Betancourth, C. A., Sañudo, B. A, Flórez, C. A., & Salazar, C. E., (2021). Manejo de la costra negra de la papa (*Rhizoctonia solani*) con el establecimiento de abonos verdes. *Información tecnológica*, 32(2), 165-174.
- Calizaya, L., C. P. (2015). Influencia del arsénico y boro sobre la Fijación Biológica de Nitrógeno entre *Sinorhizobium meliloti* y *Medicago sativa* (alfalfa) *in vitro*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna. Tacna, Perú. Pp: 22-27.
- Calzada, J., & D'Angelo, G. (2021). Demandantes y exportadores de fertilizantes en el mundo. Bolsa de comercio de rosario. Pp: 1-3.
- Cárdenas-Navarro, R., Sánchez-Yáñez, J. M., Farías-Rodríguez, R., & Peña-Cabriales, J. J. (2004). Los aportes de nitrógeno en la agricultura. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 10(2), 173-178.
- Castro-Rincón, E., Mojica-Rodríguez, J. E., Carulla-Fornaguera, J. E., & Lascano-Aguilar, C. E. (2018). Abonos verdes de leguminosas: integración en sistemas agrícolas y ganaderas del trópico. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 711-729.
- Cela, S., Santiveri, F., & Lloveras, J. (2011). Optimum nitrogen fertilization rates for second year corn succeeding alfalfa under irrigation. *Field Crops Research*, 123(2), 109-116.
- Celaya-Michel, H., & Castellanos-Villegas, A. E. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 343-356.
- Coraspe, L., H. M., Muraoka, T., Ide, F., V., Contreras, E., F. S., & Ocheuze, T., P. C. (2009). Absorción de formas de nitrógeno amoniacal y nítrica por

- plantas de papa en la producción de tubérculo-semilla. *Agronomía Tropical*, 59(1), 45-58.
- Delgado, F., D. F. (2015). La alfalfa (*Medicago sativa*): origen, manejo y producción. *Conexión Agropecuaria JDC*, 5(1), 27-43.
- Fernández, P., M. E., Nuria, M., & Felipe, M. R. (2002). Fijación biológica de nitrógeno: factores limitantes. *Ciencia y Medio Ambiente*. Pp: 195-201.
- Gaona-Gonzaga, P., Vázquez-Rojas, L., Aguayo-Pacas, S., Viera-Arrollo, W., Viteri-Díaz, P., Sotomayor-Correa, A., Medina-Rivera, L., Mejía-Bonilla, P., & Cartagena-Ayala, Y. (2020). Respuesta del cultivo de granadilla (*Passiflora ligularis* Juss) cultivar "Colombiana" al suministro de nitrógeno y potasio por fertirriego. *Manglar*, 17(1), 75-82.
- García, S., J. L., Cueto, W., J. A., Báez, P., A., Saynes, S., V. (2021). Fertilización nitrogenada y emisión de N₂O en la producción de maíz en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), 991-1003.
- González, E., A., & Camacho, A., M. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(8), 1733-1745.
- González, P., D., Arroyo, B., & Morales, B., M. (2022). The adequacy of alfalfa crops as an agri-environmental scheme: A review of agronomic benefits and effects on biodiversity. *Journal for Nature Conservation*, 69:126253.
- González, P., L. A., & Zepeda, L., A. (2013). Rendimiento de cinco variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) tipo gourmet ciclo primavera-verano. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. Pp: 1-6.
- Grijalva-Contreras, R. L., Robles-Contreras, F., Macías-Duarte, R., Santillano-Cázares, J., & Núñez-Ramírez, F. (2016). Nitrógeno en trigo y su efecto en el rendimiento y en la concentración de nitratos y potasio en el extracto celular de tallo (ECT). *Acta universitaria*, 26(5), 48-54.
- Guzmán, D., D., & Montero, T., J. (2021). Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(2), 87-101.
- Hardarson, G., Danso, S. K. A., & Zapata, F. (1988). Dinitrogen fixation measurements in alfalfa-ryegrass swards using Nitrogen-15 and influence of the reference crop. *Crop Science*, 28(1), 101-105.
- Hernández, C., A., & Rubilar, P., R. (2012). Efecto de la fertilización nitrogenada y fosforada en el desarrollo y fenología de brotes de setos de *Pinus radiata*. *Bosque (Valdivia)*, 33(1), 53-61.
- Hidalgo, D., J. L. (2017). La situación actual de la sustitución de insumos agroquímicos por productos biológicos como estrategia en la producción agrícola. Universidad Andina Simón Bolívar. Tesis de Maestría. Quito, Ecuador. Pp: 15-33.
- Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura (INTAGRI). (2017). Guía de fertilizantes nitrogenados para cultivos. Serie de nutrición vegetal Núm. 106. Artículos técnicos de INTAGRI. México. 8 p.

- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., & Waterland, N. L. (2016). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 49:19-34.
- Liu, C. W., Sung, Y., Chen, B. C., & Lai, H. Y. (2014). Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International journal of environmental research and public health*, 11(4), 4427-4440.
- Magaña, V., W., Obrador, O., J. J., García, L., E., Castelán, E., M., & Carrillo, A., E. (2020). Rendimiento comparativo de la yuca bajo fertilización mineral y abono verde. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1259-1271.
- Martín, A., G. M., & Rivera, E., R. (2015). Efecto económico de la rotación canavalia-maíz y de la sustitución parcial de fertilizantes minerales. *Cultivos tropicales*, 36(3), 34-39.
- Martínez, V. R., Dibut, B., & Ríos, Y. (2010). Efecto de la integración de aplicaciones agrícolas de biofertilizantes minerales sobre las relaciones suelo-planta. *Cultivos tropicales*, 31(3), 00-00.
- Martínez, F. E., Sarmiento, J., Fischer, G., & Jiménez, F. (2008). Efecto de la eficiencia de N, P, K, Ca, Mg y B en componentes de producción y calidad de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana*, 26(3), 389-398.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). Principios de nutrición vegetal. 4ta. Ed., Instituto Internacional del Potasio. Pp: 322-328.
- Montemayor, T., J. A., Woo, R., J. L., Munguía, L., J., López, A., R., Segura, C., M. A., Yescas, C., P., & Frías, R., E. (2012). Producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivada con riego sub-superficial y diferentes niveles de fósforo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(7), 1321-1332.
- Morales, A., R. A. (2016). Evaluación productiva del pasto faralis (*Phalaris aquatica* L.) en asociación con diferentes variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en la estación experimental de Patacamaya. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. Pp: 16-18.
- Ollúa, R. T., Logegaray, V. R., & Chiesa, A. (2016). Concentración de nitratos en dos tipos comerciales de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas con distintas fuentes nitrogenadas. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 32(3), 194-203.
- Orozco-Vidal, J. A., Palomo-Gil, A., Gutiérrez-Del Río, E., Espinoza-Banda, A., & Hernández-Hernández, V. (2008). Dosis de nitrógeno y su efecto en la producción y distribución de biomasa de algodón transgénico. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 29-35.
- Pérez, O., Ufer, C., Azañon, V., & Solares, E. (2010). Estrategias para la optimización del uso de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de caña de azúcar en Guatemala. *Centro de investigación y capacitación de la caña de azúcar CENGICAHNA*, Guatemala. Pp: 159-165.
- Ramos, M., C., & Pomares, G., F. (2018). Fertilización y necesidades de nutrientes de los cultivos hortícolas. Portal Frutícola. Recuperado en 05

- enero de 2022, de <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/01/29/fertilizacion-y-necesidades-de-nutrientes-de-los-cultivos-hortcolas/>.
- Ramos-Ulate, C. M., Pérez-Álvarez, S., Guerrero-Morales, S., & Palacios-Monarez, A. (2021). Biofertilización y nanotecnología en la alfalfa (*Medicago sativa* L.) como alternativas para un cultivo sustentable. *Cultivos tropicales*, 42(2), e10.
- Rodríguez-Yzquierdo, G. A., Pradenas-Aguila, H. E., Basso-de Figuera, C. A., Barrios-García, M., León-Pacheco, R. I., & Pérez-Macías, M. (2020). Efecto de dosis de nitrógeno en la agronomía y fisiología de plantas de maracuyá. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 117-128.
- Rojas, G., A. R., Hernández, G., A., Joaquín, C., S., Maldonado, P., M. A., Mendoza, P., S. I., Álvarez, V., P., & Joaquín, T., B. M. (2016). Comportamiento productivo de cinco variedades de alfalfa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(8), 1855-1866.
- Samaddar, S., Schmidt, R., Tautges, N. E., & Scow, K. (2021). Adding alfalfa to an annual crop rotation shifts the composition and functional responses of tomato rhizosphere microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 167:104102.
- Sánchez, E., Soto, J. M., Ruiz, J. M., & Romero, L. (2006). Asimilación de nitrógeno en raíces y hojas de frijol ejotero: deficiencia vs toxicidad de nitrógeno. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(3), 187-195.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2021). Al alza, producción y exportación de lechuga mexicana. Ciudad de México. Recuperado en 05 de abril de 2022, de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/al-alza-produccion-y-exportacion-de-lechuga-mexicana?idiom=es>.
- Solís, S., V. A. (2019). El nitrógeno como base de la producción agrícola en cultivo de ciclo corto. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica de Babahoyo. Babahoyo, Ecuador. Pp: 1-4.
- Sotomayor, A., R., Chura, C., J., Calderón, M., C., Sevilla, P., R., & Blas, S., R. (2017). Fuentes y dosis de nitrógeno en la productividad del maíz amarillo duro bajo dos sistemas de siembra. *Anales Científicos*, 78(2), 232-240.
- Ube, A., J. L. (2021). Importancia del nitrógeno para el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de café (*coffea spp.*) en Ecuador. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica de Babahoyo. Babahoyo, Ecuador. Pp: 1-19.
- Verhulst, N., & García, L., A. R. (2022). Recomendaciones para optimizar la fertilización nitrogenada. Recuperado en 09 de septiembre de 2022, en <https://www.cimmyt.org/es/noticias/recomendaciones-para-optimizar-la-fertilizacion-nitrogenada/>.
- Yost, M. A., Russelle, M. P., & Coulter, J. A. (2014). Field-specific fertilizer nitrogen requirements for firstyear corn following alfalfa. *Agronomy Journal*, 106(2), 645-658.