



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

**EFECTO DE LA RELACIÓN
AMONIO/NITRATO EN EL
DESARROLLO DEL AGUACATE
(*Persea americana* Mill.) “HASS” EN
HIDROPONÍA**

ATZINTLALI MARTÍNEZ MARTÍNEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

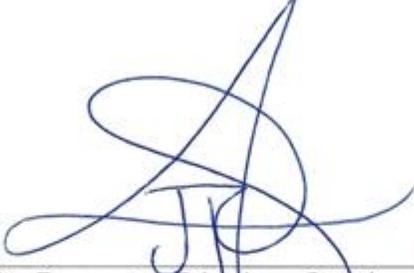
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Efecto de la relación amonio/nitrato en el crecimiento del aguacate (*Persea americana* Mill.) "Hass" en hidroponía**, realizada por la estudiante: **Atzintlali Martínez Martínez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

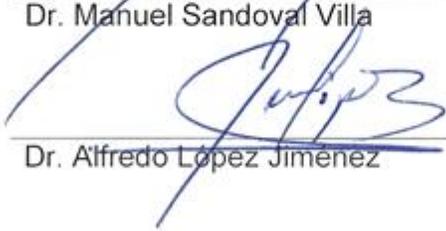
CONSEJERO


Dr. Prometeo Sánchez García

ASESOR


Dr. Manuel Sandoval Villa

ASESOR


Dr. Alfredo López Jiménez

Montecillo Texcoco, Estado de México, México, octubre de 2022

EFFECTO DE LA RELACIÓN AMONIO/NITRATO EN EL DESARROLLO DEL AGUACATE (*Persea americana* Mill.) “HASS” EN HIDROPONÍA

Atzintlali Martínez Martínez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Las principales formas de nitrógeno (N) absorbidas por las plantas son el nitrato (NO_3^-) y el amonio (NH_4^+), sin embargo, las plantas difieren en su capacidad para absorberlas. En el caso del aguacate, la respuesta a estas formas de N y su combinación ha sido poco estudiada, por lo que, este estudio tuvo el objetivo de evaluar la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el desarrollo vegetativo, la concentración nutrimental y el comportamiento de las plantas de aguacate en condiciones de hidroponía bajo invernadero. Las plantas fueron cultivadas en macetas de 28 L, empleando tezontle como sustrato. Los tratamientos consistieron en cinco relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0 en la solución nutritiva, basadas en la solución universal Steiner (1984) al 50% de su concentración, en un diseño completamente al azar con tres repeticiones. El volumen de solución nutritiva aplicado por día varió de 2.5 a 3 L mediante riego por goteo en ocho riegos, durante el transcurso del experimento.

Los resultados indicaron que la relación 25/75 en la solución nutritiva incrementó el área foliar. La relación 75/25 aumentó el peso fresco (PF) total y de tallos, además del PF y seco (PS) de brotes primarios y secundarios. El exceso de NH_4^+ en la solución benefició la longitud de brotes primarios y el PF y PS de hojas. La adición gradual de NH_4^+ al medio favoreció la altura y el PS total. El suministro del 100% de NO_3^- a las plantas incrementó la concentración de sólidos solubles totales en raíz, pero redujo la concentración de N total, Mn y Zn. mientras que la relación 25/75 redujo la concentración de N-NO_3^- . La combinación de NH_4^+ y NO_3^- en partes iguales aumentó la concentración de Ca^{2+} en el extracto celular de peciolo (ECP). La relación 75/25 benefició la concentración de S, B y NO_3^- (ECP), pero afectó negativamente la concentración de K^+ en el ECP. El aporte de sólo NH_4^+ a las plantas redujo la concentración de Mg y Ca. El suministro único de NH_4^+ y de NO_3^- mejoró la concentración de N-NH_4^+ . El incremento de NH_4^+ en la solución nutritiva fue proporcional a la concentración de azúcares solubles en hojas. En general, las dos formas de N y los niveles tienen impacto en las características morfológicas y nutrimentales del aguacate Hass en hidroponía destacando los efectos positivos cuando se suministran las dos formas de N.

Palabras clave: Aguacate, Amonio, Nitrato, Desarrollo vegetativo, Nutrientes.

EFFECT OF AMMONIUM/NITRATE RELATIONSHIP ON THE DEVELOPMENT OF AVOCADO (*Persea americana* Mill.) "HASS" IN HYDROPONICS

Atzintlali Martínez Martínez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

The main forms of nitrogen (N) absorbed by plants are nitrate and ammonium; however, plants differ in their capacity to absorb them. In the case of avocado, the response to these forms of N and their combination has been little studied, therefore, this study had the objective of evaluating the $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio in vegetative development, nutrient concentration, and behavior of avocado plants in hydroponic conditions under greenhouse conditions. The plants were grown in 28 L pots, using tezontle as substrate. The treatments consisted of five NH_4^+ and NO_3^- ratios: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 and 100/0 in the nutrient solution, based on Steiner's (1984) universal solution at 50% of its concentration, in a completely randomized design with three replications. The volume of nutrient solution applied per day varied from 2.5 to 3 L by drip irrigation in eight irrigations during the experiment.

The results indicated that the 25/75 ratio in the nutrient solution increased leaf area. The 75/25 ratio increased total and stem fresh weight (FFW), as well as FF and dry weight (DW) of primary and secondary shoots. Excess NH_4^+ in the solution benefited the length of primary shoots and the FP and PS of leaves. Gradual addition of NH_4^+ to the medium favored height and total PS. The supply of 100% NO_3^- to the plants increased the concentration of total soluble solids in the root, but reduced the concentration of total N, Mn, and Zn, while the 25/75 ratio reduced the concentration of N-NO_3^- . The combination of NH_4^+ and NO_3^- in equal parts increased the Ca^{2+} concentration in the petiole cell extract (ECP). The 75/25 ratio benefited the concentration of S, B, and NO_3^- (ECP), but negatively affected the concentration of K^+ in the ECP. The supply of only NH_4^+ to the plants reduced the concentration of Mg and Ca. Single supply of NH_4^+ and NO_3^- improved N-NH_4^+ concentration. The increase of NH_4^+ in the nutrient solution was proportional to the concentration of soluble sugars in leaves. In general, the two forms of N and the levels have an impact on the morphological and nutritional characteristics of Hass avocado in hydroponics, highlighting the positive effects when both forms of N are supplied.

Key words: *Avocado, Ammonium, Nitrate, Nutrients, Vegetative growth*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, por permitirme ser parte de su comunidad.

Al postgrado de Edafología por aportarme otro campo del conocimiento agronómico.

Al Dr. Prometeo, por sus aportaciones, apoyo y dirección en la realización de este proyecto.

Al Dr. Manuel por sus consejos, atención y las facilidades brindadas en la investigación de campo y por su dedicación en la revisión del presente escrito. Por su actitud positiva antes los problemas y calidez humana.

A mis compañeros: Elsar, Andrés, Ricardo, Guadalupe, Oyuki y Alicia quienes me apoyaron en el transcurso de esta investigación.

A Lorena, quién con sus consejos y disposición facilitó la realización y culminación de este trabajo.

A Dios y al Universo por permitirme superar la adversidad, por todas las cosas buenas de mi vida que desconocía y salieron a mi encuentro.

DEDICATORIA

A mis hermanos Itaí, Armando y Alám por ser mi principal inspiración.

A mi hermana Itaí, quién fue mi sostén y mi luz en esta etapa de incertidumbre, y supo brindarme su apoyo emocional para superarla.

A mi tío Sergio Martínez por su apoyo emocional y por mostrarme la vida desde su perspectiva.

A mis papás Fidelina Martínez y Armando Martínez por sus palabras de aliento, y por su apoyo total en la culminación de este proyecto.

A Elsar, con quién coincidí en este trayecto y comparto grandes momentos.

A Fabiola y Luisa, por su sincera amistad a pesar de la distancia.

Sinceramente
ATZINTLALI

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA.....	vi
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 1. RELACIÓN AMONIO/NITRATO EN EL DESARROLLO VEGETATIVO DEL AGUACATE EN HIDROPONÍA	4
1.1 RESUMEN	4
1.2 ABSTRACT	5
1.3 INTRODUCCIÓN	6
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	8
1.4.1 Ubicación del experimento	8
1.4.2 Material vegetal	8
1.4.3 Solución nutritiva	8
1.4.4 Diseño experimental y tratamientos	8
1.4.5 Aplicación de tratamientos.....	9
1.4.6 Variables evaluadas	9
1.4.7 Análisis estadístico	10
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
1.5.1 Altura de la planta.....	11
1.5.2 Longitud de brotes primarios	12
1.5.3 Área foliar	13
1.5.4 Peso fresco y seco total.....	14
1.5.5 Peso fresco y seco de hojas, tallo y raíz.....	15
1.5.6 Peso fresco y seco de brotes	17
1.6 CONCLUSIONES	19

CAPÍTULO 2. EFECTO DE LA RELACIÓN AMONIO/NITRATO EN LA CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL, AZÚCARES Y SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES DEL AGUACATE “HASS” EN HIDROPONÍA.....	20
2.1 RESUMEN	20
2.2 ABSTRACT	21
2.3 INTRODUCCIÓN	22
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.4.1. Ubicación del experimento	24
2.4.2. Material vegetal	24
2.4.3. Solución nutritiva	24
2.4.4. Diseño experimental y tratamientos	24
2.4.5. Aplicación de tratamientos.....	25
2.4.6. Variables evaluadas	25
2.4.7. Análisis estadístico	28
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
2.5.1. Determinación nutrimental.....	29
2.5.2. Azúcares y sólidos solubles totales	37
2.6. CONCLUSIONES	40
CONCLUSIONES GENERALES.....	41
LITERATURA CITADA.....	42

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva sobre la altura de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía (Tukey, 0.05).....	11
Cuadro 1.2. Efecto de la solución nutritiva con diferente relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ sobre la longitud de los brotes primarios de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía (Tukey, 0.05).	12
Cuadro 2.1. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la concentración de macronutrientes de hojas de aguacate “Hass” en hidroponía.	33
Cuadro 2.2. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la concentración de micronutrientes de hojas de aguacate “Hass” en hidroponía.....	34

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el área foliar de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$). 13
- Figura 1.2.** Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el peso fresco (A) y seco total (B) de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura. 14
- Figura 1.3.** Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el peso fresco (A) y seco (B) de hojas, tallo y raíz de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura. 16
- Figura 1.4.** Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el peso fresco (PF) y seco (PS) de brotes primarios (A y B) y secundarios (C y D) de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura. 17
- Figura 2.1.** Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ sobre la concentración de N-NO_3^- en hojas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$). 30
- Figura 2.2.** Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ sobre la concentración de N-NH_4^+ en hojas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$). 31
- Figura 2.3.** Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el N-total de hojas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$). 32
- Figura 2.4.** Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la concentración de NO_3^- en el extracto celular de peciolo (ECP) de aguacate “Hass” en hidroponía.

Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).	36
Figura 2.5. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la concentración de Ca^{2+} (A) y K^+ (B) en el extracto celular de peciolo (ECP) de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura.....	37
Figura 2.6. Efecto de la relación en la concentración de sacarosa en hojas (A) y raíz (B) de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura.....	38
Figura 2.7. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la concentración de sólidos solubles totales (SST o °Brix) en hojas (A) y raíz (B) de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura.....	39

INTRODUCCIÓN GENERAL

El origen del aguacate (*Persea americana* Mill.), tuvo lugar en la región conocida como Mesoamérica, en las partes altas del centro y este de México, y partes altas de Guatemala (Williams, 1977; Turner y Miksicek, 1984). México es el principal país productor y exportador de este fruto, seguido de Colombia y República Dominicana (FAO, 2020; SIAP, 2020a). La superficie cultivada en el país es de 248 mil hectáreas (SIAP, 2021), en las que se producen alrededor de 2 millones 400 mil toneladas de las cuales, se exporta el 43% hacia Estados Unidos, generando 2 mil 500 millones de dólares anuales. La variedad predominante es la variedad Hass en un 97 % (SIAP, 2021).

El nitrógeno juega un rol importante en la nutrición vegetal por ser el cuarto elemento más abundante en el tejido vegetal después del carbono, oxígeno e hidrógeno (Mengel y Kirkby, 1987). El amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-) son las dos fuentes predominantes de nitrógeno (N) inorgánico absorbidas por las raíces de las plantas superiores en los ecosistemas agrícolas (Carlisle, 2012). Se ha demostrado que la forma de N influye en el crecimiento, rendimiento, la calidad de la fruta y la composición química del tejido vegetal del aguacate y otras plantas (Kotsiras *et al.*, 2002; Lobit *et al.*, 2007); el efecto varía de acuerdo a la sensibilidad de los cultivos a las diversas proporciones de NH_4^+ y NO_3^- en la solución nutritiva (Sonneveld, 2002). El NH_4^+ , cuando se suministra como única fuente de N en altas concentraciones, es tóxico y perjudica el crecimiento de las plantas (Esteban *et al.*, 2016). Sin embargo, algunas especies están bien adaptadas a esta fuente (Britto y Kronzucker, 2002). Por otra parte, se ha demostrado que un adecuado balance entre el NH_4^+ y el NO_3^- es benéfico para el crecimiento de las plantas, pero sólo bajo ciertas circunstancias, y el efecto benéfico varía entre los cultivos (Mengel y Kirkby, 1987).

El incremento en los costos de producción, la disminución y el encarecimiento de las tierras de cultivo, la mano de obra cada vez más escasa, las condiciones climáticas adversas hacen necesaria la implementación de nuevas tecnologías en el cultivo de aguacate, como la implementación de su cultivo en hidroponía. La nutrición juega un papel importante en la producción de este fruto, por lo que se requiere del conocimiento de la solución nutritiva adecuada por etapa fenológica. Lobit *et al.*, (2007), han

demonstraron que el aumento de la proporción de NH_4^+ en la solución nutritiva reduce el crecimiento de las plantas de aguacate Hass en desarrollo vegetativo, bajo condiciones particulares de hidroponía. Sin embargo, el efecto de la forma iónica de N en aguacate aún no ha sido dilucidado.

El objetivo de la presente investigación es evaluar el efecto de cinco relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva en el crecimiento del aguacate "Hass", en hidroponía e invernadero.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Evaluar el efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva sobre el crecimiento de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía.

Objetivos específicos

- Evaluar el desarrollo vegetativo del aguacate por efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$: (0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0), de la solución universal de Steiner (1984).
- Contrastar la concentración N-total, N-reducido, y N-NO_3^- , macronutrientes y micronutrientes, en hojas de aguacate por efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva.
- Determinar la concentración de azúcares solubles y sólidos solubles totales, en hojas y raíz de aguacate por efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$.
- Evaluar el desarrollo vegetativo del aguacate bajo invernadero.

CAPÍTULO 1. RELACIÓN AMONIO/NITRATO EN EL DESARROLLO VEGETATIVO DEL AGUACATE EN HIDROPONÍA

1.1 RESUMEN

El efecto del suministro de NH_4^+ y NO_3^- en diferentes relaciones sobre el crecimiento de plantas de aguacate; fue evaluado. Las plantas se cultivaron bajo invernadero en hidroponía en macetas de 28 L de capacidad, con tezontle (<12 mm). Se utilizó un diseño completamente al azar. Los tratamientos consistieron en cinco soluciones nutritivas con diferentes proporciones de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 100/0; a partir de la solución Steiner (1984) al 50% de su concentración. Las variables evaluadas fueron: altura de planta, longitud de brotes primarios; área foliar; peso fresco y seco total, de hojas, tallo, raíz, brotes primarios y secundarios. Los datos se expusieron a un análisis de varianza y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados indicaron que la relación 25/75 en la solución nutritiva incrementó el área foliar. La relación 75/25 aumentó el peso fresco (PF) total y de tallos, además del PF y seco (PS) de brotes primarios y secundarios. El exceso de NH_4^+ en la relación 100/0 benefició la longitud de brotes primarios y el PF y PS de hojas. La adición gradual de NH_4^+ al medio favoreció la altura y el PS total. No se observaron síntomas de toxicidad por en las plantas tratadas con el 100% de NH_4^+ , lo que sugiere que las plantas de aguacate toleran el amonio en altas concentraciones.

Palabras clave: *Persea americana Mill., Crecimiento, Área foliar, Peso fresco y seco*

RELATION AMMONIUM / NITRATE IN THE VEGETATIVE DEVELOPMENT OF THE AVOCADO IN HYDROPONICS

1.2 ABSTRACT

The effect of NH_4^+ and NO_3^- supply in different ratios on avocado plant growth was evaluated. Plants were grown under greenhouse hydroponics in 28 L pots with tezontle (<12 mm). A completely randomized design was used. The treatments consisted of five nutrient solutions with different proportions of $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 100/0; starting from the Steiner (1984) solution at 50% of its concentration. The variables evaluated were plant height, length of primary shoots; leaf area; total fresh and dry weight of leaves, stem, root, primary and secondary shoots. The data were subjected to an analysis of variance and the means were compared with Tukey's test ($p < 0.05$). The results indicated that the 25/75 ratio in the nutrient solution increased leaf area. The 75/25 ratio increased total and stem fresh weight (FW), as well as FW and dry weight (DW) of primary and secondary shoots. Excess NH_4^+ at the 100/0 ratio benefited the length of primary shoots and the FW and DW of leaves. Gradual addition of NH_4^+ to the medium favored height and total DW. No toxicity symptoms were observed in plants treated with 100% NH_4^+ , suggesting that avocado plants tolerate ammonium at high concentrations.

Keywords: *Avocado, Growth, Leaf area, Fresh and Dry weight*

1.3 INTRODUCCIÓN

El aguacate es un árbol frutal que tuvo su origen en México y Centroamérica. Pertenece al género *Persea* con alrededor de 85 especies, la especie es *P. americana* Mill. (Williams, 1977). El cultivo de aguacate a nivel mundial ha ganado mucha popularidad desde la última década debido a su calidad nutricional y a la alta demanda en el mercado; ha sido introducido en casi todo el mundo (Selladurai y Awachare, 2020). México es el mayor proveedor de aguacate a nivel mundial (OECD-FAO, 2021).

El NH_4^+ y el NO_3^- son las principales fuentes de Nitrógeno (N) absorbidas por las raíces de las plantas. Por esa razón estas dos formas de N son básicas para la nutrición de los cultivos, tanto que estudios sobre su efecto en el crecimiento de las plantas se han llevado a cabo durante varios años (Li *et al.*, 2013). Se ha demostrado que algunas especies de plantas muestran preferencia por NH_4^+ o NO_3^- o ambos, dependiendo de la demanda de la especie y la variedad junto con las condiciones ambientales (Britto y Kronzucker, 2013). Las preferencias han sido evaluadas principalmente por la producción de biomasa vegetal, la producción de rendimiento o la cantidad de absorción de N. No obstante, existe una definición confusa de la preferencia por alguna fuente de N (Boudsocq *et al.*, 2012) además, la lista de las plantas adaptadas a estas fuentes es corta (Britto y Kronzucker, 2013).

Las plantas cultivadas muestran una preferencia por NO_3^- sobre NH_4^+ , a pesar de que el NO_3^- debe absorberse contra un fuerte gradiente electroquímico y reducirse con un enorme gasto de energía para su asimilación (Britto y Kronzucker, 2002). Por otra parte, la absorción de NH_4^+ se da de forma rápida, lo que resulta en una sobreacumulación de este compuesto, causando toxicidad en las plantas (Britto y Kronzucker, 2006). Los síntomas de toxicidad incluyen: reducción del crecimiento, cambios en la arquitectura de las raíces, reducción de la relación raíz brote y clorosis de las hojas, entre otros (Bittsánszky *et al.*, 2014). Varios factores pueden conferir cierta tolerancia a NH_4^+ y determinan el desarrollo y crecimiento de las plantas, entre ellos la combinación con NO_3^- , que incluso, a concentraciones muy bajas puede aliviar la toxicidad (Esteban *et al.*, 2016).

El aguacatero se cultiva en México principalmente en suelos ácidos de pH de 3.5 - 5.5 (Schaffer *et al.*, 2013). Dado que el pH afecta la disponibilidad de las formas de N en el suelo, la forma predominante en suelos ácidos es el NH_4^+ (Chen *et al.*, 2020), lo que indica que estas plantas pueden tener alta adaptabilidad y tolerancia a este ion. En la presente investigación se planteó la hipótesis de que las plantas de aguacate crecen preferencialmente en medios con NH_4^+ y pueden ser poco sensibles a las altas concentraciones de este ion. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el crecimiento en la etapa vegetativa con el fin de identificar la respuesta del aguacate en hidroponía a diferentes relaciones de N: sólo NO_3^- (100/0); 25/75, 50/50, 75/25 de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, y sólo NH_4^+ (0/100).

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de tipo “dos aguas”, con ventilación cenital y cubierta de polietileno UVII calibre 720 μm con transmitancia de luz solar del 85%, del Área de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados, localizado en el km 36.5 de la Carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México; en las coordenadas 19° 29' latitud norte y 98° 54' longitud oeste, a 2250 m de altitud. La temperatura mínima promedio fue de 28.6 °C y la máxima de 32.5 °C, mientras que la humedad relativa promedio de 72%.

1.4.2 Material vegetal

Se utilizaron plantas de aguacate (*Pesea americana Mill.*) c.v. “Hass” de seis meses de edad, injertadas sobre patrón criollo (raza mexicana). Las raíces de las plantas se lavaron para retirar el sustrato proveniente del vivero, se plantaron en macetas Air Grower de 28 L con tezontle de granulometría no mayor a 12 mm. Se establecieron a 50 x 70 cm entre maceta y maceta. Una vez plantadas se realizó la aplicación de fungicida (clorotalonil + metalaxil) al “drench” para evitar infecciones en la raíz.

1.4.3 Solución nutritiva

La solución nutritiva base para generar los tratamientos fue la solución universal de Steiner (1984) al 50% de la concentración original, variando únicamente los porcentajes de las fuentes de N. El pH se ajustó a 5.8 ± 2 , con un potenciómetro marca Conductronic.

1.4.4 Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con cinco tratamientos y ocho repeticiones, con un total de 40 unidades experimentales. La concentración de la solución nutritiva fue la siguiente en meq/ L⁻¹: N: 6, Ca²⁺:4.5, K⁺: 3.5, Mg²⁺: 2, SO₄²⁻: 3.5 y H₂PO₄⁻: 0.5. Los tratamientos consistieron en cinco soluciones con diferente relación NH₄⁺/NO₃⁻ (%): 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0 para cubrir los requerimientos de N. La aleatorización se realizó mediante el programa estadístico R versión R-UCA 4.1.1.

1.4.5 Aplicación de tratamientos

Las plantas se regaron con agua corriente durante una semana, posteriormente se aplicó solución nutritiva de Steiner (1984) al 25% de la concentración original, durante el mismo periodo. Los tratamientos se aplicaron después de esta fase de adaptación y hasta los 120 días después del trasplante (ddt).

Con riego por goteo (8 L h^{-1}) se aplicaron 2.5 L día^{-1} de solución nutritiva planta⁻¹, distribuidos en 6 eventos, en los primeros 75 ddt, posteriormente se aplicaron 3 L distribuidos en 8 riegos diarios.

1.4.6 Variables evaluadas

1.4.6.1 Altura de planta

Se realizaron siete mediciones quincenales, para determinar el crecimiento longitudinal de la planta a partir de los 30 y hasta los 120 ddt. Se midió desde la base del tallo hasta el meristemo apical utilizando un flexómetro.

1.4.6.2 Longitud de brotes primarios

Se midió la longitud de todos los brotes primarios recién formados, desde la base hasta el ápice. La evaluación se realizó después de los 30 y hasta los 120 ddt, con ayuda de una cinta métrica.

1.4.6.3 Área foliar

Se registró el área de la lámina foliar, a los 120 ddt. Se cosecharon tres plantas de aguacate por tratamiento las cuales se encontraban en etapa vegetativa. Para la medición se empleó un integrador de área foliar (LI-COR, LI-30004, USA).

1.4.6.4 Peso fresco y seco

Para determinar la biomasa fresca tres plantas de cada tratamiento fueron seccionadas en hojas, tallo, raíz (se quitó el sustrato y se enjuagó con agua destilada) brotes secundarios y brotes primarios, a los 120 ddt; posteriormente fueron pesadas por separado en una balanza de precisión (Ohaus, Scout Prou 6000x0.1 g). La biomasa seca

se determinó luego de someter las muestras a la estufa de aire forzado (Riossa®, modelo HCF-125D) a 70°C durante 72 horas. El peso fresco y seco total se determinó sumando el peso promedio de cada órgano.

1.4.7 Análisis estadístico

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza y comparación de medias con el método de Tukey ($\alpha=0.05$), utilizando el programa estadístico R-UCA-4.1.1 de R para Windows.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1 Altura de la planta

En las evaluaciones realizadas después de los 30 y hasta los 75 ddt se observó que las relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ no mostraron efecto sobre la altura de la planta. A partir de la evaluación realizada a los 90 ddt hubo una relación positiva entre la adición de amonio y la altura, el crecimiento longitudinal fue mayor en las plantas tratadas con la relación 100/0, mientras que el menor se tuvo con la relación 0/100. El suministro de NH_4^+ en un 100% (100/0) mostró un incremento de hasta 16, 18, y 22%, en los muestreos después de los 90, 105 y 120 ddt respectivamente (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva sobre la altura de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía (Tukey, 0.05).

$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	Días después del trasplante						
	30	45	60	75	90	105	120
	Cm						
0/100	83.56 a	95.64 a	112.81 a	125.75 a	139.19 b	148.69 b	157.27 c
25/75	78.28 a	98.03 a	113.25 a	125.94 a	139.38 b	150.63 b	173.06 b
50/50	81.50 a	108.91 a	121.31 a	128.25 a	140.00 b	154.43 b	175.83 ab
75/25	78.83 a	99.73 a	117.43 a	133.85 a	149.18 b	158.29 b	176.07 ab
100/0	81.99 a	103.73 a	120.69 a	137.38 a	165.13 a	180.14 a	191.86 a
DSH	11.87	16.80	15.97	16.31	13.50	17.37	17.92
CV %	10.21	11.55	9.49	8.71	6.40	7.54	6.39

Medias con diferente letra por columna presentan diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$). DSH (Diferencia honestamente significativa), C.V. (coeficiente de variación).

Estos datos concuerdan con los reportados por Zou *et al.*, (2020), en bambú (*Phyllostachys edulis*) y *Castanopsis fargesii*, cultivados hidropónicamente, donde la menor altura se obtuvo con la relación 0/100 y la mayor con 100/0. Por el contrario, Chen *et al.*, (2020) concluye que en condiciones de sólo NO_3^- , el crecimiento en altura es mayor que en condiciones de sólo NH_4^+ en plántulas de cítricos.

1.5.2 Longitud de brotes primarios

La longitud de los brotes primarios de las plantas de aguacate aumentó significativamente a los 30 ddt cuando se combinaron las dos formas de N, es decir, con la proporción 50/50 ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$). Posteriormente, a los 75 ddt se obtuvo el mayor crecimiento longitudinal con la relación 100/0 (incremento de 53%) y el menor con el tratamiento 0/100, mientras que las relaciones 25/75, 50/50 y 75/25 fueron estadísticamente iguales. En la última evaluación (120 ddt) la adición de NH_4^+ al 100% mostró un incremento de 44 % en la longitud de los brotes (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2. Efecto de la solución nutritiva con diferente relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ sobre la longitud de los brotes primarios de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía (Tukey, 0.05).

$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	Días después del trasplante						
	30	45	60	75	90	105	120
	Cm						
0/100	3.13 b	7.85 a	12.31 a	15.61 b	19.06 a	20.48 a	22.93 b
25/75	3.98 b	11.10 a	17.20 a	20.74 ab	18.15 a	18.69 a	23.50 b
50/50	8.37 a	15.82 a	18.23 a	20.33 ab	18.24 a	17.53 a	21.50 b
75/25	3.13 b	9.77 a	14.44 a	20.31 ab	20.95 a	21.45 a	21.98 b
100/0	2.63 b	9.99 a	17.13 a	23.92 a	21.44 a	27.16 a	33.05 a
DSH	3.71	8.58	10.42	6.90	10.32	11.05	54.54
CV %	60.83	54.73	45.71	23.67	36.69	36.49	8.58

Medias con la misma letra por columna no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$). DSH (Diferencia honestamente significativa), CV (coeficiente de variación).

Resultados similares sobre el efecto positivo del amonio en arándano fueron reportados por Crisóstomo-Crisóstomo *et al.*, (2014), donde la relación 100/0 indujo el mayor crecimiento de brotes a las siete semanas. De igual forma, Gurrola-Nieblas (2020), señala que la relación 100/0 mostró un incremento gradual en el desarrollo de los brotes, lo cual culminó en una mayor longitud con respecto a los demás tratamientos. Contrario a esto, Lobit *et al.*, (2007) en plantas de aguacate, indicaron que el amonio redujo el

crecimiento de los brotes primarios; cuando el NH_4^+ aumentó de cero a 100%, la longitud de los brotes presentó una disminución del 36%.

Debido a la expectativa de cultivo del aguacate en sustrato bajo invernadero, se debe considerar el efecto del exceso de NH_4^+ en el crecimiento de los brotes primarios y así evitar el desarrollo excesivo, dichos brotes son el soporte de los brotes secundarios y estos a su vez de la carga frutal.

1.5.3 Área foliar

El área foliar fue afectada significativamente en el muestreo realizado a los 120 ddt. Los valores más altos se registraron en el tratamiento donde se combinó NH_4^+ y NO_3^- en la relación 25/75 con respecto al tratamiento sin adición de NH_4^+ (100/0), que presentó la menor área foliar (Figura 1.1), este incremento fue del 81 %. Esta tendencia fue similar a la reportada por Jesús *et al.*, (2022) en fresa, en la que la relación 25/75 tuvo la mayor área foliar, no obstante; el menor valor lo obtuvieron con la relación 0/100. Por su parte, Lobit *et al.*, (2007) en aguacate, no encontraron diferencias significativas.

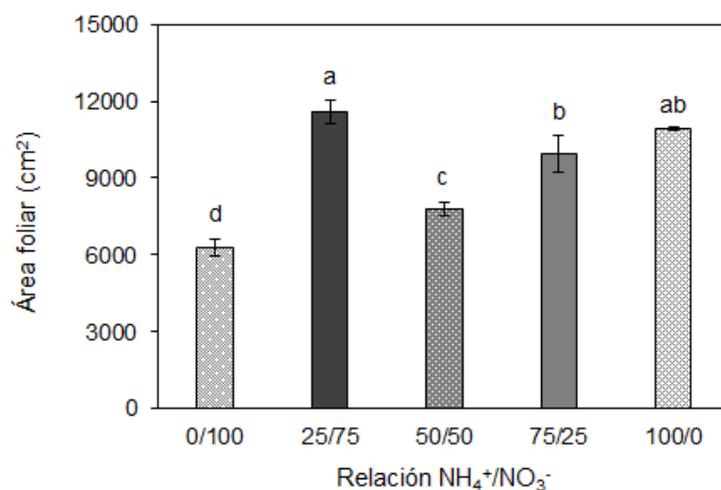


Figura 1.1. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el área foliar de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

1.5.4 Peso fresco y seco total

El peso fresco total se vio afectado significativamente por los tratamientos, el mayor valor se observó cuando se combinaron las dos formas de N (95% de incremento) en la relación 75/25 ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) y la reducción ocurrió con el tratamiento de sólo NO_3^- (0/100), donde se tuvo el menor peso (Figura 1.2 A). En contraste con lo aquí reportado, Choi *et al.*, (2011) en fresa, reportaron que los tratamientos con menor concentración de NH_4^+ (0/100 y 40/60), resultaron con el mayor peso fresco.

El peso total de la materia seca incrementó a medida que se adicionó NH_4^+ en la solución nutritiva, de modo que el mayor peso total se obtuvo en los tratamientos 75/25 y 100/0 de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ por tanto, el incremento resultó en un 78 y 80% con respecto al tratamiento con NO_3^- al 100%, donde la reducción del peso seco se hizo más evidente (Figura 1.2 B). Jesús *et al.*, (2022) observaron una tendencia similar en plantas de fresa, al suministrar NH_4^+ y NO_3^- en diferentes porcentajes (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100). Por el contrario, Lobit *et al.*, (2007), reportaron que la combinación de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la proporción 25/75 conduce a mayor peso seco en plantas de aguacate, seguido del suministro de sólo NO_3^- , mientras que el menor peso lo obtuvieron con las relaciones 50/50, 75/25 y sólo NH_4^+ en este orden.

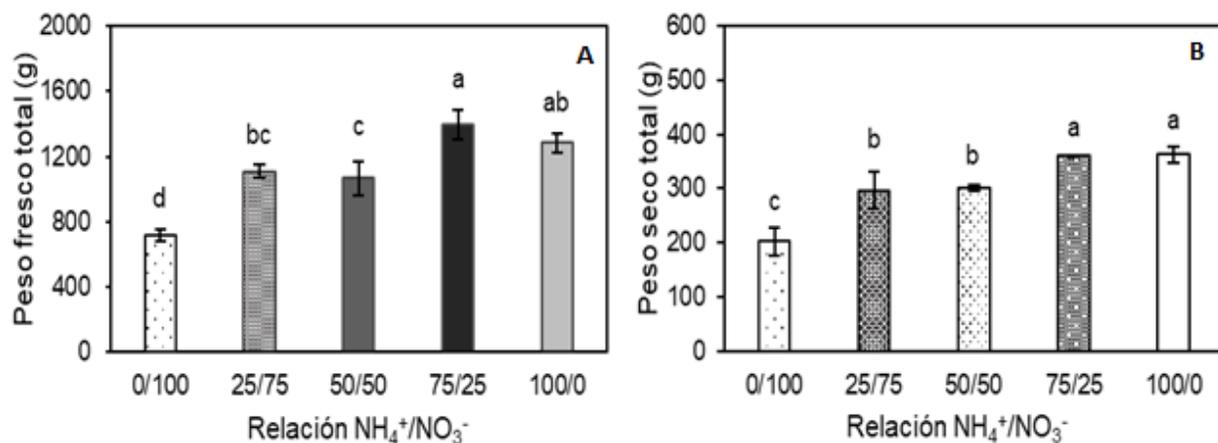


Figura 1.2. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el peso fresco (A) y seco total (B) de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura.

Estudios señalan los efectos beneficiosos de dos formas de N ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) en una proporción adecuada sobre el crecimiento de diferentes plantas (Gashaw y Mugwira 1981), puesto que tienen la función de regular el pH celular, almacenar parte de N para el consumo de menos energía y obtener la máxima velocidad de crecimiento (Li *et al.*, 2013). Aunque el NH_4^+ utilizado como única forma de N puede provocar reacciones tóxicas y reducir e incluso inhibir la tasa de crecimiento de algunos cultivos en solución (Britto y Kronzucker, 2002); los efectos observados en las investigaciones son diferentes debido a la disimilitud de las condiciones y métodos utilizados y a que las especies o variedades de plantas difieren en la tolerancia al NH_4^+ (Li *et al.*, 2013). En este sentido los resultados de la presente investigación sugieren que las plantas de aguacate son tolerantes a la alta concentración de NH_4^+ en condiciones de hidroponía, ya que no se observaron efectos tóxicos directos por el NH_4^+ , consecuentemente la concentración de NO_3^- como única fuente de N tiene un efecto inhibitor del crecimiento, al menos en el peso fresco y seco de las hojas.

1.5.5 Peso fresco y seco de hojas, tallo y raíz

La acumulación de biomasa fresca en hojas, tallo y raíz de aguacate fue significativamente menor en el tratamiento donde se adicionó únicamente NO_3^- (100%). Por consiguiente, la mayor acumulación de biomasa fresca de estos órganos se observó cuando se incrementó la concentración de NH_4^+ , en el caso de las hojas con la relación 100/0, en el tallo con 75/25 y en la raíz con 50/50, 75/25 y 100/0 (Figura 1.3 A), este incremento fue del 36 al 97 %. Los resultados de peso fresco de hojas aquí encontrados tuvieron una tendencia similar a la reportada por Tabatabaei *et al.*, (2008) en fresa, cuando se adicionó sólo NO_3^- , no obstante, la adición de amonio al 75% también provocó un decremento en esta variable.

La relación 0/100 tuvo un efecto negativo en el peso seco de hojas, tallo y raíz, tuvieron un decremento del 51, 56 y 43 % respectivamente, mientras que el aumento de la proporción de NH_4^+ incrementó el peso seco de estos tres órganos, en hojas la relación 100/0, en tallos las relaciones 50/50, 75/25 y 100/0, y en raíz 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0 (Figura 1.3 B) De manera similar, la adición de NH_4^+ como única fuente de N incrementó el peso seco de hojas, tallos y raíces de bambú (*Phyllostachys edulis*) de acuerdo con

Zou *et al.*, (2020). Por el contrario, Lobit *et al.*, (2007) en aguacate, indican que el aumento de la proporción de NH_4^+ en solución disminuye el crecimiento vegetativo y produce un menor contenido de materia seca en hojas, el mayor valor lo obtuvieron con la combinación de las dos fuentes de N (25/75).

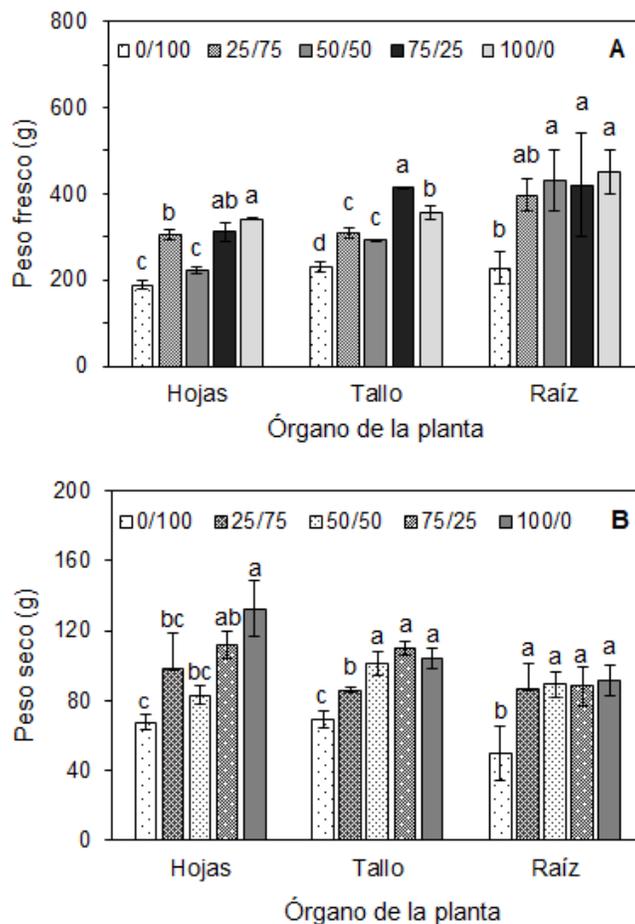


Figura 1.3. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el peso fresco (A) y seco (B) de hojas, tallo y raíz de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura.

Por último, los resultados de esta investigación mostraron un crecimiento superior de las plantas de aguacate con NH_4^+ , mientras que el NO_3^- como única fuente de N inhibe el crecimiento. Esto puede reflejar los mayores costos de energía metabólica asociados

con la absorción y asimilación de NO_3^- en comparación con NH_4^+ (Poonnachit y Darnell, 2004; Li *et al.*, 2013).

1.5.6 Peso fresco y seco de brotes

La relación 75/25 ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) mostró un efecto positivo tanto en el peso fresco (PF) como en el peso seco (PS) de los brotes primarios (3 veces mayor) en comparación con el tratamiento sin la adición de NH_4^+ (00/100), que mostró los valores más bajos (Figura 1.4 A y B).

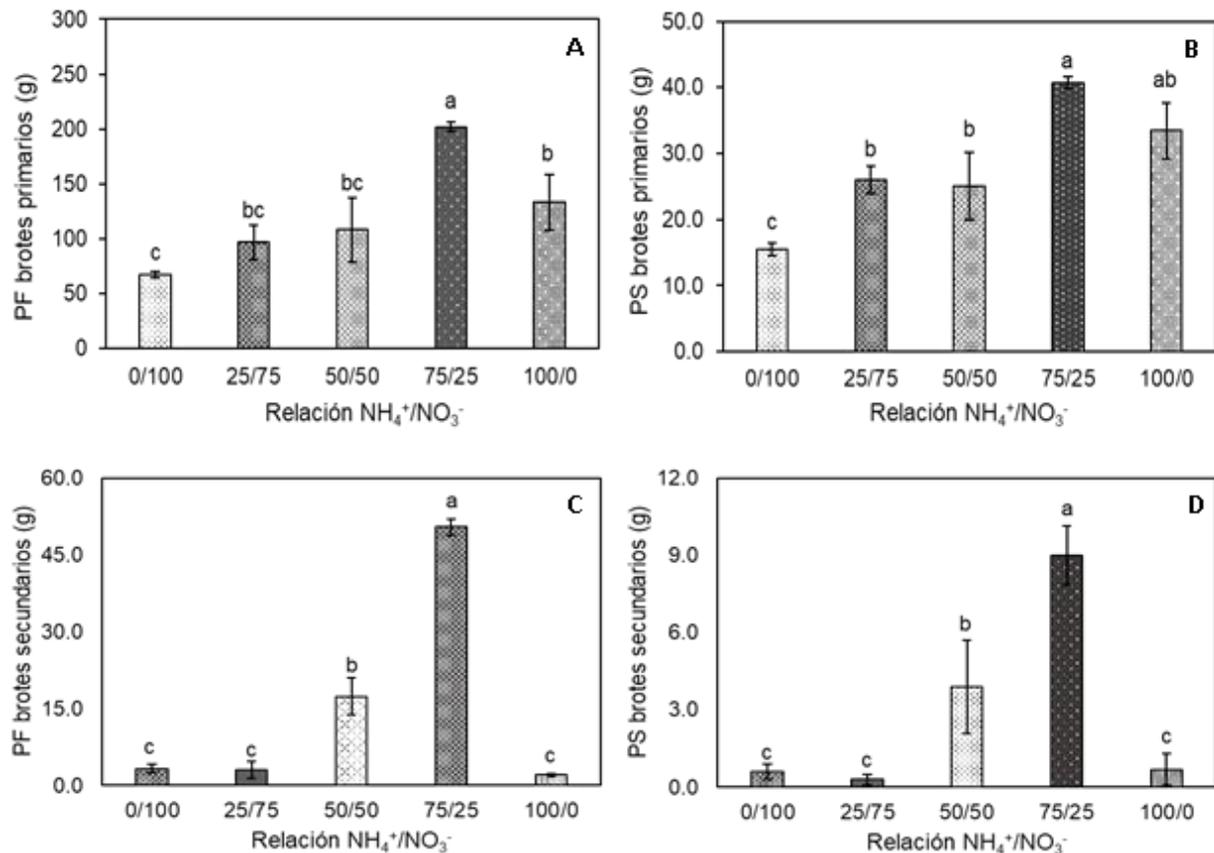


Figura 1.4. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el peso fresco (PF) y seco (PS) de brotes primarios (A y B) y secundarios (C y D) de plantas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura.

El peso fresco y seco de los brotes secundarios aumentó significativamente (17 y 20 veces respectivamente) en las plantas con el tratamiento 75/25 ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) en

comparación con las relaciones las 0/100, 25/75, 100/0 que condujeron a la reducción de estas variables (Figura 1.4 C y D).

El aumento de la concentración de NO_3^- redujo significativamente el crecimiento de los brotes de las plantas de aguacate, por lo que estos resultados sugieren la preferencia de estos órganos a la combinación de las dos fuentes de N con la relación 75/25 ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$). La combinación adecuada de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ tiene un efecto estimulante en las plantas porque reduce el gasto de energía en el proceso de absorción de N, realizado por las células de la raíz, y en la asimilación a aminoácidos (Taiz *et al.*, 2015).

1.6 CONCLUSIONES

Los resultados respaldan la hipótesis de que el aguacate se desarrolla mejor cuando existe NH_4^+ en el medio, además de que las plantas no mostraron síntomas visibles de sensibilidad al suministro de NH_4^+ al 100%.

Las plantas de aguacate respondieron de manera diferente a las distintas relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$. La aplicación de NO_3^- al 100% disminuyó el peso fresco y seco de raíz, así como el peso seco de tallo. La combinación de las dos formas de N en la relación 25/75 incrementó el área foliar. El tratamiento 75/25 aumentó significativamente el peso fresco total y de tallos, así como el peso fresco y seco de brotes primarios y secundarios. La adición del 100% de NH_4^+ a la solución nutritiva benefició la longitud de brotes primarios, el peso fresco y seco de hojas. La altura de la planta y el peso seco total incrementó gradualmente conforme se adicionó NH_4^+ a la solución nutritiva (hasta 18 y 78% respectivamente).

En general, la adición de NH_4^+ a la solución nutritiva en las relaciones 25/75, 75/25 y 100/0, favoreció el desarrollo vegetativo del aguacate "Hass" en hidroponía bajo invernadero.

CAPÍTULO 2. EFECTO DE LA RELACIÓN AMONIO/NITRATO EN LA CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL, AZÚCARES Y SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES DEL AGUACATE “HASS” EN HIDROPONÍA

2.1 RESUMEN

Las plantas pueden absorber el N principalmente como NH_4^+ y NO_3^- , y la preferencia varía de acuerdo con la especie. En plantas de aguacate el efecto de estas formas de N ha sido poco estudiado, por lo tanto, la presente investigación tuvo como objetivo determinar la respuesta de cinco relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0) en la concentración nutrimental, azúcares y sólidos solubles totales del aguacate “Hass” en hidroponía. Para ello, plantas de aguacate fueron cultivadas en macetas de 28 L de capacidad, con tezontle, en un diseño completamente al azar, con tres repeticiones. A los 120 días después de trasplante, se colectaron hojas recientemente maduras y raíces jóvenes, para determinar la concentración nutrimental (hojas); así como la concentración de azúcares solubles (sacarosa) y sólidos solubles totales en hoja y raíz. La relación 0/100 incrementó 88% la concentración de sólidos solubles totales (raíz), pero redujo la concentración de Mn (82%) y Zn (27%) comparado con los demás tratamientos, así como la concentración de K^+ en el extracto celular de peciolo (ECP). La combinación NH_4^+ y NO_3^- (50/50) aumentó cuatro veces la concentración de Ca^{2+} en el ECP. La aplicación de la relación 75/25 incrementó la concentración de S (33%), B (59%) y NO_3^- (54%), este último en el ECP. El exceso de NH_4^+ (100%) en el medio redujo la concentración de los cationes Ca (25%) y Mg (50%). El incremento de NH_4^+ en la solución nutritiva elevó la concentración de sacarosa en hojas hasta 45%.

Palabras clave: aguacate, amonio, nitrato, nutrientes, sacarosa, sólidos solubles totales.

CHAPTER 2. EFFECT OF AMMONIUM/NITRATE RATIO ON NUTRIENT CONCENTRATION, SUGARS, AND TOTAL SOLUBLE SOLIDS OF HASS AVOCADO IN HYDROPONICS

2.2 ABSTRACT

Plants can absorb N mainly as NH_4^+ and NO_3^- , and the preference varies according to the species. In avocado plants, the effect of these forms of N has been little studied, therefore, the present research aimed to determine the response of five $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios (0/100, 25/75, 50/50, 75/25 and 100/0) on nutrient concentration, soluble sugars, and total soluble solids of 'Hass' avocado in hydroponics. For this purpose, avocado plants were grown in 28 L pots, with tezontle, in a completely randomized design, with three replications. At 120 days after transplanting, recently mature leaves and young roots were collected to determine the nutrient concentration (leaves), as well as the concentration of soluble sugars (sucrose) and total soluble solids in leaves and roots. The 0/100 ratio increased 88% the concentration of total soluble solids (root) but reduced the concentration of Mn (82%) and Zn (27%) compared to the other treatments, as well as the concentration of K^+ in the petiole cell extract (ECP). The combination of NH_4^+ and NO_3^- (50/50) increased the Ca^{2+} concentration in the ECP fourfold. Application of the 75/25 ratio increased the concentration of S (33%), B (59%) and NO_3^- (54%), the latter in the ECP. Excess NH_4^+ (100%) in the medium reduced the concentration of Ca (25%) and Mg (50%) cations. The increase of NH_4^+ in the nutrient solution increased sucrose concentration in leaves up to 45%.

Key words: *avocado, ammonium, nitrate, nutrients, sucrose, total soluble solids.*

2.3 INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es a menudo un factor importante para el crecimiento y la productividad de las plantas en los ecosistemas terrestres. En condiciones naturales, el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-) son las dos formas principales de N inorgánico disponibles para las plantas en el suelo (Xu *et al.*, 2012), dos iones que, cuando se adquieren, tienen consecuencias genéticas y metabólicas muy distintas en la planta (Britto y Kronzucker, 2013).

Se ha encontrado que las plantas suministradas con NH_4^+ acumulan más iones NH_4^+ , aniones inorgánicos (cloruro, sulfato y fosfato) y aminoácidos mientras reducen la concentración de los cationes esenciales (K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y ácidos orgánicos como el malato en comparación con plantas alimentadas con NO_3^- . El NO_3^- por el contrario, puede promover la absorción de cationes e inhibir la absorción de aniones (Britto y Kronzucker, 2002).

El suministro de N en diferentes formas no solo afecta la absorción y asimilación de otros nutrientes, sino que también la formación y acumulación de carbohidratos. Los carbohidratos, también llamados azúcares, son esenciales para los procesos fundamentales de crecimiento de las plantas (Ciereszko, 2018) y representan la reserva química de energía solar (Cowan, 2016), cumplen funciones estructurales, de señalización, transporte y almacenamiento (Bihmidine *et al.*, 2013). En la mayoría de las plantas, las hojas fotosintéticamente activas exportan una gran cantidad de asimilados de C, principalmente en forma de sacarosa, a través del floema para apoyar el desarrollo de órganos de demanda (Ruan, 2012). En hojas maduras de aguacate se han identificado como productos de la fotosíntesis activa, en mayor medida sacarosa, manoheptulosa, sedoheptulosa, volemitol, y en menor medida, perseitol. El origen de manoheptulosa, es confuso, sin embargo, se propone que tiene como precursor a la sacarasa (Cawan, 2016).

El metabolismo de la sacarosa y el N están significativamente correlacionados cuando las plantas están expuestas a fuentes mixtas de N (Yin *et al.*, 2020), por su parte, Li *et*

al., (2013) informan que la nutrición con NO_3^- beneficia la acumulación de sacarosa mientras que el NH_4^+ propicia la acumulación de almidón.

La sensibilidad de las plantas a estas formas N varía debido a diferencias en especies, genotipos y variables ambientales (Guo *et al.*, 2019; Chalk y Smith, 2021). Investigaciones señalan que la concentración de macro y micronutrientes, así como de carbohidratos, disminuye cuando cultivos como la fresa, cítricos, caña de azúcar y uva, son expuestos a altas concentraciones de NH_4^+ (Boschiero *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020; Jesús *et al.*, 2021; Yin *et al.*, 2020). Por otra parte, plantas como el té (*Camellia sinensis*) y bambú (*Phyllostachys edulis*) muestran mayor tolerancia al NH_4^+ (Wang *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2020). En plantas de aguacate, Lobit *et al.*, (2007), encontraron que al suministrar NH_4^+ y NO_3^- en solución en diferentes proporciones, no hubo diferencias significativas sobre el contenido de N de las hojas.

El aguacate se cultiva en México principalmente en suelos con pH ácido de 3.5 a 5.5 (Schaffer *et al.*, 2013) donde la forma de N predominante es el NH_4^+ . Lo anterior implica que estas plantas pueden tener alta adaptabilidad y tolerancia a este ion. Por ello, se planteó la hipótesis de que la exposición de las plantas de aguacate a las diferentes concentraciones de NH_4^+ en el medio, estimula la absorción de nutrientes, así como la concentración de otros compuestos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la concentración de N-reducido, N- NO_3^- , macro y micronutrientes, azúcares solubles, y sólidos solubles totales en plantas de aguacate empleando diferentes soluciones nutritivas de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0) en hidroponía bajo invernadero.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de tipo “dos aguas”, con ventilación cenital y cubierta de polietileno, del Área de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados. Localizado en el km 36.5 de la Carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México; en las coordenadas 19 ° 29' latitud norte y 98 ° 54' longitud oeste, a 2250 m. de altitud. La temperatura mínima promedio fue de 8.6° C y la máxima de 32.5 °C, mientras que la humedad relativa promedio de 72%.

2.4.2. Material vegetal

Se utilizaron plantas de aguacate (*Persea americana Mill.*) c.v. “Hass” de seis meses de edad, injertadas sobre patrón criollo (raza mexicana). Las raíces de las plantas se lavaron para retirar el sustrato proveniente del vivero, se plantaron en macetas “Air Grower” de 28 L con tezontle de una granulometría no mayor a 12 mm. Se establecieron a 50 cm entre maceta y maceta. Una vez plantadas se realizó la aplicación de fungicida (clorotalonil + metalaxil) al “drench” para evitar infecciones en la raíz.

2.4.3. Solución nutritiva

La solución nutritiva base para generar los tratamientos fue la solución universal de Steiner (1984) al 50% de la concentración original, variando únicamente los porcentajes de las fuentes de N. El pH se ajustó a 5.8 ± 2 , con un potenciómetro marca Conductronic.

2.4.4. Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con cinco tratamientos y ocho repeticiones, con un total de 40 unidades experimentales. La concentración de la solución nutritiva fue la siguiente en meq/ L⁻¹: N: 6, Ca²⁺:4.5, K⁺: 3.5, Mg²⁺: 2, SO₄²⁻: 3.5 y H₂PO₄⁻: 0.5. Los tratamientos consistieron en cinco soluciones con diferente relación NH₄⁺/NO₃⁻ (%): 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0 para cubrir los requerimientos de N. La aleatorización se realizó mediante el programa estadístico R versión R-UCA 4.1.1.

2.4.5. Aplicación de tratamientos

Las plantas se regaron con agua corriente durante una semana, posteriormente se aplicó solución nutritiva Steiner (1984) al 25% de la concentración original, durante el mismo periodo. Los tratamientos se aplicaron después de esta fase de adaptación y hasta los 120 días después del trasplante (ddt).

Con riego por goteo (8 L/h) se aplicaron 2.5 L día⁻¹ de solución nutritiva planta⁻¹, distribuidos en 6 eventos, en los primeros 75 ddt, posteriormente se aplicaron 3 L distribuidos en 8 riegos.

2.4.6. Variables evaluadas

Las muestras foliares se tomaron a los 120 ddt, consistieron en ocho hojas (lámina foliar y pecíolo) de cada repetición, maduras y sanas, se mezclaron para obtener tres muestras por cada tratamiento. Las hojas se tomaron de las ramas del último flujo de crecimiento, orientadas en los cuatro puntos cardinales, de acuerdo con Maldonado (2002). Se lavaron con agua destilada y fueron sometidas a la estufa de aire forzado (HCF-125D Riossa®) por 72 horas. Finalmente, las muestras se molieron para el análisis de nitratos, nitrógeno reducido, macro y micronutrientes.

2.4.6.1. Nitratos (Método de Cataldo)

La determinación de nitratos se llevó a cabo con el método de Cataldo (Alcántar y Sandoval, 1999). Se pesó 0.1 g de tejido seco por muestra, se adicionaron 10 mL de agua desionizada y se agitaron brevemente, para después incubarlas en baño maría a 40° C durante 1 h. Luego se homogeneizaron y se centrifugaron a 5000 rpm por 15 minutos. De cada muestra se tomaron 0.2 mL de extracto y se adicionaron 0.8 mL de ácido salicílico-ácido sulfúrico. Al paso de 20 minutos a temperatura ambiente se les adicionó 19 mL de NaOH y se leyeron en un espectrofotómetro (SPECTRONIC® 20) a 410 nm, haciendo uso de la curva de calibración. Para dicha curva se realizó una solución patrón con KNO₃, también se realizaron dos blancos con 0.2 mL de agua destilada y reactivos de acuerdo con Alcántar y Sandoval (1999).

2.4.6.2. Nitrógeno reducido (método de Nessler)

Se pesaron 0.1 g de tejido vegetal seco y molido por muestra, se adicionaron 10 mL de buffer fosfato (fosfato de potasio monobásico y dibásico pH 7.4), y se agitaron durante 1 hora por intervalos de 15 min. Luego se filtró y se tomó una alícuota de 0.2 mL y se aforó a 9 mL con agua destilada, se añadieron 2 mL de reactivo de Nessler (NaOH y yoduro de potasio y mercurio). Las muestras se leyeron en un espectrofotómetro (SPECTRONIC®, modelo 20) a 420 nm. La curva de calibración se realizó preparando una solución estándar de NH_4SO_4 a 10 mg N mL^{-1} (Alcántar y Sandoval, 1999).

2.4.6.3. Determinación nutrimental

Nitrógeno Total (método microkjeldahl)

El N total se determinó por el método microkjeldahl (Alcántar y Sandoval, 1999), se pesó 0.1 g de material vegetal seco. Se agregaron 1.5 mL de la mezcla de ácidos sulfúrico-salicílico. Posteriormente las muestras se llevaron a una temperatura de 360°C en una parrilla de calentamiento con arena para su digestión. Una vez las muestras tomaron una coloración verde agua y el volumen inicial de ácido disminuyó, se dejaron enfriar. Se adicionó 10 mL de agua desionizada y se filtró. Enseguida se destilaron utilizando NaOH al 50%, H_3BO_3 al 4% e indicador verde de bromocresol-rojo de metilo (0.2 mL) hasta llegar a 50 mL. Para concluir, se realizó la titulación con H_2SO_4 0.05 N. hasta que el extracto se tornó ligeramente rosado.

Macro y micronutrientes

Los macronutrientes (P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn y Zn) se determinaron por digestión húmeda. Se pesaron 0.5 g de cada muestra vegetal, posteriormente se adicionaron 5 mL de ácido nítrico-perclórico y se sometieron a una temperatura de 190°C en una plancha de arena con campana extractora, hasta que el volumen disminuyó y se observó una coloración clara. Cuando las muestras se terminaron de digerir se añadieron 25 mL de agua desionizada, se filtraron (papel Whatman No. 40) y se aforó a 25 mL con agua desionizada. Para concluir, el análisis de

los elementos antes mencionados se realizó en un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (VARIAN® ICP-OES 725-ES).

Extracto celular de peciolo

La determinación de iones: NO_3^- , Ca^{2+} y K^+ de peciolo de hojas (recientemente maduras) de aguacate, se realizó mediante medidores Laquatwin ionómetros de nitrato, calcio y potasio de la marca Horiba®. Los valores obtenidos se reportaron en mg L^{-1} .

2.4.6.4. Determinación de azúcares solubles y sólidos solubles totales

Las muestras de hojas (lámina foliar y peciolo) y raíces se tomaron a los 120 ddt, correspondiente a la etapa vegetativa, en los cuatro puntos cardinales, enjuagadas y sometidas a refrigeración a $-80\text{ }^\circ\text{C}$ para su conservación hasta su análisis. Las muestras foliares consistieron en ocho hojas por repetición, las cuales se mezclaron y se obtuvieron tres réplicas por tratamiento. Para las muestras de raíces se extrajeron 5 g de raíces activas (blancas) por repetición, y se mezclaron para finalmente sacar tres repeticiones por tratamiento. Las muestras frescas se emplearon para la determinación de azúcares y sólidos solubles totales ($^\circ\text{Brix}$).

Azúcares solubles (método de antrona)

Los azúcares solubles se cuantificaron en hojas y raíces frescas por el método de antrona descrito por Southgate (1976) y mediante el uso de estándares de referencia a partir de concentraciones conocidas de sacarosa en la curva de calibración. Se pesó 1 g de material vegetal, se trituró, se agregaron 50 mL de etanol al 80% y se calentó por 20 min. De la solución resultante se tomó 1 mL y se sometió a baño maría para evaporar el diluyente. Posterior a esto, se adicionaron 2 mL de agua destilada y 6 mL de antrona. Enseguida las muestras se colocaron en baño maría por 3 min, por último, se leyeron a 600 nm en espectrofotómetro (Spectronic 20, Baush and Lomb) para la determinación de sacarosa.

Sólidos solubles totales

El análisis del porcentaje de sólidos solubles totales se realizó empleando un refractómetro digital (ATAGO PR-100) con escala de 0-32%. Para ello, el material vegetal fresco (hojas y raíces) se molieron finamente para obtener tres gotas de savia que se colocaron en la celda de medición.

2.4.7. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el programa estadístico R-UCA-4.1.1 de R para Windows.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Determinación nutrimental

2.5.1.1. Nitrógeno nítrico

La combinación de NH_4^+ y NO_3^- en la relación 25/75 en la solución nutritiva se expresó en una disminución de la concentración de nitrógeno nítrico (N-NO_3^-) en las hojas de aguacate (33%), seguido del tratamiento 75/25, en comparación con las relaciones 0/100, 50/50 y 100/0 que mostraron las concentraciones más altas (Figura 2.1). Contrario a lo aquí reportado, Yin *et al.*, 2020 en uva (*Vitis vinifera*) señalan que la concentración de NO_3^- en las hojas disminuyó conforme se adicionó NH_4^+ en la solución nutritiva. Tabatabaei *et al.*, (2008) por su parte, indican que tanto la alta concentración de NO_3^- como la de NH_4^+ redujeron la concentración de NO_3^- en hojas de fresa en tanto que la combinación de las dos formas de N ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) en partes iguales, conducen a una mayor acumulación de NO_3^- . Se sabe que el aumento de NO_3^- en el medio comúnmente provoca la acumulación de NO_3^- en los órganos vegetativos de las plantas, y el aumento de la concentración de oxígeno alrededor de las raíces aumenta correspondientemente las bacterias oxidantes de NH_4^+ , en consecuencia, las raíces absorberán NO_3^- (Li *et al.*, 2013), lo que coincide con la acumulación de NO_3^- con las relaciones 0/100 y 100/0 en este experimento; no obstante, se necesitan estudios para comprender la tendencia de la acumulación de NO_3^- en este experimento.

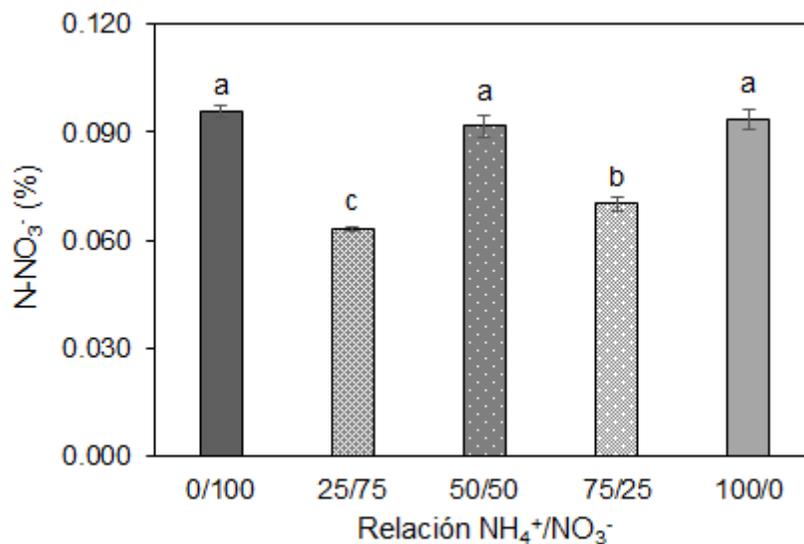


Figura 2.1. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ sobre la concentración de N-NO_3^- en hojas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

2.5.1.2. Nitrógeno reducido

La mayor acumulación de nitrógeno reducido en forma de NH_4^+ (N-NH_4^+), en las hojas de aguacate se tuvo con las relaciones 0/100 y 100/0 (29% de incremento), seguido de la relación 25/75 ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$). Los tratamientos 25/75 y 50/50 exhibieron las concentraciones más bajas (Figura 2.2). Cabe mencionar que a partir del tratamiento 25/100, la concentración de NH_4^+ tuvo una relación positiva conforme se adicionó esta forma de N a la solución nutritiva. En hojas de uva (*Vitis vinifera*) la concentración de N-NH_4^+ fue proporcional a la adición de NH_4^+ en la solución nutritiva (Yin *et al.*, 2020), tendencia similar a lo aquí reportado. El aumento de la concentración de NH_4^+ podría estar relacionado con la disminución de la velocidad de asimilación de NH_4^+ en el órgano en cuestión (Tabatabaei *et al.*, 2008).

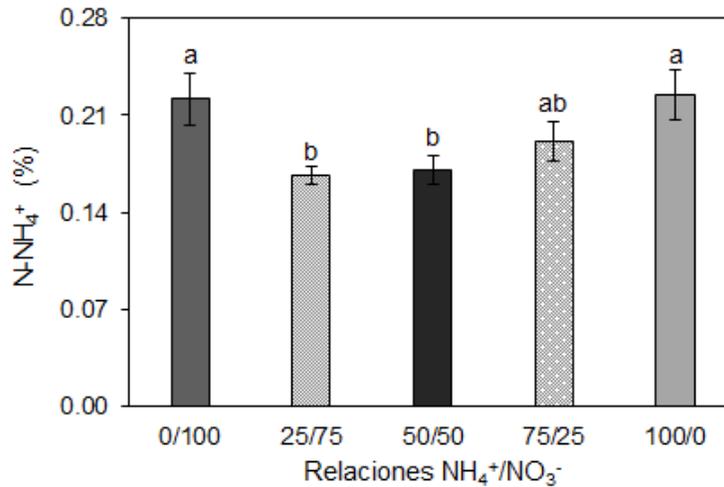


Figura 2.2. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ sobre la concentración de N-NH_4^+ en hojas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

2.5.1.3. Concentración nutrimental

Nitrógeno total

La concentración de N total en las hojas de aguacate disminuyó (35%) con el suministro de únicamente NO_3^- a la solución nutritiva en comparación con los tratamientos con las dos fuentes de N (25, 50 y 75% de NH_4^+) (Figura 2.3). Lobitt *et al.*, (2007) señalan que no se observaron diferencias significativas en el contenido de N en hojas de aguacate en respuesta a la proporción de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$. Choi *et al.*, (2011) y Jesús *et al.*, (2021) en fresa, así como Ruan *et al.*, (2007) en té (*Camellia sinensis*), reportaron una tendencia similar al suministrar NO_3^- al 100%, sin embargo, estos investigadores sostienen que la mayor concentración la obtuvieron con la solución del 100% de NH_4^+ , mientras que las plantas a las que se les suministró las dos formas de N, exhibieron niveles intermedios. La baja concentración de N total de las plantas de aguacate tratadas sólo con NO_3^- , indica que se encuentra $4.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ por debajo del nivel de suficiencia foliar de acuerdo con Maldonado *et al.*, (2007), por lo que estas plantas pudieron haber sufrido de deficiencia de N, durante su desarrollo. La concentración reducida de N total de las plantas a las

que sólo se les suministra NO_3^- podría estar relacionada con la baja tasa de absorción de NO_3^- , y no con la reducción (Ruan *et al.*, (2007).

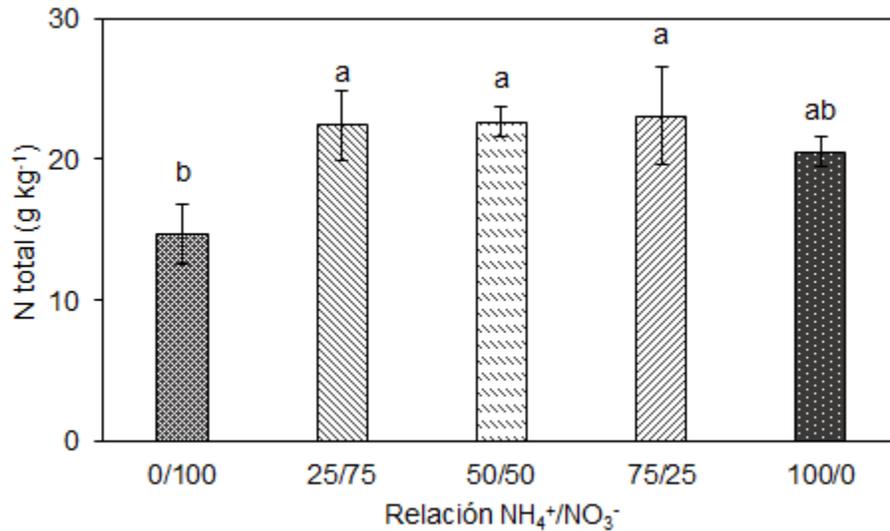


Figura 2.3. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en el N-total de hojas de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Macro y micronutrientes

Los datos de las concentraciones de los macronutrientes en hojas de aguacate se muestran en el Cuadro 2.1. Las relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva tuvieron efecto sobre la concentración de S, Mg y Ca. La combinación de las dos fuentes de N en la relación 75/25 ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) aumenta 33% la concentración de S, en comparación con el tratamiento de sólo NO_3^- . Li *et al.*, (2013) afirman que la absorción de NO_3^- inhibe la absorción de aniones.

Cuadro 2.1. Efecto de la relación NH₄⁺/NO₃⁻ en la concentración de macroelementos de hojas de aguacate “Hass” en hidroponía.

Relación NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻	N	P	K	S	Mg	Ca
	g kg ⁻¹					
0/100	14.7 b	1.16 a	6.22 a	2.33 b	4.2 a	6.67 a
25/75	22.4 a	1.29 a	5.63 a	2.62 ab	3.96 a	7.01 a
50/50	22.63 a	1.21 a	5.83 a	2.77 ab	4.11 a	7.04 a
75/25	23.1 a	1.28 a	6.26 a	3.1 a	4.81 a	7.25 a
100/0	20.53 ab	1.0 a	6.24 a	2.45 ab	3.01 b	3.82 b
DHS	2.42	0.32	4.32	0.66	0.93	1.67
CV (%)	10.88	10.1	26.64	9.26	8.59	9.75

Medias con la misma letra por columna no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$). DHS (Diferencia honestamente significativa), CV (coeficiente de variación).

Las concentraciones de Mg²⁺ y Ca²⁺ se vieron afectadas negativamente por el aumento del suministro de NH₄⁺ al 100 %, la reducción fue de 25 y 45 % respectivamente, tal como lo señala Boschiero *et al.*, (2019) en caña de azúcar, donde la reducción de estos cationes fue del 20 y 30% respectivamente. De igual manera, Carr *et al.*, (2020) revelaron que la concentración de Ca²⁺ disminuyó en las hojas de plantas de café cultivadas sólo con NH₄⁺; hallazgos consistentes con la presente investigación. El efecto integrado del exceso de NH₄⁺ provoca la inhibición de la absorción de los cationes (K⁺, Mg²⁺ o Ca²⁺), y su posterior agotamiento en la planta, asimismo, ocurren cambios en el equilibrio iónico (Esteban *et al.*, 2016), no obstante, los cationes inorgánicos afectados varían según las condiciones de crecimiento y las especies de plantas. Es preciso señalar que el agotamiento de Ca²⁺ y Mg²⁺ puede causar deficiencias en la transducción de señales o disminuir las actividades enzimáticas, lo que conduce a la toxicidad por amonio (Hachiya *et al.*, 2012).

Las concentraciones foliares de macroelementos obtenidas en esta investigación se encuentran por debajo del rango de suficiencia señalado por varios autores (Salazar-García (2002); Maldonado *et al.*, (2007); Ruiz y Ferreyra (2011)), intervalos que son

señalados para condiciones convencionales del cultivo del aguacate, por lo que se deben investigar rangos de suficiencia para el cultivo en hidroponía.

Las concentraciones de micronutrientes se encuentran en el Cuadro 2.2. Las relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva tuvieron efecto significativo en las concentraciones de Mn, Zn y B en las hojas de aguacate. La adición de sólo NO_3^- disminuyó cinco veces la concentración de Mn en comparación con los demás tratamientos; asimismo la concentración de Zn (27%) al suministrar esta relación, mientras que la combinación de NH_4^+ y NO_3^- con la relación 50/50 y 75/25 condujeron a una mayor absorción. La relación con el 75% de NH_4^+ incrementó 59% la concentración de B en las hojas en comparación con la relación 100/0 cuya concentración fue la más baja. Esto es contrastante con los hallazgos de Carr *et al.*, (2020) en hojas de café, quienes mencionan que el Mn y el B no muestran efecto de los tratamientos, por otra parte, la menor concentración de Fe, Zn y Cu la obtuvieron con la relación 100/0, mientras que la mayor de Cu con la relación 0/100 y 50/50 0/100 en la de Zn.

Cuadro 2.2. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la concentración de microelementos de hojas de aguacate “Hass” en hidroponía.

Relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	Fe	Mn	Zn	B	Cu
	mg kg ⁻¹				
0/100	71.29 a	137.92 b	12.75 b	25.54 ab	9.16 a
25/75	62.28 a	614.00 a	14.85 ab	26.44 ab	9.02 a
50/50	78.91 a	902.15 a	17.64 a	26.05 ab	8.77 a
75/25	84.15 a	928.09 a	17.48 a	35.66 a	9.63 a
100/0	92.16 a	701.09 a	14.86 ab	22.4 b	7.84 a
DHS	42.65	342.19	4.56	10.36	3.06
CV (%)	20.41	19.39	10.94	14.17	12.84

Medias con la misma letra por columna no presentan diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$). DHS (Diferencia honestamente significativa), CV (coeficiente de variación).

De acuerdo con los rangos de suficiencia determinado por diversos autores (Salazar-García (2002); Maldonado et al., (2007); Ruiz y Ferreyra (2011)), las concentraciones de

Zn y B en las hojas de aguacate se encuentran por debajo del rango óptimo de suficiencia, por tanto, las plantas tratadas con las diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ mostraron deficiencia de estos nutrimentos. La deficiencia de estos elementos es común, y ha sido reportada en huertos donde se cultiva de manera comercial (Salazar-García, 2014).

La reducción de la concentración de Zn con el tratamiento de 100% NO_3^- , se debe a la alta presencia de este ion promueve su solubilidad y por consecuencia su lixiviación (Alcántar *et al.*, (2016). Aunado a esto la presencia de Fe favorece la baja absorción de Zn, debido a que presentan una relación antagónica (Sequi, 2004).

Minchin *et al.*, (2012) demostraron que la deficiencia de B en aguacate ocurre mayormente en hojas maduras debido a la movilidad de este elemento a las jóvenes por medio del complejo formado con perseitol, lo que podría explicar la baja concentración en las plantas tratadas con las diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en esta investigación.

2.5.1.4. Extracto celular de pecíolo

Se produjo un aumento (57 %) de la concentración de NO_3^- en el extracto celular de pecíolo (ECP) de las plantas tratadas con la solución 75/25 seguido de las soluciones 25/75, 100/0 y 0/100 en orden de importancia ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$), en comparación con la relación 50/50 con la menor concentración (Figura 2.4). En cambio, Choi *et al.*, (2011) en fresa, señalan que la concentración de NO_3^- es mayor en los tratamientos 0/100, con tendencia decreciente a medida que se elevan las relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$.

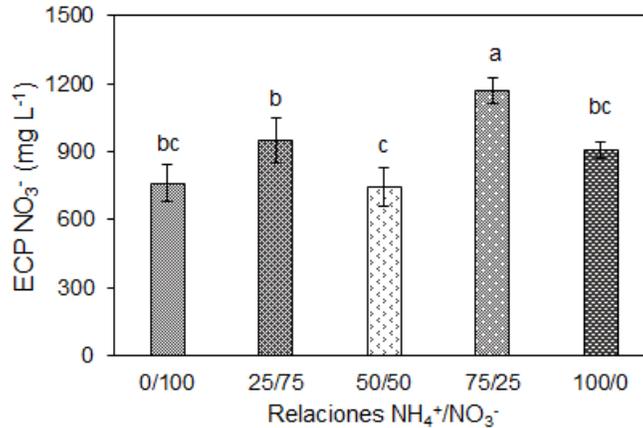


Figura 2.4. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la concentración de NO_3^- en el extracto celular de pecíolo (ECP) de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Las concentraciones de Ca^{2+} y K^+ en el ECP se vieron afectadas por la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva. La combinación de las dos fuentes de N con la relación 50/50, aumentó cuatro veces la concentración de Ca^{2+} con respecto a la relación 75/25 (Figura 2.5 A). El ion K^+ se redujo (32%) en el ECP del tratamiento 75/25, con respecto a los demás tratamientos (Figura 2.5 B). Sánchez (2022), señala que la concentración mínima de Ca^{2+} en ECP de plantas de aguacate en etapa vegetativa es de 600 mg L^{-1} , por lo que los valores presentados en esta investigación sugieren una deficiencia de este elemento, contrario a lo que ocurrió con el K^+ , cuyos valores se encuentran dentro del rango óptimo ($3000\text{-}3500 \text{ mg L}^{-1}$). La concentración de Ca está positivamente relacionada con las tasas de transpiración de los órganos de las plantas, cuando existe una baja tasa transpiración la concentración de Ca^{2+} disminuye (Marschner's, 2012) por ello, la baja concentración de Ca^{2+} en peciolo y hojas de aguacate en este experimento.

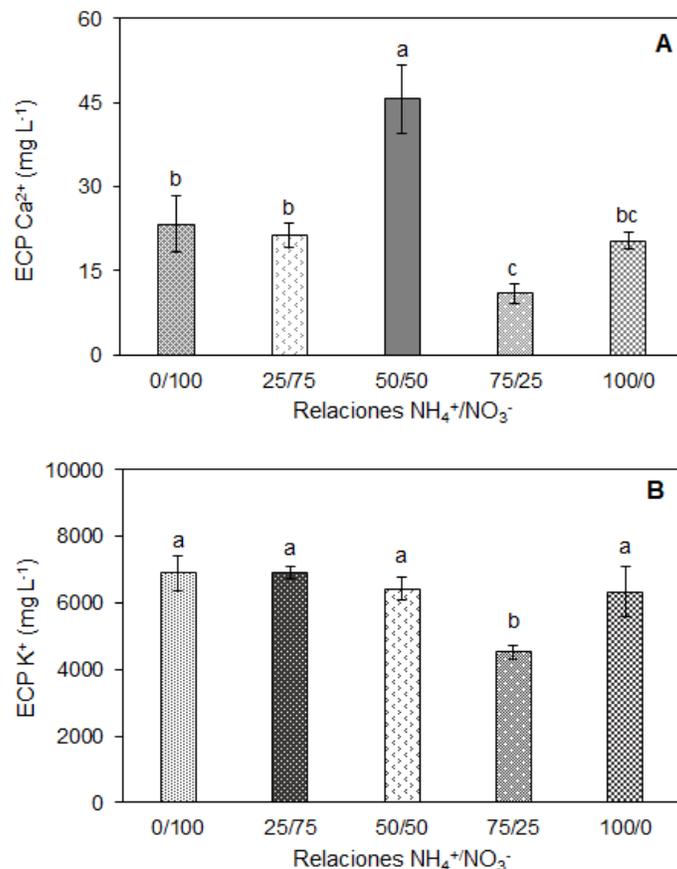


Figura 2.5. Efecto de la relación NH₄⁺/NO₃⁻ en la concentración de Ca²⁺ (A) y K⁺ (B) en el extracto celular de peciolo (ECP) de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, p ≤ 0.05) en cada subfigura.

2.5.2. Azúcares y sólidos solubles totales

2.5.2.1. Concentración de azúcares solubles

La investigación reveló que la concentración de azúcares solubles (sacarosa) en las hojas se elevó hasta 31 % conforme se adicionó NH₄⁺ a la solución nutritiva en el tratamiento 100/0 (NH₄⁺/NO₃⁻). Los tratamientos con el 25, 50 y 75% de NH₄⁺ no mostraron diferencias significativas (Figura 2.6 A). Estos resultados difieren de lo señalado por Yin *et al.*, 2020 en hojas de vid, quienes indican que los niveles de sacarosa fueron más altos en plantas tratadas con el 25% de NH₄⁺, sin embargo, coincidentemente la relación con el 100% de NO₃⁻ codujo a la concentración más baja.

Por otra parte, la aplicación de las soluciones nutritivas de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, no tuvo efecto significativo (Figura 2.6 B) en la concentración de sacarosa en raíz. Li *et al.*, (2013) concluyen que las diferentes formas de N y sus combinaciones, afectan el metabolismo del carbono y, por tanto, los tipos de carbohidratos y su distribución en diferentes órganos de las plantas, por lo que se sugiere en investigaciones futuras determinar la concentración de glucosa, fructosa, manoseptulosa y perseitol, éstos últimos, de mayor importancia para el metabolismo del aguacate.

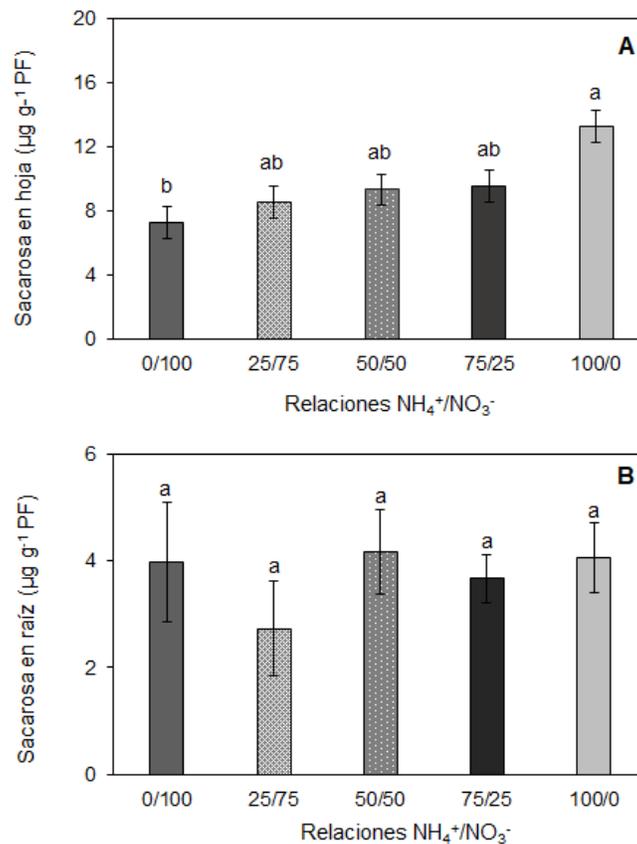


Figura 2.6. Efecto de la relación en la concentración de sacarosa en hojas (A) y raíz (B) de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura.

2.5.2.2. Sólidos solubles totales

Las relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ no tuvieron efecto sobre la concentración de sólidos solubles totales (SST) en hojas (Figura 2.7 A), mientras que, la concentración en raíz de las

plantas de aguacate incrementó (88%) con el suministro de NO_3^- como única fuente de N (Figura 2.7 B), en comparación con los tratamientos donde se combinaron las dos fuentes, por tanto, la adición de NH_4^+ resultó en la disminución de la concentración de SST.

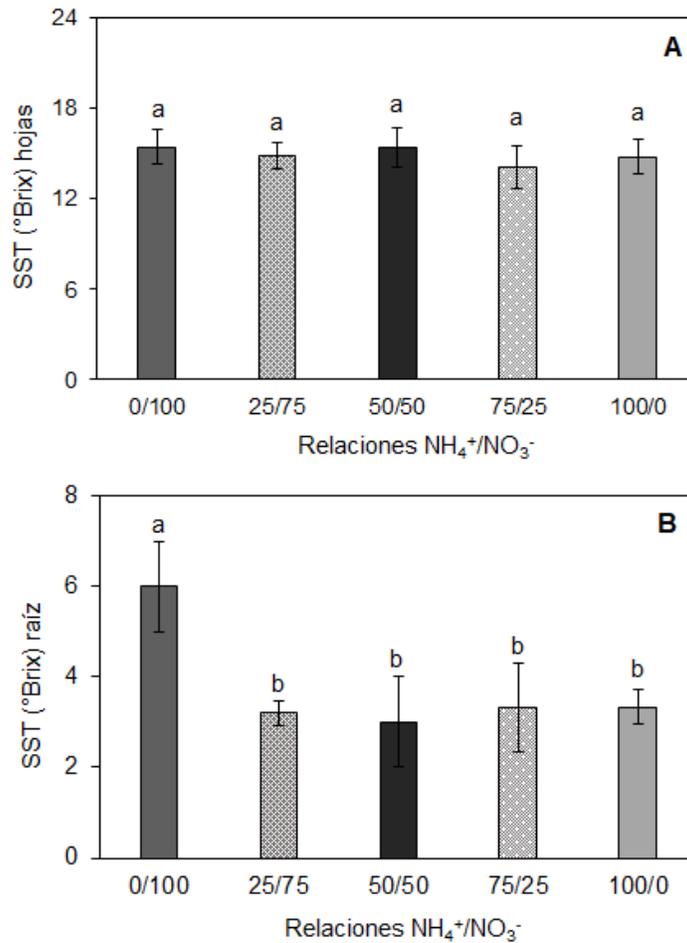


Figura 2.7. Efecto de la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la concentración de sólidos solubles totales (SST o $^{\circ}\text{Brix}$) en hojas (A) y raíz (B) de aguacate “Hass” en hidroponía. Promedios en barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada subfigura.

2.6. CONCLUSIONES

Los resultados apoyan la hipótesis de que el suministro de NH_4^+ a las plantas de aguacate en hidroponía, mejora la absorción de algunos nutrientes en hojas, así como la acumulación de sacarosa y sólidos solubles totales en hoja y raíz; sin embargo, la alta concentración (NH_4^+ al 100%) suprime la absorción de cationes.

El aporte a las plantas de aguacate de las relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ no mostró efectos significativos en la concentración de P, K, Fe y Cu.

La exposición de las plantas al NO_3^- como única fuente de N incrementa la concentración de SST en raíz, en tanto que reduce las concentraciones de N-total ocasionando deficiencia de este elemento, asimismo disminuye la concentración de Mn y Zn. La relación 25/75 disminuye la concentración de N- NO_3^- . La combinación de NH_4^+ y NO_3^- en un 50% incrementa la concentración de Ca^{2+} en el ECP. La aplicación de 75% de NH_4^+ en el medio favorece la absorción de S, B y NO_3^- en el ECP, sin embargo, disminuye la concentración de K^+ (ECP). El exceso de NH_4^+ (100%) en la solución nutritiva reduce la concentración de Mg y Ca. El suministro completo de NH_4^+ y de NO_3^- en la solución nutritiva incrementa la concentración de N- NH_4^+ . La adición gradual de NH_4^+ en la solución nutritiva, incrementa la concentración de sacarosa en hojas.

En general, el uso exclusivo de NH_4^+ o NO_3^- , afecta negativamente las concentraciones de nutrientes, azúcares y sólidos solubles totales en las plantas de aguacate "Hass" en hidroponía.

CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados aquí presentados sugieren que el suministro de una sola forma de N a las plantas de aguacate afecta negativamente la morfología y concentración nutrimental.

Las plantas tratadas únicamente con NO_3^- manifestaron aumento de la concentración de SST en raíz, y disminución del PF de raíz, PS total y PS de tallo, así como de la concentración de N-total, Mn y Zn. El aporte del 25% de NH_4^+ en la solución nutritiva incrementa el área foliar, mientras que la relación 50/50 la concentración de Ca^{2+} en el ECP. El suministro de la relación 75/25 favorece el PF de tallo y el PF y PS de brotes primarios y secundarios, también la concentración de S, B y NO_3^- (ECP), por otra parte, disminuye la concentración de K^+ en el ECP. Por otro lado, el efecto negativo del exceso de NH_4^+ en la solución nutritiva se mostró en la disminución de la concentración de Ca y Mg, lo que se traduce en respuestas tóxicas en el metabolismo de las plantas. La adición gradual de NH_4^+ al medio benefició la altura, PS total y la concentración de sacarosa en hojas.

Este estudio revela la preferencia de las plantas de aguacate cultivadas en hidroponía, a la combinación de las dos formas de N en las relaciones 25/75, 50/50, 75/25, durante el desarrollo vegetativo. Los resultados aquí presentados contribuirán al cultivo de este frutal en un sistema hidropónico en condiciones de invernadero.

LITERATURA CITADA

- Alcántar G., G. y Sandoval V. M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial 10. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*. Chapingo, estado de México, 156 p.
- Alcántar G., G., Trejo-Téllez, L. I. y Gómez-Merino F.C. (2016). *Nutrición de cultivos*. Segunda edición. Guadalajara, Jalisco, México. Colegio de Postgraduados. Biblioteca Básica de Agricultura.
- Bihmidine S., Hunter C.T., Johns C. E., Koch K. E., Braun D. M. (2013). Regulation of assimilate import into sink organs: update on molecular drivers of sink strength. *Frontiers Plant Science*, 4:177.
- Bittsánszky, A., Pilinszky, K., Gyulai, G. and Komives, T. (2014). Overcoming ammonium toxicity. *Plant science*, 231:184-190.
- Boschiero, B. N., Mariano, E., Azevedo, R. A., & Trivelin, P. C. O. (2019). Influence of nitrate-ammonium ratio on the growth, nutrition, and metabolism of sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 246-255.
- Boudsocq, S., Niboyet, A., Lata, J. C., Raynaud, X., Loeuille, N., Mathieu, J., Blouin M., Abbadie L. and Barot, S. (2012). Plant preference for ammonium versus nitrate: a neglected determinant of ecosystem functioning? *The American Naturalist*, 180(1): 60-69.
- Britto D. T. and Kronzucker H. J. (2002). NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology*. 159 (6): 567-584.
- Britto, D. T. and Kronzucker, H. J. (2006). Plant nitrogen transport and its regulation in changing soil environments. *Journal of Crop Improvement*, 15(2): 1-23.
- Britto, D. T. and Kronzucker, H. J. (2013). Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. *Annals of botany*, 112(6), 957-963.
- Carlisle, E., Myers, S., Raboy, V. and Bloom, A. (2012). The effects of inorganic nitrogen form and CO_2 concentration on wheat yield and nutrient accumulation and distribution. *Frontiers in Plant Science*, 195(3), 1-13.
- Carr, N. F., Boaretto, R. M., and Mattos Jr., D. (2020). Coffee seedlings growth under varied NO_3^- : NH_4^+ ratio: Consequences for nitrogen metabolism, amino acids profile, and regulation of plasma membrane H^+ -ATPase. *Plant physiology and biochemistry*, 154: 11-20.
- Chalk, P., & Smith, C. (2021). On inorganic N uptake by vascular plants: can ^{15}N tracer techniques resolve the NH_4^+ versus NO_3^- “preference” conundrum? *European Journal of Soil Science*, 72(4), 1762-1779.

- Chen, H., Jia, Y., Xu, H., Wang, Y., Zhou, Y., Huang, Z., Yang, L., Li, Y., Chen, L. & Guo, J. (2020). Ammonium nutrition inhibits plant growth and nitrogen uptake in citrus seedlings. *Scientia Horticulturae*, 272: 109526.
- Choi, J. M., Latigui, A. and Lee, C. W. (2011). Growth and nutrient uptake responses of 'Seolhyang' strawberry to various ratios of ammonium to nitrate nitrogen in nutrient solution culture using inert media. *African Journal of Biotechnology*, 10(59), 12567-12574.
- Ciereszko, I. (2018). Regulatory roles of sugars in plant growth and development. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 87(2).
- Cowan, A. K. (2017). Occurrence, metabolism, transport and function of seven-carbon sugars. *Phytochemistry Reviews*, 16(1), 137-157.
- Crisóstomo-Crisóstomo, M. N., Hernández-Rodríguez, O. A., López-Medina, J., Manjarrez-Domínguez, C. y Pinedo-Alvárez, A. (2014). Relaciones amonio/nitrato en soluciones nutritivas ácidas y alcalinas para arándanos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 525-532.
- Esteban, R., Ariz, I., Cruz, C. and Moran, J. F. 2016. Review: mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. *Plant science*, 2016(248), 92-101.
- FAO. 2020. The Food and Agriculture Organization. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Gashaw, L., and Mugwira, L. M. (1981). Ammonium-N and Nitrate-N effects on the growth and mineral compositions of triticale, wheat, and rye. *Agronomy journal*, 73(1), 47-51.
- Gerendás J., Zhu Z., Bendixen R., Ratcliffe R. G. and Sattelmacher B. (1997). Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 2(160), 239-251.
- González-García, J. L., Rodríguez-Mendoza, M. N., Sánchez-García, P., Osorio-Rosales, B., Trejo-Téllez, L. I., Alcántar-González, G. and Sandoval-Villa, M. (2009). Ammonium/nitrate ratios in hydroponic production of aromatic herbs. *Acta horticulturae*, 843:123-128.
- Guo, J., Jia, Y., Chen, H., Zhang, L., Yang, J., Zhang, J., Xu H., Ye X., Li Y. and Zhou, Y. (2019). Growth, photosynthesis, and nutrient uptake in wheat are affected by differences in nitrogen levels and forms and potassium supply. *Scientific reports*, 9(1), 1-12.
- Gurrola-Nieblas. E. J. (2020). Respuesta del arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) a la fertilización de amonio y nitrato en hidroponía con raíces separadas. *Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados*, 48 p.
- Hachiya, T., Watanabe, C. K., Fujimoto, M., Ishikawa, T., Takahara, K., Kawai-Yamada, M., Uchimiya H., Uesono Y., Terashima I. and Noguchi, K. (2012). Nitrate addition

- alleviates ammonium toxicity without lessening ammonium accumulation, organic acid depletion and inorganic cation depletion in *Arabidopsis thaliana* shoots. *Plant and Cell Physiology*, 53(3), 577-591.
- Jesús, G. L., Pauletti, V., Zawadneak, M. A. C. and Cuquel, F. L. (2021). Strawberry quality affected by the nitrate:ammonium ratio in the nutrient solution. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(12), 753-763.
- Kotsiras C., Olympios M., Drosopoulos J. and Passam H. C. (2002). Effect of nitrogen form and concentration on the distribution of ions within cucumber fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 3 (95), 175–183.
- Li, S. X., Wang, Z. H., and Stewart, B. A. (2013). Responses of crop plants to ammonium and nitrate N. *Advances in agronomy*, 118: 205-397.
- Lobit, P., López-Pérez, L., Cárdenas-Navarro R., Castellanos-Morales, V. C., and Ruiz-Corro, R. (2007). Effect of ammonium/nitrate ratio on growth and development of avocado plants under hydroponic conditions. *Canadian journal of plant science*, 87(1): 99-103.
- Maldonado, T. R. (2002). Diagnóstico nutrimental para la producción de Aguacate. Fundación Produce Michoacán, A. C. Morelia, Michoacán, México. 74 p.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. (1982). "Nitrogen" in Principles of plant nutrition. Ed. Mengel, K. and Kirkby, E. A. International Potash Institute. 4th edn. Worldblaufen, Bern/Switzerland, 347-374 p.
- Minchin, P. E. H., Thorp, T. G., Boldingh, H. L., Gould, N., Cooney, J. M., Negm, F. B., Focht E., Arpaia M. L., Hu H. and Brown, P. (2012). A possible mechanism for phloem transport of boron in 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) trees. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 87(1), 23-28.
- OECD/FAO. (2021). OECD-FAO Agricultural outlook 2021-2030. OECD Publish, Paris. <https://doi.org/10.1787/19991142>
- Poonnachit U. and Darnell R. (2004). Effect of ammonium and nitrate on ferric chelate reductase and nitrate reductase in *Vaccinium* species. *Annals of Botany*, 93(4), 399-405.
- Ruan, J., Gerendás, J., Härdter, R. and Sattelmacher, B. (2007). Effect of nitrogen form and root-zone pH on growth and nitrogen uptake of tea (*Camellia sinensis*) plants. *Annals of botany*, 99(2), 301-310.
- Rubí-Arriaga M., Franco-Malvaíz A. L., Rebollar-Rebollar S., Bobadilla-Soto E. E., Martínez-De La Cruz I. and Siles-Hernández Y. (2013). Situación actual del cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) en el Estado de México, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 1 (16), 93-101.

- Salazar-García, S. (2002). Nutrición del aguacate: principios y aplicaciones. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias e Instituto de la Potasa y el Fósforo. Querétaro, México.
- Salazar-García, S., Ibarra-Estrada, M. E., Gutiérrez-Martínez, P., and Medina-Torres, R. (2014). Fertilización con zinc y boro en huertos de aguacate 'Hass' sin riego en Nayarit. INIFAP-CIRPAC, Campo Experimental Santiago Ixcuintla. Libro Técnico Núm. 02. Nayarit, México.
- Sánchez, G. P. (2021). Manejo integral de la nutrición en aguacate. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Comunicación personal.
- Schaffer, B. A., Wolstenholme, B. N., and Whiley, A. W. (2013). The avocado: botany, production and uses. CABI.
- Selladurai, R. and Awachare, C. M. (2020). Nutrient management for avocado (*Persea americana* Miller). *Journal of plant nutrition*, 43(1), 138-147.
- Sequi, P., (2004). Los microelementos en la nutrición vegetal. Italia: VALAGRO. SpA. (Vol. 43). Obtenido de indice (unne.edu.ar).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). Panorama agroalimentario, 2020. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Edición 2020. Cd. México, México. 196 pp.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). Anuario estadístico de la producción agrícola por cultivo. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola>
- Sonneveld C. (2002). Composition of nutrient solutions. *In: Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. Savvas D. and Passam H.C. (eds). *Embryo Publications*, Athens, Greece. 179-210 pp.
- Southgate, D.G. (1976). Determination of food carbohydrates. *Applied Science Publishers*. LTD. London. 105 p.
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. *En: Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture*. ISOSC. Wageningen, The Netherlands, 633-649 pp.
- Stewart, W. M., Dibb, D. W., Johnston, A. E. and Smyth, T. J. (2005). The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy journal*, 97(1), 1-6.
- Tabatabaei, S. J., Yusefi, M., and Hajiloo, J. (2008). Effects of shading and NO₃⁻: NH₄⁺ ratio on the yield, quality and N metabolism in strawberry. *Scientia horticulturae*, 116(3), 264-272.
- Taiz, L., Zeiger E., Møller, I. M., and Murphy, A. (2015). Plant physiology and development. Sinauer Associates Incorporated. 6ta ed. Massachusetts, USA. 761 p.

- Turner, B. L. y Miksicek, C. H. (1984). Economic plant species associated with prehistoric agriculture in the Maya lowlands. *Economic Botany*, 2 (38), 179-193.
- Wang, Y., Wang, Y. M., Lu, Y. T., Qiu, Q. L., Fan, D. M., Wang, X. C., and Zheng, X. Q. (2021). Influence of different nitrogen sources on carbon and nitrogen metabolism and gene expression in tea plants (*Camellia sinensis* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 167, 561-566.
- Williams, L. O. (1977). The avocados, a synopsis of the genus *Persea*, subg. *Persea*. *Economic Botany*, 3(31), 315-320.
- Xu, G., Fan, X., & Miller, A. J. (2012). Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual review of plant biology*, 63, 153-182.
- Yin, H., Li, B., Wang, X., and Xi, Z. (2020). Effect of ammonium and nitrate supplies on nitrogen and sucrose metabolism of cabernet sauvignon (*Vitis vinifera* cv.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5239-5250.
- Zou, N., Shi, W., Hou, L., Kronzucker, H. J., Huang, L., Gu, H., Yang Q., Deng G., and Yang, G. (2020). Superior growth, N uptake and NH_4^+ tolerance in the giant bamboo *Phyllostachys edulis* over the broad-leaved tree *Castanopsis fargesii* at elevated NH_4^+ may underlie community succession and favor the expansion of bamboo. *Tree Physiology*, 40(11), 1606-1622.