



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Optimización en el uso del nitrógeno en la fórmula de fertirriego en clavel

Adriana del Pilar Baracaldo Argüello

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía
Bogotá, Colombia
2022

Optimización en el uso del nitrógeno en la fórmula de fertirriego en clavel

Adriana del Pilar Baracaldo Argüello

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Doctor Víctor Julio Flórez Roncancio

Codirector:

Magíster Carlos Alberto González Murillo

Línea de Investigación:

Fisiología de cultivos

Grupo de Investigación:

Horticultura

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía
Bogotá, Colombia
2022

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Adriana del Pilar Baracaldo Argüello

Nombre

17/01/2022

Fecha

Agradecimientos

Agradezco a la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores), al Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores), a la Universidad Nacional de Colombia, a la Universidad de La Salle, a la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) y, en especial, a la Gobernación de Cundinamarca por la posibilidad de participar en la ejecución del proyecto “Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia, tecnología e innovación aplicadas en Cundinamarca”. De igual manera, a las compañías Brenntag Colombia S.A., Productos Químicos Andinos S.A. y Avgust Crop Protection, por el gentil suministro de las soluciones fertilizantes, los materiales plásticos de cubierta y los productos para control fitosanitario utilizados en esta investigación, respectivamente.

De igual manera la autora agradece a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, que con su infraestructura de laboratorios y personal docente y administrativo contribuyó al desarrollo exitoso de este trabajo de grado. A los profesores Víctor J. Flórez R. y Carlos A. González M. por la respectiva dirección y codirección de este trabajo, así como por su acertada asesoría y consejería en la realización del mismo. Al doctor Raúl I. Cabrera, Extension Specialist & Associate Professor in Nursery Crops Production & Management, Department of Plant Biology, Rutgers University, por sus valiosos aportes en el desarrollo de esta investigación. Y al equipo de trabajo del proyecto de investigación en mención, que de una u otra forma contribuyeron con la realización del presente trabajo.

Resumen

Optimización en el uso del nitrógeno en la fórmula de fertirriego en clavel

Si bien el nitrógeno es el fertilizante más usado en la agricultura, contamina aguas superficiales y subterráneas a través de su lixiviación. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la disminución del nitrógeno total y el aumento del porcentaje de N-NH_4^+ sobre variables de nutrición mineral, balance del uso de nitrógeno, productividad y calidad. En el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia se evaluaron dos concentraciones de nitrógeno total ($200\text{-}140\text{ mg L}^{-1}$ en fase vegetativa y $160\text{-}112\text{ mg L}^{-1}$ en fase reproductiva) con tres relaciones de $\text{N-NH}_4\text{:N-NO}_3$ (5:95, 15:85 y 25:75) en clavel estándar cv. Don Pedro sembrado en sustrato. Se evaluaron contenidos elementales en tejido, pH, concentración de nitrato en lixiviado, eficiencia del uso del nitrógeno (EUN), tasas e índices de crecimiento, productividad y calidad. Se observó mayor concentración de Zn y Cu en el tejido con la disminución de N total; así mismo, se obtuvieron incrementos de N y Zn y disminución de Mg con el incremento de NH_4^+ , que, a su vez, redujo el pH en el sustrato. La disminución de N total no afectó significativamente el contenido de N en el tejido de la planta, pero sí el contenido de NO_3^- y N total en el lixiviado. En ambas fórmulas se obtuvieron productividad y calidad similares, y en aquella con menos N total mejor EUN, mitigando el impacto negativo de este nutriente en el medio ambiente. El número de tallos florales por planta disminuiría en la medida en que se aumenta el componente amoniacal, de manera similar a lo observado con el porcentaje de tallos florales en calidad Select.

Palabras clave: cultivo sin suelo, *Dianthus caryophyllus* L., flores de corte, nutrición mineral, relación amonio:nitrato, tasas e índices de crecimiento.

Abstract

Optimization in the use of nitrogen in the fertigation formula in carnation

Nitrogen is the most used fertilizer in agriculture and through its leaching contributes to the contamination of surface and underground waters. This study aimed to evaluate the effect of the total nitrogen decrease while increasing the N-NH_4^+ percentage on variables of mineral nutrition, the balance of nitrogen use, productivity, and quality. The research was carried out at the Marengo Agricultural Center of the Universidad Nacional de Colombia. Two concentrations of total nitrogen ($200\text{-}140\text{ mg L}^{-1}$ in vegetative phase and $160\text{-}112\text{ mg L}^{-1}$ in productive phase) with three ratios of $\text{N-NH}_4^+ : \text{N-NO}_3^-$ (5:95, 15:85, and 25:75) were evaluated in standard carnation cv. Don Pedro grown on substrates. The elemental contents in plant tissue, pH, nitrate concentration in the leachate, nitrogen use efficiency (NUE), rates and indexes of growth, productivity, and quality were measured. Higher concentrations of Zn and Cu were observed in the plant tissue with the decrease in the total N; likewise, increases of N and Zn and a decrease of Mg were obtained with the increase in NH_4^+ , which decreased the pH in the substrate. The decrease in the total N did not significantly affect the content of N in the plant tissue but did significantly affect the content of NO_3^- and total N in the leachate. In both formulas similar productivities and qualities were obtained and in that one with less total N better NUE, mitigating the negative impact on the environment. The number of flowering stems per plant would decrease as the ammoniacal component is increased, like that observed with the percentage of floral stems in Select quality.

Keywords: soilless system culture, *Dianthus caryophyllus* L., cut flowers, mineral nutrition, ammonium:nitrate ratio, growth rates and indexes.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	X
Lista de tablas	XI
Introducción	1
1. Materiales y métodos	9
1.1 Análisis estadístico.....	13
2. Resultados y discusión	15
2.1 Contenido de nutrientes en tejido vegetal	15
2.1.1 Efecto de la disminución de nitrógeno	15
2.1.2 Efecto del aumento de nitrógeno amoniacal	17
2.2 Contenido de NO ₃ en lixiviado	19
2.3 pH en el sustrato	20
2.4 Balance de nitrógeno	21
2.5 Análisis de crecimiento	22
2.5.1 Tasas e índices de crecimiento.....	23
2.6 Productividad y calidad	27
2.7 Eficiencia del uso del nitrógeno (EUN).....	28
3. Conclusiones	29
Bibliografía	31

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Valores promedio del contenido de N (A), Cu (B) y Zn (C) en el tejido vegetal de plantas completas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con disminución del N total en la fórmula de fertirriego.....	16
Figura 2-2: Valores promedio del contenido de N (A.), Mg (B.) y Zn (C.) en el tejido vegetal de plantas completas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con incrementos en el componente amoniacal de la fertilización nitrogenada.....	18
Figura 2-3: Valores promedio del contenido de nitrato en el lixiviado de un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro, con disminución del N total en la fórmula de fertirriego.....	20
Figura 2-4: Valores promedio del pH en el sustrato de un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro sometidas a incrementos en el componente amoniacal de la fertilización nitrogenada.....	21
Figura 2-5: Comportamiento de plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato y sometidas a incrementos en el componente amoniacal de dos fórmulas de fertirriego.	24
Figura 2-6: Calidad de tallos florales de clavel cv. Don Pedro de plantas sembradas en sustrato sometidas a distintos tratamientos de fertilización nitrogenada.....	27
Figura 2-7: Valores promedio de la eficiencia en el uso de nitrógeno en plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato bajo distintos tratamientos de fertilización nitrogenada.	28

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Análisis químico del agua de riego en el CAM utilizada para la preparación de las soluciones de fertirriego.....	9
Tabla 1-2: Caracterización físico química del sustrato utilizado en el ensayo.....	10
Tabla 1-3: Concentraciones y relaciones de nitrógeno evaluadas en la fórmula de fertirriego utilizada en el cultivo de clavel cv. Don Pedro sembrado en sustrato.....	11
Tabla 1-4: Métodos empleados para la determinación de las variables químicas en el sustrato empleado en el cultivo de clavel estándar cv. Don Pedro.....	11
Tabla 1-5: Métodos empleados en la determinación de las variables químicas en el tejido del cultivo de clavel estándar cv. Don Pedro.....	12
Tabla 1-6: Métodos empleados para la determinación de las variables en lixiviados en el cultivo de clavel estándar cv. Don Pedro.....	12
Tabla 2-1: Valores promedio del contenido de nitrógeno aplicado, absorbido y lixiviado en un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro sometidas a disminución de 30 % del N total en la fórmula de fertirriego.....	22
Tabla 2-2: Valores promedio del número de tallos por planta en plantas de clavel estándar cv. Don Pedro sembrado en sustrato y sometido a disminución del N total y a incrementos en el componente amoniacal en la fórmula de fertirriego.....	23
Tabla 2-3: Valores promedio de masa seca de plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con disminución del N total e incrementos en el componente de $N-NH_4^+$ en la fórmula de fertirriego.....	25

Introducción

Aunque la agricultura requiere del uso intensivo de fertilizantes nitrogenados: nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) o urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), su aplicación a base de NO_3^- y NH_4^+ genera problemas ambientales como eutrofización de reservorios de agua, contaminación de acuíferos y polución atmosférica. Dicha problemática es un asunto serio de reconocimiento mundial, de preocupación pública y económica (Esteban *et al.*, 2016; Cameron *et al.*, 2013). Para el 2020 el consumo fue de aproximadamente 201.663 toneladas de fertilizantes a base de NPK, de los cuales el 58,9 % corresponde a nitrogenados (FAO, 2017). La aplicación de nitrógeno (N) en el mundo aumentó más de ocho veces desde 1961 (Kant, 2018). En Colombia, el consumo de estos insumos agrícolas ha aumentado de forma notable desde el 2000, a pesar de no haber un aumento significativo en la superficie de uso agrícola en el país (ICA y MADR, 2015). En las condiciones locales, por lo general, la fertilización en sistemas de cultivo sin suelo se basa en prácticas empíricas, lo que, en general, lleva al productor a sobreestimar las necesidades de las plantas y aplicar cantidades excesivas, con el consecuente desperdicio de nutrientes y dinero, así como el riesgo de contaminación de cursos de agua y aguas profundas, sin embargo, el sector floricultor colombiano se ha venido ajustando por costos y restricciones de normas ambientales.

Según el Boletín de Asocolflores (2021) de las 7700 ha cultivadas con flores de corte en Colombia, 11,6%, es decir 893 ha, están sembradas con clavel, en la mayoría de las cuales se ha venido implementado el sistema de cultivo en sustrato, con un consumo de 150 a 220 mg L^{-1} de N en la fórmula de fertirriego, en 1 m^3 de agua por cama por semana. El sistema genera una solución salina en el lixiviado, que corresponde entre 20 y 50 % del volumen total aplicado por cama (Lorenzo *et al.*, 1993). Por lo tanto, este sistema genera impactos ambientales negativos derivados del alto consumo de agua y del vertimiento de sales fertilizantes al medio ambiente. Este impacto ambiental potencial en el agroecosistema de la Sabana de Bogotá aún no ha sido dimensionado.

Las reacciones de intercambio catiónico en el suelo mediante atracción electrostática retienen los iones de amonio que en su condición de catión se adsorbe en los sitios de intercambio de cationes con la carga negativa de la superficie de las arcillas y de la materia

orgánica. Este mecanismo contribuye con el almacenamiento de amonio en el suelo, con la consecuente reducción de su concentración en la solución del suelo. Esto protege a los iones NH_4^+ de la lixiviación y permite que sea absorbido por las plantas o inmovilizado en la materia orgánica del suelo. El anión nitrato no es retenido por el complejo de intercambio catiónico del suelo y, por ende, se lixivia fácilmente del suelo si no es absorbido por las plantas, inmovilizado o desnitrificado. La pérdida de NO_3^- por lixiviación representa una amenaza para el medio ambiente y para la salud humana (Cameron *et al.*, 2013). Hay evidencias de que lo anterior también ocurre en sustratos (Vélez *et al.*, 2014a; Vélez *et al.*, 2014b y Vélez *et al.*, 2022). También, Vélez *et al.* (2022) en un sistema de cultivo en sustrato para clavel estándar cv. Delphi sometido a tres porcentajes de recirculación de drenajes reportaron valores entre 70 y 510 mg L^{-1} de NO_3^- en el lixiviado, por encima del máximo permitido por la Organización Mundial de la Salud (50 mg L^{-1}) (WHO, 2011) y por la Agencia Norteamérica para la Protección del Medio Ambiente (10 mg L^{-1}) (EPA, 2009). Y, aunque en el tratamiento con menos nitrógeno en la fórmula de fertirriego utilizada en miniclavel cv. Rony, Casas (2015) reportó una reducción en la concentración de nitrato en el lixiviado, esta aún fue superior a 100 mg L^{-1} , por encima del máximo permitido para aguas superficiales que se destinaran a tratamiento y luego a consumo humano, según el Decreto 1594 de 1984 (concentración máxima de 10 mg L^{-1}) (OAB, 2019).

Nutrición con nitrógeno

El nitrógeno es uno de los nutrientes minerales clave para las plantas, y su disponibilidad tiene el mayor impacto en su crecimiento y desarrollo. Frecuentemente, las fuentes de N son limitantes, por lo que las plantas han desarrollado diversas estrategias para modular su capacidad de absorción radicular y compensar la disponibilidad espacial y temporal de N en el suelo. Las principales fuentes de N para las plantas terrestres en los suelos de regiones templadas en orden decreciente de abundancia son nitrato, amonio y aminoácidos (Nacry *et al.*, 2013). El contenido de N necesario para el crecimiento óptimo varía entre 1 y 5 % de la masa seca de las plantas puesto que constituye proteínas, ácidos nucleicos, pigmentos, coenzimas, fitohormonas y metabolitos secundarios (Hawkesford *et al.*, 2012). La importancia del nitrógeno en el desarrollo de las plantas, su esencialidad, los compuestos de los que hace parte (Taiz *et al.*, 2015), su influencia en procesos metabólicos (Jin *et al.*, 2015), en la eficiencia en el uso del agua (Ucar *et al.*, 2017), y los síntomas de deficiencia y toxicidad (Gárate y Bonilla, 2013) están ampliamente descritos en la literatura, de la misma forma que los procesos metabólicos de asimilación del

nitrógeno (Maldonado *et al.*, 2013; Taiz *et al.*, 2015), la influencia de factores ambientales y de la propia especie (Cabrera, 2006), su efecto en la acumulación de metales pesados (Yang *et al.*, 2020), su movilidad, almacenamiento, los complejos enzimáticos, organelos y fuentes energéticas involucradas en la reducción a amonio (Barker y Bryson, 2007; Kant, 2018).

La influencia del N es significativa en la asimilación del carbono en los órganos fuente y en la translocación y la utilización de fotoasimilados en los órganos vertedero, lo que determina la tasa de crecimiento y la productividad de las plantas de cultivo. Es esencial para la fotosíntesis en plantas superiores. Un contenido adecuado de N en hojas mejora el uso eficiente de la radiación (RUE) y, en consecuencia, el rendimiento de los cultivos (Fageria, 2016). Así mismo, con aumentos de la tasa de aplicación hasta 150 kg ha⁻¹ de N en maíz, Jin *et al.* (2015) muestran incrementos en los valores de masa seca foliar, máximo rendimiento cuántico del fotosistema II, asimilación fotosintética del carbono, concentración de nitrógeno foliar, concentración foliar de azúcar y de la relación azúcar:nitrógeno.

Las principales fuentes de N absorbidas por las raíces de las plantas superiores son NO₃⁻ y NH₄⁺, y la disponibilidad de estas fuentes en el suelo varía sustancialmente en tiempo y espacio, en función de sus propiedades tales como textura, pH, humedad y actividad microbiana. Por consiguiente, las plantas han desarrollado mecanismos para modular la eficiencia en la absorción de N en respuesta a la disponibilidad y a la forma del N presente en la solución del suelo, así como a la demanda de N por parte de la planta durante su ciclo de vida (Hawkesford *et al.*, 2012). La cinética de la absorción (o influjo) radicular de NO₃⁻ o NH₄⁺ en función de la concentración externa generalmente muestra un patrón bifásico. En el rango de baja concentración, los sistemas de transporte de alta afinidad (HATS) pueden encontrar iones en el suelo a concentraciones tan bajas como 1 μM. Ambos HATS de NO₃⁻ y NH₄⁺ son saturables. En el rango de alta concentración (típicamente > 0,5 - 1 mM), la actividad de los sistemas de transporte de baja afinidad (LATS) se hace evidente, sobreponiéndose a los HATS. Al contrario de los HATS, la absorción de NO₃⁻ o NH₄⁺ mediada por LATS no es saturable, y por lo general muestra un aumento lineal con el incremento de la concentración externa; esta condición a menudo se ha considerado como la evidencia de que HATS y LATS no involucran el mismo transportador proteico. También se plantea la hipótesis de que el HATS para NO₃⁻ comprende dos componentes diferentes: uno constitutivo (cHATS), presente y activo incluso en ausencia de NO₃, y otro inducible (iHATS), que solo se expresa o activa después de pretratamiento con NO₃⁻ (Nacry *et al.*, 2013). En las plantas, la absorción radical del NH₄⁺ depende de transportadores que son proteínas

integrales de membrana de la familia AMT1. Estas proteínas han sido descritas como un transportador unidireccional de amonio a lo largo del gradiente electroquímico o como cotransporte de NH_3/H^+ (Kraiser *et al.*, 2011).

También en las plantas, los transportadores de nitrato están representados por dos familias principales de genes: la familia NRT1 PTR (transportador de nitrato, transportador de péptidos) (NPF) y la familia NRT2, que pertenece a una superfamilia de facilitadores principales (MFS). Otras dos familias de transportadores están involucradas en el transporte intracelular de nitrato: la familia CLC (canal de cloruro) y la familia SLAC/SLAH (canal de aniones de activación lenta). Los miembros de las familias NPF y NRT2 están ubicados en diferentes órganos y tejidos, y participan en la absorción de nitrato del suelo o en la distribución en las diferentes partes de la planta (Hirel y Krapp, 2020). Comprender estos mecanismos de absorción y transporte de N por parte de las plantas es el primer paso para desarrollar soluciones biotecnológicas efectivas y sostenibles para mejorar el uso de N por las plantas en entornos naturales o agrícolas.

En este sentido, uno de los objetivos más importantes para el desarrollo de una agricultura sostenible es aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos con menos fertilizantes nitrogenados para mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) (Good *et al.*, 2004; Lupini *et al.*, 2017). Al respecto, Kumar *et al.* (2016) mostraron que con 0, 50, 100, 150 y 200 mg L^{-1} de N en plantas de clavel cv. Red Corso, los valores de las variables evaluadas (número de botones florales por planta, número de flores por planta, tamaño de la flor, peso de la flor, longitud del tallo y duración de la flor) aumentaron significativamente hasta 150 mg L^{-1} .

La relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ y su efecto en las plantas

La asimilación de NH_4^+ y NO_3^- tiene diferentes costos potenciales con respecto a energía y agua, con NH_4^+ como la fuente menos costosa, porque el NO_3^- debe ser reducido a NH_4^+ para ser asimilado por la planta, con consumo equivalente de 8 a 12 moles de ATP por cada mol de NO_3^- reducido. Se requieren cinco ATP por cada mol NH_4^+ asimilado (Hawkesford *et al.*, 2012). En varios cultivos, la combinación de ambas formas (NH_4^+ y NO_3^-) comúnmente resulta en mejor crecimiento en comparación con el uso de solo una de las formas (Vojtíšková *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2007). Para una dosis de N y un régimen de riego determinados, la relación en mención, según Bar-Yosef (2008), incide sobre varios factores de la solución del suelo y del cultivo: (i) eficiencia en la absorción de nitrógeno; (ii) disminución de tasas de absorción de Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^+ debido a la competencia con la

absorción de NH_4^+ ; (iii) el suministro de NH_4^+ disminuye el pH de la solución mientras que el de NO_3^- tiende a aumentarlo, y (iv) la absorción excesiva de NH_4^+ , particularmente a temperaturas mayores a 28°C en la zona radicular, es perjudicial para el desarrollo de las propias raíces. Al respecto, Taiz *et al.* (2015) plantean para el numeral iii, que a medida que la raíz de la planta absorbe iones amonio del suelo y lo asimila en aminoácidos, se generan iones de hidrógeno en la raíz que son excretados en el suelo circundante; así mismo, para el numeral iv, los autores indican que el amonio desacopla los gradientes transmembranales de protones que se requieren para el transporte de electrones en la fotosíntesis y la respiración. Con base en lo anterior, la mejor relación por aplicar varía con factores como la etapa fenológica (Cui *et al.*, 2017) y la temperatura (Liu *et al.*, 2017). Un desbalance en la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ puede afectar la solubilidad y disponibilidad de otros nutrientes esenciales para las plantas, debido a cambios en el pH del entorno radical (Helali *et al.*, 2010). La toxicidad (sensibilidad) y tolerancia a NH_4^+ en plantas desde la hipótesis clásica hasta la más reciente es ampliamente abordada por Esteban *et al.* (2016), para quienes los cultivos de papa o remolacha azucarera en general son más sensibles a NH_4^+ que sus respectivos parientes silvestres; sin embargo, arroz, arándanos y cebolla se han adaptado a altas concentraciones y raramente alcanzan umbral de toxicidad por NH_4^+ . Esta relación también está asociada con la susceptibilidad o la tolerancia a plagas y enfermedades, según Žanić *et al.* (2011), quienes argumentan que con mayor concentración de N y alta proporción de NO_3^- se aumenta la severidad de la infestación con mosca blanca en el estrato medio de plantas de tomate. De igual manera, dependiendo de la especie, dicha relación afecta indicadores del desarrollo y la nutrición mineral de las plantas. De acuerdo con González *et al.* (2009), en cultivo en sustrato a base de 60% de tezontle y 40% de fibra de coco, la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ 0:100 en cebollín favoreció el área foliar y la producción de biomasa; la 20:80 en albahaca incrementó el rendimiento, y en eneldo no se observaron diferencias en altura de planta, área foliar y biomasa total en las relaciones estudiadas. Mientras que en tomate cultivado en una mezcla de turba y vermiculita (1:1 v/v), la relación $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ 70:30 disminuyó la concentración de Ca foliar y aumentó la de P, también redujo algunos indicadores de crecimiento sin afectar la productividad, viabilizando el uso de la fuente amoniacal (Parra *et al.*, 2012). En lechuga se absorbe preferencialmente más NH_4^+ que NO_3^- , e incrementos de hasta 30 % del N total estimulan el crecimiento, probablemente como consecuencia del aumento en la absorción de P, resultante de un mejor control del pH en la zona radical. Los contenidos foliares de

P, Mn, Zn y Cu aumentaron en función del incremento de la fuente amoniacal (Savvas *et al.*, 2006).

Al utilizar las relaciones $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ de 0,25, 0,37 y 0,51 en una solución nutritiva para anturio, Dufour y Guérin (2005) encontraron que con el aumento de dicha relación hasta 0,37 del N total se mejoraron tanto el crecimiento como el desarrollo y el rendimiento de las plantas. Khalaj *et al.* (2017) evaluaron el efecto de relaciones $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ (100:0, 80:20, 60:40, 40:60) en la solución de fertirriego utilizada en gerbera cv. Stanza y Double Dutch. Con la relación 80:20 se obtuvieron los mayores valores en las variables evaluadas (número de hojas por planta, número de flores, diámetro del tallo y de la flor, masa fresca y seca de la raíz y de la parte aérea y la vida en florero); con la disminución de la relación a 40:60 se redujo en forma significativa el crecimiento vegetal y la biomasa. El aumento en la concentración de amonio incrementa los contenidos de carotenoides y clorofilas, así como la actividad catalasa y peroxidasa en las células. Para el cultivo hidropónico de fresa, Tabatabaei *et al.* (2006) encontraron que las altas relaciones de NH_4^+ y de NO_3^- en la solución de fertirriego siempre redujeron el rendimiento, y con la relación $25\text{NH}_4^+:75\text{NO}_3^-$ obtuvieron incrementos en el rendimiento de 38 % y 84 % en los cv. Camarosa y Selva, respectivamente. El mayor rendimiento en esta relación hace referencia a incrementos en el tamaño del fruto: longitud y masa fresca de los frutos. Sin embargo, el incremento de 0 a 75 % en la relación de NH_4^+ redujo de manera significativa la concentración de Ca y la vida en poscosecha de ambos cultivares. Al parecer, mayores área foliar y tasa de fotosíntesis en la relación 25:75 de N serían la razón para los incrementos en productividad y crecimiento de las plantas. Para Roosta (2014), los efectos adversos de la alcalinidad sobre los valores de SPAD y el máximo rendimiento cuántico del PSII (Fv/Fm) fueron aliviados con incrementos en la proporción de NH_4^+ en la solución nutriente, con lo cual aumentaron el número de frutos y el rendimiento en fresa cv. Camorosa. Entre los tratamientos estudiados por Abasi *et al.* (2016) en el cultivo hidropónico de tulipán cv. Apricot Parrot y Daytona, con la relación de 0,38 de $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva encontraron los valores máximos en las concentraciones de Ca y Mg, la longevidad floral, la masa seca y los valores óptimos de N, P y K. Por lo aquí expuesto, se necesitan estudios específicos para cada especie con la finalidad de encontrar la mejor relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ en función de la calidad y la productividad requeridas.

Entre las estrategias para mitigar el impacto del nitrógeno como contaminante están el reducir el aporte de nitrógeno total e incrementar el porcentaje de amonio. Por lo tanto, la disminución en la concentración del N total buscando optimizar la fórmula de fertirriego y

el aumento en la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ pueden proveer información acerca de una mejor utilización y optimización del uso del N, y de esta forma afectar los contenidos de sales en el lixiviado que genera este sistema de cultivo, a fin de mitigar el impacto ambiental.

Objetivo

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la disminución del N total y el aumento de la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ en la solución de fertirriego utilizada sobre el contenido de elementos en el tejido vegetal, el sustrato y el lixiviado, la eficiencia en el uso del nitrógeno, así como sobre indicadores del crecimiento, la productividad y la calidad en el cultivo de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Don Pedro.

1. Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, ubicado en el municipio de Mosquera (Cundinamarca), a 4° 42' N y 74° 12' W, a 2540 msnm, con temperatura promedio de 12,4 °C, humedad relativa entre 76 y 89 % y precipitación promedio anual de 1124 mm (Ordóñez y Bolívar, 2014). Durante el estudio los promedios de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero fueron de 17,5 °C y 76 %, respectivamente.

Para el ensayo se utilizó un invernadero tradicional de estructura metálica tipo flexon (Acuña y Ortiz, 2004), con ventilación lateral y cenital pasivas, en el cual se acondicionaron dos naves de 9 × 70 m (630 m²) cada una. Se construyeron seis camas en madera (7 × 0,7 m), levantadas a 0,4 m del suelo, a doble contenedor de 0,25 m de ancho y 0,2 m de profundidad cada uno, y al final de cada cama se ubicó un tanque recolector de lixiviado. Se sembraron esquejes con raíz de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Don Pedro, a una densidad de 15,5 plantas por m² invernadero, en un sistema abierto de cultivo en sustrato. Las características químicas del agua utilizada en el riego y en el fertirriego se pueden detallar en la tabla 1-1. De igual forma, las características físico químicas del sustrato utilizado se observan en la tabla 1-2, el cual consistió de una mezcla de 50 % de cascarilla de arroz cruda + 15 % cascarilla de arroz tostada + 25 % de cascarilla de arroz tostada reutilizada + 10 % compost, obtenido de los residuos del cultivo de rosa y clavel (v/v/v/v). El manejo agronómico del cultivo se hizo conforme a lo descrito en Flórez *et al.* (2006a).

Tabla 1-1: Análisis químico del agua de riego en el CAM utilizada para la preparación de las soluciones de fertirriego.

Na	K	Ca	Mg	NH ₄	Cloruro	Sulfato	Carbonato	Bicarbonato	N-NO ₃	Fosfato
(Meq L ⁻¹)										
3,21	0,32	1,11	0,49	0,3	2,24	1	0	2,35	0,17	0,11
Fe	Mn	Cu	Zn	B	Alcalinidad	Dureza Total (CaCO ₃)		pH	CE	RAS
(mg L ⁻¹)										
0,54	0,48	0,01	0,01	0,31	150	80		7,76	0,68	3,59

Tabla 1-2: Caracterización físico química del sustrato utilizado en el ensayo.

Parámetro	Unidades	Sustrato
pH		7,41
CE	(dS m ⁻¹)	2,77
CIC	(meq 100g ⁻¹)	32
C:N		64,81
Nitrógeno amoniacal		0,43
Nitrógeno nítrico		0,36
Fósforo	(meq L ⁻¹)	0,81
Potasio		12,3
Calcio		7,18
Magnesio		2,37
Hierro		9,45
Manganeso		4,77
Cobre	(mg L ⁻¹)	0,14
Zinc		0,55
Boro		2,58
Cloruros		7
Azufre	(meq L ⁻¹)	9,54
Sodio		3,44
Bicarbonatos		8,85
Agua fácilmente disponible	(%)	7
Capacidad de Aireación		40

Se establecieron seis tratamientos correspondientes a modificaciones en el contenido de N de la fórmula convencional aplicada comercialmente en el cultivo de clavel (200 - 160 mg L⁻¹ de N total para las fases vegetativa y productiva del cultivo, respectivamente, manteniendo una relación NH₄⁺:NO₃⁻ de 15:85). En esta fórmula, el N total se redujo en 30 %, y la relación NH₄⁺:NO₃⁻ se disminuyó o aumentó en 10 % (tabla 1-3). En las soluciones de fertirriego, la CE se mantuvo entre 1,5 y 2,5, y el pH entre 5,5 y 6,0; las concentraciones de los demás elementos (mg L⁻¹) en las fases vegetativa y reproductiva fueron: P, 30; K, 150; Ca, 120; Mg, 40; Fe, 3; Cu, 1; Zn, 0,5; B, 1; Mo, 0,1; para S, esta osciló entre 2 y 116 mg L⁻¹ en razón a que se utilizó para el balance estequiométrico de la fórmula en el ajuste de NH₄⁺. Para el cálculo de las soluciones nutritivas se tuvo en cuenta el aporte del agua (CE = 0,6 y pH = 7,0) y de Mn por parte del sustrato a base de cascarilla de arroz tostada (Florián-Martínez y Roca, 2011). La lámina de riego diaria fue igual en todos los tratamientos y se aplicó en función de asegurar un porcentaje de drenaje de alrededor del 30%.

Tabla 1-3: Concentraciones y relaciones de nitrógeno evaluadas en la fórmula de fertirriego utilizada en el cultivo de clavel cv. Don Pedro sembrado en sustrato.

Tratamientos	NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻	Fase vegetativa			Fase productiva			
		NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N total	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N total	
	(%)	(mg L ⁻¹)						
5 % N-NH ₄	5:95	10	190	200	8	152	160	
15 % N-NH ₄	15:85	30	170		24	136		
25 % N-NH ₄	25:75	50	150		40	120		
30 % menos N	5 % N-NH ₄	5:95	7	133	140	5,6	106,4	112
	15 % N-NH ₄	15:85	21	119		16,8	95,2	
	25 % N-NH ₄	25:75	35	105		28	84	

En las semanas 16, 21 y 26 después de siembra (SDS) durante el ciclo de producción se realizaron tres muestreos de carácter destructivo de planta completa para los respectivos análisis. En estas mismas semanas se recogieron tres muestras de sustrato y una de lixiviado por tratamiento, tomando cerca de 1 kg de sustrato por unidad experimental y de 1 L de lixiviado en el canal de la cama de cada tratamiento. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en condiciones refrigeradas. En el tejido vegetal y en el sustrato se determinaron los contenidos de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn y B de acuerdo con Carrillo *et al.* (1994), así como el pH del sustrato. En el lixiviado se determinó la concentración de NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄, K⁺, HCO₃, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ y el pH y la CE según Rice *et al.* (1967). Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia según las metodologías descritas en las tablas 1-4, 1-5 y 1-6.

Tabla 1-4: Métodos empleados para la determinación de las variables químicas en el sustrato empleado en el cultivo de clavel estándar cv. Don Pedro.

Variable	Método de análisis
N: Nitrógeno total	Micro-kjeldahl, valoración volumétrica
F: Fósforo total	Calcinación de la muestra a 475°C, valoración colorimétrica con vanadato y molibdato de amonio
Ca, K, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn totales	Calcinación de la muestra a 475°C, espectrofotometría de absorción atómica
B: total	Calcinación de la muestra, valoración colorimétrica con Azometina-H
pH	Potenciómetro, determinación en el extracto de saturación (relación peso:volumen 1:5)
CE	Lectura en conductivímetro a 25°C en el extracto de saturación.

Tabla 1-5: Métodos empleados en la determinación de las variables químicas en el tejido del cultivo de clavel estándar cv. Don Pedro.

Variable	Método de análisis
N: Nitrógeno total	Micro-kjeldahl, valoración volumétrica
F: Fósforo total	Calcinación de la muestra a 475°C, valoración colorimétrica con vanadato y molibdato de amonio
Ca, K, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn totales	Calcinación de la muestra a 475°C, espectrofotometría de absorción atómica
B: total	Calcinación de la muestra, valoración colorimétrica con Azometina-H

Tabla 1-6: Métodos empleados para la determinación de las variables en lixiviados en el cultivo de clavel estándar cv. Don Pedro.

Variable	Método de análisis
pH	Potenciométrico
OH, CaCO ₂ y HCO ₃	Titulación con H ₂ SO ₄ 0,02N
PO ₄ ³⁻	Cloruro de estannoso, valoración colorimétrica
NO ₃ ⁻	Ácido fenoldisulfónico, valoración colorimétrica
Ca, K, Mg, Na, Cu, Fe, Mn, y Zn	Espectrofotometría de absorción atómica
NH ₄ ⁺	Nessler, valoración colorimétrica
CE	Lectura en conductivímetro a 25°C

Para el cálculo del balance de nitrógeno se tuvo en cuenta el contenido de N en el fertirriego, en el volumen total del lixiviado y en la masa seca del último muestreo.

Para el análisis de crecimiento en las 16, 21 y 26 SDS del ciclo de producción se midieron las variables área foliar y masa seca de la raíz, y de la parte aérea, discriminada en masa seca de tallos, hojas y botones florales. El área foliar (cm²) se determinó con un medidor de marca LI-COR, modelo LI-3100. Con base en estos datos, y de acuerdo con Flórez *et al.* (2006b), se calculó la tasa relativa de crecimiento (TRC), el índice de área foliar (IAF), el área foliar específica (AFE) y la relación de masa foliar (RMF). A partir de la 10 SDS y con frecuencia quincenal se seleccionaron al azar seis plantas por tratamiento para las medidas de crecimiento continuo. Se contó el número de tallos por planta, y en el tallo medio de cada una de ellas se midió la longitud y el diámetro del tallo, el número de hojas, así como la longitud y el diámetro del botón floral.

La productividad y la calidad de los tallos florales de clavel se registraron para cada uno de los tratamientos. La productividad es expresada en número de tallos florales producidos por m² de área de invernadero, mientras que la calidad, en porcentajes de los tallos según los parámetros de los grados Select, Fancy, estándar y nacional. Esta última fue

determinada, entre otras características, por la longitud y fortaleza del tallo, el tamaño y punto de apertura de las flores, los defectos en atributos o parámetros de calidad y por la presencia de plagas o enfermedades, conforme son descritos en Reid y Hunter (2000) y en Escandón (2009).

La eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) se calculó teniendo en cuenta la acumulación de masa seca y la absorción de nitrógeno según Good *et al.* (2004), de acuerdo con la siguiente fórmula: $EUN = \text{masa seca de planta completa (g)} / \text{contenido de nitrógeno en planta completa (g)}$.

1.1 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado en arreglo factorial con dos niveles de nitrógeno total y tres relaciones $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ (tabla 1-3). Los seis tratamientos tuvieron tres réplicas, y la unidad experimental consistió en 2 m de cama con 46 plantas. El análisis inferencial se realizó por medio de análisis de varianza (Anova) y comparación múltiple de Tukey, con nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Se verificaron normalidad y homogeneidad de varianza en los residuales por medio de las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente, para validar el modelo ajustado. Todos los análisis fueron realizados con el software estadístico SAS v. 9.1.

2. Resultados y discusión

A continuación, se analiza y se discuten los resultados significativos del contenido de nutrientes en tejido vegetal, del pH en sustrato y del contenido de NO_3^- en el lixiviado. Luego, se aborda el balance de nitrógeno del cultivo en respuesta a los tratamientos evaluados. Se presentan el comportamiento de las variables de crecimiento, de las tasas e índices de crecimiento, y la información obtenida sobre productividad y calidad. También, se analiza y se discuten los resultados del uso eficiente del nitrógeno.

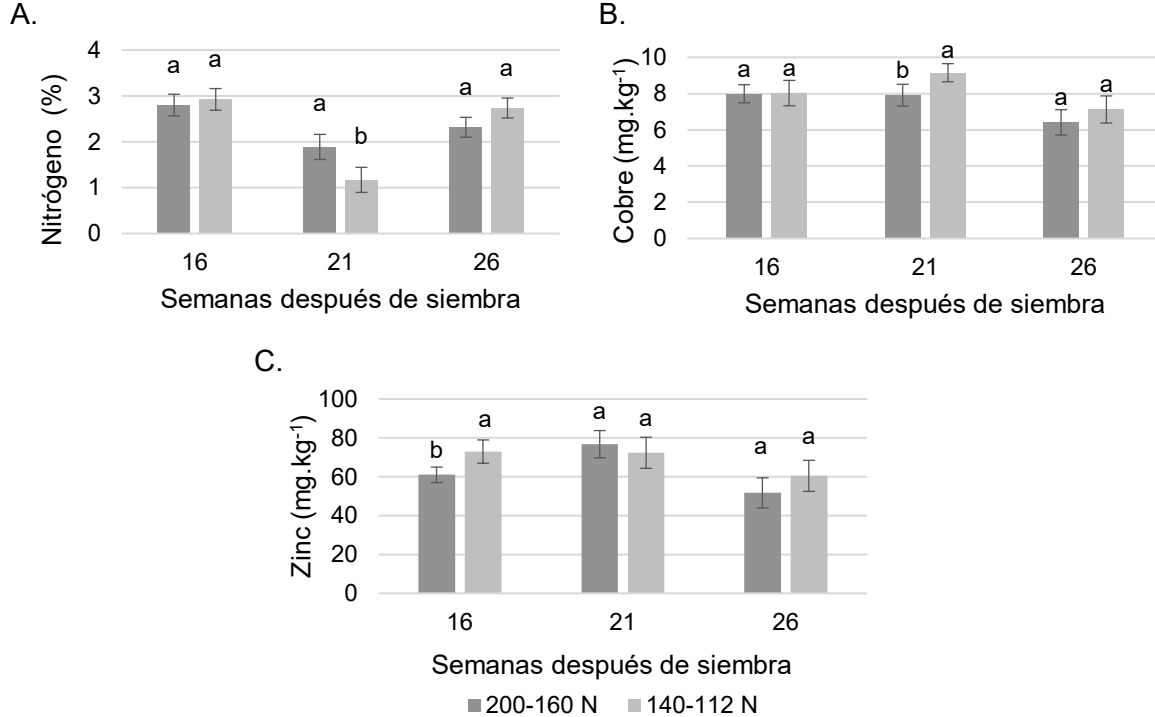
2.1 Contenido de nutrientes en tejido vegetal

2.1.1 Efecto de la disminución de nitrógeno

Al abordar el análisis estadístico de los contenidos de nutrientes en el tejido de la planta entera teniendo en cuenta en la fórmula de fertirriego el factor concentración de N total, los contenidos de N, Cu y Zn presentaron diferencias estadísticamente significativas en algunos estadios fenológicos (figura 2-1). En la 21 SDS, las plantas del tratamiento con menor concentración de N (140-112 N) muestran un contenido menor de N con respecto al tratamiento con mayor concentración (200-160 N) (figura 2-1A), que contrasta con el mayor contenido de Cu encontrado en el tratamiento con menor concentración de N (figura 2-1B). Así, se visualiza una posible relación inversa N:Cu. En la primera evaluación también se constató una concentración mayor de Zn en el tratamiento 140-112 N, en comparación con el tratamiento 200-160 N (figura 2-1C).

Figura 2-1: Valores promedio del contenido de N (A), Cu (B) y Zn (C) en el tejido vegetal de plantas completas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con disminución del N total en la fórmula de fertirriego.

Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).



Fuente: Baracaldo *et al.* (2018)

La relación N:Cu descrita en el presente estudio fue abordada por Navarro y Navarro (2003); para Broadley *et al.* (2012), en condiciones de alto suministro de N, el contenido de Cu de las raíces se incrementa proporcionalmente a su concentración externa, aunque se inhibe de forma drástica su transporte a la parte aérea. Para Navarro y Navarro (2003), las cantidades elevadas de compuestos nitrogenados en el suelo también son un factor influyente en el movimiento del Zn en el suelo y puede provocar deficiencia de Zn a causa de la cinética de absorción propia de los dos elementos. Rehman *et al.* (2018) indican que la aplicación de N aumenta la concentración y absorción de Zn en semillas de cereales, aunque Kumar *et al.* (1985) encontraron en plantas de mijo perla un efecto sinérgico del N sobre la concentración de Zn en hojas y tallos, y antagónico en la raíz.

En general, Yang *et al.* (2020) expresan que la fertilización con N mejora los contenidos de Fe, Zn, Cu, Ca, Hg y otros cationes en granos, y que el incremento en el suministro de N estimula el contenido radicular de Zn, su translocación de raíz a la parte aérea y el contenido total de Zn en trigo. Las fuentes nítricas y amoniacales también pueden aumentar la acumulación de Zn y Pb en *Populus euramericana*. Sin embargo, la aplicación

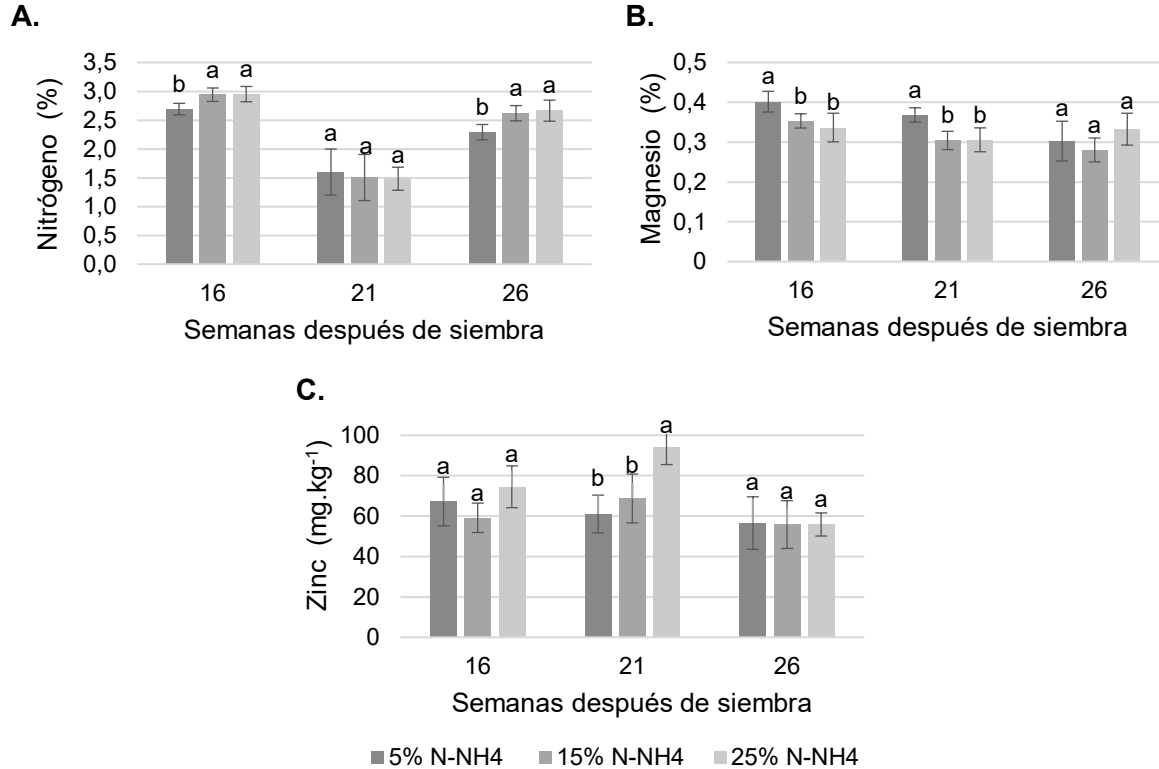
de niveles óptimos de nitrógeno en un suelo contaminado con metales pesados aumentó la translocación de dichos metales de la rizosfera a las raíces, y de la raíz a la parte aérea en granos de trigo, aunque con el suministro excesivo de N estos incrementos resultaron no significativos.

2.1.2 Efecto del aumento de nitrógeno amoniacal

En la figura 2-2 se muestran los contenidos de N, Mg y Zn, con diferencias estadísticas significativas en algunos de los estadios fenológicos evaluados, cuando en el análisis estadístico se consideró el aumento de N-NH₄. En las 16 y 26 SDS, las plantas con más contenido de NH₄, 15 y 25 %, respectivamente, de manera consecuente presentaron porcentajes mayores de N en el tejido de la planta (figura 2-2A). Asimismo, en la 21 SDS, las plantas sometidas a mayor porcentaje de NH₄⁺ (25 %) manifestaron contenidos mayores de Zn, con respecto a los tratamientos con 5 y 15 % de NH₄⁺ (figura 2-2C). Este resultado es contrario a lo verificado para Mg en las 16 y 21 SDS, cuando con el menor porcentaje de NH₄⁺ (5 %) se observaron los mayores contenidos del ion (figura 2-2B).

Figura 2-2: Valores promedio del contenido de N (A.), Mg (B.) y Zn (C.) en el tejido vegetal de plantas completas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con incrementos en el componente amoniacal de la fertilización nitrogenada.

Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).



Fuente: Baracaldo *et al.* (2018)

Al adicionar NH_4^+ en las soluciones nutritivas formuladas con NO_3^- para plantas de rosa cultivadas en hidroponía, Lorenzo *et al.* (2000) encontraron una mayor tasa de absorción de N total, P y K, con incremento en la concentración de P en las raíces. Por otra parte, Abasi *et al.* (2016) evaluaron el efecto de relaciones $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ en tulipán y, contrario a lo encontrado en el presente estudio, las plantas con mayor proporción de NH_4^+ (0,14) presentaron concentraciones significativamente más bajas de N en los bulbos de las plantas (0,84 %); ellos afirman que las plantas fertirrigadas con NO_3^- generalmente tienen una concentración alta de N en comparación con las fertirrigadas con NH_4^+ . Sin embargo, para Mengel y Kirkby (2001), las plantas fertilizadas con NH_4^+ tienen una mayor concentración de N en los tejidos de la parte aérea.

A mayores concentraciones de NH_4^+ en la solución nutritiva, se disminuye la absorción de cationes, como K, Ca y Mg. Según Abasi *et al.* (2016), las concentraciones de N en bulbo y de Ca, Mg y K en la parte aérea del tulipán se vieron significativamente afectadas por la

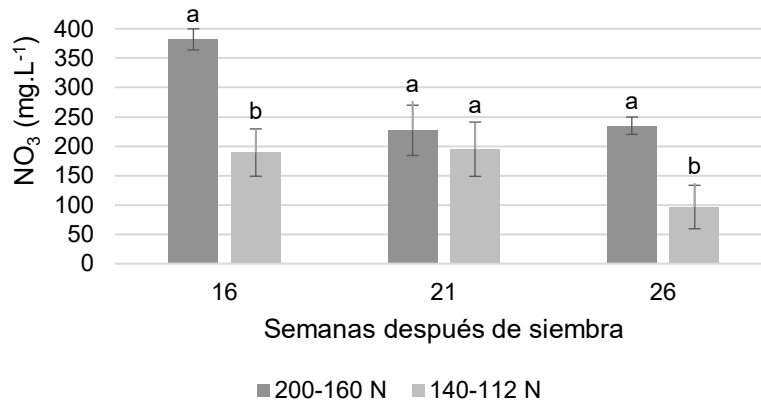
fuelle de N. En general, en las plantas fertilizadas con NH_4^+ se observaron concentraciones más bajas de los cuatro elementos, con 0,84, 1,10, 0,80 y 0,53 %, respectivamente.

En suelos neutros o alcalinos la acidificación de la rizosfera con la aplicación de amonio puede mejorar la movilización de fosfatos de calcio poco solubles y, en consecuencia, aumentar la absorción de P; de igual manera se incrementa la absorción de micronutrientes como B, Fe, Mn y Zn (Neumann y Römheld, 2012); para Alloway (2008), dicho marcado efecto acidificante aumenta la disponibilidad de Zn. Por lo tanto, el efecto del aumento en la proporción de NH_4^+ sobre el ion Zn puede atribuirse al impacto del NH_4^+ sobre el pH de la rizosfera (figuras 2-2 y 2-4).

2.2 Contenido de NO_3^- en lixiviado

La concentración del ion NO_3^- en el lixiviado muestra diferencias estadísticamente significativas en función de la concentración del N total en la fórmula de fertirriego, lo cual se verificó en las 16 y 26 SDS, cuando el contenido de NO_3^- en el tratamiento 140-112 N fue menor en comparación con 200-160 N, con un 49,5 y 41,1 % menos NO_3^- en el lixiviado, respectivamente (figura 2-3). La diferencia no significativa en la 21 SDS probablemente se debe al cambio de fórmula de fertirriego de fase vegetativa a reproductiva. Hong *et al.* (2014) mostraron que los sistemas intensivos de producción de tomate en invernadero pueden llevar a valores de N lixiviado de hasta 788,6 kg ha⁻¹ (65,7 kg ha⁻¹ de N por día) equivalente al 89,4 % del $\text{NO}_3\text{-N}$ aplicado. La magnitud de la pérdida de iones por lixiviación es proporcional a la concentración del elemento en la solución del suelo y a la cantidad de agua drenada (Ghiberto *et al.*, 2009).

Figura 2-3: Valores promedio del contenido de nitrato en el lixiviado de un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro, con disminución del N total en la fórmula de fertirriego. Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

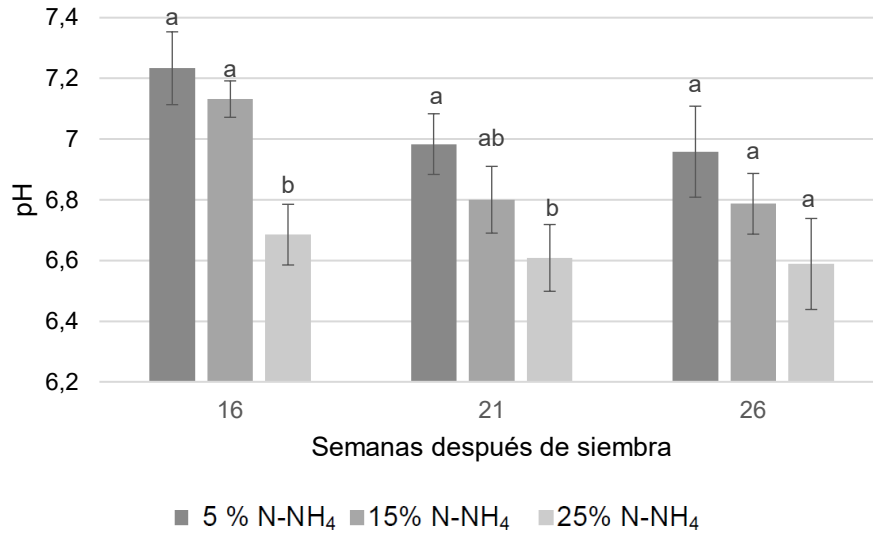


Fuente: Baracaldo *et al.* (2018)

2.3 pH en el sustrato

Se evidencia una disminución del pH en el sustrato en la medida en que se aumenta el porcentaje de NH_4^+ , con diferencias estadísticas significativas en las 16 y 21 SDS (figura 2-4). En geranio, petunia e *Impatiens*, Dickson *et al.* (2016) reportaron que el pH del sustrato varía con la especie y la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$. Con la solución de 0 % NH_4^+ todas las especies mostraron una reacción básica, con valores mayores en petunia en comparación con las otras dos especies; en la solución con 10 % NH_4^+ , geranio e *Impatiens* mostraron una reacción neutra y petunia básica, y en la solución con 20 % NH_4^+ , geranio e *Impatiens* presentaron una reacción ácida, y en petunia sin diferencia del pH neutro. De manera similar, en *Ozothamnus diosmifolius*, Silber (2009) reportó que el aumento en la concentración de NH_4^+ , por incremento en la concentración total de N o en la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$, resulta en una marcada disminución del pH, presentándose los menores valores (pH 4-5) en la concentración 150 de N total y en la relación 3:1. A pesar de que la toxicidad provocada por altas concentraciones de NH_4^+ en la solución del suelo se debe a una marcada disminución del pH (Silber, 2009; Esteban *et al.*, 2016), como en el presente estudio se utilizó un sustrato con tendencia a valores de pH altos (pH ~7) (Vélez *et al.*, 2022), la disminución del pH en el sustrato habría generado un efecto benéfico al cultivo, con los valores alcanzados en los tratamientos con mayor porcentaje de amonio (pH = 6,6), lo cual, como es ampliamente descrito en la literatura (Taiz *et al.*, 2015; Neumann y Römheld, 2012), aumenta la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes.

Figura 2-4: Valores promedio del pH en el sustrato de un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro sometidas a incrementos en el componente amoniacal de la fertilización nitrogenada.



Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

Fuente: Baracaldo *et al.* (2018)

2.4 Balance de nitrógeno

El contenido de N en el tejido vegetal no presentó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, mientras que el valor del contenido de N en lixiviado del tratamiento 200-160 N fue mayor que en el tratamiento con disminución del contenido de N en el fertirriego (tabla 2-1). Lo anterior evidencia una posible sobrefertilización con este nutriente, en razón a que, a pesar de disminuir la concentración del N aplicado, no se presenta un menor contenido de N en el tejido vegetal, y se observa mayor pérdida de N en el lixiviado. Cabrera (2003), por el contrario, determinó en *Ilex* y *Lagerstroemia*, que son especies ornamentales leñosas, una relación directa entre la concentración de N aplicado en la solución de fertirriego y el porcentaje de este ion en el tejido foliar; sin embargo, las pérdidas de N por lixiviación se incrementaron de 17,4 %, en las plantas con la concentración más baja de N (15 mg L^{-1}), a 52 % para las fertirrigadas con concentraciones mayores (210 y 300 mg L^{-1}), resultados similares a los hallados en el presente estudio.

Tabla 2-1: Valores promedio del contenido de nitrógeno aplicado, absorbido y lixiviado en un sistema de cultivo sin suelo con plantas de clavel cv. Don Pedro sometidas a disminución de 30 % del N total en la fórmula de fertirriego.

Nitrógeno	200-160 N*	140-112 N*
	(kg ha ⁻¹)	
Aplicado	1932	1551
Tejido vegetal	218,6 a	209,5 a
Lixiviado	1381,9 a	740,1 b

Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey (P<0,05).

*Concentraciones de N total (mg L⁻¹) para las fases vegetativa y productiva del cultivo, respectivamente.

2.5 Análisis de crecimiento

Entre los tratamientos evaluados, la fórmula con menos N total y menor porcentaje de NH₄⁺ (140-112 N-5 % N-NH₄) mostró un número de tallos por planta significativamente mayor que la fórmula con más N total, con los porcentajes más altos del componente amoniacal (tabla 2-2); entre tanto, para las variables longitud (promedio 89,6 cm) y diámetro del tallo floral (promedio 6,5 mm) no se encontraron diferencias significativas (tabla 2-2). Tampoco se constataron diferencias estadísticas significativas en las variables número de hojas (promedio de 29,1 hojas por tallo), longitud (entre 42 y 53 mm) y diámetro (promedio de 22 mm) del botón floral. De esta forma, se pone de manifiesto que es viable mantener atributos de calidad e incluso mejorar la productividad con una fórmula de fertirriego más conservadora en el componente nitrógeno.

Este hallazgo es coherente con los aumentos significativos en variables de productividad y calidad reportados por Kumar *et al.* (2016) con hasta 150 mg L⁻¹ de N en plantas de clavel cv. Red Corso. Al respecto de la relación NO₃⁻:NH₄⁺, de manera similar a lo aquí reportado, Khalaj *et al.* (2017) obtuvieron los mayores valores en las variables evaluadas en Gerbera cv. Stanza y Double Dutch con el menor porcentaje de amonio, es decir, la relación 80:20. Sin embargo, Dufour y Guérin (2005) encuentran en anturio mejoras en desarrollo y rendimiento con el aumento de la relación NH₄⁺:NO₃⁻ hasta 0,37 del N total.

Este estudio corrobora que concentraciones de 140-112 mg L⁻¹ de N en las fases vegetativa y reproductiva, respectivamente, serían apropiadas para el normal desarrollo de las plantas, y que el número menor de tallos por planta en los tratamientos con mayor concentración de N total podría deberse a los mayores porcentajes de N-NH₄.

Tabla 2-2: Valores promedio de la longitud, diámetro y número de tallos por planta en plantas de clavel estándar cv. Don Pedro sembrado en sustrato y sometido a disminución del N total y a incrementos en el componente amoniacal en la fórmula de fertirriego.

Tratamientos		Semana después de siembra																	
		10	12	14	16	18	20	22	24	26									
N total (mg L ⁻¹)	N-NH ₄ (%)	Número de tallos por planta																	
200-160*	5	8,3	a	8,5	ab	8,8	ab	9,2	ab	9,2	ab	8,8	ab	8,8	ab	8,8	ab	8,8	ab
	15	7,7	a	7,8	b	7,8	b	7,8	b	7,8	b	7,8	b	7,8	b	7,8	b	7,8	b
	25	7,8	a	8,2	ab	8,2	ab	8,2	b	8,2	b	8,2	b	8,2	b	8,2	b	8,1	b
140-112*	5	10,0	a	10,3	a	10,3	a	10,7	a	10,7	a	10,7	a	10,5	a	10,5	a	10,4	a
	15	9,0	a	9,0	ab	9,0	ab	9,2	ab	9,3	ab	9,3	ab	9,3	ab	9,3	ab	9,2	ab
	25	7,8	a	8,2	ab	8,2	ab	8,5	ab	8,5	ab	8,5	ab	8,5	ab	8,5	ab	8,4	ab
Error estándar		0,23		0,23		0,23		0,23		0,22		0,23		0,22		0,22		0,22	
N total (mg L ⁻¹)	N-NH ₄ (%)	Longitud de tallo (cm)																	
200-160*	5	12,5	a	16,9	ab	26,6	a	37,5	a	56,8	a	76,5	a	82,6	a	88,3	a	92,8	a
	15	14,1	a	17,0	ab	28,0	a	42,7	a	66,0	a	81,3	a	86,6	a	86,6	a	87,5	a
	25	14,3	a	18,3	ab	27,8	a	42,8	a	63,5	a	78,8	a	85,7	a	87,2	a	88,0	a
140-112*	5	13,9	a	18,7	ab	28,3	a	42,2	a	62,0	a	79,5	a	87,5	a	88,6	a	88,6	a
	15	14,0	a	20,5	a	30,1	a	45,4	a	62,8	a	79,4	a	84,7	a	90,4	a	91,8	a
	25	13,4	a	15,7	b	23,2	a	39,5	a	60,9	a	77,8	a	85,3	a	87,8	a	89,0	a
Error estándar		0,36		0,41		0,77		1,37		1,98		1,17		1,16		1,08		1,25	
N total (mg L ⁻¹)	N-NH ₄ (%)	Diámetro del tallo (mm)																	
200-160*	5	5,1	a	5,6	a	6,3	a	6,4	a	6,4	a	6,2	a	6,4	a	6,5	a	6,2	a
	15	5,8	a	6,5	a	7,1	a	7,4	a	7,3	a	7,0	a	6,8	a	6,9	a	6,9	a
	25	5,2	a	5,9	a	6,8	a	7,1	a	7,1	a	7,0	a	6,8	a	6,8	a	6,8	a
140-112*	5	4,3	a	5,5	a	6,8	a	7,3	a	7,2	a	6,9	a	6,4	a	6,4	a	6,4	a
	15	5,6	a	6,1	a	6,6	a	7,0	a	6,8	a	6,7	a	6,7	a	6,8	a	6,6	a
	25	5,3	a	6,2	a	6,8	a	7,3	a	7,1	a	6,9	a	6,6	a	6,6	a	6,5	a
Error estándar		0,15		0,1		0,09		0,1		0,1		0,12		0,09		0,09		0,11	

*La primera concentración es la utilizada en el periodo vegetativo y la segunda en el periodo reproductivo.

Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey (P<0,05).

2.5.1 Tasas e índices de crecimiento

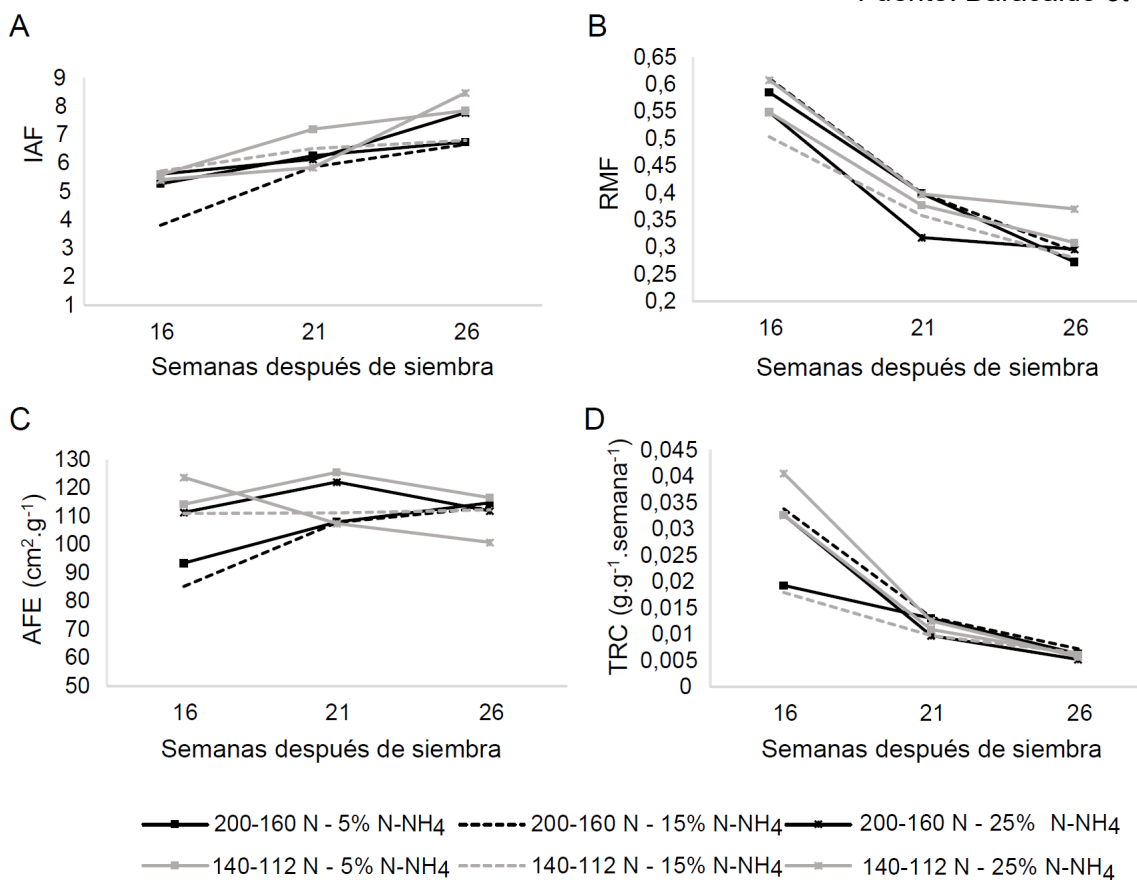
En la figura 2-5 se muestran las tasas e índices calculados (IAF, RMF, AFE, TRC y TAN) que, aunque no presentaron diferencias estadísticas significativas en ninguno de los tres muestreos, indican las tendencias de dichas variables con la finalidad de entender el comportamiento fisiológico de las plantas sometidas a los tratamientos.

Según lo esperado, el IAF presentó un patrón de crecimiento gradual en todos los tratamientos, con tendencia a mostrar un mejor desempeño en los tratamientos con menor cantidad de N total, de forma independiente de la concentración de NH₄⁺ (figura 2-5A). Cuando el área foliar intercepta el máximo de radiación fotosintéticamente activa se obtiene el IAF óptimo (Hunt, 1978). Teniendo en cuenta el área foliar de plantas enteras de clavel cv. Nelson cultivadas en sustrato, Cárdenas *et al.* (2006) reportaron valores máximos

de IAF entre 4,4 y 4,8; entre tanto, con el mismo cv., a segundo pico de cosecha, Baracaldo *et al.* (2010) informaron valores máximos entre 7,5 y 8,7, similares a los obtenidos en el presente estudio. Por lo aquí expuesto, los valores de IAF dependen, entre otros factores, del tipo de planta, variedad, estadio fenológico de desarrollo y manejo agronómico. Con un mejor uso de N por parte de la planta se optimiza el metabolismo del carbono, en razón a que estos metabolismos están regulados entre sí (Maldonado *et al.*, 2013), y el área foliar incide sobre la ganancia fotosintética de carbono, lo cual se refleja en la tasa de crecimiento de la planta (Taiz *et al.*, 2015), por la síntesis de nueva biomasa.

Figura 2-5: Comportamiento de plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato y sometidas a incrementos en el componente amoniacal de dos fórmulas de fertirriego. A. Índice de área foliar (IAF); B. Relación masa foliar (RMF); C. Área foliar específica (AFE); D. Tasa relativa de crecimiento (TRC).

Fuente: Baracaldo *et al.* (2019)



En todos los tratamientos se hace evidente un decrecimiento de la RMF desde el inicio del ensayo (figura 2-5B), lo que indica una inversión de fotoasimilados en la formación de otras estructuras de la planta. Los mayores valores de esta variable se presentaron en los

tratamientos 200-160 N-15 % N-NH₄⁺ (fórmula comercial) y 140-112 N-25 % N-NH₄⁺ a las 16 SDS. A pesar de que este último tratamiento presentaba una mayor proporción de amonio, la acumulación de masa seca foliar no se vio afectada.

Cuando se aumenta a 25 % de N-NH₄⁺ en la fórmula alta en N, tiende a disminuir la cantidad de biomasa que se redirecciona hacia otras estructuras de la planta, por lo que se infiere que en el tratamiento 200-160 N-5 % N-NH₄ las plantas direccionarían mayor masa seca para la formación de botones florales, como se observa en la 26 SDS (tabla 2-3). El marcado decrecimiento de la RMF de la 16 a la 21 SDS en todos los tratamientos coincide con el momento de las máximas TAC para la formación de botones florales (18 y 19 SDS). Esta relación se ralentiza entre 21 y 26 SDS, en la medida en que dichas estructuras alcanzan su desarrollo definitivo.

Tabla 2-3: Valores promedio de masa seca de plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato, con disminución del N total e incrementos en el componente de N-NH₄⁺ en la fórmula de fertirriego.

Semana después de siembra	Tratamiento		Masa seca (g)				
	N total (mg L ⁻¹)	N-NH ₄ (%)	Hojas	Tallos	Raíz	Botón	Total
16	200-160*	5	16,9	11,1	1,0		29,0
		15	13,5	7,9	0,7		22,1
		25	15,0	12,4	0,8		28,2
	140-112*	5	15,4	11,7	0,9		28,0
		15	15,5	14,2	0,9		30,6
		25	12,9	7,7	0,6		21,2
21	200-160*	5	17,6	25,8	1,7	3,3	48,4
		15	16,4	23,1	0,9	0,9	41,4
		25	15,1	27,7	1,3	2,3	46,5
	140-112*	5	17,2	25,6	1,6	1,1	45,4
		15	18,0	28,3	1,4	1,8	49,4
		25	16,4	22,3	1,8	1,3	41,8
26	200-160*	5	17,7	33,1	2,9	12,3	65,9
		15	17,7	32,1	2,3	8,2	60,3
		25	20,9	35,2	2,6	7,6	66,3
	140-112*	5	20,2	35,0	2,4	10,8	68,4
		15	18,3	36,9	2,1	8,0	65,4
		25	25,8	33,5	2,1	11,2	72,6

*La primera concentración es la utilizada en el periodo vegetativo, y la segunda en el periodo reproductivo.

En la figura 2-5C se muestra el comportamiento del AFE. Si bien en los tratamientos 200-160 N-5 % N-NH₄ y 200-160 N-15 % N-NH₄ a la 16 SDS se inicia con un menor AFE, junto con los tratamientos 200-160 N-25 % N-NH₄ y 140-112 N-5 % N-NH₄ conforman un mismo perfil de respuesta; es decir, disponen de una mayor área foliar en relación con su masa

seca, comportándose entre la 16 y la 21 SDS como fuentes de carbohidratos para los órganos vertederos. Los demás tratamientos, aunque son fuentes de asimilados, exportan de manera menos eficiente: en 140-112 N-15 % N-NH₄ se exporta lo que se sintetiza, sin afectar el AFE, y en 140-112 N-25 % N-NH₄ se transloca menos de lo que se sintetiza, disminuyendo el AFE y manteniendo buena parte de la biomasa que sintetiza en las hojas (tabla 2-3). Un alto AFE indica mayor área foliar con hojas livianas y, en consecuencia, mayor capacidad de captación de luz y elaboración de carbohidratos. Una respuesta de incremento del AFE señala partición constante de carbohidratos hacia vertederos con alta demanda. Con las fórmulas de fertirriego más conservadoras en N total, el componente amoniacal desempeñaría un papel preponderante, donde el porcentaje más alto afecta negativamente el AFE, como ocurre con el tratamiento 140-112 N-25 % N-NH₄ (figura 2-5C).

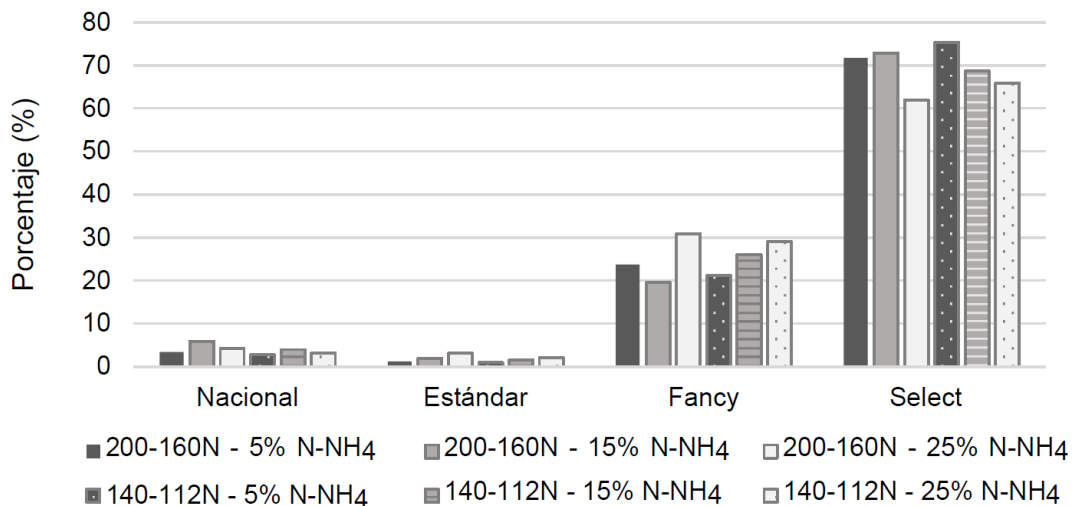
Para la TRC se observan dos grupos de respuesta (figura 2-5D): en el grupo de tratamientos con TRC más alta se destaca 140-112 N-25 % N-NH₄, con lo cual se entiende que es el tratamiento más eficiente en la acumulación de nueva biomasa al sistema. Este comportamiento se refleja en las hojas con el AFE más bajo hacia la 26 SDS (figura 2-5C), lo cual se explica al disminuir el área foliar y aumentar su biomasa, como se constata en la tabla 2-3, donde también se verifica que en este tratamiento la planta invirtió más masa seca en hojas y en botón floral, a expensas del tallo y la raíz. En el segundo grupo, de TRC iniciales más bajas (200-160 N-5 % N-NH₄ y 140-112 N-15 % N-NH₄), independientemente de la concentración de N total, no se encuentran los porcentajes de amonio más altos; estos estimularían la acumulación de nueva biomasa inicial. Según Grime y Hunt (1975), los valores más altos de TRC se obtienen en las plantas que crecen en condiciones de mayor fertilidad. En gerbera, el aumento de la proporción de NH₄⁺ en la solución de nutrientes tuvo como resultado mayores masas fresca y seca en la parte aérea y la raíz, con valores más altos en la relación 80:20 (NO₃⁻:NH₄⁺) (Khalaj *et al.*, 2017).

2.6 Productividad y calidad

Teniendo en cuenta el factor nitrógeno, no se encontró diferencia estadística significativa entre los tratamientos 200-160 N y 140-112 N, con promedios de productividad de 83,5 y 87,9 tallos/m² de área de invernadero, respectivamente, de lo que se infiere que el mismo nivel de productividad se puede alcanzar con menos nitrógeno total en la fórmula. Sin embargo, los incrementos en las dosis de N usados por Thakulla *et al.* (2018) en clavel exótico var. Chabaud tuvieron un efecto positivo en la mayoría de los parámetros atribuidos a crecimiento y floración, con excepción de la máxima dosis que retardó el tiempo hasta el inicio de la floración.

De otro lado, habría disminución del porcentaje de tallos en el grado de calidad Select en la medida en que se aumenta el porcentaje de amonio, con el consecuente incremento del porcentaje de tallos en el grado de calidad Fancy (figura 2-6). Una productividad de cuatro tallos más por m², con un grado de calidad superior, así como la economía en el costo del fertilizante y en el impacto ambiental redundarían en el ejercicio financiero del productor. Los logros en productividad y en atributos de calidad en función de relaciones particulares de NH₄⁺:NO₃⁻ fueron abordados por Tabatabaei *et al.* (2006) en fresa, con fundamento en mejor nutrición a base de calcio e incrementos en área foliar y tasa de fotosíntesis, y, para la misma especie, con mejores valores de SPAD y rendimiento cuántico del PSII (Fv/Fm) (Roosta, 2014), o en tulipán, con máximas concentraciones de Ca y Mg, longevidad floral, masa seca y óptimos de N, P y K (Abasi *et al.*, 2016).

Figura 2-6: Calidad de tallos florales de clavel cv. Don Pedro de plantas sembradas en sustrato sometidas a distintos tratamientos de fertilización nitrogenada.

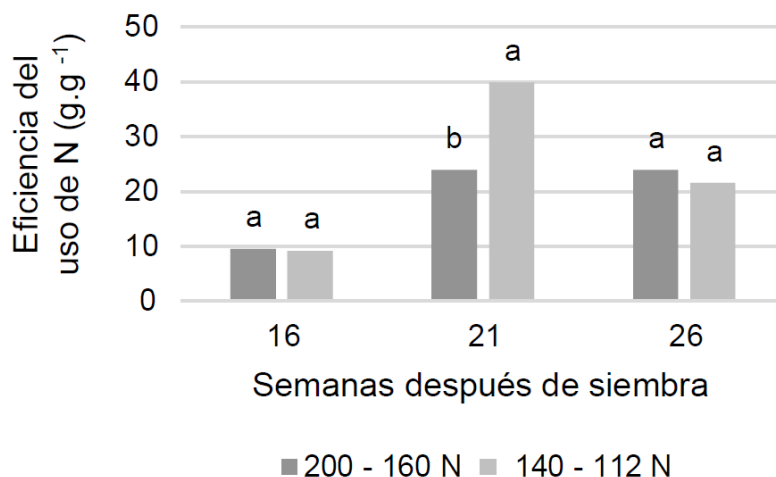


Fuente: Baracaldo *et al.* (2019)

2.7 Eficiencia del uso del nitrógeno (EUN)

En la figura 2-7 se pone de manifiesto que en la 21 SDS se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, con un valor mayor en la EUN para las plantas del tratamiento 140-112 N en comparación con el tratamiento de mayor concentración de N; esto indica que la ganancia de esa masa seca tuvo como resultado un uso más eficiente de N. La producción de masa seca está estrechamente relacionada con la EUN, y como en el experimento no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los valores de masa seca (tabla 2-3), por ende las plantas fertilizadas con la concentración de N más baja presentan valores más altos de EUN. Para lograr una mayor EUN en clavel cv. Gaduina, según Muthukrishnan *et al.* (2014), se requiere una liberación constante del N incorporado al suelo.

Figura 2-7: Valores promedio de la eficiencia en el uso de nitrógeno en plantas de clavel cv. Don Pedro sembradas en sustrato bajo distintos tratamientos de fertilización nitrogenada. Promedios seguidos con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).



Fuente: Baracaldo *et al.* (2019)

3. Conclusiones

La disminución de N total en la fórmula de fertirriego generó en el tejido vegetal un contenido mayor de Cu y de Zn, sin diferencia en el contenido de N, y con menor contenido de NO_3^- en el lixiviado. Con lo anterior se obtiene una mejor EUN, que mitiga el impacto ambiental negativo de este nutriente en el medio ambiente. En las 16 y 26 SDS, el contenido de NO_3^- en el lixiviado fue menor en el tratamiento 140-112 N en comparación con el tratamiento 200-160 N, con 49,5 y 41,1 % menos NO_3^- , respectivamente.

El aumento de la relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ incrementó los contenidos de N y Zn y disminuyó el de Mg en el tejido vegetal; también disminuyó el pH de los sustratos.

En ambas fórmulas de fertirriego se obtuvieron productividades y calidades similares, y el componente amoniacal desempeña un papel preponderante: el número de tallos florales por planta disminuiría en la medida que se aumenta este componente, de manera similar a lo observado con el porcentaje de tallos florales en grado de calidad Select.

Bibliografía

- Abasi, H., M. Babalar, H. Lessani y R. Naderi. 2016. Effects of nitrogen form of nutrient solution on uptake and concentration macro element and morphological trait in hydroponic tulip. *J. Plant Nutr.* 39(12):1745-1751. DOI: 10.1080/01904167.2016.1201110.
- Acuña C., J.F. y D.M. Ortiz P. 2004. Estructuras de invernadero: la experiencia colombiana. pp. 83-107. En: Acuña C., J.F., D.L. Valera M. y J.C. Avendaño (eds.). *Invernaderos: La experiencia iberoamericana*. Almería: Programa Cytel. 197p.
- Alloway, B.J. 2008. *Zinc in soils and crop nutrition*, 2.^a ed. París: IZA e IFA. 135 p.
- Asocolflores 2021. Boletín de exportación de clavel. 21p.
- Baracaldo A., A. del P., A. Ibaque O. y V.J. Flórez R. 2010. Tasas e índices de crecimiento a segundo pico de cosecha en clavel estándar cv. Nelson cultivado en suelo y en sustratos. *Agron. Colomb.* 28(2):209-217. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/18063/37682>. Consulta: junio de 2020.
- Baracaldo, A. del P., M.C. Díaz, V.J. Flórez, C.A. González. 2018. Efecto de la disminución de N total y aumento de NH_4^+ en la fórmula de fertirriego en el cultivo de clavel. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 12(3):658-667. DOI: 10.17584/rcch.2018v12i3.8062.
- Baracaldo, A. del P., V.J. Flórez, C.A. González. 2019. Es posible mantener estándares de productividad y calidad en clavel con menos nitrógeno en la fórmula de fertirriego. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 13(2):279-290. DOI: 10.17584/rcch.2019v13i2.8068.
- Barker, A. y G. Bryson. 2007. Nitrogen. pp. 22-23. En: Barker, A.V. y D.J. Pilbeam (eds.). *Handbook of plant nutrition*. Boca Raton: CRC Press-Taylor and Francis. 632p.
- Bar-Yosef, B. 2008. Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses. pp. 341-424. En: Raviv, M. y J.H. Lieth (eds.). *Soilless culture: theory and practice*. 1.^a ed. Oxford: Elsevier, 608p. DOI: 10.1016/B978-044452975-6.50011-3.

- Broadley, M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel y F. Zhao. 2012. Function of nutrients: micronutrients. pp. 191-248. En: Marschner, P. (ed.). Mineral nutrition of higher plants. 3.ª ed. Ámsterdam: Elsevier. 672p. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8.
- Cabrera, R.I. 2003. Nitrogen balance for two container-grown woody ornamental plants. *Sci. Hortic.* 97(3-4):297-308. DOI: 10.1016/S0304-4238(02)00151-6.
- Cabrera, R.I. 2006. Consideraciones sobre nutrición mineral y fertilización en rosas. pp. 145-161. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda, B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Cameron, K.C., H.J. Di y J.L. Moir. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Ann. Appl. Biol.* 162(2):145-173. DOI: 10.1111/aab.12014.
- Cárdenas M., C.A., I.F. Rivera G., V.J. Flórez R., B. Chaves C. y W. Piedrahíta C. 2006. Growth analysis of standard carnation cv. "Nelson" in different substrates. *Acta Hortic.* 718:623-629. DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.718.73.
- Carrillo P., I.F., B. Mejía M. y A. Franco H.F. 1994. Manual de laboratorio para análisis foliares. Cenicafé, Chinchiná. 52p.
- Casas O., N.R., 2015. Evaluación de la modificación del contenido de nitrógeno en una fórmula de fertirriego usada en el cultivo de miniclavel variedad Rony cultivado en sustrato. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Cui, J., C. Yu, N. Qiao, X. Xu, Y. Tian y H. Ouyang. 2017. Plant preference for NH_4^+ versus NO_3^- at different growth stages in an alpine agroecosystem. *F. Crop. Res.* 201(3):192-199. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.11.009.
- Dickson, R.W., P.R. Fisher, W.R. Argo, D.J. Jacques, J.B. Sartain, L.E. Trenholm y T.H. Yeager. 2016. Solution ammonium: nitrate ratio and cation/anion uptake affect acidity or basicity with floriculture species in hydroponics. *Sci. Hortic.* 200(2016):36-44. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.12.034.
- Dufour, L. y V. Guérin. 2005. Nutrient solution effects on the development and yield of *Anthurium andreaeanum* Lind. in tropical soilless conditions. *Sci. Hortic.* 105(2):269-282. DOI: 10.1016/j.scienta.2005.01.022.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) 2009. National primary drinking water regulations. EPA 816-F-09-004. Disponible en: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulation-table>. Consulta: junio 2020.

- Escandón L., J.D. 2009. Propuesta logística para el desarrollo de la exportación de rosas y claveles a Estados Unidos para la comercializadora Export Flexy Ltda. Tesis de grado. Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 143p.
- Esteban, R., I. Ariz, C. Cruz y J.F. Moran. 2016. Review: Mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. *Plant Sci.* 248(2016):92-101. DOI: 10.1016/j.plantsci.2016.04.008.
- Fageria, F.K. 2016. Functions of nitrogen in crop plants. pp. 1-66. En: Fageria, F.K. (ed.). Nitrogen management in crop production. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group. 436p.
- FAO. 2017. World fertilizer trends and outlook to 2020. Summary report. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations. 27p.
- Flórez, R., V.J., R. Parra R., M. Rodríguez S. y D.E. Nieto C. 2006a. Características y fundamentos del proyecto "Producción más limpia de rosa y clavel con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá". pp. 3-40. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández M., D. Miranda L., B. Chaves C. y J. M. Guzmán P. (eds.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Flórez R., V.J., D. Miranda L., B. Chaves C., L.A. Chaparro T., C.A. Cárdenas M. y A. Farías A. 2006b. Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo en suelo y en sustrato. pp 43-52. En: Flórez R., V.J., A. de la C. Fernández, D. Miranda L., B. Chaves C. y J.M. Guzmán P. (eds). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá: Unibiblos. 500p.
- Florián-Martínez, P. y D. Roca. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. pp. 37-78. En: Flórez R., V.J. (ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 292p.
- Gárate A. e I. Bonilla. 2013. Nutrición mineral y producción vegetal. pp. 143-164. En: Azcón-Bieto, J. y M. Talón. (ed.). 2.^a ed. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid: McGraw Hill- Interamericana de España S.L. 651p.
- Ghiberto, P.J., P.L. Libardi, A.S. Brito y P.C.O. Trivelin. 2009. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an ultisol in Brazil. *Agric. Water Manag.* 96(10):1443-1448. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.04.020.
- González G., J.L., M. de las N. Rodríguez M., P. Sánchez G. y E.A. Gaytán A. 2009. Relación amonio/nitrato en la producción de hierbas aromáticas en hidroponía. *Agric.*

- Téc. Méx. 35(1):5-11. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v35n1/v35n1a1.pdf>. Consulta: junio de 2020.
- Good, A.G., Shrawat, A.K. y D.G. Muench. 2004. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends Plant Sci.* 9(12):597-605. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.10.008.
- Grime, J.P. y R. Hunt. 1975. Relative growth-rate: its range and adaptive significance in a local flora. *J. Ecol.* 63(2):393. DOI: 10.2307/2258728.
- Hawkesford, M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I. Møller y P. White. 2012. Functions of macronutrients. pp 135-189. En: Marschner, P. (ed.). *Mineral nutrition of higher plants*, 3.^a ed. San Diego: Academic Press. 672p.
- Helali, S.M., H. Nebli, R. Kaddour, H. Mahmoudi, M. Lachaâl y Z. Ouerghi. 2010. Influence of nitrate-ammonium ratio on growth and nutrition of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Soil.* 336(1):65-74. DOI: 10.1007/s11104-010-0445-8.
- Hirel, B. y A. Krapp. 2020. Nitrogen utilization in plants I Biological and agronomic importance En; Reference module in life sciences. París: Elsevier. 14p. DOI: 10.1016/B978-0-12-809633-8.21265-X.
- Hong, E.M., J.Y. Choi, W.H. Nam, M.S. Kang y J.R. Jang. 2014. Monitoring nutrient accumulation and leaching in plastic greenhouse cultivation. *Agric. Water Manag.* 146:11-23. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.07.016.
- Hunt, R. 1978. *Plant growth analysis*. London: Edward Arnold Publishers. 67p.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). 2015. Relación entre el consumo aparente de fertilizantes y la superficie bajo uso agrícola. Disponible en DANE. www.dane.gov.co. Consulta: abril de 2017.
- Jin, X., G. Yang, C. Tan y C. Zhao. 2015. Effects of nitrogen stress on the photosynthetic CO₂ assimilation, chlorophyll fluorescence, and sugar-nitrogen ratio in corn. *Sci. Rep.* 5:1-9. DOI: 10.1038/srep09311.
- Kant, S. 2018. Understanding nitrate uptake, signaling and remobilisation for improving plant nitrogen use efficiency. *Semin. Cell Dev. Biol.* 74:89-96. DOI: 10.1016/j.semcdb.2017.08.034.
- Khalaj, M.A., S. Kiani, A.H. Khoshgoftarmanesh y R. Amoaghaie. 2017. Growth, quality, and physiological characteristics of gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) cut flowers in response to different NO₃⁻:NH₄⁺ ratios. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 58(4):313-323. DOI: 10.1007/s13580-017-0067-7.
- Kraiser T., D. Gras, A. Gutiérrez, B. González y R. Gutiérrez. 2011. A holistic view of

- nitrogen acquisition in plants. *J. Exp. Bot.* 62(4):1455-1466. DOI: 10.1093/jxb/erq425.
- Kumar, A., G.S. Rana, R. Sharma, Prince y D.S. Dahiya. 2016. Flowering of carnation as influenced by different levels of nitrogen and *Azotobacter* strains. *Indian Hortic. J.* 6(2):222-225. DOI: 283-16-ihj-1402-2016-57.
- Kumar, V., V.S. Ahlawat y R.S. Antil. 1985. Interactions of nitrogen and zinc in pearl millet: 1. Effect of nitrogen and zinc levels on dry matter yield and concentration and uptake of nitrogen and zinc in pearl millet. *Soil Sci.* 139:351-356. DOI: 10.1097/00010694-198504000-00009.
- Li, J., J.M. Zhou y Z.Q. Duan. 2007. Effects of elevated CO₂ concentration on growth and water usage of tomato seedlings under different ammonium/nitrate ratios. *J. Environ. Sci.* 19(9):1100-1107. DOI: 10.1016/S1001-0742(07)60179-X.
- Liu, G., Q. Du y J. Li. 2017. Interactive effects of nitrate-ammonium ratios and temperatures on growth, photosynthesis, and nitrogen metabolism of tomato seedlings. *Sci. Hortic.* 214(1):41-50. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.09.006.
- Lorenzo, H., M.C. Cid. J.M. Siverio y M. Caballero. 2000. Influence of additional ammonium supply on some nutritional aspects in hydroponic rose plants. *J. Agric. Sci.* 134(4):421-425. DOI: 10.1017/S0021859699007728.
- Lorenzo, P., Medrano, E. y García, M. 1993. Irrigation management in perlite. *Acta Hortic.* 335:429-434. DOI: 10.17660/ActaHortic.1993.335.52.
- Lupini, A., M.P. Princi, F. Araniti, A.J. Miller, F. Sunseri y M.R. Abenavoli. 2017. Physiological and molecular responses in tomato under different forms of N nutrition. *J. Plant Physiol.* 216:17-25. DOI: 10.1016/j.jplph.2017.05.013.
- Maldonado, J.M., E. Agüera y R. Pérez-Vicente. 2013. Asimilación del nitrógeno y del azufre. pp. 287-303. En: Azcón-Bieto, J. y M. Talón. (ed.). 2.^a ed. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid: McGraw Hill-Interamericana de España S.L. 651p.
- Mengel, K. y E.A. Kirkby. 2001. *Principles of plant nutrition*, 5.^a ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 849p.
- Muthukrishnan, R., K. Arulmozhiselvan, M. Jawaharlal, T. Padmavathi, V.P. Duraisami, S. Krishnakumar y S. Rameshkumar. 2014. Recovery of fertilizer nitrogen by carnation grown with nutri-pellet pack and soil nitrogen retention using 15 N tracer. *Res. Environment Life Sci.* 7(4):271-274.
- Nacry, P., E. Bouguyon y A. Gojon. 2013. Nitrogen acquisition by roots: physiological and developmental mechanisms ensuring plant adaptation to a fluctuating resource. *Plan.*

- Soil. 310:1-29. DOI: 10.1007/s11104-013-1645-9.
- Navarro, S. y G. Navarro. 2003. Química agrícola. 2.^a ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 487p.
- Neumann, G. y V. Römheld. 2012. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. pp. 347-368. En: Marschner, P. (ed.). Mineral nutrition of higher plants. 3.^a ed. Ámsterdam: Elsevier. 672p.
- Observatorio Ambiental de Bogotá (OAB). 2019. Documentos e investigación: Decreto 1594 de 1984: Disponible en: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/comunidad//decreto-1594-de-1984>. Consulta: mayo de 2019.
- Ordóñez D., N. y A. Bolívar G. 2014. Levantamiento agrológico del Centro Agropecuario Marengo (CAM). Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. 392 p.
- Parra T., S., P. Lara M., M. Villareal R. y S. Hernández V. 2012. Crecimiento de plantas y rendimiento de tomate en diversas relaciones nitrato/amonio y concentraciones de bicarbonato. Rev. Fitotec. Mex. 35(2):143-153. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000200006&lng=es&nrm=iso. Consulta: junio de 2020.
- Rehman, A., M. Farooq, L. Ozturk, M. Asif y K.H.M. Siddique. 2018. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. Plant Soil. 422(1-2):283-315. DOI: 10.1007/s11104-017-3507-3.
- Reid, M. y D. Hunter. 2000. Manejo de la poscosecha. Biología y tecnología de la poscosecha. pp. 165-181. En: Pizano de Marquez, M. (ed.). Clavel (*Dianthus caryophyllus*). Bogotá: Ediciones Hortitecna Ltda. 181 p.
- Rice, E.W., R.B. Baird, A.D. Eaton y L.S. Clesceri. 1967. Standard methods for the examination of water and wastewater. 12.^a ed. Washington D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association. 769p.
- Roosta, H.R. 2014. Effect of ammonium: nitrate ratios in the response of strawberry to alkalinity in hydroponics. J. Plant Nutr. 37(10):1676-1689. DOI: 10.1080/01904167.2014.888749.
- Savvas, D., H.C. Passam, C. Olympos, E. Nasi, E. Moustaka, N. Mantzos y P. Barouchas. 2006. Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. HortScience. 41(7):1667-1673. DOI: 10.21273/HORTSCI.41.7.1667.
- Silber, A. 2009. Impact of solution-NH₄ concentrations on soilless-grown plants: Benefits and constraints. Acta Hort. 819:373-380. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.819.45.

- Tabatabaei, S.J., L.S. Fatemi y E. Fallahi. 2006. Effect of ammonium: nitrate ratio on yield, calcium concentration, and photosynthesis rate in strawberry. *J. Plant Nutr.* 29(7):1273-1285. DOI: 10.1080/01904160600767575.
- Taiz L., E. Zeiger, I.M. Møller, A. Murphy. 2015. *Plant physiology and development*. 6.^a ed. Sunderland: Sinauer Associates Incorporated. 690p.
- Thakulla, D., A. Khanal y L.R. Bhatta. 2018. Adaptability of exotic variety of carnation (*Dianthus Caryophyllus* var. Chabaud) under different doses of nitrogen. *Int. J. Hort. Agric.* 3(2):1-3. DOI: 10.15226/2572-3154/3/2/00120.
- Ucar, Y., S. Kazaz, F. Eraslan y H. Baydar. 2017. Effects of different irrigation water and nitrogen levels on the water use, rose flower yield and oil yield of *Rosa damascena*. *Agric. Water Manag.* 182:94-102. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.12.004.
- Vélez C., N.A., V.J. Flórez R. y A.F. Flórez R. 2014a. Comportamiento de variables químicas en un sistema de cultivo sin suelo para clavel en la Sabana de Bogotá. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín.* 67(2):7281-7290. DOI: 10.15446/rfnam.v67n2.44170.
- Vélez-Carvajal, N.A., Melo-Martínez, S.E. y Flórez-Roncancio, V.J. 2014b. Comportamiento de Ca, Mg y S en un sistema de cultivo sin suelo para clavel. *Rev. Chapingo. Ser. Hortic.* 20(2):171-185. DOI: 10.5154/r.rchsh.2013.10.038
- Vélez C., N.A., M.C. Díaz O. y V.J. Flórez R. 2022. Behavior of NPK in carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi growing on a soilless crop system with recycling of drainage, *J. Plant. Nutr.* DOI: 10.1080/01904167.2022.2155531.
- Vojtíšková, L., E. Munzarová, O. Votrubová, A. Rihová y B. Juřicová. 2004. Growth and biomass allocation of sweet flag (*Acorus calamus* L.) under different nutrient conditions. *Hydrobiologia.* 518:9-22. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000025052.81373.f3.
- World Health Organization (WHO). 2011. *Guidelines for drinking-water quality*. 4.^a ed. Ginebra: World Health Organization. 541p.
- Yang, Y., J. Xiong, L. Tao, Z. Cao, W. Tang, J. Zhang, X. Yu, G. Fu, X. Zhang y Y. Lu. 2020. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: A review. *Sci. Total. Environ.* 708:135-186. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135186.
- Žanić, K., G. Dumičić, M. Škaljac, S.G. Ban y B. Urlić. 2011. The effects of nitrogen rate and the ratio of $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ on *Bemisia tabaci* populations in hydroponic tomato crops. *Crop Prot.* 30(2):228-233. DOI: 10.1016/j.cropro.2010.11.004.