



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

Relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ y $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ en la producción de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) en hidroponia.

TONATIU CAMPOS GARCÍA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

La presente tesis titulada: **Relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ y $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ en la producción de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) hidropónica** realizada por el alumno: **Tonatiu Campos García** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

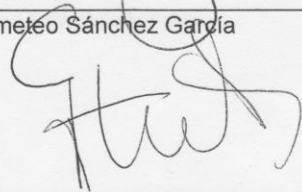
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



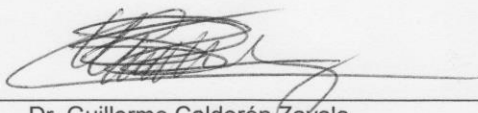
Dr. Prometeo Sánchez García

ASESOR



Dr. Gabriel Alcántar González

ASESOR



Dr. Guillermo Calderón Zavala

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Rodolfo Campos y Guadalupe García por darme el apoyo, la fortaleza y el cariño para continuar mi formación profesional y personal, además de ayudarme a alcanzar tan respetable logro.

A mi hermano Huitzimengari Campos sin cuya valiosa guía y experiencia no hubiera sido capaz de alcanzar este logro.

A mi hermana Yuritziri y mi sobrina Mónica y el resto de mis familiares por siempre estar ahí cuando los he necesitado brindándome su apoyo e incondicional afecto.

Al Dr. Prometeo Sánchez por ser parte de este trabajo brindándome siempre su apoyo y experiencia profesional para lograr mis objetivos académicos, además de brindarme su apoyo moral para mi formación personal.

A los doctores Gabriel Alcántar y Guillermo Calderón por su apoyo y guía profesional para la elaboración del presente trabajo y por brindarme tan afable compañía.

A todos los profesores sin los cuales no hubiera adquirido los conocimientos fundamentales para mi formación académica y profesional

Al CONACyT y al pueblo de México por brindarme la oportunidad de ser becario para lograr el presente título.

DEDICATORIA

A mis padres

Rodolfo Campos y Guadalupe García

por ser los pilares fundamentales en mi formación.

*A mi familia Huitzimengari,
Yuritziri y Monica por brindarme
su incondicional cariño y apoyo.*

*A todos mis tíos, tías, primos
primas, sobrinos y sobrinas
cuya afable compañía hizo más
agradables difíciles momentos.*

*"Nuestras virtudes y nuestros defectos son inseparables, como la fuerza y la
materia. Cuando se separan, el hombre deja de existir"*

-Nikola Tesla-

RELACIONES $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ Y $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ EN LA PRODUCCIÓN DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch. Cv. Festival) EN HIDROPONIA.

Tonatiu Campos García, M.C.

Colegio de Posgraduados, 2014

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue estudiar el efecto de las relaciones (en la solución nutritiva) amonio/nitrato ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) y calcio/potasio ($\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$) en plantas de fresa *Fragaria x ananassa* cv. Festival, cultivadas en fibra de coco en un sistema hidropónico. Los tratamientos de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ fueron 100/0, 75/25, 25/75 y 0/100 en porcentaje de nitrógeno total y 58/42, 75/25, 50/50, 25/75 de $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$. Los resultados obtenidos indicaron que las plantas con mayor crecimiento vegetativo y área foliar fueron las que se cultivaron con el tratamiento 100/0 donde se adicionó el 100% de nitrógeno en forma de amonio. También se observó que la corona es el órgano de la planta que concentra la mayor cantidad de NH_4^+ y NO_3^- . La concentración de azúcares y firmeza en frutos no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. Los resultados de las relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados en rendimiento y calidad del fruto.

Palabras clave: *fresa, amonio, nitrato, relaciones, producción.*

ABSTRACT

The aim of this work was to study the effect of the $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ and $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ (in nutrient solution) ratios in strawberry plants (*Fragaria x ananassa* Duch. cv. Festival) grown hydroponically in a coir substrate. The treatments were 100/0, 75/25, 25/75 and 0/100 percent of total nitrogen with $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios and 58/42, 75/25, 50/50, 25/75 of $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$. The higher growth and leaf area was observed at 100 $\text{NH}_4^+/\text{0NO}_3^-$ ratio treatment. Beside, results shown that crowns are the main NH_4^+ and NO_3^- storage plant organ. The $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ ratios have no shown significant differences between treatments on yield and fruit quality.

Key Words: *Strawberry, ammonium, nitrate, ratio, yield.*

**RELACIONES $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ Y $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ EN LA PRODUCCIÓN DE FRESA
(*Fragaria x ananassa* Duch. Cv. Festival) EN HIDROPONIA.**

ÍNDICE

RESÚMEN.....	i
ABSTRACT.....	i
ÍNDICE.....	ii
ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	v
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo General	2
III. HIPÓTESIS	2
3.1. Hipótesis General.....	2
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
4.1. Aspectos generales del cultivo de la fresa	3
4.1.1. Taxonomía y descripción botánica	3
4.2. Principales nutrientes en las plantas y sus funciones.....	5
4.3. Nitrógeno en las plantas.	7
4.3.1. Origen, contenido, formas de absorción y funciones en la planta. .	7
4.3.2. Asimilación del NH_4^+ por las plantas.	11
4.3.3. Asimilación del NO_3^- por las plantas.....	13
4.4. Calcio en las plantas.....	16
4.4.1. Origen, contenido, formas de absorción y funciones en la planta.	17
4.5. Potasio en las plantas.....	19
4.5.1. Origen, contenido, formas de absorción y funciones en la planta.	19
V. MATERIALES Y MÉTODOS	22

5.1. Ubicación del experimento	22
5.2. Desarrollo del experimento	22
5.3. Metodología	25
5.3.1. Variables de estudio.	27
5.4. Metodología de la segunda fase: Relaciones Ca^{2+}/K^{+}	31
5.5. Análisis de la información.	33
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
6.1. Asignación de biomasa y área foliar	33
6.1.1. Primer muestreo.	33
6.1.2. Segundo muestreo.	36
6.2. Área foliar.....	38
6.2.1. Primer muestreo.	38
6.2.2. Segundo muestreo.	38
6.3. Concentración de NH_4^{+} y NO_3^{-} en plantas de fresa	40
6.3.1. Primer muestreo.	40
6.3.2. Segundo muestreo.	41
6.4. Análisis de frutos.....	44
6.5. Resultados de la segunda fase: Relaciones Ca^{2+}/K^{+}	46
VII. CONCLUSIONES.....	52
VIII. BIBLIOGRAFÍA	53

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de los elementos minerales de acuerdo al nivel de requerimiento por las plantas (Adaptado de Alcántar y Trejo, 2007).	5
Cuadro 2. Función de los macro y micro nutrientes en las plantas superiores (Alcantar y Trejo, 2007).	6
Cuadro 3. Características del sustrato.	23
Cuadro 4. Diseño de tratamientos con diferentes relaciones NH_4^{+}/NO_3^{-} , en porcentaje.	26

Cuadro 5. Solución nutritiva Steiner (1980) al 100 y al 25 %.	26
Cuadro 6. Composición química de los tratamientos.	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Versión simplificada del ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera (Modificado de Fageria, 2009)	8
Figura 2. Asimilación del N en plantas superiores (Andrews <i>et al.</i> , 2013).	12
Figura 3. Asimilación del NO_3^- .	15
Figura 4. Climatología del municipio de Texcoco.	22
Figura 5. Sacos de cultivo con fibra de coco.	23
Figura 6. Representación esquemática del sistema de riego (T=tratamientos).	24
Figura 7. Distribución de las unidades experimentales en el experimento.	24
Figura 8. Plántulas de fresa <i>Fragaria x ananassa</i> Duch. Var. Festival antes y después del trasplante 1/05/2013.	25
Figura 9. Plantas de fresa colectadas para el primer (A) y segundo muestreo (B).	27
Figura 10. Determinación de área foliar (A) y molienda de las muestras (B).	28
Figura 11. Filtrado de las muestras para el análisis de amonio (A), medición colorimétrica (B).	29
Figura 12. Muestras para la determinación de NO_3^- .	29
Figura 13. Muestreo del extracto celular de peciolo (A) y análisis químico en el ICP-AES (B).	30
Figura 14. Análisis de frutos en la primera fase.	31
Figura 15. Preparación de las muestras para su análisis.	32
Figura 16. Medición de la concentración de iones Ca_2^+ , K^+ y NO_3^- en jugo de fruto.	33

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1A. Acumulación de biomasa fresca en hojas y raíz con corona en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente
--

significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....35

Gráfica 2A. Acumulación de biomasa seca en hojas y raíz con corona en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....35

Gráfica 1B. Acumulación de biomasa fresca en hojas, raíz y corona en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (108 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....37

Gráfica 2B. Acumulación de biomasa seca en hojas, raíz y corona en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (108 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....37

Gráfica 3A. Área foliar en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....39

Gráfica 3B. Área foliar en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (108 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....39

Gráfica 4A. Concentración de NH_4^+ en hojas y coronas con raíz en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....41

Gráfica 5A. Concentración de NO_3^- en hojas y coronas con raíz en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....42

Gráfica 4B. Concentración de NH₄⁺ en hojas, coronas y raíz en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (108 dit). **Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD**

Fisher.....43

Gráfica 5B. Concentración de NO₃⁻ en hojas, coronas y raíz en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (108 dit). **Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD**

Fisher.....44

Gráfica 6. Concentración de azúcares en corona y frutos de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (108 y 136 dit). **Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD** Fisher.....45

Gráfica 7. Firmeza de frutos en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (136 dit). **Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD** Fisher.....45

Gráfica 8. Análisis nutrimental del extracto celular de peciolo en plantas de fresa a los 136 dit. **Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD** Fisher.....47

Gráfica 9. Firmeza en frutos de plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones Ca²⁺/K⁺ a los 70 dit (a) y a los 86 dit (b). **Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD** Fisher.....47

Gráfica 10. Diámetros polar y ecuatorial de frutos en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones Ca²⁺/K⁺ a los 70 dit (a) y a los 86 dit (b). **Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD** Fisher.....48

Gráfica 11. Peso de materia fresca y materia seca de frutos en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones Ca²⁺/K⁺ a los

70 dit (a) y 86 dit (b). **Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....49**

Gráfica 12. Contenido de azúcares ($^{\circ}$ Brix) en frutos de fresa, desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones Ca^{2+}/K^{+} a los 70 dit (a) y a los 86 dit (b). Letras diferentes **indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....50**

Gráfica 13. Concentración de Ca^{2+} , K^{+} y NO_3^{-} en frutos de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones Ca^{2+}/K^{+} a los 70 dit (a) y a los 86 dit (b). Letras diferentes indican **diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....50**

Gráfica 14. Concentración de Ca^{2+} , K^{+} y NO_3^{-} en coronas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones Ca^{2+}/K^{+} a los 86 dit. Letras diferentes **indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.....51**

I. INTRODUCCIÓN

La fresa es un cultivo muy importante a nivel nacional aunque solamente ocupa el 1% de la superficie dedicada a la agricultura; este producto genera divisas ya que es un producto principalmente de exportación (SAGARPA, 2005). Con el auge de nuevas tecnologías como el uso de acolchados, sistemas de riego, uso de sustratos e hidroponía, se tiene un potencial para incrementar la producción por unidad de superficie. Las investigaciones sobre nutrición vegetal complementan las nuevas tecnologías para hacerlas más eficientes, ya que estas han demostrado que haciendo buen uso de las soluciones nutritivas se pueden incrementar tanto la cantidad de la biomasa vegetativa como la calidad del fruto. Uno de los elementos más estudiados en cuanto a la nutrición de las plantas es el nitrógeno, esto debido a que es el cuarto elemento más abundante que se encuentra en el tejido vegetal después del carbono oxígeno e hidrógeno. Las plantas pueden aprovechar este nitrógeno en forma de NO_3^- o NH_4^+ , por lo que en hidroponía es posible utilizar nitratos y amonio en la solución nutritiva (González *et al.*, 2009). Investigaciones han demostrado que plantas de fresa en cultivos sin suelo son sensibles a la nutrición a base de amonio (Tabatabaei *et al.*, 2007). Con respecto a lo anterior se han realizado varios estudios para estudiar el efecto de los nitratos y el amonio en el crecimiento de la planta, ya que esta relación se encuentra principalmente ligada al desarrollo vegetativo de la planta.

En una investigación con hierbas aromáticas González *et al.* (2009) encontraron que en cebollín, la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ de 0/100 favorece el desarrollo del área foliar y la producción de biomasa total. Por otro lado, Tabatabaei *et al.* (2006) encontraron que la completa exclusión del NH_4^+ de la solución nutritiva en plantas de fresa reduce su crecimiento. Estos autores encontraron que una relación $25\text{NH}_4^+:75\text{NO}_3^-$ mejora el desarrollo y rendimiento de las plantas de fresa.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de diferentes soluciones nutritivas con distintas relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ y $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ sobre el crecimiento de plantas y calidad de fruto de fresa.

2.2. Objetivos Particulares

2.2.1. Obtener una solución nutritiva con la mejor relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ que potencialice el desarrollo de plantas de fresa en la fase vegetativa.

2.2.2. Diseñar una solución nutritiva con la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ adecuada para incrementar la calidad de fruto en fresa.

III. HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis General

Una relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la que el porcentaje de NO_3^- es menor que NH_4^+ producirá plantas más suculentas y con excesivo follaje mientras que en una relación $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ donde se tenga un balance cercano a 50% Ca^{2+} y 50% K^+ se tendrá una mejor calidad precosecha de frutos.

3.2. Hipótesis Particulares

3.2.1. La solución nutritiva con una relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ igual a 75/25 en la fase vegetativa producirá plantas de fresa vigorosas con mayor follaje.

3.2.2. La relación $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ 50/50 en la solución nutritiva incrementará la firmeza y los grados Brix en frutos de fresa.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Aspectos generales del cultivo de la fresa

La fresa es una planta conocida y apreciada desde la antigüedad, existiendo referencias de la misma en algunos de los escritos de los autores clásicos romanos, en los que se indica que se desarrollaba en los bosques, por lo que probablemente se trataba de *Fragaria vesca* L. (Maroto y López, 1988).

Los frutos de esta planta son muy apreciados como postre, consumidos directamente con vino, crema, nueces, etc. También presentan gran número de aplicaciones en la obtención de zumos, para ser consumidos directamente o dar sabor a multitud de preparados, como licuados, yogurt, pasteles, mermeladas, confituras, conservas y congelados.

La fresa de nuestro país presenta características excelentes de calidad y por complementar la demanda del mercado norteamericano, lo convierte en un producto de exportación. Así, vemos que en función de la infraestructura y la tecnología para la producción con que cuenta cada una de las regiones que producen fresa en nuestro país, se especializan en el mercado ya sea nacional o internacional. Por ejemplo en la región del valle de Zamora y la de Baja California, parte de su producción se destina a la exportación ya sea en fresco o congelada., por otro lado, Irapuato y el resto de las zonas productoras de Michoacán se destinan al consumo nacional (SAGARPA, 2005).

En los años 2000, 2001 y 2002, el 99% de las exportaciones mexicanas de fresa tuvieron como destino Estados Unidos. El restante 1% se repartió entre Gran Bretaña, Canadá, Italia, Japón y Francia (SAGARPA, 2005).

4.2. Taxonomía y descripción botánica

Las plantas de fresa pertenecen a la familia Rosaceae y al género *Fragaria*. Existen especies oriundas de Europa tales como *Fragaria vesca* L., *F. moschata* Duch. y *F. viridis* Duch., de frutos pequeños o “fresas” y especies americanas como *F. chilonensis* Duch. y *F. virginiana* Duch., de frutos grandes, y de cuyos cruzamientos derivan los actuales cultivares de “fresón” de frutos

grandes que suelen ser conocidos botánicamente como *Fragaria x ananassa* Duch (Maroto y López, 1988).

Esta planta tiene la característica de ser herbácea y perenne, está conformada por un tallo central o “corona” de donde emergen las hojas, raíces, estolones e inflorescencias. La corona consiste en un núcleo rodeado por un anillo vascular. Este núcleo está compuesto principalmente por médula, con una delgada capa de cambium que la rodea. En la punta de cada hoja a lo largo de la corona se encuentra un callo axilar, el cual puede producir hijuelos, ramificaciones de la corona o permanecer en dormancia, dependiendo de las condiciones ambientales (Hancock, 1999).

El sistema radicular de esta planta es fasciculado, constituido por un gran número de raíces y raicillas, la mayor parte de las cuales (90%) se encuentran localizadas superficialmente (25cm) (Maroto y López, 1988).

Las hojas se encuentran en un arreglo en espiral, cada sexta hoja esta encima de la primera. Las hojas son generalmente pinadas y trifoliadas. Tienen la epidermis en empalizada y las capas del mesófilo son típicas de las dicotiledóneas. Los estomas se encuentran únicamente en el envés de las hojas (Darrow, 1966; citado por Hancock, 1999). Las hojas de la mayoría de las especies viven unos cuantos meses y mueren al exponerse a bajas temperaturas en el otoño, éstas hojas viejas son remplazadas en la primavera por hojas nuevas (Hancock, 1999).

Los estolones de la mayoría de las especies consisten en dos nudos. Una planta hija es producida en el segundo nudo, mientras que el primer nudo permanece en dormancia o desarrolla otro estolón. Cada planta hija tiene la capacidad de producir sus propios estolones. Una planta vigorosa usualmente produce de 10-15 estolones al año (Hancock, 1999).

Las flores son actinomorfas, dotadas de un involucre bracteal, subacalicino, cáliz gamosépalo y pétalos blancos. La polinización suele ser alógama y entomófila (Maroto y López, 1988).

4.3. Principales nutrientes en las plantas y sus funciones.

En las plantas superiores la mayor parte del material vegetal está constituido por agua, la cual alcanza valores entre 80 y 95%. Cuando el tejido vegetal fresco es secado a 70°C por 48h, la materia seca obtenida representa alrededor del 10-20% del peso fresco inicial. La sustancia seca en los cultivos está compuesta principalmente por carbono, oxígeno e hidrógeno, elementos organogénicos, los cuales constituyen alrededor de 90-98% del total y se encuentran combinados principalmente en los carbohidratos, lípidos y proteínas. Entre el 2 y 10% restantes, representan la composición mineral (Alcántar y Trejo, 2007).

Entre los nutrientes minerales que requieren las plantas están el nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio, magnesio, hierro, entre otros, catorce en total (Cuadro 1) que generalmente son absorbidos del suelo o del medio nutritivo en los cultivos hidropónicos, por las raíces (Alcántar y Trejo, 2007).

Cuadro 1. Clasificación de los elementos minerales de acuerdo al nivel de requerimiento por las plantas (Adaptado de Alcántar y Trejo, 2007).

Clasificación	Requerimiento por las plantas
Elementos indispensables	Aquellos de importancia vital para la nutrición de la planta y que reúnen los requisitos de esencialidad: C, H, O, N, P, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Ni y Cl.
Elementos útiles	Los elementos que en una forma directa o indirecta benefician la nutrición de las plantas sin ser indispensables en la nutrición vegetal: Si, Co, Na.
Elementos prescindibles	Elementos que son absorbidos por las plantas pero que no realizan funciones fisiológicas específicas ni benefician directamente o indirectamente el crecimiento de las plantas.

Cuadro 2. Función de los macro y micronutrientes en las plantas superiores (Alcantar y Trejo, 2007).

Elemento	Estructural	Constituyente o activador de enzimas	Procesos
Nitrógeno	Aminoácidos, proteínas, bases nitrogenadas, ácidos nucleicos, enzimas, coenzimas, vitaminas glico y lipoproteínas, pigmentos.	Todas (constituyente)	Absorción iónica, fotosíntesis, respiración, síntesis, multiplicación y diferenciación celular, herencia y todo el metabolismo.
Fosforo	Ésteres de carbohidratos, fosfolípidos, coenzimas, ácidos nucleicos, nucleótidos.	Deshidrogenasas, reductasas, cinasas, sintasas.	Almacenamiento y transferencia de energía y todo el metabolismo.
Potasio	Predominantemente en forma iónica unido a moléculas de bajo peso molecular (carboxilatos) por enlaces de baja energía.	Cinasas, sintetetasas, deshidratetasas, aldolasas, deshidrogenasas.	Propiedades osmóticas, apertura y cierre de estomas, fotosíntesis, transporte de carbohidratos y otros productos, respiración, síntesis, fijación simbiótica del nitrógeno.
Calcio	Pectato (lámina media) carbonato, oxalato, filato, cadmodulina.	ATP-asa, alfa amilasas, nucleasas.	Estructura y funcionamiento de las membranas, absorción iónica, reacciones con hormonas vegetales y activación enzimática (vía cadmodulina).
Magnesio	Clorofilas.	Tiocinasas, cinasas, hexocinasas, enolasas, deshidrogenasas, descarboxilasas, carboxilasas, sintetetasas, transferasas.	Absorción iónica, fotosíntesis, respiración, almacenamiento y transferencia de energía, síntesis orgánicas, balance electrolítico, estabilidad de los ribosomas.
Azufre	Aminoácidos (cisteína, cistina, metionina, taurina), proteínas (casi todas), vitaminas y coenzimas (tiamina y biotina) ésteres con polisacáridos.	Grupo sulfhidrido -SH Y ditiol -S-S- activo en enzimas y coenzimas, ferredoxinas.	Fotosíntesis, fijación no fotosintética de CO ₂ , respiración, síntesis de grasas y proteínas, fijación simbiótica de nitrógeno.
Boro	Complejos cis con difenoles, carbohidratos, azúcares-P.	ATP-asas sintetetasas.	Absorción iónica, transporte de carbohidratos, síntesis de lignina y celulosa, síntesis de ácidos nucleicos y proteínas, fotosíntesis.
Cloro	Acutumina y acutumidina (lactosa sesquiterpenoide), jaconina (alcaloide), ácido 4-Cl-indolil-3-, acético, sulfolípidos.	Fotólisis del agua.	Fotosíntesis.
Cobre	Proteínas (anurina, estelacianina,	Oxidasas, polifenoloxidasas,	Fotosíntesis, respiración, regulación hormonal,

	umecianina, glicoproteínas).	carboxilasas.	fijación de nitrógeno (efecto indirecto), metabolismo de compuestos secundarios.
Hierro	Quelatos (con ácidos di y tricarbóxicos) fitoferritina con P.	Reductasas, hemoperoxidasas, catalasas, acotinasas, oxidasas, deshidrogenasas, nitrogenasas, hidrogenasas, ferredoxina, citocromos a, a ₃ , b ₂ , b ₆ , f.	Fotosíntesis, respiración, fijación biológica del nitrógeno, asimilación del nitrógeno y azufre.
Manganeso	Manganina.	Sintetasas, ATP- asas, cinasas, enolasas, deshidrogenasas, descarboxilasas, pirofosforilasas, transferasas, oxidasas.	Absorción iónica, fotosíntesis, respiración, control hormonal, síntesis de proteínas.
Molibdeno	Nitrogenasa y nitrato reductasa.	Reductasas y nitrogenasas.	Reducción de nitratos, fijación de nitrógeno.
Zinc		Anhidrasas, isomerasas, deshidrogenasas, aldolasas, carboxilasas, ribonucleasas.	Respiración, control hormonal, síntesis de proteínas, y del ácido indolacético.
Niquel	Ureasas	Ureasas	Metabolismo del nitrógeno

4.4. Nitrógeno en las plantas.

El nitrógeno es un elemento esencial para todos los seres vivos, es un componente específico de las proteínas, aminoácidos, está presente en la mayor parte de las combinaciones orgánicas de las plantas y es totalmente volátil por calcinación (Navarro y Navarro, 2003).

Es uno de los nutrimentos más limitantes de la producción además de que es el elemento mayormente aplicado y en mayor cantidad en la mayoría de los cultivos anuales en el mundo (Huber y Thompson, 2007).

4.4.1. Origen, contenido, formas de absorción y funciones en la planta.

El ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera es muy dinámico y complejo, además envuelve factores climáticos, del suelo y de las plantas. En la Figura 1 se muestra una versión simplificada del ciclo del nitrógeno, se

muestran las principales fuentes de entrada del N al sistema suelo-planta tales como fuentes fertilizantes, materia orgánica y fijación biológica del N_2 . También se muestran las principales causas que agotan el N en el sistema suelo-planta, tales como lixiviación, desnitrificación, volatilización, escorrentía superficial y absorción por parte de la planta. La inmovilización también tiene una influencia temporal en la absorción del N por las plantas, y ésta se define como la transformación de componentes inorgánicos (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , NH_3) en moléculas orgánicas (Fageria and Baligar, 2005a).

La fijación biológica del nitrógeno es mediada por la nitrogenasa la cual se encuentra en microorganismos que viven en el suelo (Oaks y Hirel, 1985).

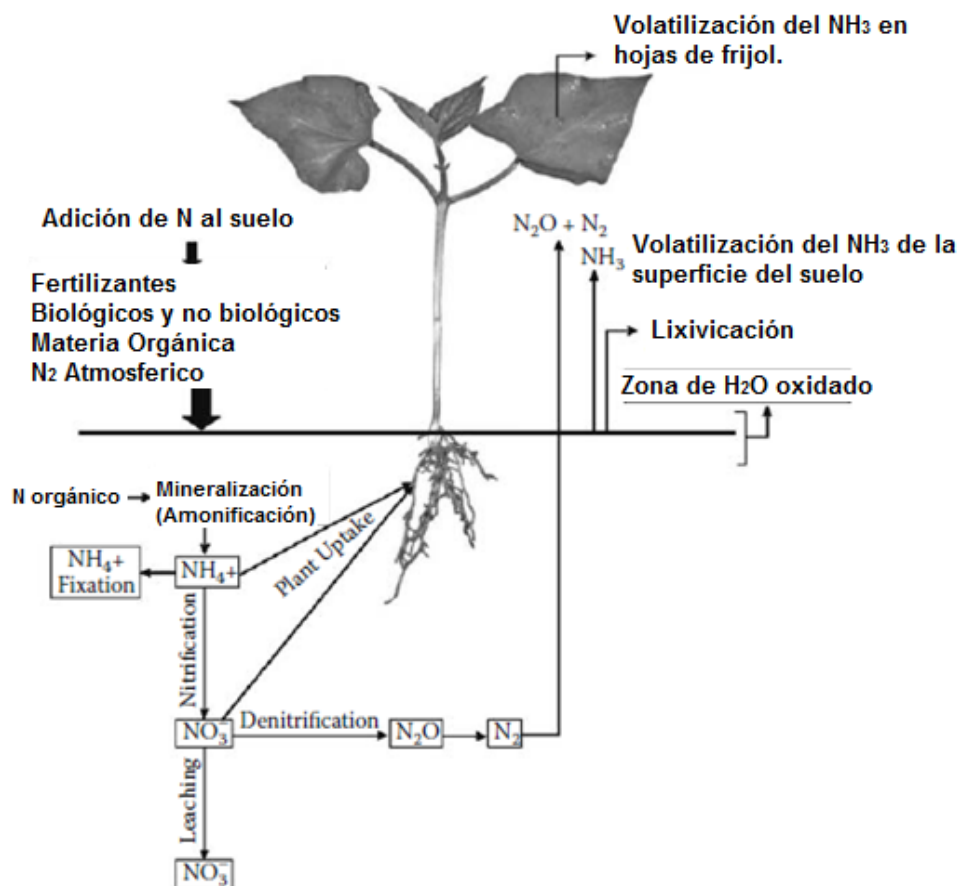


Figura 1. Versión simplificada del ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera (Modificado de Fageria, 2009)

En las plantas el mayor contenido de N se encuentra en los tejidos jóvenes. En estos el porcentaje suele oscilar entre 5.5 y 6.5% en peso seco. A medida que la planta avanza en edad, la proporción de celulosa aumenta, el porcentaje de N disminuye y se eleva la relación C/N. Las hojas suelen ser más ricas en

nitrógeno, pero su valor disminuye durante la floración. De todas las especies las leguminosas son las que están mejor provistas de N (Navarro y Navarro, 2003).

El nitrógeno es un componente de muchos compuestos orgánicos importantes desde las proteínas hasta los ácidos nucleicos. Es un constituyente de la molécula de clorofila la cual juega un papel importante en la fotosíntesis. Muchas enzimas son proteicas, por lo tanto, el N juega un papel clave en muchas reacciones metabólicas. El nitrógeno es también es constituyente estructural de las paredes celulares y se encuentra en moléculas tan importantes como las purinas, pirimidinas, porfirinas, vitaminas y alcaloides (Fageria, 2009). En los órganos vegetativos, tales como las hojas, se encuentra al lado de proteínas cloroplastidiales o citoplásmicas, en gran parte como aminoácidos libres y también como aminoácidos amidados (asparagina y glutamina). Bajo estas formas las sustancias nitrogenadas sintetizadas en la hoja contribuyen a la síntesis de proteínas (Navarro y Navarro, 2003).

La urea, ácido úrico, alatoína, ácido cianhídrico combinado en forma de glucósidos, y otros compuestos nitrogenados diversos, están igualmente presentes en los vegetales aunque en débil proporción (Navarro y Navarro, 2003).

La mayoría de las plantas pueden tomar del suelo y utilizar el nitrógeno en sus formas inorgánicas y orgánicas. El nitrato (NO_3^-) es la principal forma en la que la mayoría de las plantas absorben y asimilan el N en suelos cultivados y bien aireados, pero el amonio (NH_4^+) puede ser importante en suelos sin fertilizar, mientras que en suelos mal manejados los aminoácidos, pequeños péptidos, e incluso proteínas, pueden ser importantes (Gioseffi *et al.*, 2012; Paungfoo-Lonhene *et al.*, 2012) y estas formas dependen de la edad de la planta, de la especie así como del pH del suelo (Navarro y Navarro, 2003).

En cultivos hidropónicos si la única fuente de nitrógeno es NO_3^- en la solución nutritiva, su absorción resulta en un incremento en el pH del medio; sucediendo lo contrario si la única fuente es NH_4^+ , existiendo algunas excepciones dependiendo de las condiciones medioambientales y especies (Hershey, 1992). En general, en un ambiente ácido, el NO_3^- es más fácilmente absorbido, mientras que el NH_4^+ es mejor absorbido en pH's altos. En un pH de 6.8, ambas especies iónicas, son absorbidas por igual, y manteniendo un buen

balance entre las dos formas en la solución nutritiva se puede regular parcialmente el pH (Hershey, 1992; Benton, 2005).

Son tres procesos independientes mediante los cuales los iones amonio y nitrato alcanzan la raíz (Hocking *et al.*, 1984):

1. Flujo de masas: este se da por el movimiento del agua provocado por un gradiente en el potencial hídrico. Este es el mecanismo por el cual se da predominantemente el movimiento del NO_3^- y el cual permite entregar la mayor cantidad del N absorbido por las raíces en la estación de crecimiento.
2. Difusión: provocado por un gradiente en la concentración de solutos principalmente de N.
3. Intercepción por la raíz: éste se da por el crecimiento de la raíz, la cual llega a las zonas donde se encuentran depositados estos solutos.

Después de que la raíz tiene a su disposición el nitrógeno o el amonio disuelto en la solución del suelo se llevan a cabo los procesos de absorción. Andrews *et al.* (2013) mencionan que la absorción de amonio y nitratos es conducida por sistemas de transporte de alta afinidad (HATS) y por sistemas de transporte de baja afinidad (LATS). Existe fuerte evidencia de que proteínas en la membrana de la familia de transportadores de amonio (AMT1) son la principal ruta de influjo de alta afinidad de amonio en las plantas. Tempranas interpretaciones de la función de las AMT en las plantas envuelven un uniporte pasivo de amonio, el cual, por un potencial eléctrico dado a través del plasmalema no permite una alta relación de acumulación (dentro:fuera) como el simporte $1\text{H}^+:1\text{NH}_4^+$ (Andrews *et al.*, 2013).

En cuanto a la absorción de nitratos se han descrito dos rutas HATS, una como sistema constitutivo y otra como sistema inducible que es estimulado por NO_3^- . Estos sistemas son las principales rutas de absorción de nitratos en la planta a una baja concentración de estos ($< 0.5 \text{ molm}^{-3}$). Los sistemas LATS son significativos cuando se tiene una concentración externa de nitratos superior a 1 molm^{-3} (Andrews *et al.*, 2013).

Bloom y Epstein (2005) mencionan que las condiciones termodinámicas no favorecen el movimiento pasivo del NO_3^- a través de la membrana plasmática

hacia el interior del citoplasma de las células radicales: el citoplasma mantiene un potencial negativo con respecto al exterior y contiene una mayor concentración de NO_3^- que la rizosfera. En consecuencia, los potenciales eléctricos y químicos se oponen al influjo de NO_3^- . Para transportar NO_3^- en contra de estos potenciales se requiere el uso de energía metabólica en un proceso que incluye el cotransporte de iones H^+ .

En cuanto a la función de este elemento en la planta Fageria (2009) menciona que juega un rol esencial en muchos procesos fisiológicos y bioquímicos en las plantas. Es un componente de muchos compuestos orgánicos importantes, desde proteínas hasta ácidos nucleicos. Es constituyente de las moléculas de clorofila, las cuales juegan un importante rol en el proceso fotosintético. Muchas enzimas son proteicas, por lo cual, el N juega un papel preponderante en las reacciones metabólicas. También es un componente estructural de las paredes celulares. Debido a lo anterior, plantas deficientes en nitrógeno tienen una baja tasa de crecimiento y sus hojas son pequeñas; tienen una reducción en el índice de área foliar, baja eficiencia en el uso de la radiación y baja actividad fotosintética.

Las deficiencias de éste elemento aparecen como clorosis en las hojas (color verde pálido) y debido a que el N es un elemento móvil en las plantas los primeros síntomas se localizan en las hojas viejas. Otro síntoma de la deficiencia de N es la reducción del crecimiento trayendo como consecuencia floraciones fuera de temporada y que se complete el ciclo de vida de manera precoz (Benton, 2005; Clark, 1982).

4.4.2. Asimilación del NH_4^+ por las plantas.

En sistemas ecológicos estables, el nitrógeno metabólicamente útil es suministrado por la acción de la nitrogenasa sobre el N_2 atmosférico. El amonio, producto de esta reacción, es convertido en glutamato y glutamina, para después transformarlo en otros componentes que contienen nitrógeno requeridos por las plantas y los animales para su desarrollo (Oaks y Hirel, 1985).

Lea y Mifflin (2011) y Hirel *et al.* (2011) mencionan que el amonio absorbido por las raíces es asimilado en aminoácidos por la vía de la glutamato sintetasa (GS)/Glutamato sintasa (GOGAT) (Figura 2).

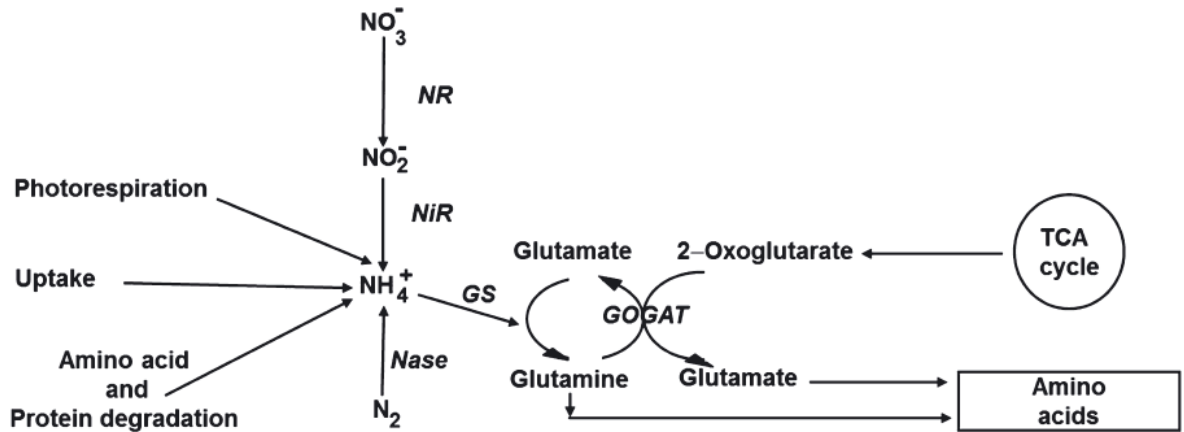


Figura 2. Asimilación del N en plantas superiores (Andrews et al., 2013).

La glutamino sintetasa cataliza la conversión (ATP-dependiente) del glutamato y NH_3 a glutamina. Existen mayormente dos isoformas de GS (glutamino sintetasa); la GS1 que se encuentra en el citosol de las raíces, floema y células de las hojas, y la GS2 la cual se encuentra en los plastidios de la raíz, otros tejidos no fotosintéticos y en los cloroplastos de tejidos fotosintéticos (Andrews *et al.*, 2013). La GOGAT (glutamato sintasa) cataliza la nicotidamida adenin dinucleotido (NADH-) o ferredoxina (Fd-), conversión dependiente de glutamina y 2-oxoglutarato para formar dos moléculas de glutamato. Al parecer la NADH- y la Fd-GOGAT están localizadas solamente en los plastidios/cloroplastos. La GOGAT NADH- dependiente está localizada principalmente en células no fotosintéticas donde el reductor es suministrado inicialmente por la ruta de las pentosas-fosfato (Bowsher *et al.*, 2007). La actividad de la Fd-GOGAT es mucho mayor que la de la NADH-GOGAT en los cloroplastos, donde la energía de la luz es usada directamente para la síntesis de Fd- reducida (Andrews *et al.*, 2013).

Normalmente la raíz es el principal sitio para la asimilación primaria del amonio, aunque se puede detectar significativa cantidad de amonio en la savia del xilema cuando las plantas son cultivadas en concentraciones altas de NH_4^+ (Schjoerring *et al.*, 2002). Se ha descubierto que bajo condiciones de un elevado suministro de NH_4^+ , este puede ser tomado del suelo por las plantas y

ser transportado vía xilema hacia el tallo (Schjoerring *et al.*, 2002), lo cual es asociado con una reducción en el crecimiento y, en algunos casos, la aparición de lesiones necróticas o la aparición de hojas de un verde muy oscuro y es probable que la generación de H⁺ en la asimilación primaria de NH₄⁺ en el tallo sea uno de los principales factores que contribuyen en la aparición de este daño (Brittoa y Kronzucker, 2002; ten Hoopen *et al.*, 2010).

4.4.3. Asimilación del NO₃⁻ por las plantas.

Hocking *et al.* (1984) mencionan que Butz y Jackson (1977) propusieron un mecanismo en el cual la NR y la ATPasa se acoplan promoviendo la reducción del nitrato al mismo tiempo que ocurre el transporte de este a través de la membrana. Por lo tanto parece probable que la tasa de influjo de NO₃⁻ puede ser determinada por tres procesos simultáneos vinculados al metabolismo de carbohidratos: (1) la ATPasa facilita el transporte del NO₃⁻ a través del plasmalema y desde la fuente de nitratos citoplasmáticos dentro de la raíz hacia otros organelos (ej. la vacuola); (2) metabolismo ácido orgánico resultando en iones hidroxil y (3) reducción del nitrato.

Después de que el NO₃⁻ entra a la raíz los eventos que le siguen son los siguientes (Hocking *et al.*, 1984):

- a) Reducción del nitrato y síntesis de aminoácidos por los tejidos de la raíz.
- b) Deposición de los nitratos y aminoácidos en pools de almacenamiento en la vacuola y su subsecuente retiro.
- c) Transporte de los nitratos y aminoácidos a través de las raíces hacia el xilema.

La reducción del NO₃⁻ es la reacción de mayor importancia en los tejidos de la raíz y existen algunas evidencias que indican que los controles que regulan la inducción de enzimas en la asimilación de N es diferentes en raíces que en hojas (Oaks y Hirel, 1985). Una muestra de esto es lo encontrado por Sanderson y Cocking (1964), quienes encontraron que la Km^s (constante de Michaelis Menten) para la NADH y el NO₃⁻ fue diferente para nitrato reductasas obtenidas de raíces y hojas en plantas de jitomate.

Hocking *et al.* (1984) mencionan que las proporciones de nitratos reducidos en las raíces y hojas cambian según el suministro de NO_3^- se incremente, en las hojas se favorece como principal sitio de reducción en condiciones de alto suministro de NO_3^- . El nitrato es reducido principalmente en las hojas de plantas jóvenes, pero progresivamente más nitrato es reducido en las raíces conforme la planta se va desarrollando.

Para la asimilación del nitrato se han descrito dos formas HATS, un sistema constitutivo y otro inducible que es estimulado por NO_3^- (Andrews *et al.*, 2013). Estos sistemas son la principal ruta de absorción en suelos con bajas concentraciones de nitratos ($< 0.5\text{-}1 \text{ mol m}^{-3}$). Los sistemas LATS se presentan cuando existen significativas concentraciones externas de nitratos ($>1 \text{ mol m}^{-3}$) (Andrews *et al.*, 2013).

El nitrato absorbido por las raíces puede ser almacenado o asimilado en ellas, o ser transportado en el xilema hacia el tallo donde nuevamente puede ser almacenado o asimilado. Normalmente hay un ligero transporte de nitratos en el floema (Wang *et al.*, 2012). Andrews *et al.* (2013) mencionan que las vacuolas son el principal sitio de almacenamiento en las raíces y el tallo, aunque el almacén de NO_3^- , es dependiente del genotipo de la planta, del tejido y de las condiciones medioambientales.

La asimilación de nitratos en las plantas incluye inicialmente la reducción a NH_4^+ para posteriormente ser asimilado vía GS/GOGAT del mismo modo en que se asimila el amonio tomado del suelo (Figura 2) (Andrews *et al.*, 2013).

El primer paso en la reducción del NO_3^- requiere la actividad de la enzima nitrato reductasa (NR) la cual convierte el NO_3^- en NO_2^- (Figura 3). Esta enzima es substrato inducible tanto en hojas como en raíz y está localizada en el citosol. La mayoría de estas enzimas requieren NADH- como agente reductor (Andrews *et al.*, 2013), y se ha encontrado que las enzimas que operan en raíces y en hojas son diferentes (Oaks y Hirel, 1985).

La NR es una metallo-flavoproteína que contiene FAD (flavin adenin dinucleotido), molibdeno y grupos sulfidrilos activos con NADPH₂ (nicotinamida-adenina dinucleótido fosfato) que sirve como donador de H⁺. Esta enzima ha mostrado tener un requerimiento no especificado de fosfato, el cual puede ser completamente o parcialmente remplazado por arsenato, telurato, selenato, silicato o sulfato y al parecer el fosfato sirve para ligar el molibdeno a la apoenzima de la NR (Nicholas y Scawin, 1956).

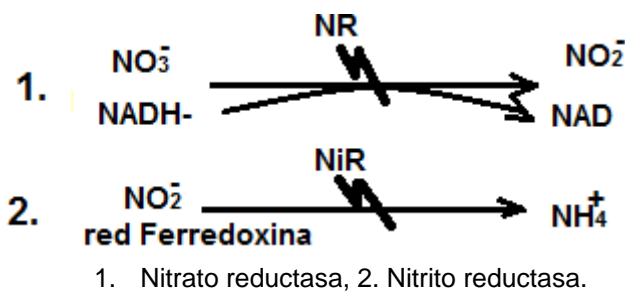


Figura 3. Asimilación del NO₃⁻.

El siguiente paso está dado por la actividad de la enzima nitrito reductasa (NiR) la cual es el mediador en la reducción del NO₂⁻ a NH₄⁺ (Figura 3). Su actividad es mediada por la adición de NO₂⁻ o NO₃⁻ y se encuentra localizada en los plastidios de las raíces y otros tejidos no fotosintéticos, puede estar presente en los cloroplastos de tejidos fotosintéticos y usa ferredoxina (Fd) como reductor (Oaks y Hirel, 1985; Andrews *et al.*, 2013). Generalmente la NR y NiR son enzimas inducidas por el sustrato y la luz (Lillo, 2008).

La raíz o el tallo pueden ser los principales sitios de asimilación de NO₃⁻ dependiendo del genotipo y las condiciones medioambientales, especialmente en suelos con concentraciones de nitratos por encima del rango en suelos agrícolas. Por ejemplo, en cereales y granos de climas templados, la raíz es el principal sitio de asimilación de nitratos a concentraciones externas alrededor de 1 mol m⁻³, en contraste, en estos mismos cultivos en climas subtropicales la mayor asimilación de nitratos se lleva a cabo en el tallo cuando crecen en concentraciones externas bajas en nitratos (Andrews *et al.*, 2013).

La asimilación de una molécula de NO_3^- en componentes orgánicos de la planta resulta en la generación de 0.67 moléculas de OH^- (Raven, 1985). Mucho de estos OH^- generados en la raíz por la asimilación del nitrato son extruidos en el suelo, mientras que la mayor proporción de OH^- generados en el tallo son neutralizados por síntesis de ácidos orgánicos, en particular malato. Con frecuencia este malato es retenido en los tallos aunque algunas especies son capaces de co-transportar malato y K^+ desde el tallo hacia la raíz, donde es enlazado a la excreción de OH^- de la raíz (Andrews *et al.*, 2013).

Andrews *et al.* (2013) mencionan que existe un menor costo de fotones y agua en la asimilación de NH_4^+ y urea, mientras que este costo energético es mayor en la asimilación de NO_3^- y en la fijación de N_2 . También menciona, basándose en los trabajos de, Andrews *et al.* (2005) y Hummel *et al.* (2010), que algunas especies que crecen en altas concentraciones de NO_3^- o bajo condiciones en las cuales la fotosíntesis es reducida (baja irradiancia), una gran proporción del NO_3^- absorbido no es asimilado. Bajo estas condiciones el nitrato puede ser un agente osmótico en los tejidos, tomando el lugar de moléculas orgánicas, en particular, azúcares de exosas (principalmente glucosa) y ácidos orgánicos (principalmente malato).

4.5. Calcio en las plantas.

El Ca^{2+} es un catión alcalino divalente y juega muchos roles importantes en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Cuando la biodisponibilidad del Ca^{2+} es baja, el rendimiento y calidad del cultivo no son óptimos, dependiendo de la especie y las condiciones medioambientales (Thurman *et al.*, 1980; Fageria and Baligar, 2003).

Este elemento es considerado como esencial y puede decirse que ningún otro elemento además del hidrógeno y potasio ha recibido tanta atención desde el punto de vista de la fertilidad del suelo. El estudio de este elemento ha mostrado categóricamente su papel fundamental, no solo en la estructura del suelo en su conjunto, sino también en la mecánica química del complejo

adsorbente y su influencia sobre la asimilabilidad de otros elementos también esenciales para la planta (Navarro y Navarro, 2003).

La deficiencia de calcio es más común en suelos ácidos sobre irrigados, como Oxisoles y Ultisoles (Thurman *et al.*, 1980). Los suelos deficientes en calcio tienen una baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) y una elevada lixiviación. En dichos suelos el contenido de Al^{3+} es elevado y algunas veces tóxico para las plantas. El calcio es usualmente adicionado a suelos ácidos por prácticas como el encalado, para suministrar el Ca^{2+} necesario en el crecimiento de las plantas (Bruce *et al.*, 1988).

4.5.1. Origen, contenido, formas de absorción y funciones en la planta.

El Ca^{2+} es fundamentalmente absorbido bajo la forma de ion Ca^{2+} y es después del potasio el elemento básico más abundante que existe en las plantas. Este elemento, bajo condiciones específicas, puede ser directamente absorbido por los pelos radicales directamente del complejo coloidal donde se encuentre adsorbido (Navarro y Navarro, 2003; Fageria, 2009).

El contenido de Ca^{2+} en el suelo depende del material parental, el grado de desgaste y del nivel de encalado o fertilización. Una gran cantidad de calcio en el suelo está presente como intercambiable y depende de la CIC del suelo (Fageria, 2009).

Según Navarro y Navarro (2003), en las plantas jóvenes el calcio se encuentra preferentemente en el protoplasma y en las membranas celulares, mientras que en las adultas se halla en las vacuolas, principalmente bajo la forma de oxalato. En los granos, tubérculos y rizomas se encuentra como constituyente de la fitina, sal cálcico-magnésica del éster exafosfórico del inositol. Este mismo autor nos menciona que el calcio se encuentra en la planta tanto en forma mineral soluble como sulfato cálcico (SO_4Ca), como insoluble fosfato de calcio ($(PO_4)_2Ca_3$) y carbonato cálcico (CO_3Ca) y en su forma orgánica (en plantas como leguminosas, crucíferas y remolacha

azucarera) como oxalatos y pectinatos cálcicos; aunque el oxalato cálcico es el más abundante.

El calcio está involucrado en la división y elongación celular y juega un rol fundamental en el mantenimiento de la integridad de la membrana celular. Además tiene una importante función en mantener el balance nutrimental en los tejidos de la planta así como disminuye la toxicidad de metales pesados. Este elemento también cataliza para algunas enzimas involucradas en la hidrólisis de ATP y fosfolípidos, además reemplaza parcialmente al Mg^{2+} en algunas reacciones. También es fundamental para evitar algunas enfermedades fisiológicas como el blossom end rot y el bitter pit. (Ito y Fujiwara, 1967; Fageria, 2009)

La absorción de calcio es dependiente de su concentración en el medio de la raíz y de las tasas de transpiración ya que el ion calcio es transportado pasivamente en el torrente transpiratorio. Por lo tanto los factores que afectan la tasa de transpiración también afectarán el transporte de calcio a las porciones aéreas de la planta. La tasa de absorción de Ca es dependiente de los iones antagónicos en la solución; esta es mayor cuando iones NO_3^- están presentes en la solución nutritiva (Dunlop, 1973)

Existen grandes gradientes electroquímicos a través de la membrana plasmática (PM), tonoplasto (TN) y probablemente retículo endoplásmico (ER). Los gradientes en estos organelos son relativamente estables; sin embargo, pueden ocurrir algunos cambios durante la transducción de la señal. También pueden existir gradientes mucho más pequeños entre el citoplasma, plastidios y mitocondrias, pero estos gradientes pueden variar a consecuencia de las actividades fotosintéticas y respiratorias de la célula (Bush, 1995).

El Ca^{2+} es el mayor elemento estructural de la lamela media de la pared celular, éste mantiene la integridad de la membrana celular, la cual es probablemente la función más significativa en las plantas (Demarty *et al.*, 1984).

Este elemento está también involucrado en la división celular y elongación celular. Además, el Ca^{2+} juega un papel importante manteniendo el balance nutricional en los tejidos de la planta y también aminorando la toxicidad de metales pesados. En las plantas las células carentes de Ca^{2+} tienden a perder su permeabilidad y colapsar. También se ha encontrado que el calcio cataliza en algunas enzimas involucradas en la hidrólisis de adenosin trifosfato (ATP) y fosfolípidos, y parcialmente reemplaza al Mg^{2+} en algunas reacciones; además se ha demostrado que el calcio es requerido por los frutos para evitar síntomas como la pudrición apical (blossom end rot) en tomate y hueso amargo (bitter pit) en manzana (Clark, 1982).

El crecimiento de la raíz es severamente restringido en plantas deficientes en Ca^{2+} . El calcio protege la membrana plasmática del efecto perjudicial de los iones H^+ en pH bajos e igualmente reduce los efectos dañinos del Na^+ en suelos afectados por salinidad. También se ha descubierto que niveles adecuados de Ca^{2+} en la rizosfera ayudan a reducir el estrés biótico y abiótico (Rengel, 1992; Garland y Wilkins, 1981).

4.6. Potasio en las plantas.

El K^+ es el elemento inorgánico predominante en las plantas y es crucial para la nutrición, crecimiento, tropismo, homeostasis enzimática y osmoregulación (Epstein *et al.*, 1963; Epstein, 1966; Kochian y Lucas, 1988; Schroeder y Gassmann, 1994)

Las plantas con deficiencias de K^+ experimentan reducción en el crecimiento pero no muestran algún síntoma foliar (Bertsch y Thomas, 1985). El potasio es absorbido por las raíces bajo la forma de K^+ y es un elemento siempre importante cuantitativamente en las cenizas vegetales bajo la forma de óxido potásico (Navarro y Navarro, 2003).

4.6.1. Origen, contenido, formas de absorción y funciones en la planta.

Su contenido está en los rangos de 1.25-3% de la materia seca; aunque existen especies vegetales que tienen mayores requerimientos de K^+ , por encima de 10% (ej. bananas). Cultivos tales como tomate, pepinos y

pimientos, tienen un mayor requerimiento de K que algunos otros cultivos. Como sucede con el N y el P, la concentración de K⁺ en la planta es inicialmente alta (>5%) y posteriormente declina con la edad. El potasio puede ser fácilmente absorbido por las raíces y puede ser acumulado en las plantas en niveles mayores a los fisiológicamente requeridos (Benton, 2005).

La absorción de potasio del suelo hacia la raíz está en gran parte mediada por receptores de K⁺ de alta afinidad ($K_m=10-14\mu M$) (Epstein *et al.* 1963; Epstein, 1966; Newman *et al.*, 1987; Fernando *et al.*, 1992; Maathuis y Sanders, 1993). Pero, aunque los canales de K⁺ permiten absorción de K⁺ de baja afinidad ambos, el mecanismo de transporte y la estructura del camino nutricional de alta afinidad de K⁺ permanecen desconocidos.

El K⁺ es el principal catión presente en los jugos vegetales y se encuentra bajo la forma de sales orgánicas (oxalatos y tartratos), sales minerales (fosfatos y nitratos) y de combinaciones complejas inestables con los coloides celulares. No hay evidencia de que forme parte de la estructura molecular de las células. Se admite que se encuentra en estado ionizado en todos los órganos de la planta y ello justifica la facilidad de su paso de una parte a otra. En las hojas de las plantas superiores, un 30% se encuentra en los coloides del citoplasma y un 70% en sus vacuolas (Navarro y Navarro, 2003).

Con la excepción del citosol y la vacuola, la distribución subcelular del K⁺ se encuentra en gran parte sin caracterizar. La concentración de K⁺ en el citoplasma se mantiene relativamente constante (alrededor de 50-150mM) mientras que la concentración en la vacuola varía substancialmente dependiendo del estatus de disponibilidad. Junto con los iones acompañantes (NO₃⁻, Cl⁻, malato⁻), el K⁺ vacuolar determina en gran medida el potencial osmótico de la savia celular (Zörb *et al.*, 2013).

En cuanto al papel del potasio dentro de la planta Navarro y Navarro (2003) mencionan que éste elemento no desempeña una función específica, y que a diferencia de otros elementos como nitrógeno, fosforo y azufre, éste no entra en la constitución de los principios esenciales (prótidos, lípidos y glúcidos) y que debido a su gran movilidad, el K⁺ actúa en la planta, básicamente,

neutralizando los ácidos orgánicos resultantes del metabolismo y asegura así la constancia de la concentración de H^+ en los jugos celulares.

Las principales funciones del potasio se podrían resumir de la siguiente manera (Fageria, 2009; Amtmann y Rubio, 2012):

1. Incrementa el crecimiento de la raíz y mejora la absorción de agua y nutrientes.
2. Reduce el doblamiento de la planta.
3. Activa por lo menos 60 enzimas diferentes involucradas en el crecimiento de la planta.
4. Reduce la respiración, previniendo pérdidas de energía.
5. Contribuye en la fotosíntesis y en la formación de alimentos.
6. Favorece en la translocación de azúcares y almidón.
7. Produce granos ricos en almidones.
8. Incrementa el contenido de proteínas en la planta.
9. Mantiene el turgor y reduce las pérdidas de agua y marchitez.
10. Genera resistencia contra enfermedades en los cultivos.
11. Aunque el K^+ no es un constituyente de la clorofila, un síntoma característico de su deficiencia es la destrucción de la clorofila. Esto significa que se sospecha que parte de la función del K^+ está relacionada con la formación de precursores de la clorofila o con la prevención de la descomposición de la clorofila.
12. La deficiencia de K^+ puede inhibir la fijación de N reduciendo el crecimiento de las plantas en leguminosas.
13. Neutraliza los ácidos producidos durante el metabolismo de los carbohidratos en las células de las plantas.
14. Está involucrado íntimamente en la apertura y cierre estomático.
15. Está implicado en el incremento de la absorción y transporte de Fe en monocotiledóneas y dicotiledóneas.
16. El potasio no solo puede incrementar la resistencia de los tejidos de las plantas, sino que también puede reducir la población de hongos en el suelo, reduce su patogenicidad y promueve una rápida curación de las heridas.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del experimento

El presente trabajo se realizó en un invernadero rústico ubicado en el área de Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) en Texcoco, Estado de México ubicado entre los paralelos 19°24' y 19°33' de latitud norte y los meridianos 98°38' y 99°02' de longitud oeste a una altitud de 2200m con clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano y de humedad media (29%), las temperaturas medias varían desde los 6°C min. a los 25°C máx.

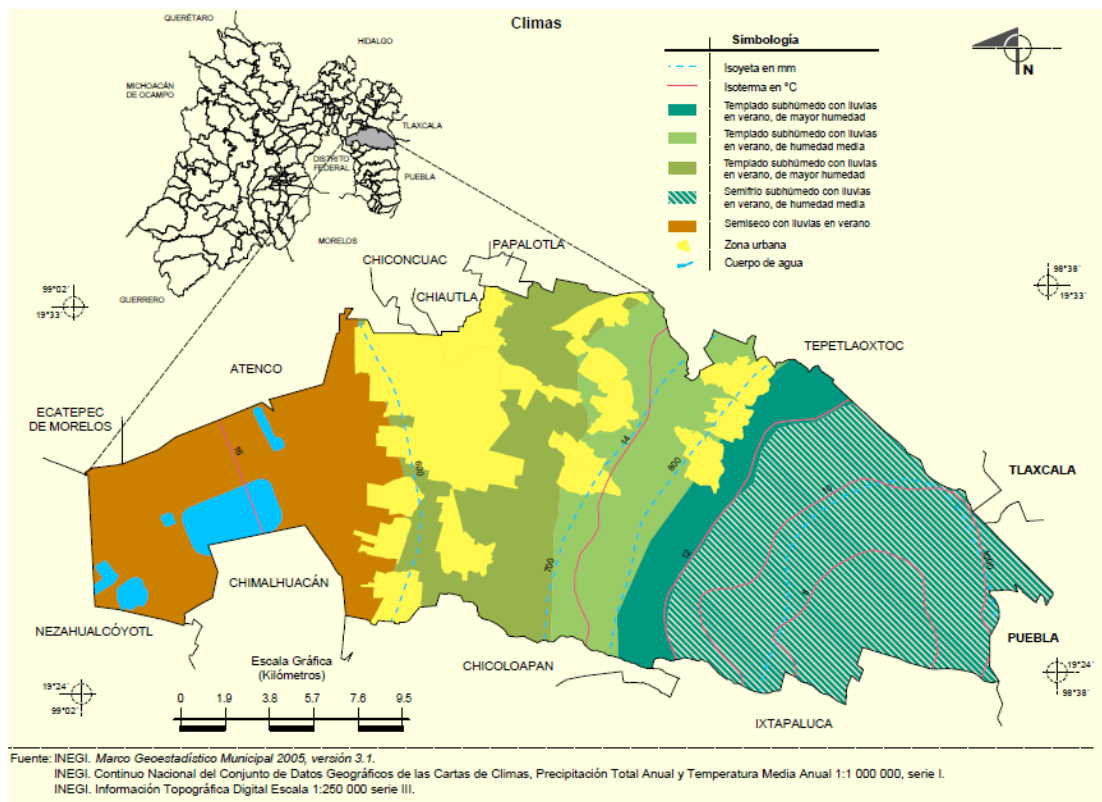


Figura 4. Climatología del municipio de Texcoco.

5.2. Desarrollo del experimento

Se estableció un experimento en hidroponía bajo invernadero, donde las plantas de fresa se desarrollaron en sacos de cultivo con 50% de fibra y 50% de polvo de coco como sustrato (Cuadro 3 y Figura 5).

Cuadro 3. Características del sustrato.

Presentación*	Bolsa de 5 kg. Poletilieno coextruido, blanco por fuera, negro por dentro calibre 400.
Dimensiones del saco de cultivo	10 centímetros de alto, 30 centímetros de ancho y 1 metro de largo.
pH	6.3 a 6.7
Conductividad eléctrica (CE)**	1.2 - 1.7 mS cm ⁻¹
Retención hídrica	de 3 a 4 veces su peso
Densidad	294 kg m ⁻³
Rendimiento	Aproximadamente 35 L expandido
Humedad	Aproximadamente 57 %
Cloruros (Cl⁻)	5.64 meq L ⁻¹
Sodio (Na⁺)	8.85 meq L ⁻¹
Calcio y Magnesio (Ca²⁺ + Mg²⁺)	1.3 meq L ⁻¹

*Datos del distribuidor (<http://www.hydroenv.com.mx/>).

**La C.E. medida al iniciar el experimento fue en promedio 6 mS cm⁻¹

Debido a que la CE inicial del sustrato era demasiado alta (6 dS m⁻¹), éste se lavó mediante riegos pesados con agua (pH = 5.5) durante un mes. También se aplicó 1 ml L⁻¹ de hipoclorito de sodio (cloralex®) en el sustrato para su desinfección. Posteriormente se hicieron lavados con agua acidificada para eliminar los residuos del desinfectante.



Figura 5. Sacos de cultivo con fibra de coco.

El sistema de riego estuvo compuesto por 5 contenedores de plástico con 200 L de capacidad, conectados a una bomba de agua cada uno para distribuir las soluciones nutritivas de cada tratamiento en cada bloque y cada repetición

(Figuras 6 y 7). El sistema de riego se calibró para obtener un riego homogéneo en todos los tratamientos.

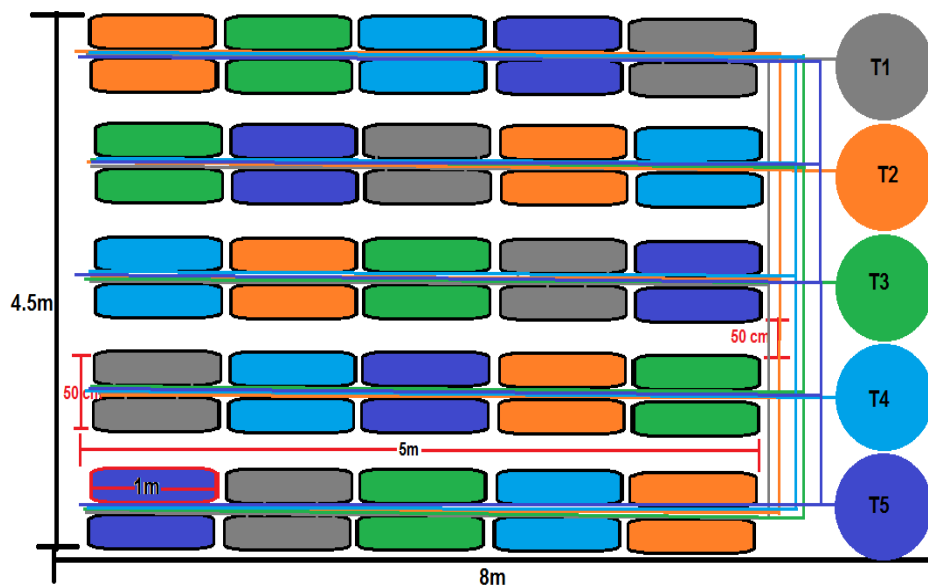


Figura 6. Representación esquemática del sistema de riego (T=tratamientos).



Figura 7. Distribución de las unidades experimentales en el experimento.

El material vegetal utilizado fueron plantas de fresa *Fragaria x ananassa* Duch. Variedad "Festival", las cuales se trasplantaron a una distancia de 15 cm entre ellas dentro de cada saco de cultivo con lo cual se tuvieron 6 plantas por saco y 12 plantas por repetición (Figura 8).

El trasplante se realizó el 1 de Mayo del 2013, después de las 18:00 horas para evitar un estrés en las plantas por las altas temperaturas. Previamente las plántulas se sumergieron en una solución compuesta por *Trichoderma harzianum* para evitar posibles problemas de pudrición de la corona. Después del trasplante se estableció un programa de riegos, compuesto por 2 riegos al día (10:00 am y 1:00 pm) de 1 minuto cada uno con agua (pH = 5.5) y a esta se le adicionó un enraizador líquido (Rooting®).

Durante el primer mes se agregó agua acidulada y Rooting® para acondicionar todas las plantas y se eliminaron las flores que emergían para mantener sólo el crecimiento vegetativo y procurar condiciones homogéneas de inicio en todas las unidades experimentales. A los 36 ddt (días después del trasplante) se comenzaron a aplicar los tratamientos.



Figura 8. Plántulas de fresa *Fragaria x ananassa* Duch. Var. Festival antes y después del trasplante 1/05/2013.

5.3. Metodología

Se aplicaron 5 tratamientos con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (Cuadro 4) para lo cual se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 5 repeticiones.

Cuadro 4. Diseño de tratamientos con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, en porcentaje del total.

Tratamiento	% NH_4^+	% NO_3^-
1	100	0
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	0	100

Se utilizó como solución nutritiva base la solución nutritiva universal de Steiner (1980) al 25% (C.E. = 0.5 dS m^{-1}), modificando únicamente las fuentes de nitrógeno (Cuadro 5). Debido a que el agua de riego tenía una C.E. de 0.5 dS m^{-1} se utilizó la solución nutritiva al 25 % para obtener una C.E. total de 1.0 dS m^{-1} por lo cual los tratamientos quedaron como se indica en los Cuadros 5 y 6.

Cuadro 5. Solución nutritiva Steiner (1980) al 100 y al 25 %.

		ANIONES			CATIONES		
		N	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
100	me L^{-1}	12	1	7	7	9	4
%							
25%	me L^{-1}	6	0.5	1.75	1.75	2.25	1

Cuadro 6. Composición química de los tratamientos.

Trats	NH_4^+	NO_3^-	Ca^{+2}	K^+	Mg^{+2}	SO_4^{-2}	H_2PO_4^-
	meq L^{-1}						
1	7.7	0	2.3	1.8	1	3.5	0.2
2	5.8	2.3	1.8	1.4	0.8	3.2	0.3
3	3.9	3	1.8	1.4	0.8	2.1	0.3
4	1.9	4.5	1.8	1.4	0.8	0.6	0.3
5	0	7.7	2.3	1.8	1	0.4	0.2

Trats = tratamientos

A los 54 días de iniciados los tratamientos (dit) se realizó el primer muestreo destructivo. Se colectó una planta de cada tratamiento (5 tratamientos) y de cada repetición (5 repeticiones), con lo cual se obtuvo un total de 25 plantas (5 plantas por tratamiento) (Figura 9).



Figura 9. Plantas de fresa colectadas para el primer (A) y segundo muestreo (B).

Para el muestreo se seleccionaron las plantas más representativas, con porte medio, de cada tratamiento en cada repetición.

5.3.1. Variables de estudio.

El experimento se dividió en 2 fases. En la primera fase se evaluó la respuesta de las plantas de fresa a las diferentes relaciones de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, en donde se midieron las siguientes variables (Figura 10):

- Área foliar (a los 54 y 108 días de iniciados los tratamientos): se usó un integrador de área foliar LI-COR. Se hizo un muestreo destructivo (una planta por repetición).
- Biomasa seca y fresca a los 54 y 108 dit): con una balanza analítica se determinó el peso de biomasa fresca y seca de hojas corona y raíz.
- Concentración de amonio y nitrato (a los 54 y 108dit) en diferentes órganos de la planta (hojas, corona y raíz) mediante los métodos de Nessler y Cataldo, respectivamente.
- °Brix en corona con un refractómetro (a los 108 dit).
- °Brix en fruto, firmeza y rendimiento (a los 136 dit).

- Análisis químico del extracto celular de peciolo (a los 136 dit)



Figura 10. Medición de área foliar (A) y molienda de las muestras (B).

5.3.1.1. Determinación de NH_4^+

Para el análisis de NH_4^+ en tejidos se utilizó el método de Nessler para la determinación rápida de nitrógeno reducido (Alcántar y Sandoval, 1999). Éste método cuantifica todo el nitrógeno reducido soluble que se encuentra en el tejido vegetal y consiste en pesar 0.1g de tejido vegetal seco y molido y agregarle 10ml de buffer fosfato, agitar en vortex y filtrar en frascos de vidrio (Figura 11A). Posteriormente se toma una alícuota de 0.1 ml de este filtrado y se lleva a un volumen de 7ml con agua destilada añadiendo 2 ml del reactivo de Nessler el cual está hecho a base de ioduro de potasio, ioduro de mercurio e hidróxido de sodio. Por último, se lee la absorbancia de las muestras en un espectrofotómetro a 420 nm (Figura 11B). El fundamento de esta técnica es la reacción colorimétrica que ocurre al mezclar la muestra con el reactivo de Nessler, dando una coloración amarillo-café cuya intensidad es proporcional a la cantidad de amonio en la muestra.

5.3.1.1. Determinación de NO_3^-

Para la determinación de NO_3^- se utilizó el método de Cataldo (Alcántar y Sandoval, 1999) el cual consiste en pesar 0.1 g de la muestra seca y molida y suspender en 10 ml de agua desionizada e incubar estas suspensiones a 45°C. Después se procede a homogeneizar y centrifugar a 5000 rps. Posteriormente se transfieren alícuotas de 0.2 ml en matraces y se adicionan

0.8 ml de ácido salicílico-ácido sulfúrico y se dejan reposar. Finalmente se agregan 19ml de hidróxido de sodio 2N y se lee absorbancia a 410 nm en un espectrofotómetro Spectronic 20+ de Milton Roy Company (Figura 11B).

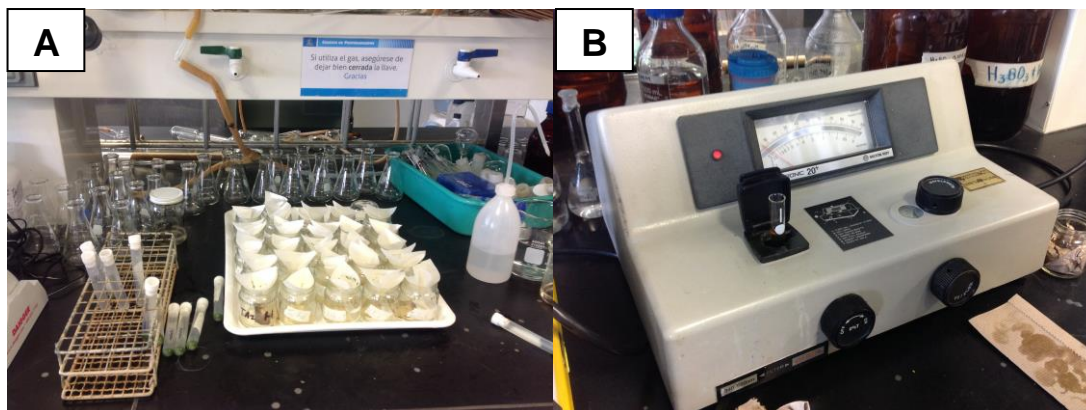


Figura 11. Filtrado de las muestras para el análisis de amonio (A), medición colorimétrica (B).

El fundamento de esta técnica se basa en que el complejo formado por la nitración del ácido salicílico en condiciones fuertemente ácidas presenta una máxima absorción a 410 nm en una solución básica de $\text{pH} < 12$ y la absorbancia del cromóforo formado es directamente proporcional a la concentración de nitratos.



Figura 12. Muestras para la determinación de NO_3^- .

5.3.1.2. Análisis nutrimental del extracto celular de peciolo.

El análisis nutrimental se realizó el día 21 de Octubre del 2013 a los 136 dit (días de iniciados los tratamientos), y para esto se cortaron peciolo de las hojas más recientemente maduras de cada tratamiento y se obtuvo el extracto celular de peciolo con una jeringa. Posteriormente se tomó una alícuota de 0.2 ml de este extracto y se llevó a 10 ml con agua desionizada (Figura 13A). Esta dilución se llevó al laboratorio y en ella se determinó la concentración de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn, B, Mo y Na, mediante el ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) (Figura 13B).

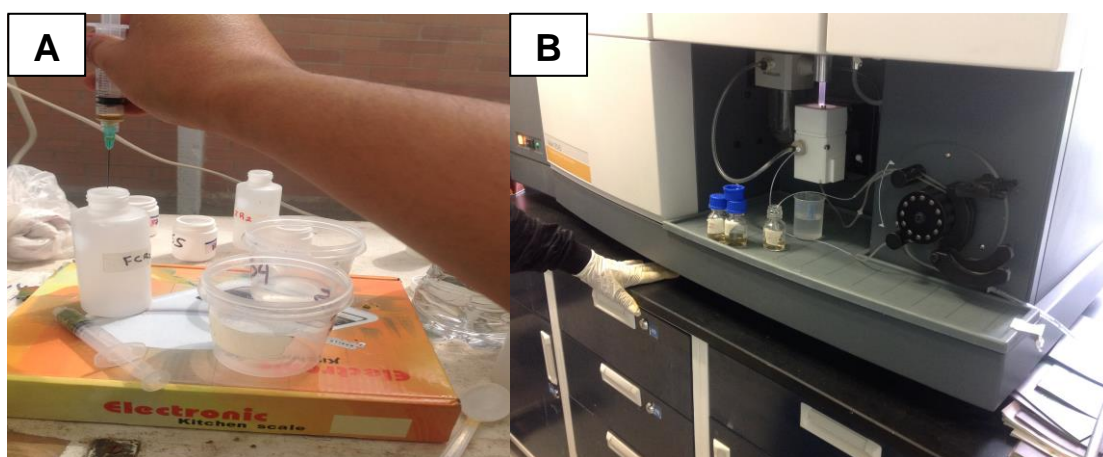


Figura 13. Muestreo del extracto celular de peciolo (A) y análisis químico en el ICP-AES (B).

Análisis de °Brix y rendimiento.

Al final de la fase uno del experimento (a los 136 dit) se determinó la concentración de azúcares (°Brix), firmeza y rendimiento en frutos (peso de materia fresca y seca) de las primeras 2 fructificaciones del cultivo tomando como muestra una planta por tratamiento y 3 frutos por planta (Figura 14).

En el segundo muestreo (108 dit) se midió la concentración de azúcares (°Brix) en la corona de las plantas (25 plantas). Este procedimiento consistió en obtener el extracto celular de las coronas y se colocaron unas gotas de esta en un refractómetro.



Figura 14. Análisis de frutos en la primera fase.

5.4. Metodología de la segunda fase: relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$

La segunda fase se inició el 20 de Diciembre del 2013 cuando la planta ya tenía 234 días de haberse trasplantado. Antes de aplicar los tratamientos se dejaron agotar las reservas nutrimentales de todas las plantas dando riegos únicamente con agua acidulada durante 20 días y se podaron todas las hojas viejas dejando únicamente dos hojas (la más recientemente madura y el nuevo brote). En esta fase se evaluó el efecto de las relaciones calcio / potasio en la fructificación de plantas de fresa *Fragaria x ananassa* Duch. cv. Festival. Para esto, se utilizó como solución nutritiva base la solución de Steiner modificada en la primera fase con un 25% de NH_4^+ y 75% NO_3^- . Los tratamientos se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Tratamientos con diferentes relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$

Trats	NH_4^+	NO_3^-	Ca^{+2}	K^+	Mg^{+2}	SO_4^{-2}	H_2PO_4^-
	meq L^{-1}						
1	1.9	4.5	2.3	1.8	0.8	1.2	0.3
2	1.9	4.5	3.0	1	0.8	1.3	0.3
3	1.9	4.5	2.0	2.0	0.8	1.1	0.3
4	1.9	4.5	0.5	3.0	0.4	0.5	0.3

Trats = Tratamientos

A los 70 días de iniciados los tratamientos (dit) se hizo el primer muestreo en el que se evaluaron los siguientes parámetros: diámetro ecuatorial, polar, firmeza y concentración de azúcares ($^{\circ}$ Brix) de tres frutos; peso de materia seca y materia fresca de frutos maduros de cada tratamiento y concentración de iones Ca^{2+} , K^{+} y NO_3^{-} de tres frutos maduros por tratamiento. Los diámetros se tomaron con un vernier, la firmeza se midió con un penetrómetro digital y el contenido de azúcares se determinó con un refractómetro (Figura 15). Para medir la concentración de iones se utilizaron ionómetros marca Horiba® (Figura 16). Se obtuvo el jugo de tres frutos por tratamiento y se sacó un promedio para posteriormente graficar estos valores (Figura 15).



Figura 15. Preparación de las muestras para su análisis.



Figura 16. Medición de la concentración de iones Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- en jugo de fruto.

A los 87 días de iniciados los tratamientos, en esta segunda fase, se determinó el peso de materia fresca, materia seca, diámetro ecuatorial, diámetro polar, y concentración de iones Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- en el extracto de los frutos.

5.5. Análisis de la información.

Los resultados se analizaron estadísticamente mediante el programa InfoStat. Se realizó un análisis de varianza con prueba de diferencias mínimas significativas (LSD Fisher) con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados.

Posteriormente con las medias obtenidas en el análisis estadístico se elaboraron gráficas para representar el comportamiento de los datos y a éstas se les adicionó gráficamente la desviación estándar del error.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Asignación de biomasa y área foliar

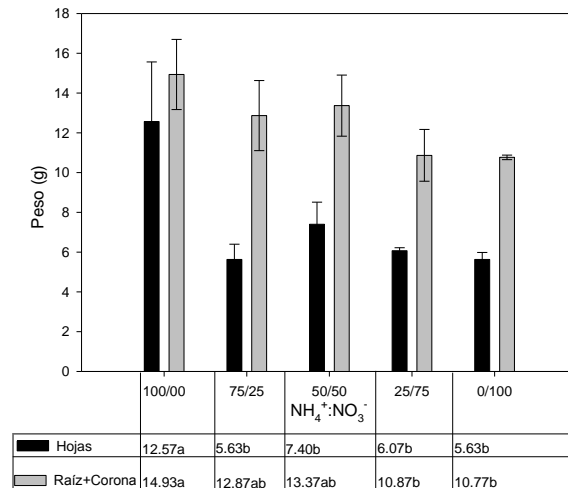
6.1.1. Primer muestreo.

En las Gráficas 1A y 2A se muestran las medias del peso de materia fresca y seca de las hojas y raíz con corona, donde se observan diferencias estadísticamente significativas. El tratamiento donde se adicionó 100% del nitrógeno en forma amoniacal acumuló mayor biomasa fresca y seca y fue estadísticamente diferente a los demás tratamientos.

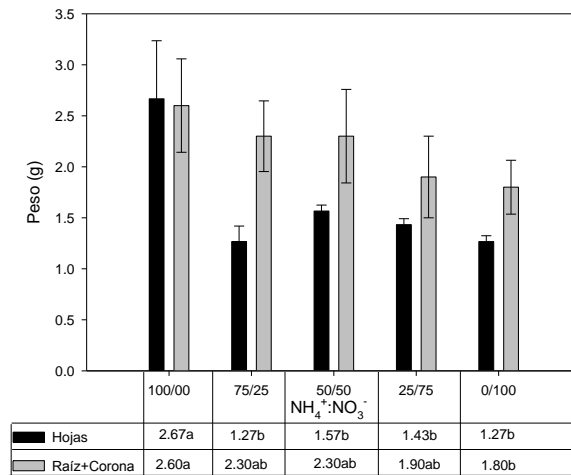
Se observa que conforme se incrementa el contenido de nitratos en la solución nutritiva con relación al amonio, el contenido de materia fresca y seca, en corona y raíz disminuyen proporcionalmente.

Estos resultados difieren con lo obtenido por Tabatabaei *et al.* (2006) quienes evaluaron el efecto de la relación amonio/nitrato en fresas 'Camarosa' y 'Selva', cultivadas en sustrato y con soluciones nutritivas, quienes encontraron que las plantas cultivadas en solución con 75% de NH_4^+ disminuyeron el contenido de peso de materia fresca y seca, en comparación con aquellas plantas que recibieron el 25% de NH_4^+ . Por lo tanto, una combinación de estas dos formas de N en una relación apropiada (25 NH_4^+ /75 NO_3^-) resultó ser benéfico para el crecimiento de plantas.

También, Cardenas-Navarro *et al.* (2006) encontraron que la formulación de diferentes relaciones amonio nitrato en la solución nutritiva no afecta el crecimiento de la planta madre, por otra parte el número de plantas hijas no se ve afectado por las diferentes relaciones amonio/nitrato, pero la materia seca de estas se redujo cuando la proporción de amonio se adiciono por encima del 50%. También observó que la relación carbono/nitrógeno (C/N) en la corona bajó significativamente cuando la proporción de amonio estuvo arriba de 75%, esto sugiere un impacto, en la acumulación de carbohidratos, de los tratamientos aplicados y sobre el metabolismo de la planta.



Gráfica 1A. Acumulación de biomasa fresca en hojas y raíz con corona en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.



Gráfica 2A. Acumulación de biomasa seca en hojas y raíz con corona en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

6.1.2. Segundo muestreo.

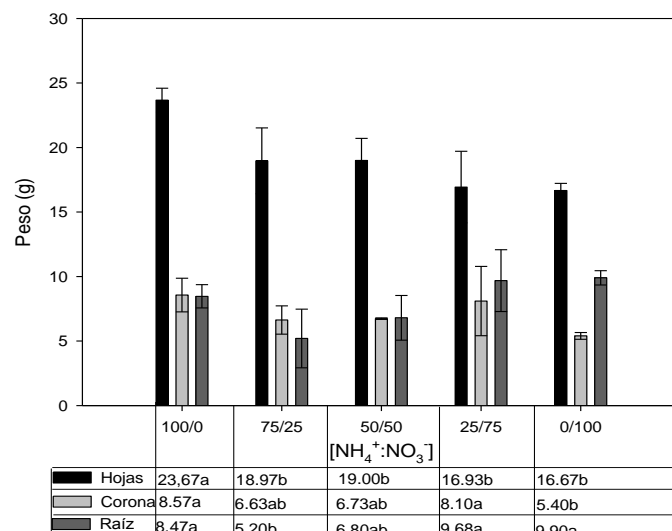
En las Gráficas 1B y 2B se observa que hubo diferencias estadísticas entre tratamientos por efecto de la adición de diferentes relaciones amonio/nitrato en la solución nutritiva en plantas de fresa cv. Festival.

Para esta etapa de muestreo, se detectó mayor contenido de materia fresca y seca en hojas que en coronas y raíces. Se observa que a mayor concentración de amonio en la solución mayor es el peso de biomasa fresca y seca en hojas. El tratamiento 0/100 fue el que mantuvo una baja acumulación de pesos de biomasa fresca y seca en las dos fases, lo cual concuerda con lo obtenido por Yoon *et al.* (2009) quienes observaron que aplicaciones de amonio en tasas de 20% en la solución nutritiva resulta en un mejor crecimiento de la planta, además de mejor producción de fruto en comparación con adiciones únicamente con nitrato; sin embargo, los resultados de los tratamientos 100/0 y 75/25 difieren con lo obtenido por estos autores los cuales mencionan que un incremento en la proporción de amonio en la solución nutritiva a un 30%, modificó el pH del sustrato a 3.5, por lo tanto, se observó una reducción en el crecimiento de la planta y a su vez, en el rendimiento.

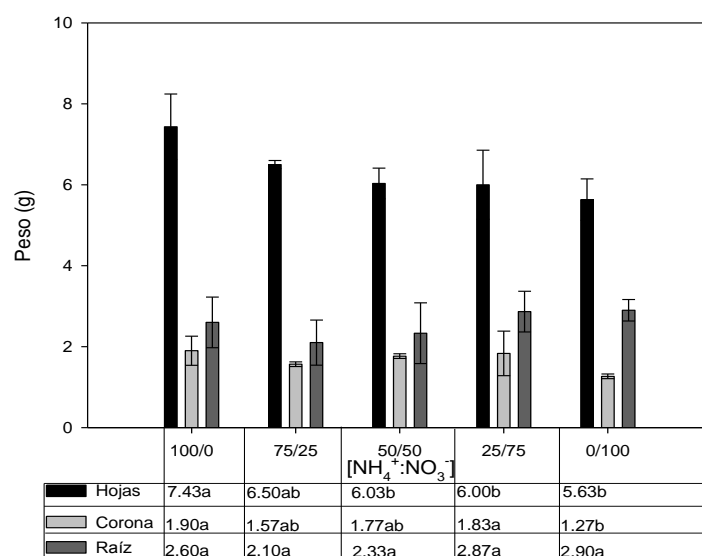
Ganmore y Kafkafi (1984) realizaron un experimento con fresas para evaluar la mejor fuente de nitrógeno para la etapa vegetativa y el efecto de la temperatura de la raíz. Se encontró que el N se absorbe mayormente cuando están presentes las dos formas (NH_4^+ y NO_3^-) que cuando se encuentran por separado. La planta absorbe preferencialmente al NH_4^+ durante el periodo de crecimiento vegetativo, tal y como se observó en el presente estudio.

Andrews *et al.* (2013) mencionan que el suministro de N, independientemente de su forma (NH_4^+ o NO_3^-), tiene un fuerte y consistente efecto en la distribución de materia seca entre el brote y la raíz.

En ambas gráficas se observa que la materia seca y fresca de raíces es mayor en las plantas abastecidas con mayor proporción de nitratos lo cual concuerda con lo encontrado por Scheible *et al.* (1997) en plantas de tabaco, donde la relación tallo:raíz fue de 8:10 cuando crecieron en condiciones elevadas de NO_3^- .



Gráfica 1B. Acumulación de biomasa fresca en hojas, raíz y corona en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (108 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.



Gráfica 2B. Acumulación de biomasa seca en hojas, raíz y corona en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (108 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

Lima *et al.* (2010) propusieron que el NH_4^+ y el NO_3^- inducen diferentes respuestas en el crecimiento de la raíz, mientras que el NH_4^+ promueve la

iniciación el NO_3^- promueve la elongación radical, y la adición de $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ sinérgicamente induce el número y el tamaño de las raíces laterales.

Claussen y Lenz (1999) encontraron que en arena de cuarzo con adiciones de CaCO_3 el NH_4^+ como fuente única N causó un menor deterioro en plantas de fresa cv. Senga Sengana. Guo *et al.* (2007) demostraron que en un sistema de raíces divididas cuando el pH del medio se ajusta entre 4.0 - 5.5 la materia seca de raíces se incrementa en las raíces fertilizadas con amonio mientras que con nitratos decreció.

6.2. Área foliar

6.2.1. Primer muestreo.

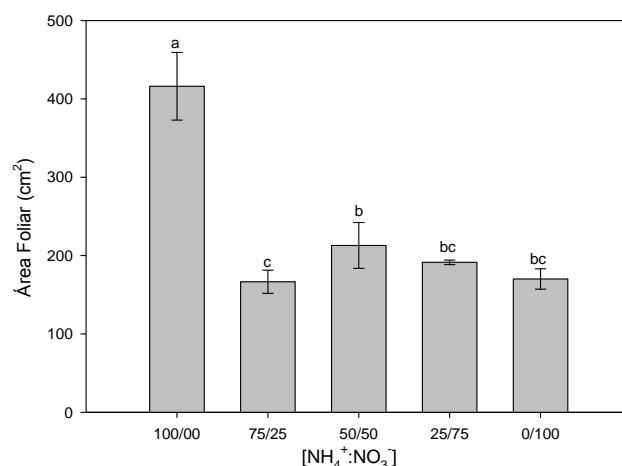
En la Gráfica 3A se observa que el tratamiento en donde se adicionó 100% del nitrógeno en forma amoniacal acumuló mayor área foliar y fue estadísticamente diferente a los demás tratamientos.

Generalmente el exceso de nitrógeno en forma amoniacal genera un crecimiento exuberante de la planta, lo cual se traduce en plantas comúnmente denominadas “alechugadas” que alcanzan alturas mayores de 30 cm y esto complica el paso de aire entre las plantas además de hacerlas más susceptibles a daños por *Botrytis* y cenicilla.

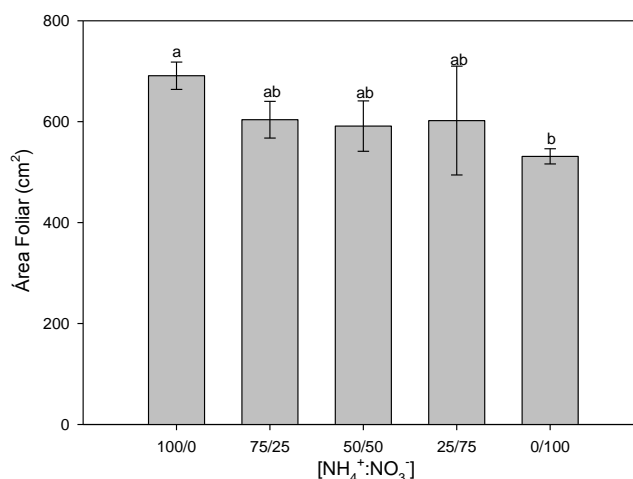
Caso contrario observaron Tabatabaei *et al.* (2006), quienes encontraron que las plantas de fresa cultivadas en solución con 75% de NH_4^+ disminuyeron su contenido de área foliar, en comparación con aquellas plantas que recibieron el 25% de NH_4^+ .

6.2.2. Segundo muestreo.

En el segundo muestreo, a los 108 dit, se observa un incremento en el área foliar en todos los tratamientos, sin embargo, donde se adicionó solo amonio a la solución nutritiva las plantas tuvieron mayor área foliar y fue estadísticamente diferente al tratamiento con el 100% de nitratos, como fuente de nitrógeno (Gráfica 3B).



Gráfica 3A. Área foliar en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.



Gráfica 3B. Área foliar en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (108 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

El mismo fenómeno observaron Ganmore y Kafkafi (1984), quienes señalan que la preferencia por la absorción de NO₃⁻ en plantas de fresa ocurre durante la floración y el periodo de fructificación. La planta absorbe preferencialmente al NH₄⁺ durante el periodo de crecimiento vegetativo.

De igual manera, Yoon *et al.* (2009) mencionan que al adicionar amonio en tasas de 20% en la solución nutritiva adicionada a un cultivo de fresa en sustrato, resulta en un mejor crecimiento de la planta además de mejor producción de fruto en comparación con solo adicionar nitrato.

Taghavi *et al.* (2004) encontraron que las plantas de fresa necesitan más amonio que nitratos en la etapa vegetativa, pero el amonio no debe exceder más del 50% del nitrógeno total en la solución nutritiva. El amonio también mejora el rendimiento y el contenido de nitrógeno en los tejidos de la planta. La etapa de desarrollo de las plantas y las condiciones ambientales de la planta determinan las mejores relaciones amonio/nitrato.

Al igual que en el presente estudio, Guo *et al.* (2007) reportan que en diversos estudios se encontró que el amonio en mayor proporción que el nitrato mejora el crecimiento de plantas de frambuesa, arroz, pimiento dulce y maíz.

6.3. Concentración de NH_4^+ y NO_3^- en plantas de fresa

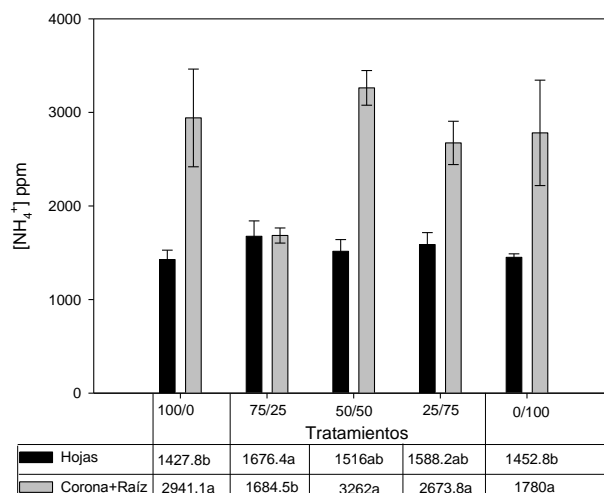
6.3.1. Primer muestreo.

En las Gráficas 4A y 5A se observa que hubo diferencias estadísticas entre tratamientos por efecto de la adición de diferentes relaciones amonio/nitrato en la solución nutritiva en plantas de fresa cv. Festival para la variable concentración de amonio y nitrato.

Se detectó que las concentraciones de amonio en los tejidos es similar, la corona más la raíz tienen el doble de concentración de amonio que las hojas, lo cual nos permite inferir que la relación en la concentración de hoja y raíz es 1:1. Los tratamientos que presentan las dos fuentes nitrogenadas ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) presentaron una mayor acumulación de amonio en las hojas, mientras que en corona y raíz no se tuvieron diferencias concluyentes (Gráfica 4A).

En cuanto a la concentración de nitratos podemos observar que los niveles de estos en las hojas se incrementó conforme la fuente de nitrógeno en el sustrato se componía exclusivamente de nitratos. Este comportamiento concuerda con lo obtenido por Taghavi *et al.* (2004), quienes concluyeron que el efecto del nitrógeno sobre la actividad de la enzima nitrato reductasa en fresa, sometida a diferentes relaciones amonio/nitrato durante el crecimiento vegetativo, se vió

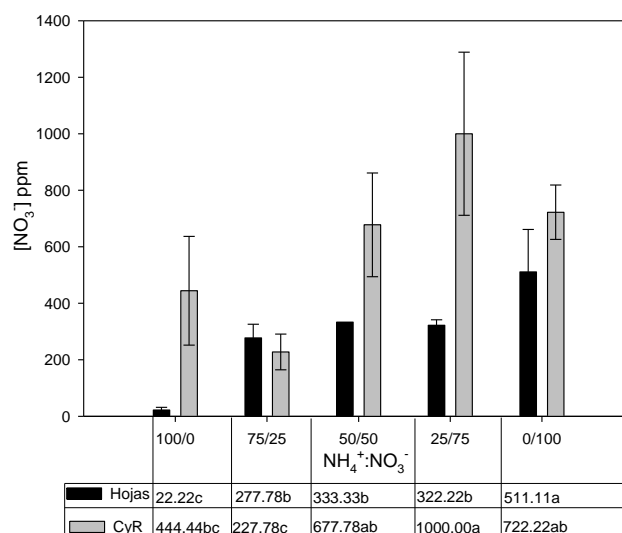
afectado por las fuentes de nitrógeno y la actividad máxima de la nitrato reductasa se encontró en la relación amonio/nitrato igual a 1/6. De acuerdo con estos autores, las plantas de fresa requieren mayormente de amonio en la etapa vegetativa pero sugiere que el NH_4^+ no debe exceder del 50% del nitrógeno total en la solución nutritiva.



Gráfica 4A. Concentración de NH_4^+ en hojas y coronas con raíz en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

6.3.1. Segundo muestreo.

En las gráficas 4B y 5B se observa que hubo diferencias estadísticas entre tratamientos por el efecto de la adición de diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ en la solución nutritiva para la variable concentración de nitratos y amonio en diferentes órganos en plantas de fresa cv. Festival.



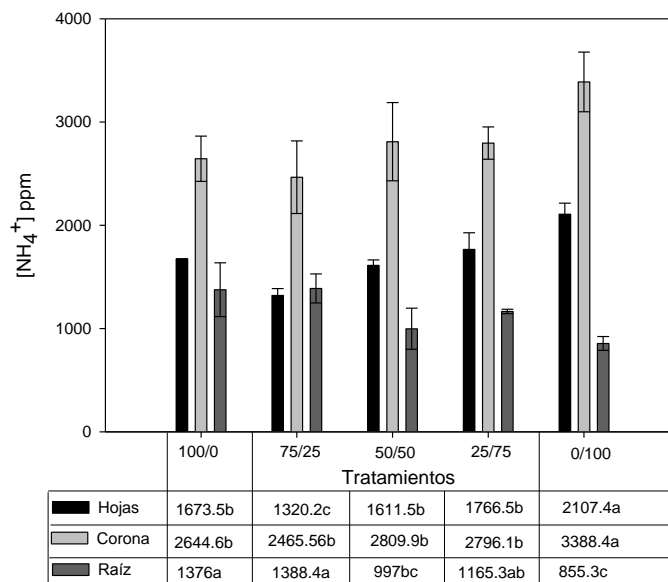
Gráfica 5A. Concentración de NO_3^- en hojas y coronas con raíz en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (54 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

En la Gráfica 4B podemos observar que el tratamiento 100% nitratos como fuente fertilizante fue el tratamiento que tuvo una mayor concentración de amonio en los tejidos de hoja y corona y mayor concentración de nitratos en corona. Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Tlatelpa (2011) quien encontró que en el tratamiento con la aplicación de 100% NO_3^- en fresa cv. Festival, la concentración de N total osciló entre 11,800 y 18,100 mg kg^{-1} y a los 120 días ddt acumuló 23.7 g planta^{-1} de materia seca. Al igual que Monroy *et al.* (2002) la máxima eficiencia de recuperación de N se presentó en el periodo 91-164 ddt (27%).

Papadopoulos (1987) señala que con la adición de 7.2 mmol L de N se encontraron los mayores niveles de N total en hojas y N-NO_3^- en extracto celular de peciolo de fresas desarrolladas en hidroponia.

La elevada concentración de NH_4^+ en el tratamiento 0/100 puede ser debida a la actividad de los sistemas de reducción del nitrato a amonio. Resultados similares fueron encontrados por Taghavi *et al.* (2004), quienes encontraron que la actividad de la nitrato reductasa durante el crecimiento vegetativo fue afectada por la fuente de nitrógeno y su mayor actividad fue con una relación

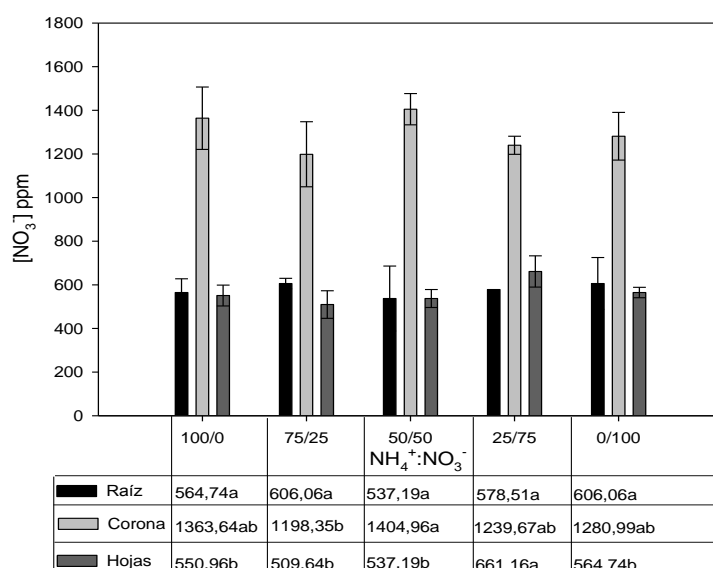
$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ igual a 6/1 y las plantas de fresa mostraron también un mayor contenido de nitrógeno total con esta relación comparadas con los tratamientos carentes de amonio.



Gráfica 4B. Concentración de NH_4^+ en hojas, coronas y raíz en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (108 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

La elevada concentración de NH_4^+ en las hojas y la baja concentración del mismo en las raíces del tratamiento 0/100 concuerda con lo encontrado por Hocking *et al.* 1984, quienes nos dicen que la proporción de NO_3^- reducido en las hojas y las raíces cambia conforme la fuente de NO_3^- se incrementa y las hojas se ven favorecidas como principal sitio de reducción en condiciones de elevado suministro de NO_3^- .

Las Gráficas 4B y 5B muestran claramente que el amonio y los nitratos se concentran principalmente en la corona y que prácticamente no hay diferencias estadísticas entre tratamientos. Al respecto Hocking *et al.* (1984) mencionan que la concentración de NO_3^- libre en el vástago depende del balance entre el NO_3^- suministrado desde las raíces y la actividad de la nitrato reductasa en las hojas. Los resultados de estas gráficas también indican que la corona es un tejido de almacenaje de iones nitrato y amonio mientras que las hojas y raíces tienen una distribución de iones NO_3^- más homogénea.



Gráfica 5B. Concentración de NO₃⁻ en hojas, coronas y raíz en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (108 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

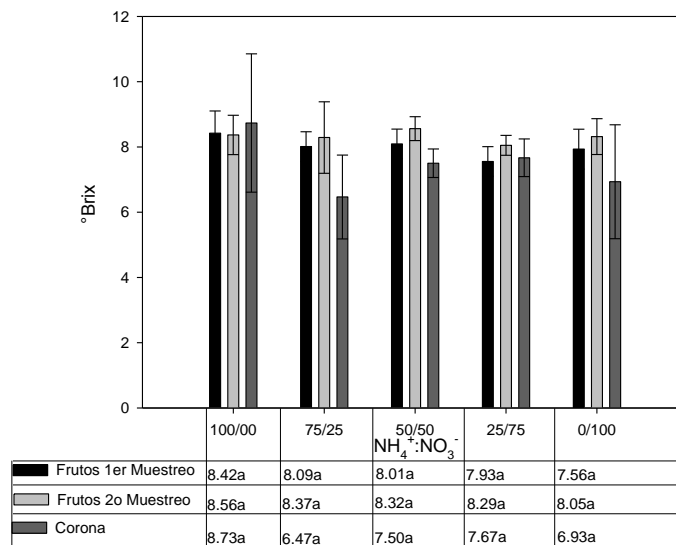
6.4. Análisis de frutos

En la Gráfica 6 podemos observar la concentración de azúcares (°Brix) en los frutos de fresa. Los resultados muestran que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos por efecto de las relaciones amonio/nitrato.

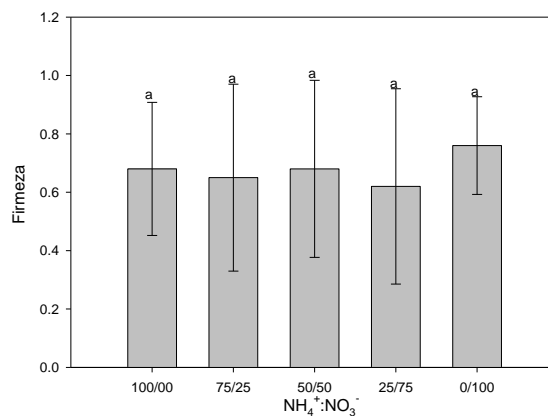
Caso contrario, Cardenas Navarro *et al.* (2006) observaron que el número de frutos fue significativamente mayor en plantas de fresa donde la solución nutritiva contenía 100% de amonio.

Sin embargo, en algunos tratamientos la concentración de azúcares en los frutos fue ligeramente proporcional a la concentración de azúcares en los tejidos de la corona.

En la Gráfica 7 no se observan diferencias significativas entre tratamientos para la variable firmeza de frutos debido, seguramente, a los coeficientes de variación tan elevados.



Gráfica 6. Concentración de azúcares en corona y frutos de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (108 y 136 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.



Gráfica 7. Firmeza de frutos en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones NH₄⁺/NO₃⁻ (136 dit). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

En la Gráfica 8 se presenta el análisis nutrimental del extracto celular de peciolo en plantas de fresa y de cada tratamiento. La gráfica muestra que el K⁺ es el ion que se presenta en mayor concentración en todos los tratamientos,

seguido por el Ca^{2+} . El tratamiento con 100% de nitrógeno como NO_3^- mostró concentraciones significativamente menores de P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} y B, lo cual puede explicar el bajo desarrollo vegetativo de las plantas durante el ciclo.

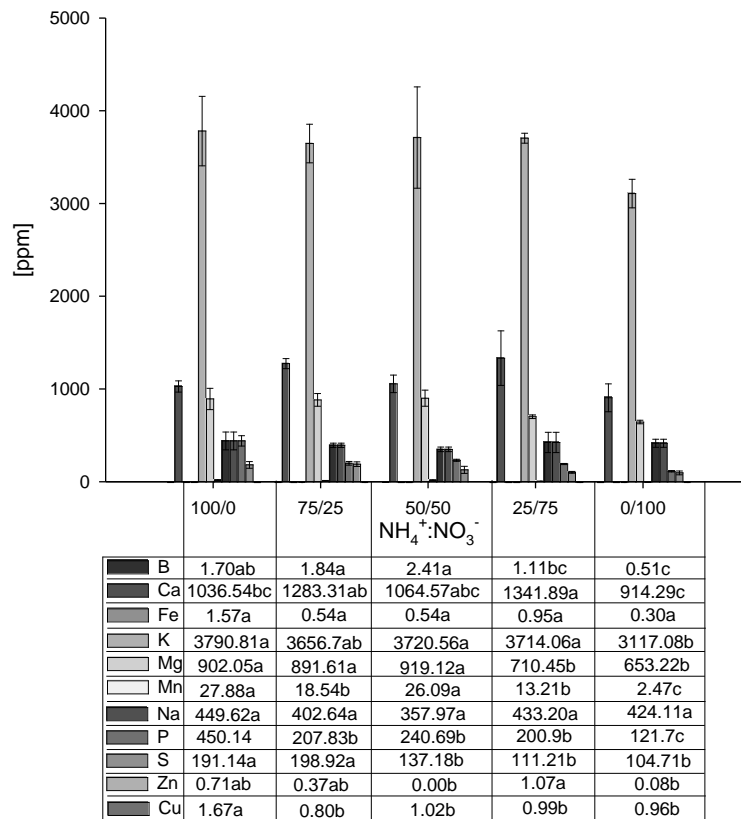
El tratamiento que mostró una mejor relación en la concentración nutrimental fue el tratamiento $100\text{NH}_4^+/0\text{NO}_3^-$.

Estos resultados difieren parcialmente con lo encontrado por Kirkby y Knight (1977), quienes sugieren que el incremento en los niveles nutricionales de NO_3^- en plantas de jitomate estimulan la absorción nutrimental.

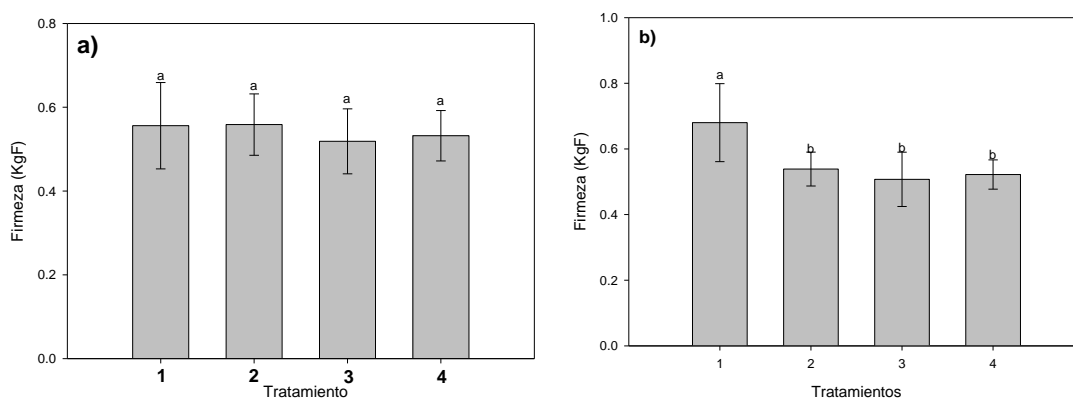
Almaliotis *et al.* (2003) encontraron que en plantas de fresa cv. Tudla el contenido de potasio es la variable más importante para predecir el rendimiento, además definieron un rango de suficiencia nutrimental el cual fue (en %): N 2.07-3.04, P 0.20- 0.38, K 1.84-2.21, Ca 0.77-1.48, Mg 0.25-0.70 y en mg kg^{-1} : B 12.0- 25.0, Mn 45.0-121.0, Zn 15.0-33.0, Fe 58.0-114.0 y Cu 3.0-22.5.

6.1. Resultados de la segunda fase: relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$

Los resultados que se muestran a continuación son el promedio de tres frutos por tratamiento y por bloque, con lo cual se tuvieron 15 frutos por tratamiento, se adicionó la barra de desviación estándar y se hizo un análisis de varianza con una prueba de diferencias mínimas significativas de Fisher ($\alpha=0.05$). En la Gráfica 9a se muestra que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos a los 70 dit, mientras que en la Gráfica 9b se observa que a los 86 dit el tratamiento 1 con $58\%\text{Ca}^{2+}/42\%\text{K}^+$ fue significativamente mayor con 0.68Kg F^{-1} de firmeza.



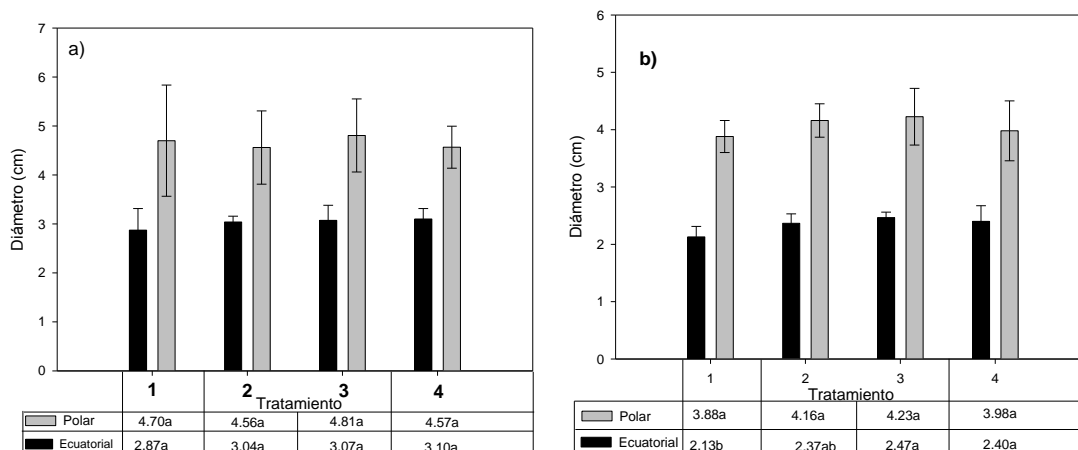
Gráfica 8. Análisis nutrimental del extracto celular de peciolo en plantas de fresa a los 136 dit. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.



Gráfica 9. Firmeza en frutos de plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$ a los 70 dit (a) y a los 86 dit (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

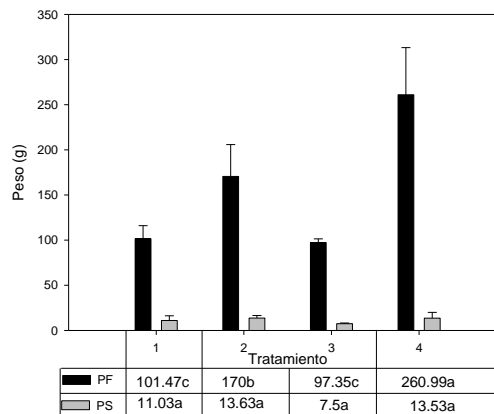
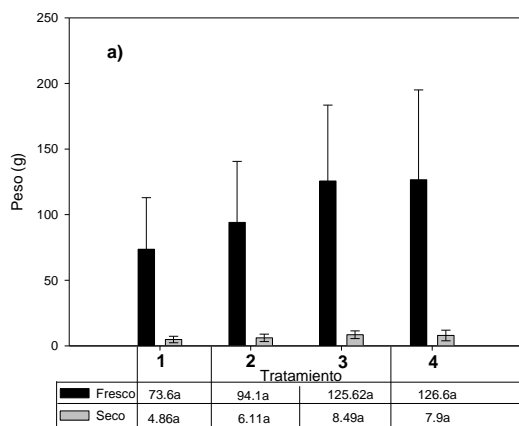
En las Gráficas 10a y 10b se observa que no hubo diferencia significativa entre tratamientos para la variable tamaño de frutos, sin embargo, se observa una tendencia de que el tamaño de frutos se incrementa cuando se tiene un mayor porcentaje de K^+ en la solución nutritiva y el mejor tratamiento fue con $50\%Ca^{2+}/50\%K^+$.

Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Neocleous y Savvas (2013) quienes evaluaron la respuesta de plantas de fresa cv. Camarosa a diferentes relaciones $Ca^{2+}/K^+/Mg^{2+}$ y encontraron que los tratamientos con 5 mM de Ca^{2+} no presentaron diferencias significativas, con respecto a las plantas desarrolladas con una solución nutritiva estándar.



Gráfica 10. Diámetros polar y ecuatorial de frutos en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones Ca^{2+}/K^+ a los 70 dit (a) y a los 86 dit (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

En la Gráfica 11a se indica que no hubo diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para la variable peso de materia fresca y materia seca en frutos de fresa por efecto de las relaciones Ca/K en la solución nutritiva. Se detectó una tendencia que cuando se incrementa el potasio en la solución nutritiva el peso del fruto también se aumenta y como se muestra en la Gráfica 11b el tratamiento 4 con una relación Ca^{2+}/K^+ de 25/75 fue el que tuvo una mayor acumulación de biomasa fresca en frutos.

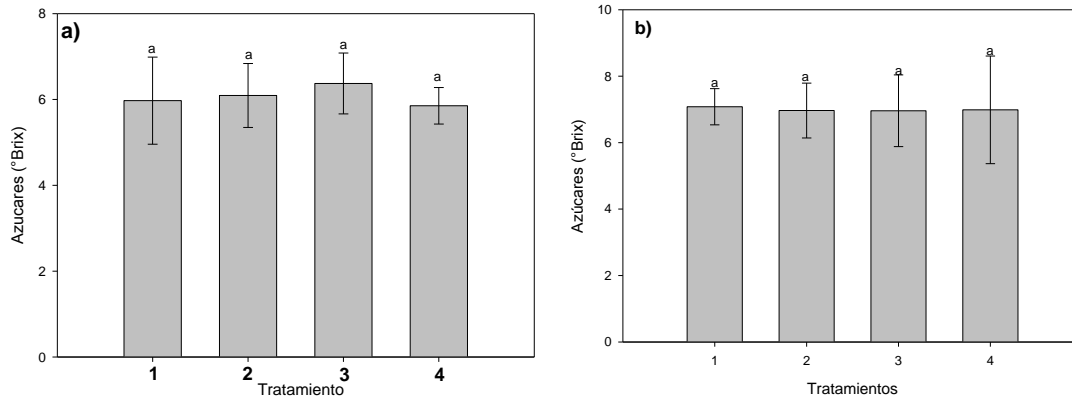


Gráfica 11. Peso de materia fresca y materia seca de frutos en plantas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ a los 70 dit (a) y 86 dit (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

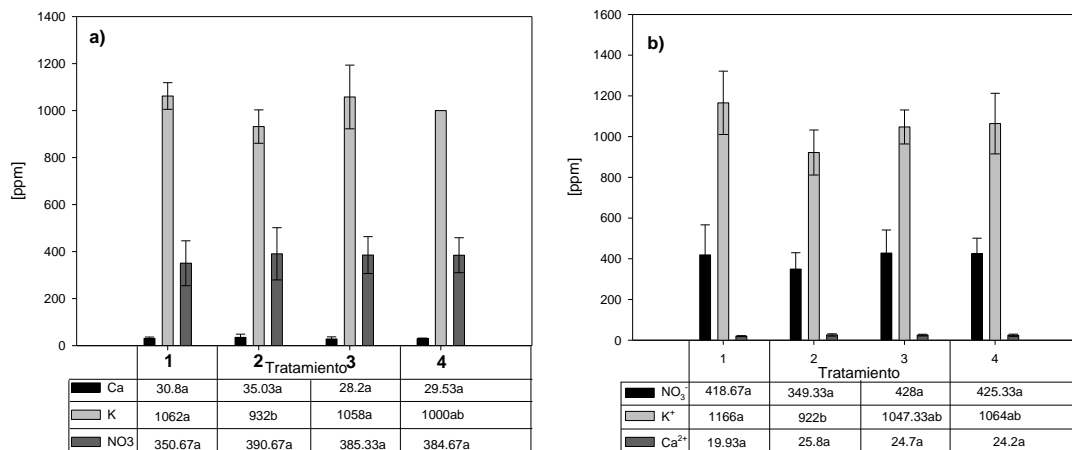
Estos resultados son parcialmente consistentes con los obtenidos por Lieten (2002) en plantas de fresa cv. Elsanta quien no encontró diferencias en peso de frutos, número de frutos y rendimiento total entre los tratamientos evaluados durante la primera cosecha. En la segunda cosecha encontró que un bajo suministro de K^+ en la solución nutritiva disminuye la firmeza y el contenido de azúcares en los frutos. Este mismo autor concluyó que aplicaciones de $\text{Ca}^{2+} < 2 \text{ mmol l}^{-1}$ reduce significativamente el crecimiento vegetativo, formación de estolones, peso de frutos y rendimiento total.

Las Gráficas 12a y 12b indican que no hubo diferencias significativas entre tratamientos para la variable contenido de azúcares en frutos de fresa.

En las Gráficas 13a y 13b podemos observar que los tratamientos no tuvieron un efecto significativo en la concentración de Ca^{2+} y NO_3^- dentro del fruto mientras que el tratamiento 1 ($58\%\text{Ca}^{2+}/42\%\text{K}^+$) fue significativamente mayor con una concentración de K^+ de 1062 ppm a los 70dit y 1166 ppm a los 86dit.



Gráfica 12. Contenido de azúcares (°Brix) en frutos de fresa, desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ a los 70 dit (a) y a los 86 dit (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

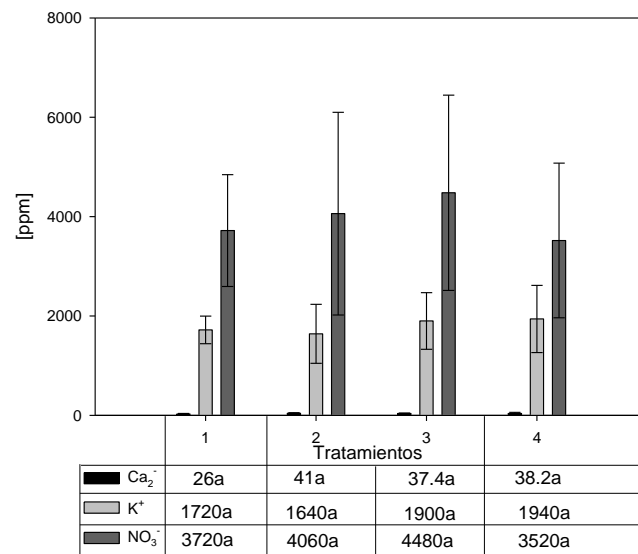


Gráfica 13. Concentración de Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- en frutos de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ a los 70 dit (a) y a los 86 dit (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

Estos resultados coinciden parcialmente con Neocleous y Savvas (2013), quienes encontraron que las plantas redujeron su tamaño y el rendimiento de frutos al incrementar la relación $\text{Ca}/\text{K}/\text{Mg}$, sin embargo, mencionan que esta diferencia es debida al incremento de la C.E. en solución del suelo, afectando procesos fotosintéticos y osmóticos y en comparación con los resultados

expuestos en este trabajo, los frutos no mostraron diferencias significativas en cuanto a rendimiento y calidad de fruto.

En la Gráfica 14 se muestra que los tratamientos no tuvieron un efecto significativo en la concentración de iones Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- acumulados en la corona de plantas de fresa y que la concentración de estos iones es ligeramente mayor a la concentración que presentan los mismos en el fruto.



Gráfica 14. Concentración de Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- en coronas de fresa desarrolladas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ a los 86 días. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) por una prueba LSD Fisher.

VII. CONCLUSIONES

7.1. En la etapa vegetativa, la solución nutritiva con una relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ igual a 100/0 incrementó significativamente el peso de materia fresca, peso de materia seca y área foliar en plantas de fresa.

7.2. En la etapa de fructificación, la solución nutritiva con una relación $\text{Ca}^{+2}/\text{K}^+$ igual a 58/42 incrementó la firmeza en los frutos de fresa.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alcántar G. G. y Tréjo-Tellez L. I. 2007. Nutrición de cultivos. Mundi-Prensa. México.
- Alcantar G. G. y Sandoval V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Publicación especial No. 10.
- Almaliotis D., Velemis D., Bladenopoulou S., Karapetsas N. 2003. Leaf nutrient levels of strawberries (cv. Tudla) in relation to crop yield. *Acta Horticulturae*. 708: 397-400.
- Amtmann A. y Rubio F. 2012. Potassium in Plants. In: eLS. John Wiley & Sons Ltd, Chichester. <http://www.els.net> [doi: 10.1002/9780470015902.a0023737]
- Andrews M., Raven J. A., Lea P. J. 2013. Do plants need nitrate? The mechanisms by which nitrogen form affects plants. *Annals of applied biology*, 163:174-199.
- Bar-Tal A., Aloni B., Karni L., Oserovitz J., Hazanm A., Itach M., Gantz S., Avidan A., Posalski I., Tratkovski N., y Rosenberg R. 2001. Nitrogen Nutrition of Greenhouse Pepper. I. Effects of Nitrogen Concentration and $\text{NO}_3 : \text{NH}_4$ Ratio on Yield, Fruit Shape, and the Incidence of Blossom-end Rot in Relation to Plant Mineral Composition. *HortScience* 36(7):1244–1251
- Benton J. J. 2005. Hydroponics: a practical guide for the soilless grower. 2nd Ed. CRC Press. U.S.A.
- Bertsch, P. M. y Thomas W. G. 1985. Potassium status of temperate region soils. In: Potassium in agriculture, R. D. Munson, Ed., 131–162. Madison, WI: ASA, CSSA, and SSSA.
- Bowsher C.G., Lacey A.E., Hanke G.T., Clarkson D.T., Saker L.R., Stulen I., Emes M.J. 2007. The effect of G1c6P uptake and its subsequent oxidation within pea root plastids on nitrite reduction and glutamate synthesis. *Journal of Experimental Botany*, 58:1109–1118.
- Britto T. D. y Kronzuckera J. H. 2002. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology* 159(6):567–584.
- Bruce, R. C., L. A. Warrell, D. G. Edwards, and L. C. Bell. 1988. Effects of aluminum and calcium in the soil solution of acid soils on root elongation of *Glycine max* cv. Forrest. *Aust. J. Agric. Res.* 39:319–338.

- Bush S. D. 1995. Calcium regulation in plant cells and its roll in signaling. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 46:95-122.
- Butz G. R. y Jackson A. W. 1977. A mechanism for nitrate transport and reduction. *Phytochemistry.* 16(4):409–417.
- Cárdenas-Navarro, R., P.L López., P. Lobit., C.R. Ruiz., M.V. Castellanos. 2006. Effects of nitrogen source on growth and development of strawberry Plants. *Journal of Plant Nutrition*, 29:1699–1707.
- Clark, R. B. 1982. Plant response to mineral element toxicity and deficiency. In: *Breeding plants for less favorable environments*, M. N. Christiansen and C. F. Lewis, Eds. 71–142. New York: John Wiley & Sons.
- Claussen W. y Lenz F. 1999. Effect of ammonium or nitrate nutrition on net photosynthesis, growth, and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry, raspberry and strawberry. *Plant and Soil* 208:95–102
- D'Anna, F., Incalcaterra, G., Moncada, A. y Miceli, A. 2006. Effects of different electrical conductivity levels on strawberry grown in soilless culture (Conference Paper). *Acta Horticulturae.* 708:397-400.
- Demarty M., Morvan C. y Thellier M. 1984. Calcium and the cell wall. *Plant, Cell & Environment.* 7(6):441–448
- Dunlop J. 1973. The kinetics of calcium uptake by roots. *Planta (Berl.).* 112(2):159-167.
- Epstein E. 1966. Dual pattern of ion absorption by plant cells and by plants. *Nature* 212:1324 - 1327
- Epstein, E., Rains, D. W. y Elzam, O. 1963 Resolution of dual mechanisms of potassium absorption by barley roots *Proc. Natl. Acad. Sci.* 49(5):684–692.
- Fageria, N. K. and V. C. Baligar. 2003. Fertility management of tropical acid soils for sustainable crop production. In: *Handbook of soil acidity*, Z. Rengel, Ed., 359–385. New York:Marcel Dekker.
- Fageria, N. K. and V. C. Baligar. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* 88:97–185.
- Fageria N. K. 2009. *The use of nutrients in crop plants.* CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Fernando, M., Mehroke, J. y Glass, A. D. M. 1992. De novo synthesis of plasma membrane and tonoplast polypeptides of barley roots during short-term

- potassium deprivation. In search of the high-affinity transport system. *Plant Physiol.* 100:1269–1276.
- Garland J. C. y Wilkins A. D. 1981. Effect of calcium on the uptake and toxicity of lead in *Hordeum vulgare* L. and *Festuca ovina* L. *New Phytologist.* 87(3):581–593
- Gioseffi E., de Neergaard A., Schjoerring J. K. 2012. Interactions between uptake of amino acids and inorganic nitrogen in wheat plants. *Biogeosciences*, 9, 1509-1518.
- González G. J. L, Rodríguez M., Ma. de las Nieves., Sánchez G. P., Gaitán A. E. A. 2009. Relación amonio:nitrato en la producción de hierbas aromáticas en hidroponía. *Agricultura Técnica de México.* 35:1 Enero-Marzo. pp. 5-11.
- Guo S., Zhou Y., Shen Q., y Zhang F. 2007. Effect of Ammonium and Nitrate Nutrition On Some Physiological Processes in Higher Plants – Growth, Photosynthesis, Photorespiration, and Water Relations. *Plant Biol.* 9:21–29
- Hancock J. F. 1999. Strawberries. CABI Publ., New York. N.Y.
- Hershey D. R. 1992. Plant nutrient solution pH changes. *J. Biol. Educ.* 26(2):107-111.
- Hirel B, Tétu T, Lea PJ, Dubois F. 2011. Improving Nitrogen Use Efficiency in Crops for Sustainable Agriculture. *Sustainability.* 3(9):1452-1485
- Hocking J. P., Steer B. T., Pearson J. C. 1984. Nitrogen nutrition of non-leguminous crops: A review. Part 1. *Field Crop Abstracts.* 37(8):625-636
- Huber, D. M. y Thompson I. A. 2007. Nitrogen and plant disease. In: *Mineral nutrition and plant disease*, L. E. Datnoff, W. H. Elmer, and D. M. Huber, Eds., 31–44. St. Paul, MN: The American Phytopathological Society.
- Ito A. y Fujiwara A. 1967. Functions of calcium in the cell wall of rice leaves. *Plant Cell Physiol* 8(3):409-422.
- Kirkby A. E. y Knight H. A. 1977. Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake and assimilation, organic acid accumulation and cation-anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiol.* 60:349-353.
- Kochian, L. V. & Lucas, W. J. 1988. Potassium transport in roots. *Adv. Botany Res.* 15:93–177
- Lea J. P. y Mifflin J. B. 2011. Nitrogen assimilation and its relevance to crop improvement. *Annual Plant Reviews* 42:1–40

- Lieten P. 2002. Effect of K:Ca:Mg ratio on performance of 'Elsanta' strawberries grown on peat (Conference Paper). *Journal of Plant Physiology*. 159(6):567-584
- Lillo C. (2008) Signalling cascades integrating light-enhanced nitrate metabolism. *Biochemical Journal*, 415: 11–19.
- Maathuis, F. J. M. y Sanders, D. 1993. Energization of potassium uptake in *Arabidopsis thaliana*. *Planta* 191(3):302–307.
- Maroto J. V., López G. S. 1988. Producción de fresas y fresones. Agroguias mundi-prensa. Madrid. 119pp.
- Myung J. C., Latigui A. y Lee W. C. 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
- Myung J.C., Jeong K. S. y Ko. D. K. 2008. Influence of $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ Ratios in fertigation solution on appearance of ammonium toxicity, growth and nutrient uptake of 'Maehyang' strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.)
- Navarro B. S. y Navarro G. G. 2003. Química agrícola. 2ª Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Neocleous D. y Savvas D. 2013. Response of hydroponically grown strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) plants to different ratios of K:Ca:Mg in the nutrient solution. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 88:3 293-300
- Newman, I. A., Kochian, L. V., Grusak, M. A. y Lucas, W. J. 1987. Fluxes of protons and potassium in corn roots. Characterization and stoichiometries using ion-selective microelectrodes. *Plant Physiol*. 84:1177–1184.
- Nicholas D. J. D. y Scawin J. H. 1956. A Phosphate Requirement for Nitrate Reductase from *Neurospora crassa*. *Nature*. 178(4548):1474-1475.
- Oaks A. y Hirel Bertrand. 1985. Nitrogen metabolism in roots. *Ann. Rev. Plant Physiol*. 36:345-365
- Paungfoo-Lonhienne C., Visser J., Lonhienne T. G. A., Schmidt S. 2012. Past present and future of organic nutrients. *Plant and Soil*, 359:1-18.
- Raven J.A. 1985. Regulation of pH and generation of osmolarity in vascular plants: A cost and benefit analysis in relation to efficiency of use of energy, nitrogen and water. *New Phytologist*, 101, 25–77.

- Rengel Z. 1992. The role of calcium in salt toxicity. *Plant, Cell & Environment* 15(6):625–632.
- SAGARPA. 2005. Plan Rector Sistema Nacional Fresa. México, D.F. 48pp.
- Sanderson G. W y Cocking E. C. 1964. Enzymatic assimilation of nitrate in tomato plants. I. Reduction of nitrate to nitrite. *Plant physiol.* 39:416-422
- Scheible R. W., Laurer M., Schulze D. E., Caboche M. y Stitt M. 1997. Accumulation of nitrate in the shoot acts as a signal to regulate shoot-root allocation in tobacco. *The Plant Journal.* 11(4): 671-691
- Schjoerring J.K., Husted S., Mack G., Mattsson M. 2002. The regulation of ammonium translocation in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53:883–890.
- Schroeder, J. I., Ward, J. M. y Gassmann, W. A. 1994. Perspectives on the physiology and structure of inward-rectifying K⁺ channels in higher plants: biophysical implications for K⁺ uptake *Rev. Biophys. biomolec. Struct.* 23, 441–471
- Tabatabaei J. S., Fatemi S. L. y Fallahi E. 2006. Effect of ammonium:nitrate ratio on yield, calcium concentration and photosynthesis rate in strawberry. *Journal of Plant Nutrition.* 29:7, 1273-1285.
- Taghavi S. T., Babalar M., Ebadi A., Ebrahimzadeh H. y Asgari A. M. 2004. Effects of Nitrate to Ammonium Ratio on Yield and Nitrogen Metabolism of Strawberry (*Fragaria x Ananassa* cv. Selva). *International Journal Of Agriculture & Biology.* 6(6):994-997.
- ten Hoopen F., Cuin T. A. P., Hegelund N. J., Shabala S., Schjoerring K. J. y Jahn P. T. 2010. Competition between uptake of ammonium and potassium in barley and Arabidopsis roots: molecular mechanisms and physiological consequences. *Journal of Experimental Botany.* 61(9):2303–2315.
- Thurman, L. G., K. D. Ritchy, and G. C. Naderman, Jr. 1980. Nitrogen fertilization on an Oxisol of the cerrado of Brazil. *Agron. J.* 72:261–265.
- Yoon H.S., Y.H. Hwang., C.G. An., J.S. Shim., H.J. Hwang., H.Y. Shin. 2009. Effect of NH₄⁺ to NO₃⁻ Ratio on Growth, Yield and Albinism Disorder of Strawberry. *Acta Hort.* 842:987-990.
- Wang Y.-Y., Hsu P.-K., Tsay Y.-F. 2012. Uptake, allocation and signaling of nitrate. *Trends in Plant Science*, 17:458–467.

- Walch-Liu P., Neumann G., Bangerth F. y Engels C. 2000. Rapid effects of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco. *Journal of Experimental Botany*, 51(343):227–237
- Zörb C., Senbayram M. y Peiter E. 2013. Potassium in agriculture-Status and perspectives. *J.Plant Physiol.*<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>