



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

**“REFLECTANCIA EN HOJAS DE CHILE MANZANO
(*Capsicum pubescens* R. y P.) PARA ESTIMAR CONTENIDO
DE NITRÓGENO”**

M. C. ROSALINO GASGA PEÑA

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2011

La presente tesis titulada: **Reflectancia en hojas de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) para estimar contenido de nitrógeno**, realizada por el alumno: **M. C. Rosalino Gasga Peña**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: _____
Dr. Manuel Sandoval Villa

ASESOR: _____
Dra. Libia I. Trejo Téllez

ASESOR: _____
Dr. Gustavo Adolfo de Jesús Baca Castillo

ASESOR: _____
Dr. Mario Pérez Grajales

ASESOR: _____
Dr. Rogelio Castro Brindis

Montecillo, Texcoco, Estado de México, agosto de 2011

DEDICATORIA

A mi madre: Sra. Noemí Peña Melendez

A mi padre: Sr. Moisés Gasga Vásquez

A mis hermanos: José A., Rigoberto, Humberto, Zoraida, Mayra F. y Adriana

A todos mis amigos

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por financiar mis estudios por medio de la beca que tuvo a bien otorgarme durante mi formación académica como Doctor en Ciencias.

Al Colegio de Postgraduados por darme la oportunidad de continuar con mis estudios y brindarme las facilidades para el desarrollo y conclusión del presente trabajo de investigación.

A mi Consejo particular: Dr. Manuel Sandoval Villa, Dra. Libia I. Trejo Téllez, Gustavo A. de J. Baca Castillo, Mario Pérez Grajales y al Dr. Rogelio Castro Brindis, quienes me brindaron apoyo para sacar adelante el proyecto de investigación.

ÍNDICE	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.1.1 Objetivos específicos.....	2
2.2 Hipótesis general.....	2
2.2.1 Hipótesis particulares.....	2
III. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1 Importancia del cultivo de chile manzano.....	3
3.2. Interacción de la radiación y la materia.....	3
3.3. Propiedades espectrales de las plantas.....	4
3.4. Estrés nutrimental y reflectancia espectral.....	4
3.5. Importancia del nitrógeno para las plantas.....	5
3.6. Diagnóstico nutrimental.....	6
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
4.1 Ubicación del experimento.....	8
4.2 Material vegetal.....	8
4.3 Unidad y diseño experimental.....	8
4.4 Muestreo de hojas.....	10
4.5 Variables respuesta.....	10
4.6 Análisis estadístico.....	11
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	12
5.1. Concentración de nitrógeno en follaje.....	12
5.2. Reflectancia obtenida de fotografías digital.....	13
5.2.1 Relación entre la reflectancia obtenida de fotografía digital y la concentración de nitrógeno en hojas.....	15
5.3. Reflectancia obtenida a partir de imágenes de escáner.....	20
5.3.1 Relación entre la reflectancia obtenida a partir de escáner y la concentración de nitrógeno en hojas.....	20

5.4. Estimación de la concentración de clorofila con SPAD-502.....	24
5.4.1 Relación entre la concentración de clorofila estimada con el SPAD-502 y la concentración de nitrógeno en hojas.....	25
V. CONCLUSIONES.....	27
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	28

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1.- Solución nutritiva utilizada para irrigar plantas de chile manzano cultivado en invernadero.....	9
Cuadro 2.- Fertilizantes comerciales que se utilizaron como fuentes de micronutrientes en la solución nutritiva.....	9
Cuadro 3.- Tratamientos aplicados a cada una de las unidades experimentales.....	10

ÍNDICE DE FIGURAS

Páginas

Figura 1. Efecto de la concentración de N (en solución nutritiva) en la concentración de nitrógeno en follaje de plantas de chile manzano (Tukey, $\alpha = 0.05$). * $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$	12
Figura 2. Reflectancia obtenida de fotografías digitales tomadas en follaje de plantas de chile manzano cultivado en condiciones de invernadero. * $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$	14
Figura 3. Relación entre la reflectancia en la banda azul obtenida con fotografía digital y la concentración de N en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.....	15
Figura 4. Relación entre la reflectancia en la banda verde obtenida con fotografía digital y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.....	17
Figura 5. Relación entre la reflectancia en la banda roja obtenida con fotografía digital y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.....	19
Figura 6. Reflectancia obtenida de imágenes digitales mediante un escáner de escritorio, en follaje de plantas de chile manzano cultivado en invernadero. * $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$	19
Figura 7. Relación entre la reflectancia en la banda azul obtenida con escáner de escritorio y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.....	21
Figura 8. Relación entre la reflectancia en la banda verde obtenida con escáner de escritorio y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.....	22
Figura 9. Relación entre la reflectancia en la banda roja obtenida con escáner de escritorio y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.....	23

Figura 10. Efecto de la concentración de N (en solución nutritiva) en las lecturas SPAD tomadas en follaje de plantas de chile manzano (Tukey, $\alpha = 0.05$). * $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$	24
Figura 11. Relación entre la concentración de nitrógeno en parte aérea y lecturas SPAD tomadas en plantas de chile manzano en plena fructificación.....	26

REFLECTANCIA EN HOJAS DE CHILE MANZANO (*Capsicum pubescens* R y P) PARA ESTIMAR CONTENIDO DE NITRÓGENO

Rosalino Gasga Peña, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

Con la finalidad de encontrar un procedimiento económico, rápido y confiable que estime el contenido de nitrógeno (N), se estableció un experimento en los invernaderos del Colegio de Postgraduados. La unidad experimental consistió de una planta de chile manzano sembrada en maceta de polietileno negro calibre 600 de 40x45 cm a una distancia de 1.5 m entre hileras y 0.5 m entre macetas. Como sustrato se utilizó tezontle rojo. Se emplearon soluciones nutritivas con cuatro niveles de N: 4, 8, 12 y 16 mol_c m⁻³ (en el último tratamiento 2 mol_c m⁻³ corresponden a NH₄⁺), a partir de la solución Steiner. El diseño experimental fue completamente al azar con cuatro repeticiones. En plena fructificación, en cada unidad experimental, se seleccionaron seis hojas y se les tomó fotografía digital y se escanearon. Posteriormente, con el programa de cómputo IDRISI Andes, cada imagen se separó en sus colores primarios (bandas azul, verde y rojo) y se extrajeron las reflectancias correspondientes a las longitudes de onda 450-495, 495-570 y 620-750 nm, respectivamente. En laboratorio se determinó la concentración de N mediante el método microkjeldahl. Las concentraciones de N en las hojas se relacionaron con las reflectancias obtenidas en las bandas azul, verde y roja, de cada método. Se correlacionó la concentración de N y las reflectancias obtenidas en las bandas azul, verde y roja, mediante el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2003). La reflectancia en la banda del verde obtenida con escáner de escritorio mostró ser el mejor estimador del contenido de nitrógeno en plantas de chile manzano ($R^2=0.97$). Se obtuvo la regresión entre lecturas SPAD y la concentración de nitrógeno en follaje. Estas variables presentaron un alto coeficiente de ajuste ($R^2=0.86$), pero resultó inferior al obtenido con el escáner.

Palabras claves: *reflectancia, Capsicum pubescens R. y P., sensores remotos, escáner de escritorio.*

REFLECTANCE IN LEAVES MANZANO HOT PEPPER (*Capsicum pubescens* R y P) TO ESTIMATE NITROGEN CONTENT

Rosalino Gasga Peña, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

With the objective of finding an economic, rapid and reliable procedure that estimates the concentration of nitrogen, an experiment in the greenhouses of the "Colegio de Postgraduados" was established. The experimental unit consisted of a plant of *Capsicum Pubescens R. y P.* planted in black polyethylene pots caliber 600 and 40x45 cm at a distance of 1.5 m between rows and 0.5 m between pots. Red tezontle was used as substrate. We utilized four nutrient solutions with different levels of NO_3^- : 4, 8, 12 and 14 meq L^{-1} , from the Steiner solution. An experimental design was used completely at random with four replications. When plants reached the fruiting stage (seven months after transplant), in each experimental unit, six leaves were selected and scanned to obtain digital images. Later, with the program IDRISI Andes, each image was separated in their primary colors (red, blue, and green bands) and we extracted the reflectances corresponding to wavelengths 450-495, 495 - 570 and 620 - 750 nm, respectively. In the laboratory leaves were processed to determine the concentration of nitrogen through the microkjeldahl method. The concentrations of nitrogen in the leaves were related to the reflectances in blue, green and red bands. We estimated correlations of Pearson of the concentration of nitrogen with the reflectances obtained in the red, green, and blue bands through the statistical programme Statistical Analysis System (SAS, 2003). The reflectance in the green band proved to be the best estimator of the of nitrogen concentration in plants of *Capsicum pubescens R. y P.* ($r = - 0.95$).

Keywords: reflectance, *Capsicum pubescens R. and P.*, remote sensing, desktop scanner

I. INTRODUCCION

Son muchos los factores que afectan el rendimiento y la calidad de los cultivos, la nutrición es uno de los más importantes. El estado nutrimental es un factor invisible en el crecimiento de la planta, excepto cuando existe un desequilibrio nutricional severo, que ocasionan síntomas visuales en la planta. La única manera de saber si un cultivo esta nutrido es hacer un análisis de tejido durante la estación de crecimiento. El análisis de tejido es una herramienta que nos ayuda en el monitoreo y en la evaluación del estado nutrimental de los cultivos (Reuter y Robinson, 1986). Por lo que se requiere de un modelo matemático, una vez obtenido dicho modelo, éste nos sería útil para determinar la concentración nutrimental crítica. Dicha concentración puede variar bajo condiciones diferentes. Actualmente, las técnicas para detectar anomalías nutrimentales en los cultivos son muy lentas y costosas, por lo que, la evaluación del estado nutrimental en cultivos intensivos mediante imágenes digitales es una alternativa prometedora para llevar a cabo un mejor manejo nutrimental de los cultivos. Por tal motivo, en el presente trabajo se realizó un experimento con la finalidad de diagnosticar deficiencia y toxicidad de nitrógeno, en plantas de chile manzano cultivado hidropónicamente en invernadero, mediante imágenes digitales. Además, se obtuvo la regresión entre la reflectancia de cada banda (azul, verde y roja) de las imágenes digitales del cultivo de chile manzano con las deficiencias y toxicidades de nitrógeno inducidas y la concentración de nitrógeno en follaje. Lo anterior fue con el propósito de diagnosticar deficiencia y toxicidad de nitrógeno antes de que éstas se manifiesten visualmente.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general

Detectar deficiencia y exceso de nitrógeno en hojas de chile manzano, con diferentes niveles de suministro, a través de su reflectancia.

2.1.1 Objetivos específicos

- Identificar deficiencias y exceso de nitrógeno en hojas de chile manzano a través de imágenes digitales de escáner.
- Identificar deficiencias y exceso de nitrógeno en hojas de chile manzano a través de imágenes de cámara digital.
- Identificar deficiencias y exceso de nitrógeno en hojas de chile manzano con el medidor de clorofila SPAD-502.

2.2 Hipótesis general

La reflectancia producida por las plantas de chile manzano, con diferentes niveles de suministro, conduce a la identificación de deficiencias y excesos de nitrógeno.

2.2.1 Hipótesis particulares

- La concentración de nitrógeno en plantas de chile manzano se relaciona de manera negativa con la reflectancia de imágenes digitales de sus hojas obtenidas con escáner.
- La concentración de nitrógeno en plantas de chile manzano se relaciona de manera negativa con la reflectancia de sus fotografías digitales.
- La concentración de nitrógeno en plantas de chile manzano se relaciona de manera positiva con las unidades SPAD medidas en sus hojas.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Importancia del cultivo de chile manzano

El chile manzano (*Capsicum pubescens* R y P) es una especie originaria de las partes altas de Perú y Bolivia, fue introducido a México a principios del siglo XX, es el único tipo de chile que se encuentra en las regiones con altitudes de 1700 a 2500 m. Existe gran diversidad de este tipo de chile en cuanto a color, forma y tamaño de fruto; por lo común, los amarillos son preferidos a los rojos y anaranjados; mientras que los de forma de manzana o cuadrados son más apreciadas que los que presentan una forma de pera, y en cuanto a tamaño tienen más demanda los frutos medianos (70 mL de volumen de agua desplazada) que los grandes (90 mL).

Por otra parte el crecimiento de la demanda de chile manzano en Los Ángeles, California, y los mercados nacionales, requiere del incremento de la calidad de este producto y su oferta durante todo el año. Sin embargo, la producción en México se caracteriza por ser principalmente de temporal, lo cual provoca una concentración de este producto en los meses de julio a diciembre, y una carencia casi absoluta de enero a junio. Por ello, han surgido en los últimos 10 años el cultivo intensivo de chile manzano en invernadero y el de campo abierto con el uso de riego por goteo. Estas variantes de producción constituyen sistemas que generan mayor calidad y cantidad de fruto. Los sistemas de producción intensivos tienen ventajas no sólo en la calidad y cantidad de fruto cosechado, sino también en la oportunidad de su producción, es decir, abastecer en los meses de enero a junio (Pérez y Castro, 1998; Pérez, 2002). Su cultivo a campo abierto depende del temporal y los rendimientos son relativamente bajos, 5 a 7 Mg por hectárea por año (Pérez y Castro, 1998). En tanto que en un sistema de producción intensivo en invernadero se alcanzan 75 Mg por hectárea por año y mayor calidad de fruto, lo cual representa una ventaja en la comercialización del producto (Pérez y Castro, 2008).

3.2. Interacción de la radiación y la materia

Todo objeto en la naturaleza posee una distribución única de radiación electromagnética, ésta puede ser reflejada, transmitida o absorbida (Soria *et al.*, 1998).

En este principio se basa la curva de reflectancia espectral o firma espectral, ya que cada especie vegetal presenta una reflectancia exclusiva según sus características morfológicas, fisiológicas, nutrimentales o causadas por efecto de un déficit de humedad. La señal que recibe el sensor corresponde a la energía electromagnética reflejada (Hecht, 2000), a lo que le llamamos o designamos el color. La firma espectral es distinta según las longitudes de onda (Soria *et al.*, 1998).

3.3. Propiedades espectrales de las plantas

La variación de la reflectancia del dosel está regida por las propiedades ópticas de las hojas. Estas propiedades están relacionadas con la capacidad de absorción de la luz (Baret *et al.*, 1994). La absorbancia por el follaje de los cultivos en el espectro visible depende principalmente de la concentración de las moléculas de clorofilas y carotenoides y, es menor en la región de longitud de onda de 550 nm, donde el pico de la reflectancia es frecuentemente menor de 20 %. La deficiencia de algunos nutrimentos influye a que exista una menor cantidad de pigmentos y consecuentemente el color de la hoja presente una menor intensidad, ocasionando una mayor reflectancia. Plantas saludables reflejan más luz verde que plantas enfermas o cloróticas (Palacios-Velez y Palacios-Sánchez, 2003).

3.4. Estrés nutrimental y reflectancia espectral

Zhao *et al.* (2005) realizaron un experimento en plantas de sorgo, donde usaron como fuente de nutrimentos la solución nutritiva de Hoagland al 100, 20 y 0 % de N. Cuantificaron la reflectancia en follaje y encontraron que las plantas irrigadas con 0 % de N presentaron significativamente un incremento lineal en la reflectancia en las longitudes de onda 555 y 715 nm ($r=-0.82$). Estos autores concluyen que la concentración de nitrógeno en el follaje de sorgo puede ser estimado por medio de la reflectancia en dicha longitud de onda.

En el mismo año, Zhao *et al.* establecieron un experimento con algodón en el que aplicaron nitrógeno a 0, 50, 100, 200 %, respectivamente de la dosis recomendada, y mediante la cuantificación de la reflectancia determinaron que se relaciona estrechamente con la concentración de nitrógeno en follaje. Estos resultados nos

indican que es posible detectar la deficiencia de nitrógeno de forma temprana, antes que ocurra un efecto irreversible en el cultivo. Noh *et al.* (2006) mencionan que las plantas deficientes en nitrógeno presentan una coloración amarilla, por lo que no sólo se puede detectar la deficiencia así también el grado de deficiencia dicho nutrimento.

3.5. Importancia del nitrógeno para las plantas

El nitrógeno es un nutrimento de alta demanda por las plantas los requerimientos en las primeras etapas de desarrollo son bajos, pero la demanda de nitrógeno se incrementa conforme la planta crece. Algunas plantas en la etapa máxima de desarrollo pueden demandar cantidades de 3 a 5 kg ha⁻¹ día⁻¹. Posteriormente cuando la planta madura la demanda de N disminuye. El nitrógeno (N) es un elemento constituyente de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos. Por esta razón la materia seca vegetal puede alcanzar hasta 6% de N, y el intervalo de concentración en el tejido normalmente varía desde 0.5 hasta 6%. Las grandes cantidades requeridas por las plantas, en combinación con la baja disponibilidad del N en los suelos agrícolas, hacen del N el nutrimento limitante más frecuente para los cultivos (Epstein y Bloom, 2005). De acuerdo con Alcántar *et al.* (2007) el N está presente en coenzimas, nucleótidos, amidas, ureidos y en la molécula de clorofila y participa en todas las reacciones enzimáticas y en todo el metabolismo. El N es esencial en la división y expansión celular, por lo tanto en el crecimiento (Pérez y Castro, 2010), también es constituyente de una multitud de compuestos llamados alcaloides, que no son metabolitos esenciales y se cree sirven como compuestos que almacenan N (Jones *et al.*, 1991). Una deficiencia de N limita la división y expansión celular, el desarrollo de los cloroplastos, por lo que se producen plantas débiles y enanas, con crecimiento lento, que maduran precozmente, con rendimiento y calidad significativamente bajos. Los síntomas iniciales y más severos se ven en las hojas más antiguas, donde las proteínas se hidrolizan y el N es translocado como aminoácido de los tejidos viejos a las porciones en crecimiento activo de la planta. La proteólisis resulta en un colapso de cloroplastos, con una disminución en el contenido de clorofila y el amarillamiento de las hojas (Marschner?, 1995). El estrés nutrimental por deficiencia de N está involucrada en la producción de los compuestos nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADP⁺) y adenosin trifosfato

(ATP). Estos compuestos son utilizados por la ribulosa-1-5-bisfosfato carboxilasa-oxigenasa (Rubisco) para la fijación de CO₂. Las plantas con exceso de N tienen follaje más abundante de color verde oscuro y tienden a ser más susceptibles a enfermedades y a la invasión de insectos debido a que su savia contiene gran cantidad de aminoácidos libres, azúcares y nitratos que las vuelven más atractivas (Cisneros y Godfrey, 2001; Ortega-Arenas *et al.*, 2006). Por lo anterior, es indispensable conocer el contenido de N en los cultivos pues contribuye en gran medida al crecimiento y desarrollo óptimo de la planta durante su ciclo fisiológico y como consecuencia, se ve reflejado en el rendimiento. Existen diversos métodos, desde los que emplean un balance entre demanda y suministro de N (Palma-López *et al.*, 2002), los cuales requieren de análisis de laboratorio; otros métodos utilizan equipos portátiles, como el medidor de nitratos en savia (Rangel-Lucio *et al.*, 2002), el estimador de clorofila (Varvel *et al.*, 2007), hasta sensores remotos (Solari *et al.*, 2008).

3.6. Diagnóstico nutrimental

Mediante el estudio de la nutrición vegetal se pretende establecer con que capacidad actúan cada uno de los elementos esenciales para la planta; también en que cantidad son necesarios, cómo asegurar que las plantas reciban estos elementos en la proporción y cantidad adecuada, diagnosticar y evitar problemas nutrimentales (Castro, 1998).

El diagnóstico nutrimental se basa en métodos para identificar deficiencias, toxicidades o desbalances nutrimentales. Una deficiencia nutrimental ocurre cuando un nutrimento es insuficiente o no puede ser asimilado por la planta. De manera similar, una toxicidad nutrimental ocurre cuando existen condiciones de exceso, desbalance y/o condiciones ambientales desfavorables (Fageria *et al.*, 1991).

Desde el punto de vista nutrimental, las plantas cultivadas pueden manifestar deficiencia o exceso del nutrimento. La clorosis y la necrosis así como el patrón de distribución de ambas son criterios importantes en el diagnóstico nutrimental. Los síntomas visibles de la deficiencia de un nutrimento son más específicos que los de su toxicidad (Gárate y Bonilla, 2001).

La estimación de las cantidades de nutrientes requeridas para alcanzar cierto rendimiento precisa ciertos conocimientos teóricos y el empleo de técnicas de análisis químico de suelo y planta. Estas últimas se emplean para medir los contenidos totales de nutrientes en la planta al momento de la colecta (cualquiera que este sea), y son análisis que se realizan con anterioridad y sus valores son conocidos. Este dato, junto con los rendimientos esperados o posibles y los índices de cosecha respectivos, se emplea para calcular la demanda nutrimental, esto es, los kilogramos por hectárea de un nutrimento que la planta debe poder extraer desde el suelo e incorporar a sus tejidos para alcanzar los rendimientos indicados. El análisis de tejido vegetal tiene tres variantes bien definidas, cuyos objetivos son, en general, distintos. Estas variantes son: el análisis del total de la parte aérea de la planta, el análisis de hojas u otros órganos de referencia y el análisis de savia (Etchevers, 1999).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación del experimento

La presente investigación se desarrolló en los invernaderos del Área de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Estado de México.

4.2 Material vegetal

Se utilizó la variedad Puebla de chile manzano. Los frutos de esta variedad son de color amarillo, cuentan con pericarpio grueso (0.5 cm). Las plantas crecieron en condiciones de invernadero, utilizando como cubierta plástico lechoso al 50 % de luminosidad. El riego y la fertilización se proporcionaron mediante un sistema por “spaguetti”. En fructificación, a cada unidad experimental, en cada riego se les suministro 1 litro de solución nutritiva.

4.3 Unidad y diseño experimental

La unidad experimental consistió de una planta de chile manzano sembrada en maceta de polietileno negro calibre 600 μm y de 40x45 cm a una distancia de 1.5 m entre hileras y 0.5 m entre macetas. Como sustrato se utilizó tezontle rojo. El diseño de tratamientos consistió en cuatro soluciones nutritivas con diferentes niveles de nitrógeno (Cuadro 1), utilizando como referencia para los otros nutrimentos la solución Steiner (Steiner, 1984). Para la preparación de las soluciones nutritivas se utilizaron fertilizantes comerciales. El pH de la solución nutritiva fue de 5.5. Los tratamientos (Cuadro 3) se aplicaron una semana después del trasplante, éste se realizó cuando la planta presentó la bifurcación principal. Dichos tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones.

Cuadro 1.- Solución nutritiva utilizada para irrigar plantas de chile manzano cultivado en invernadero.

Fertilizante	Solución nutritiva ($\text{mol}_c \text{ m}^{-3}$)			
	I	II	III	IV
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	4	5	9	9
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5	4	0	0
KNO_3	0	3	3	3
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4	4	4	4
KH_2PO_4	1	1	1	1
K_2SO_4	6	3	3	3
NH_4NO_3	0	0	0	2
P.O.	0.0624	0.066	0.072	0.0816
C.E.	1.73	1.83	2.00	2.27

P.O. = Potencial osmótico (MPa). C.E. = Conductividad eléctrica (dS m^{-1})

Como fuente de nutrimentos en la solución nutritiva se utilizaron los fertilizantes comerciales que se enlistan en el Cuadro 2.

Cuadro 2.- Fertilizantes comerciales que se utilizaron como fuentes de micronutrimentos en la solución nutritiva.

Fertilizante	Requerimiento (mg L^{-1})
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.0
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.2
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.2
H_3BO_3	0.5
Quelato-Fe	3.0

Cuadro 3.- Tratamientos aplicados a cada una de las unidades experimentales

Solución nutritiva	mol _c m ⁻³	
	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺
I	4	0
II	8	0
III	12	0
IV	14	2

4.4 Muestreo de hojas

En plena fructificación (siete meses después del trasplante) en el segundo tercio del dosel de la planta (unidad experimental), se seleccionaron seis hojas al azar. El muestreo y la toma de datos se realizaron a las 12:00 (Hoel y Solhaug, 1998).

4.5 Variables respuesta

A los siete meses después del trasplante se tomaron las siguientes variables:

- a) **Reflectancia en hoja obtenida a partir de fotografía digital.-** Las fotografías se obtuvieron con una cámara digital marca Sony con lente Carl Zeiss a una resolución de 1240 x 800 píxeles a una distancia de un metro de altura. Éstas se tomaron a las 12:00 h en condiciones de invernadero (50 % de luminosidad o sombreado). Las fotografías se almacenaron en una computadora portátil (Jiménez, 2009).
- b) **Reflectancia de hoja obtenida a partir de imágenes de escáner.-** Mediante un escáner de escritorio, marca Genius modelo Vivid II, se escanearon las muestras de hojas para obtener imágenes digitales, éstas se adquirieron con una resolución de 400 puntos por pulgada (dpi). La parte inferior de la tapa del escáner fue de color negro (Jiménez, 2009).
- c) **Lecturas SPAD.-** Éstas se tomaron con el medidor portátil de clorofila SPAD-502 marca Minolta.

d) Concentración de nitrógeno en biomasa aérea de plantas.- Después de haber tomado las lecturas correspondientes, las muestras foliares se enviaron a laboratorio para que se le determinara la concentración de nitrógeno.

4.6 Análisis estadístico

A los datos obtenidos se les obtuvo la prueba de comparación de medias (Tukey $p=0.01$). Se obtuvo la regresión correspondiente entre los datos de reflectancia de cada banda y la concentración de nitrógeno en el follaje de la planta, esto en el caso de las imágenes digitales (escáner y fotografía). Además, se obtuvo la regresión correspondiente entre las Lecturas SPAD y la concentración de nitrógeno en follaje.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Concentración de nitrógeno en follaje

Al realizar un análisis de varianza se obtuvo que los tratamientos evaluados tuvieron un efecto altamente significativo ($\alpha < 0.01$) en la concentración de nitrógeno en parte aérea de las plantas de chile manzano. Para determinar la magnitud del efecto se llevó a cabo una prueba de comparación de medias por el método de Tukey con un nivel de significancia de 0.05 (Figura 1).

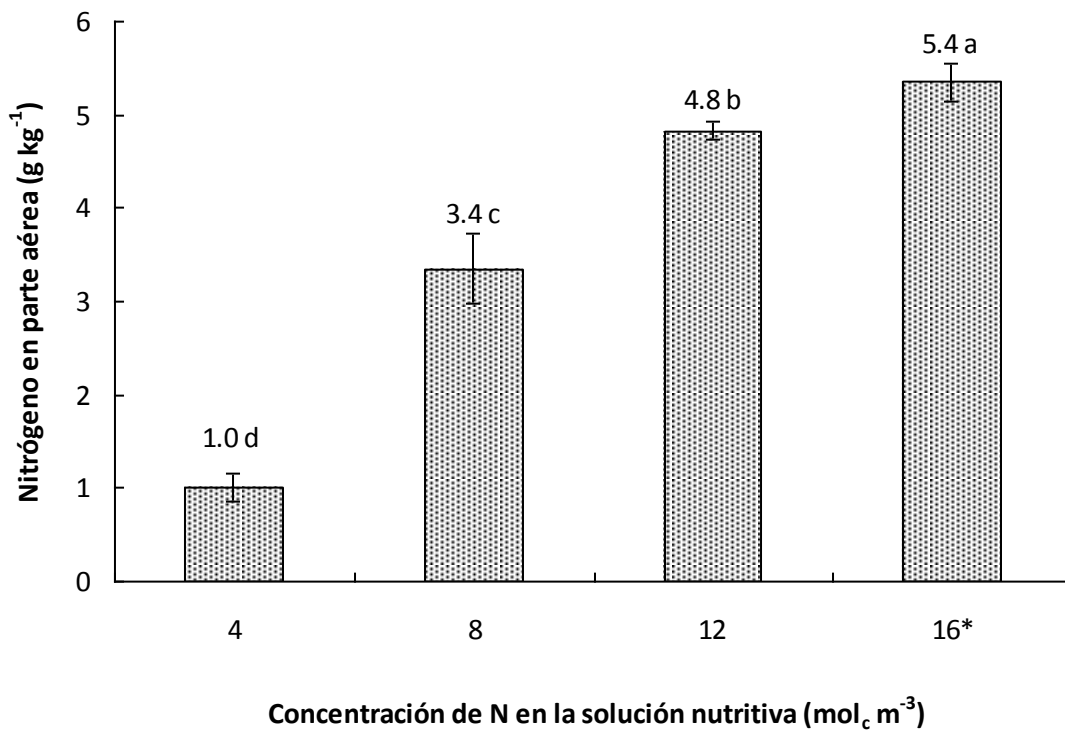


Figura 1. Efecto de la concentración de N (en solución nutritiva) en la concentración de nitrógeno en follaje de plantas de chile manzano (Tukey, $\alpha = 0.05$). * $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$.

La Figura 1 muestra que con los tratamientos aplicados al follaje del cultivo de chile manzano, se tuvieron unidades experimentales con diferentes concentraciones de nitrógeno, lo cual resultó fundamental para el análisis de correlación entre dicha concentración y la reflectancia del follaje.

5.2. Reflectancia obtenida de fotografías digital

La prueba de comparación de medias (Tukey $\alpha = 0.05$) indica que en la banda azul las plantas irrigadas con $16 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ reflejaron un menor porcentaje de radiaciones electromagnéticas que las que se irrigaron con 4, 8 y $12 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ de N, respectivamente. En la banda verde, las plantas irrigadas con $4 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ presentaron mayor reflectancia, mientras que los valores más bajos en reflectancia se tuvieron en las plantas que se trataron con 12 y $16 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$. Con respecto a la banda roja, estadísticamente, la reflectancia fue igual en las unidades experimentales (Figura 2).

En general, las plantas que se irrigaron con $4 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ de N en la solución nutritiva presentaron mayor reflectancia en el espectro visible. Lo anterior se atribuye a que las unidades experimentales con menores concentraciones de nitrógeno en su tejido foliar presentan también una menor presencia de clorofila (Curran *et al.*, 2001). Al respecto, Cho y Skidmore (2006) indican que las bajas reflectancias de los cultivos saludables, observadas en la región visible del espectro electromagnético, se deben principalmente a la intensa absorción de la molécula de clorofila. Ésta absorbe la radiación azul y roja y refleja el verde (Brizuela-Amador, 2007). El pico de absorbancia de la banda azul por la clorofila se traslapa con la absorción de los carotenoides, por lo que la reflectancia azul no es usada para la estimación de la clorofila. Asimismo, la máxima absorbancia del rojo ocurre entre 660 y 680 nm, pero las altas concentraciones de clorofila saturan esta región de absorción (Sims y Gamon, 2002), por lo que la concentración de clorofila se predice a partir de reflectancias entre los 550 y 700 nm y, por consiguiente, la concentración de N en las hojas, ya que este nutrimento es un componente principal de la molécula de clorofila (Varvel *et al.*, 2007) y están estrechamente correlacionados de tal manera que una deficiencia de N incrementa la reflectancia de la radiación del espectro verde (Noh *et al.*, 2006).

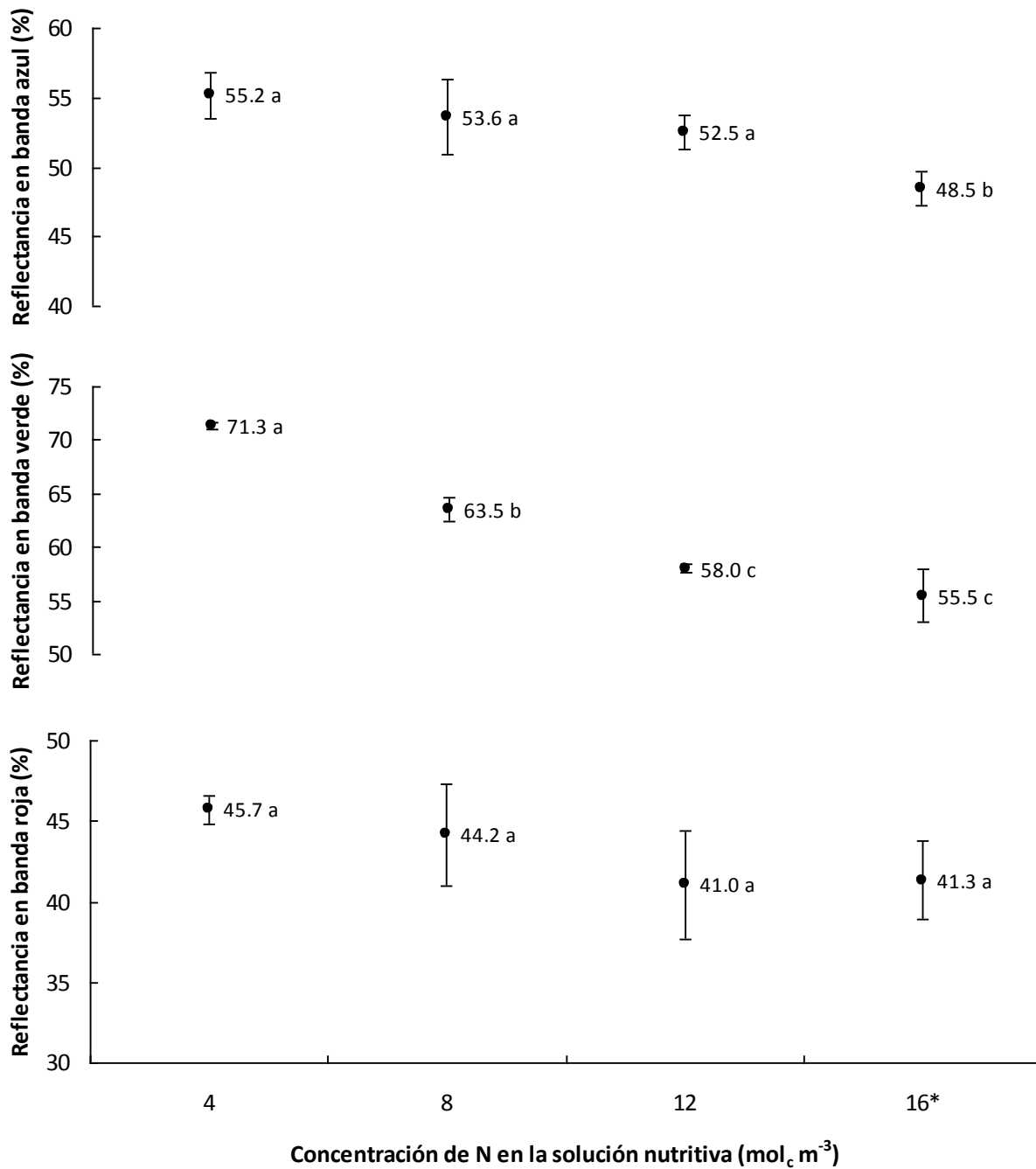


Figura 2. Reflectancia obtenida de fotografías digitales tomadas en follaje de plantas de chile manzano cultivado en condiciones de invernadero. * NO₃⁻ + NH₄⁺.

5.2.1 Relación entre la reflectancia obtenida de fotografía digital y la concentración de nitrógeno en hojas

El grado de asociación entre la concentración de N y la reflectancia en la banda azul resultó significativo ($\alpha \leq 0.05$) con una correspondencia negativa (Figura 3). Es decir, a medida que aumenta la reflectancia en el follaje de la planta la concentración de N es menor. El modelo matemático derivado de esta regresión predice la concentración de N en follaje de plantas de chile manzano, cultivado en invernadero, con un coeficiente de ajuste del 58 % ($R^2 = 0.58$).

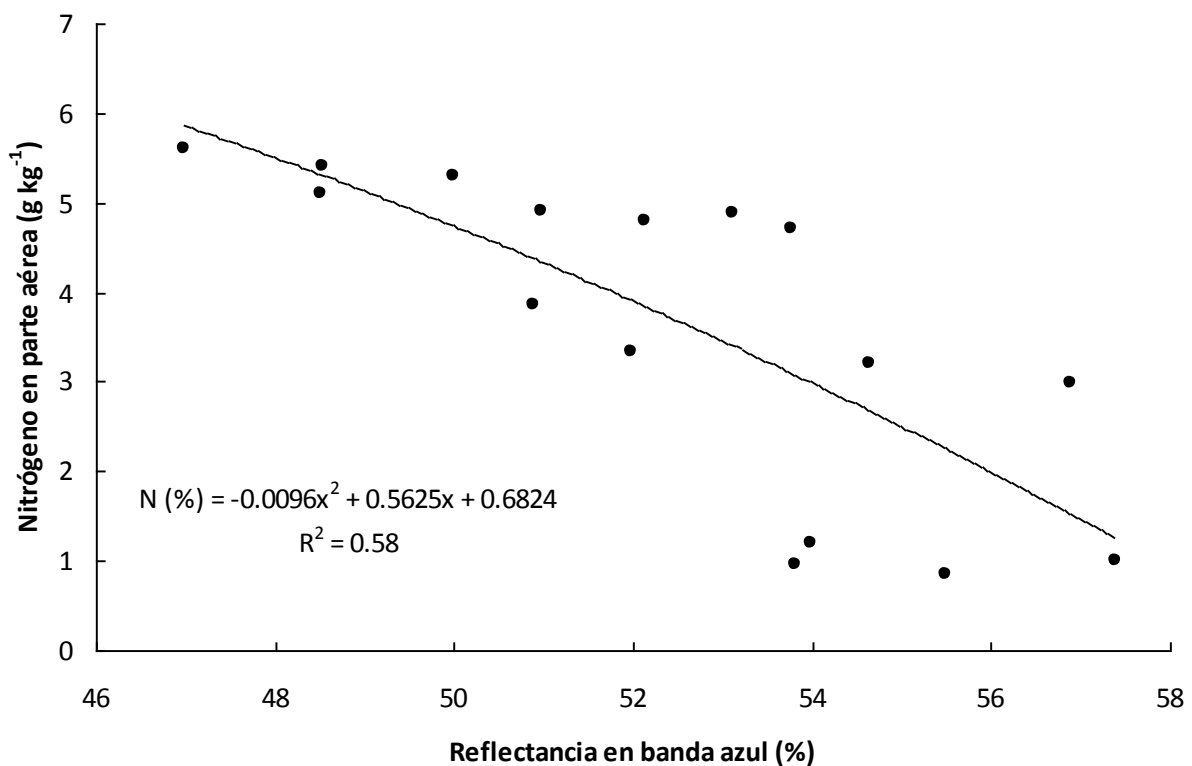


Figura 3. Relación entre la reflectancia en la banda azul y la concentración de N en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.

El grado de asociación entre la concentración de N y la reflectancia en la banda verde resultó altamente significativo ($\alpha < 0.01$) con una correspondencia negativa (Figura 4). Es decir, a medida que la concentración de N es menor aumenta la reflectancia en el follaje de la planta. El modelo matemático derivado de esta regresión predice la concentración

de N en follaje de plantas de chile manzano, cultivado en invernadero, con un coeficiente de ajuste del 96 % ($R^2=0.96$). Valor superior al obtenido en la banda azul y a la banda roja (58 y 44 %, respectivamente).

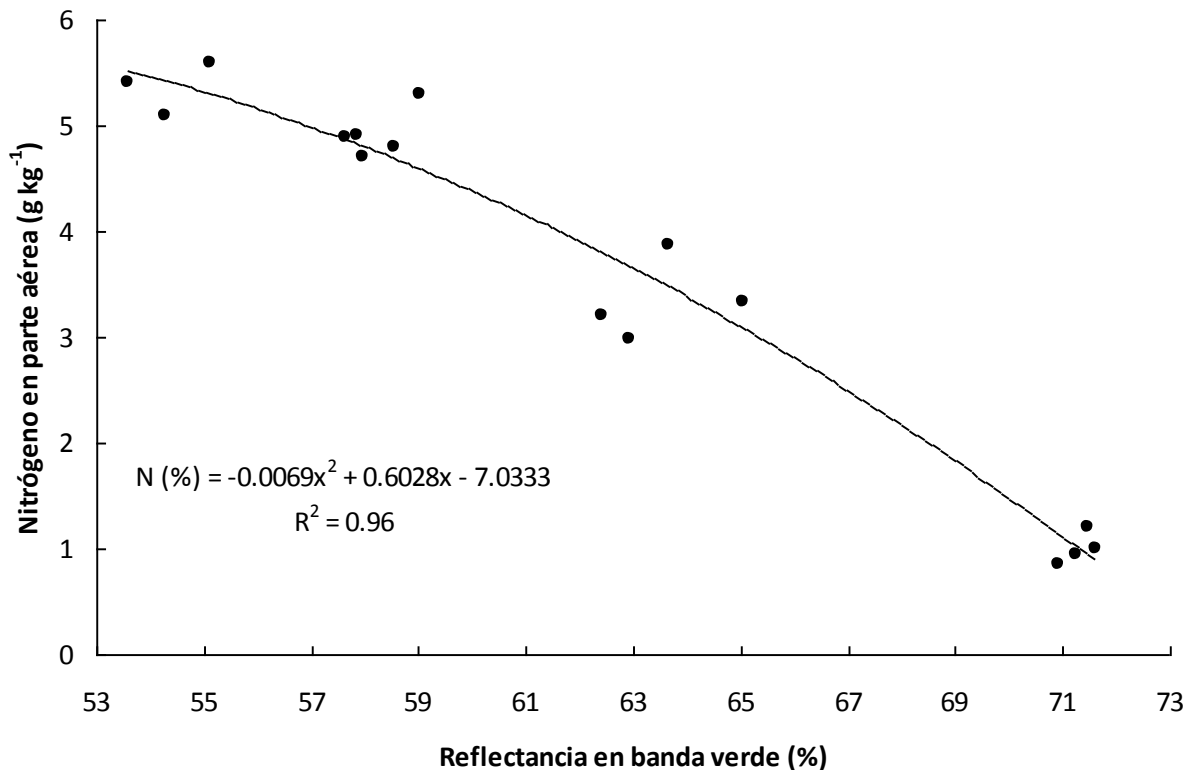


Figura 4. Relación entre la reflectancia en la banda verde y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.

El análisis de regresión mostró una relación significativa ($\alpha \leq 0.05$) con una correspondencia negativa entre la concentración de nitrógeno en la parte aérea de las plantas y la reflectancia de la luz en la banda verde (Figura 5). Es decir, a medida que aumenta la reflectancia en el follaje de la planta la concentración de N es menor. El modelo matemático que se derivó de esta regresión predice la concentración de N en follaje de plantas de chile manzano, cultivado en invernadero, con un coeficiente de ajuste del 44 % ($R^2=0.44$). Dicho coeficiente es inferior a los obtenidos en las bandas azul y verde (58 y 44 %, respectivamente).

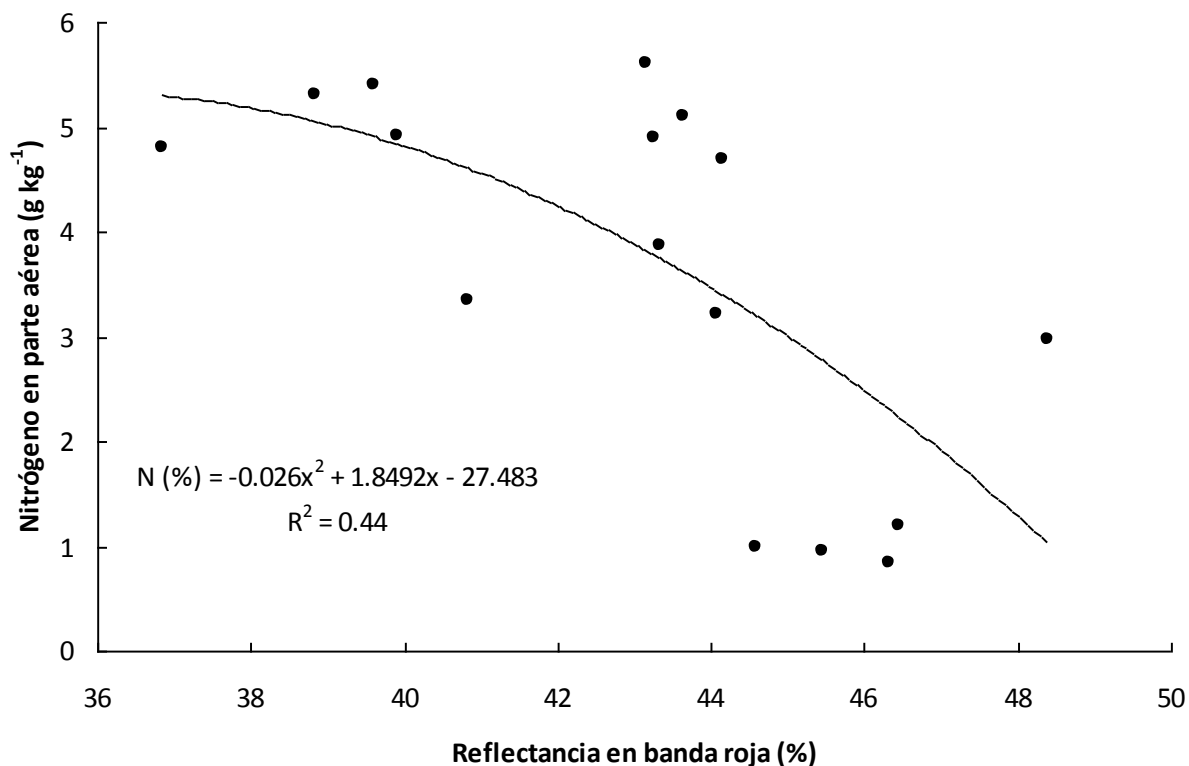


Figura 5. Relación entre la reflectancia en la banda roja y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación

En las Figuras 3, 4 y 5 se observa el grado de asociación entre la concentración de nitrógeno en la parte aérea de las planta y la reflectancia de la luz en el espectro visible (banda azul, verde y roja). En los tres casos la asociación resultó significativa con una correspondencia negativa. El modelo matemático con un mayor coeficiente de ajuste se tuvo en la banda verde (96 %), seguido de la banda azul (58 %) y la roja (44 %). Por lo anterior, se tiene que la reflectancia en la banda verde (495 – 570 nm) es la que estima de manera adecuada la concentración de N en las hojas de chile manzano cultivado en invernadero en un sistema hidropónico (Figura 4). Estos resultados coinciden con Peñuelas *et al.* (1994) quienes identificaron un incremento en reflectancia entre los 500 y 600 nm en hojas de girasol estresadas por N. Patrón similar notaron Gamon *et al.* (1992) en la reflectancia de la cubierta foliar en girasol, y específicamente observaron cambios entre 8:00 y medio día en reflectancia entre plantas estresadas y no

estresadas. De igual manera Lihong *et al.* (2004), trabajando con arroz, encontraron que la reflectancia a los 560 nm correlacionaba de manera negativa con la concentración de N en el follaje. Con estas observaciones Lihong *et al.* (2004) generaron un modelo matemático lineal para predecir las concentraciones de N en el follaje a partir de las reflectancias a 560 nm con un coeficiente de ajuste del 85% ($R^2 = 0.85$), inferior al obtenido en el presente trabajo que fue del 96 % ($R^2 = 0.96$), en la banda verde (495-570 nm). Al respecto, Mirik *et al.* (2007) mencionan que el espectro de reflectancia en plantas adultas y sanas se caracteriza por una fuerte absorción (baja reflectancia) en el azul, un incremento en la reflectancia en el verde, fuerte absorción en el rojo, dentro del espectro visible. Además indican que la respuesta en reflectancia en la región visible del espectro electromagnético está gobernada en las plantas por el efecto y comportamiento de las clorofilas, carotenos y antocianinas.

5.3. Reflectancia obtenida a partir de imágenes de escáner

La reflectancia obtenida de imágenes digitales provenientes del escáner de escritorio mostró el mismo comportamiento que las obtenidas de las imágenes captadas con cámara digital. Al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$), ésta mostró que la mayor reflectancia la presentaron las plantas irrigadas con solución nutritiva que contenía $4 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ de N, en tanto que los valores más bajos de reflectancia se encontraron en las plantas que se irrigaron con una mayor concentración de nitrógeno en la solución nutritiva (12 y $16 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ de N). De tal manera que a mayor concentración de nitrógeno en la solución nutritiva, existe menor reflectancia en el follaje. Experimentos realizados en hojas de girasol con N y sin N en la solución nutritiva demuestran que el cultivo irrigado con solución con N tiene mayores niveles de concentración de dicho nutrimento, clorofila, actividad de la enzima ribulosa bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBCasa), mientras que las plantas limitadas con N muestran mayor reflectancia en la longitud de onda del espectro visible (Peñuelas *et al.*, 1994). Al respecto, Brizuela-Amador (2007) menciona que las bajas reflectancias de los cultivos saludables, observadas en la región visible del espectro electromagnético, se deben principalmente a la intensa absorción de la molécula de clorofila. Ésta absorbe la radiación azul y roja y refleja la verde.

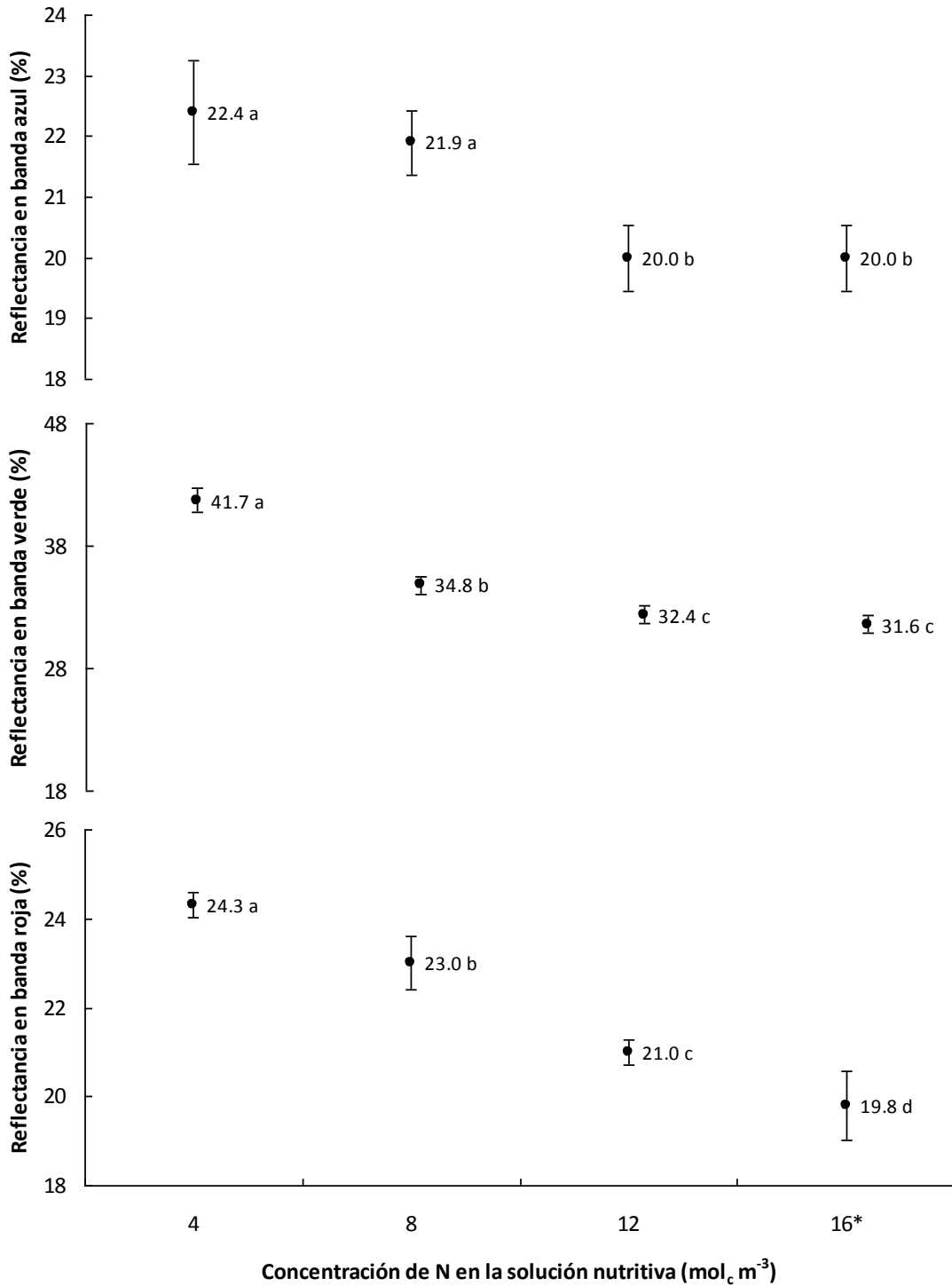


Figura 6. Reflectancia obtenida de imágenes digitales mediante un escáner de escritorio, en follaje de plantas de chile manzano cultivado en invernadero. * NO₃⁻ + NH₄⁺

Carter *et al.* (1996) y Gitelson *et al.* (1996) indican que la concentración de la molécula de clorofila es inversamente proporcional al grado de estrés en vegetación, lo que origina un cambio en la proporción de absorción de luz en el visible: las variaciones en la reflectancia, transmitancia y absorbancia permiten distinguir distintos grados de estrés en función de la proporción en que queda afectada por dicho pigmento cada una de las mencionadas propiedades ópticas foliares.

5.3.1 Relación entre la reflectancia obtenida a partir de escáner y la concentración de nitrógeno en hojas

Se realizó un análisis de regresión entre la concentración de N en parte aérea de las plantas y la reflectancia de la luz en el espectro visible (bandas azul, verde y roja) con la finalidad de conocer el grado de asociación entre dichas variables (Figuras 7, 8 y 9). La relación fue altamente significativa ($\alpha < 0.01$) con una correspondencia negativa entre las variables antes mencionadas en la banda azul (Figura 7). Lo que indica que al existir una mayor concentración de N en follaje, éste presenta una mayor reflectancia. El modelo matemático que se obtuvo de esta regresión predice la concentración de N en follaje de plantas de chile manzano, cultivado en invernadero, con un coeficiente de ajuste del 73 % ($R^2 = 0.73$). Dicho coeficiente es inferior a los obtenidos en las bandas verde y roja (97 y 92 %, respectivamente).

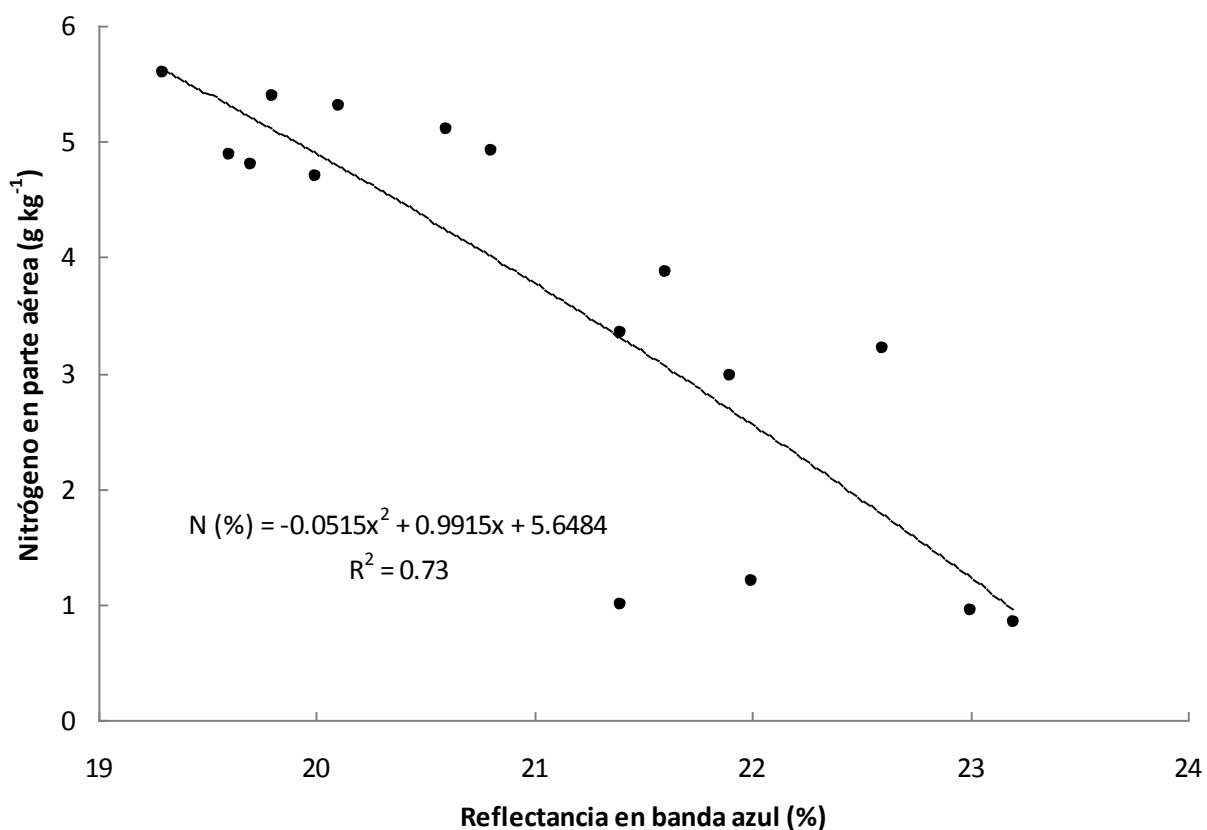


Figura 7. Relación entre la reflectancia en la banda azul y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación

El análisis de regresión muestran una asociación negativa entre la reflectancia de la luz y concentración de N en follaje. Esta relación fue altamente significativa ($\alpha < 0.01$) y de tipo cuadrática (Figura 8). La tendencia es similar al comportamiento que mostraron las bandas en la reflectancia obtenida con fotografía digital. El modelo matemático cuadrático derivado de esta regresión predice la concentración de N en follaje de plantas de chile manzano, mediante la reflectancia en la banda verde, con un coeficiente de ajuste del 97 % ($R^2 = 0.97$).

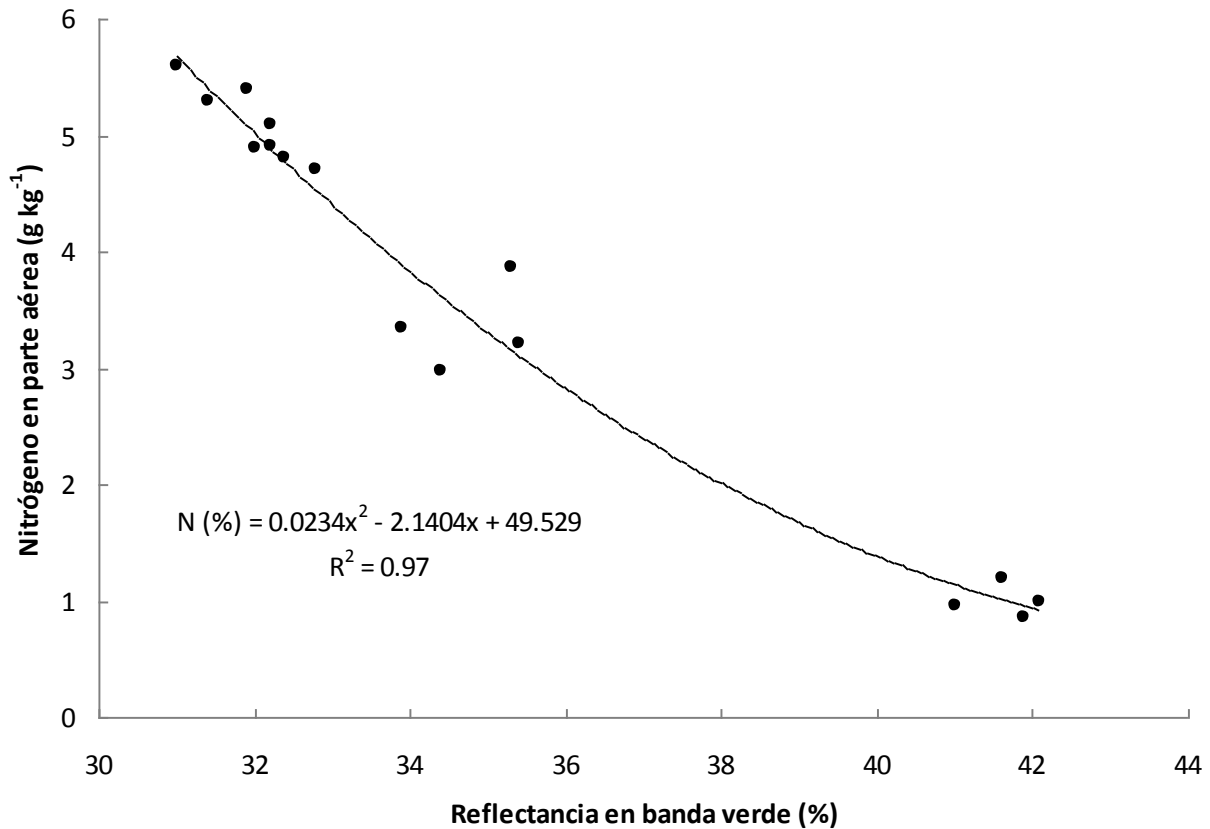


Figura 8. Relación entre la reflectancia en la banda verde y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación.

Se realizó un análisis de regresión entre la concentración de N en parte aérea de las plantas y la reflectancia de la luz en la banda roja con la finalidad de conocer el grado de asociación entre dichas variables. La relación fue altamente significativa ($\alpha < 0.01$) con una correspondencia negativa entre las variables antes mencionadas (Figura 9). Esta asociación fue de tipo cuadrática y el comportamiento indica que al existir una mayor concentración de N en follaje, éste presenta una mayor reflectancia. El modelo matemático que se obtuvo predice la concentración de N en follaje de plantas de chile manzano, cultivado en invernadero, con un coeficiente de ajuste del 92 % ($R^2 = 0.92$).

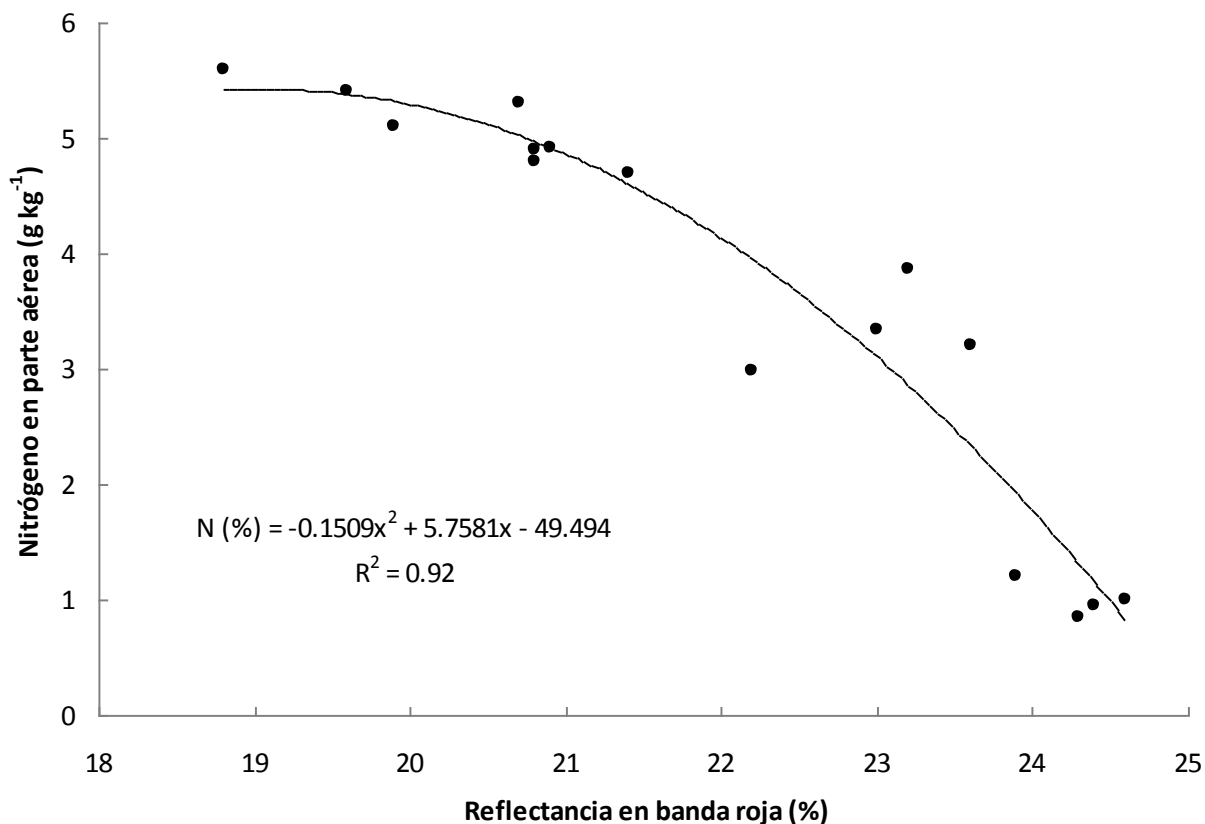


Figura 9. Relación entre la reflectancia en la banda roja y la concentración de nitrógeno en la parte aérea de plantas de chile manzano. N = concentración de nitrógeno en hoja; R^2 = coeficiente de determinación

En las Figuras 7, 8 y 9 se observa el grado de asociación entre la concentración de nitrógeno en la parte aérea de las planta y la reflectancia de la luz en el espectro visible (banda azul, verde y roja). En los tres casos la asociación resultó significativa con una correspondencia negativa. Es decir, la reflectancia de las plantas en las bandas del espectro visible disminuyó con el incremento en las dosis de N aportado con la solución nutritiva. El modelo matemático cuadrático con un mayor coeficiente de ajuste se tuvo en la banda verde (97 %), seguido de la banda roja (92 %) y la azul (73 %). Por lo anterior, se tiene que la reflectancia de la luz en la banda verde (495 – 570 nm) es la que estimó de manera adecuada la concentración de N en el follaje de las plantas de chile manzano cultivado en invernadero en un sistema hidropónico (Figura 8). Las reflectancias bajas en la región del espectro visible del espectro electromagnético, se debe principalmente a la intensa absorción de la molécula de clorofila (Thomas y

Oerther, 1972), carotenos y antocianinas (Mirik *et al.* 2007). La clorofila estima el nivel de nitrógeno en el follaje de las plantas (Filella *et al.*, 1995 y Moran *et al.*, 2000).

5.4. Estimación de la concentración de clorofila con SPAD-502

Al realizar un análisis de varianza se obtuvo que los tratamientos evaluados tuvieron un efecto altamente significativo ($\alpha < 0.01$) en las lecturas SPAD tomadas en hojas de chile manzano. De acuerdo a la prueba de comparación de Tukey ($\alpha=0.05$) se determinó la magnitud del efecto de los tratamientos. En la Figura 10 se observa que incrementar la concentración de N en la solución nutritiva también incrementó las lecturas SPAD, la cual estima la concentración de N en follaje (Figura 11). Los valores más altos se mostraron en las plantas que se irrigaron con solución nutritiva que contenía $16 \text{ mol}_c \cdot \text{m}^{-3}$.

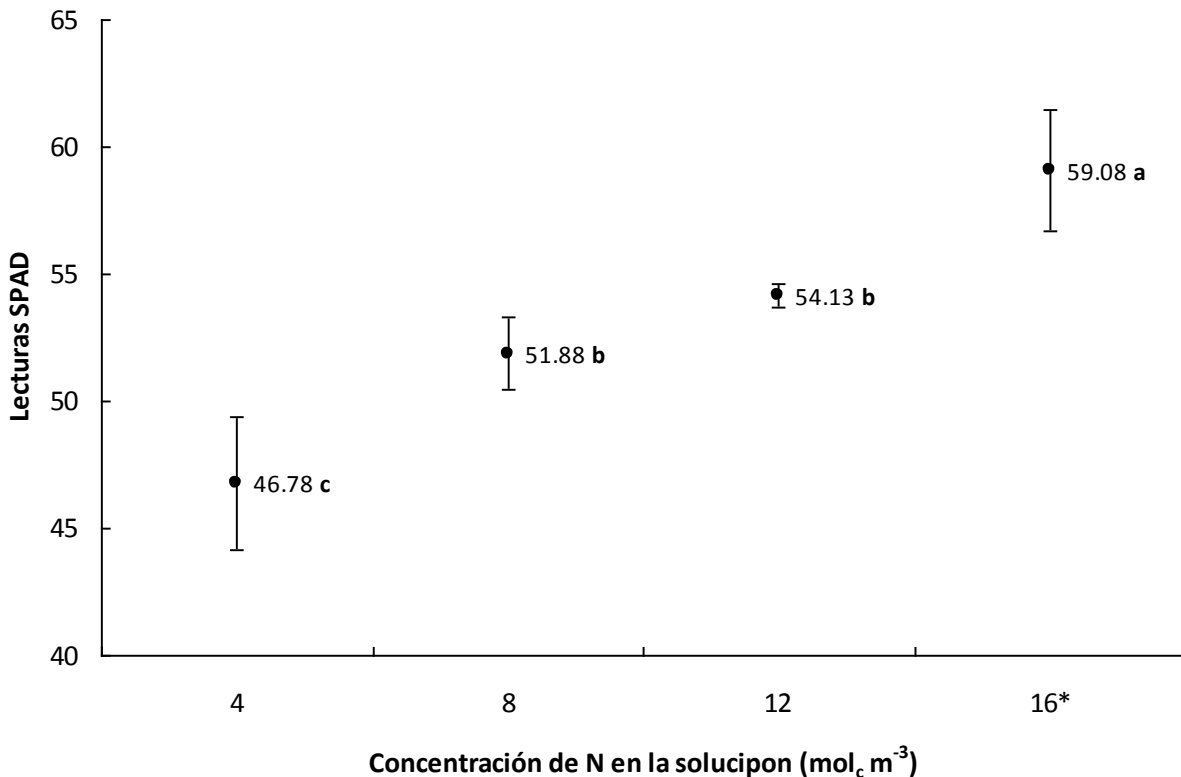


Figura 10. Efecto de la concentración de N (en solución nutritiva) en las lecturas SPAD tomadas en follaje de plantas de chile manzano (Tukey, $\alpha = 0.05$). * $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$

5.4.1 Relación entre la concentración de clorofila estimada con el SPAD-502 y la concentración de nitrógeno en hojas

Se encontró una correlación altamente significativa ($\alpha=0.01$, $r=0.93$) entre las lecturas SPAD y la concentración de N en el follaje de las plantas de chile manzano. Lo que representa una gran ventaja al poder sustituir al método tradicional (método destructible) por la lecturas SPAD, ya que el tiempo en obtener dichas lecturas en 20 plantas es de aproximadamente 10 min (Rodríguez *et al.* 1998).

En la Figura 11 se muestra la regresión cuadrática en la que están involucradas las lecturas SPAD y la concentración de N en el follaje. En ella se observa que a medida que los valores en las lecturas SPAD incrementa, la concentración de N, también aumenta. El N es necesario para la síntesis de clorofila y, por lo tanto, determina el nivel de verdor de las hojas y la eficiencia de los procesos fotosintéticos que se realizan en ellas. Plantas adecuadamente fertilizadas con nitrógeno presentan un color más verde en sus hojas, en contraste con aquellas sometidas a una fertilización nitrogenada deficiente. En la mayoría de los trabajos publicados donde correlacionan las unidades SPAD con nitrógeno o clorofila, se presenta la misma tendencia, incluso es factible dar seguimiento al contenido de nitrógeno en el desarrollo del cultivo con el manejo del SPAD-502. Este equipo fue desarrollado principalmente para estimar la concentración de N en los cultivos (Markwell *et al.*, 1995). Rodríguez *et al.* (1998) obtuvieron ecuaciones de regresión para estimar el contenido de clorofila y de nitrógeno total en tomate a partir de las unidades SPAD. Demostraron la facilidad de utilización del SPAD-502 (Minolta), así como el ahorro en tiempo por rapidez con que se hace la determinación. Estos resultados son similares a los obtenidos en la presente investigación.

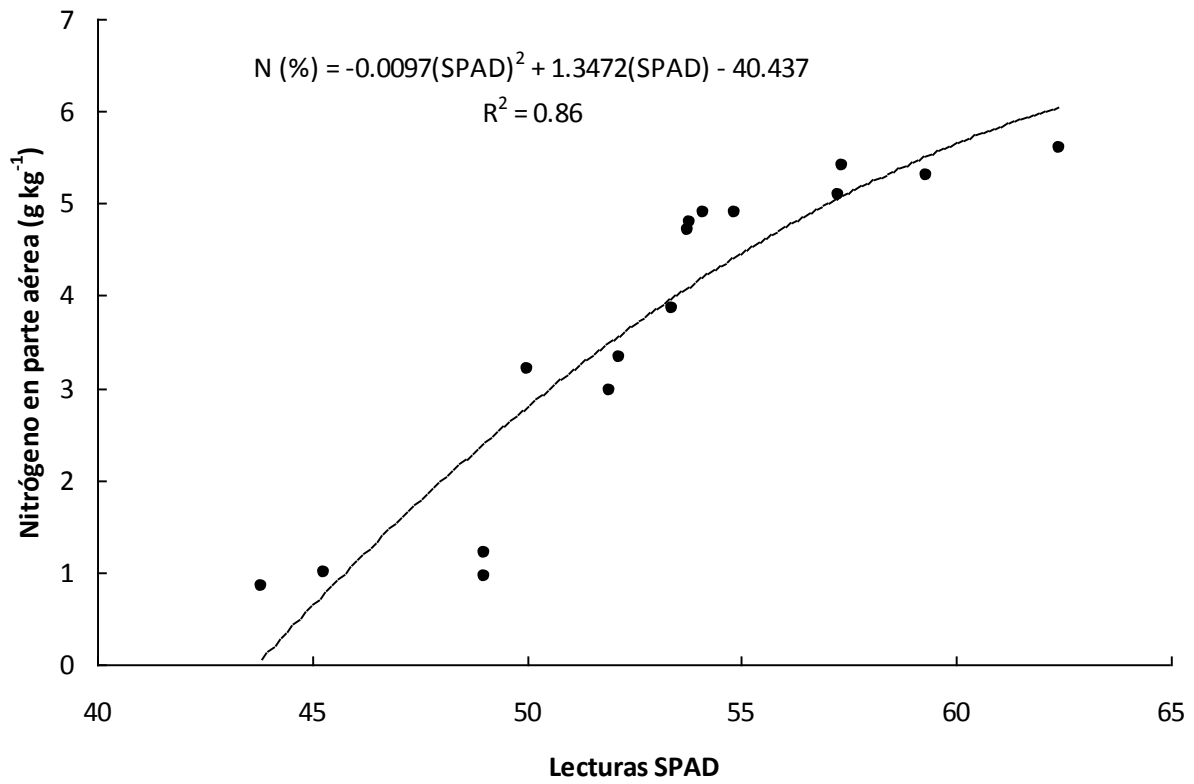


Figura 11. Relación entre la concentración de nitrógeno en parte aérea y lecturas SPAD tomadas en plantas de chile manzano en plena fructificación.

V. CONCLUSIONES

Se observó una relación negativa altamente significativa entre la reflectancia y la concentración de nitrógeno en el follaje de plantas de chile manzano, en las bandas del espectro visible (azul, verde y roja), obtenidas mediante el programa Idrisi Andes, en el que se utilizaron imágenes digitales provenientes de una cámara digital y un escáner de escritorio.

Las plantas irrigadas con una solución nutritiva deficiente en nitrógeno presentaron mayor reflectancia en el espectro visible. Este efecto fue más notorio en la banda verde (495 – 570 nm).

Se observó una relación positiva y altamente significativa entre las lecturas SPAD y la concentración de nitrógeno en follaje

Los modelos matemáticos que mejor estimaron la concentración de nitrógeno en el follaje de las plantas de chile manzano, se obtuvieron en la banda verde; utilizando fotografía digital y escáner de escritorio, ya que presentaron mayor coeficiente de determinación ($R^2=0.96$ y $R^2=0.97$, respectivamente).

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Adams, M. L., W. A. Norvell, W. D. Philpot and J. H. Peverly. 2000. Spectral detection of micronutrient deficiency in 'Bragg' soybean. *Agronomy Journal* 92:261-268.
- Alcántar G. G., Trejo-Téllez, L.I., Fernández P., L. y M. Rodríguez Mendoza. 2007. Elementos esenciales. pp. 7-48. *In: Nutrición de Cultivos*. Editorial Mundi-Prensa. México.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México.
- Baret, F., V. C. Vanderbilt, M. D. Steven and S. Jacquemoud. (1994). Use of spectral analogy to evaluate canopy reflectance sensitivity to leaf optical properties. *Remote Sensing of Environment*. 48:253-260.
- Brizuela-Amador, B., G. Alcántar-González, P. Sánchez-García, Y. Pea-kalra, J. Crumbaugh, C. Olive, L. Tijerina-Chávez y R. Maldonado-Torres. 2007. Establecimiento de índices espectrales en el diagnóstico nutrimental de nitrógeno en maíz. *Agrociencia* 41 (8): 827-835.
- Castro, B. R. 1998. Índices nutrimentales en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot). Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 87 p.
- Cho, M. A. and A. K. Skidmore. 2006. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment* 101:181-193
- Cisneros, J. J. and L. D. Godfrey. 2001. Midseason pest status of the cotton aphid (Homoptera: *Aphididae*) in California cotton: is nitrogen a key factor? *Environmental Entomology* 30: 501- 510.
- Curran, P. J., J. L. Dungan and D. L. Peterson. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark Methodologies. *Remote Sensing Of Environment* 76:349-359.
- Epstein, E. y Bloom, A.J. 2005. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. Second edition. Sinauer Associates, Inc. E. U. A.

- Etchevers, J. D. 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra* 17:209-219.
- Fageria N., V. Baligar and C.H. Jones. 1997. Growth and mineral nutrition of field crops. Ed. Marcel Decker Inc. New Cork, USA. 476 p.
- Gamon, J. A., J. Peñuelas and C. B. Field. 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing Environmental* 41:35-44.
- Gárate, A. e I. Bonilla. 2001. Nutrición mineral y producción vegetal. En/*n*: Azcón-Bieto, J. y M. Talón (Coordinadores). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Ed. McGraw-Hill e Interamericana de España, S. A. U. Madrid, España. pp. 113-130
- Gates, D. M., H. J. Keegan, J. C. Schleter and V. R. Weidner. 1965. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4(1):11-20.
- Gitelson, A. A., A. Viña, V. Ciganda, D. C. Rundquist and T. J. Arkebauer. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L08403. doi:10.1029/2005GL022688
- Huber, S., M. Kneubühler, A. Psomas, K. Itten and N. E. Zimmermann. 2008. Estimating foliar biochemistry from hyperspectral data in mixed forest canopy. *Forest Ecology and Management* 256:491 501.
- Jones, J. B. Jr., B. Wolf, and H. A. Mills. 1991. *Plant Analysis Handbook. A Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide*. Micro-Macro-Publishing, Inc., USA.
- Lihong, X., C. Weixing, L. Weihong, D. Tingbo and Z. Yan. 2004. Monitoring leaf nitrogen status in rice with Canopy spectral reflectance. *Agronomy Journal* 96:135-142.
- Ma, B. L., M. J. Morrison and L. M. Dwyer. 1996. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. *Agronomy Journal* 88:915-920.
- Markwell, J., J. C. Osterman and J. L. Mitchell. 1995. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research* 46: 467- 472.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Second edition. Ed. Academic Press Inc. San Diego, E. U. A.

- Mirik, M., G. J. Michels Jr., S. Kassymzhanova-Mirik and N. C. Elliott. 2007. Reflectance characteristics of Russian wheat aphid (Hemiptera: *Aphididae*) stress and abundance in winter wheat. *Computers and Electronics in Agriculture* 57:123-134.
- Noh, H., Q. Zhang, B. Shin, S. Han and L. Feng. 2006. A neural network model of maize crop nitrogen stress assessment for a multi-spectral imaging sensor. *Biosystems Engineering*. 94 (4):477-485
- Ortega-Arenas, L. D., D. A. Miranda-Aragón y M. Sandoval-Villa. 2006. Densidad de huevos y ninfas de mosca blanca *Trialeurodes vaporariorum* (WEST.) en *Gerbera jamesonii* H. Bolus con diferentes regímenes de fertilización nitrogenada. *Agrociencia* 40: 363-371.
- Palacios-Vélez, E. y J. E. Palacios-Sánchez. 2003. Introducción a los Sensores Remotos y a los Sistemas de Información Geográfica (Agricultura Asistida por Sensores Remotos). Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
- Palma-López, D. J., S. Salgado-García, J. J. Obrador-Olán, A. Trujillo-Narcia, L. del C. Lagunes-Espinoza, J. Zavala-Cruz, A. Ruiz-Bello y M. A. Carrera-Martel. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra* 20: 347-358.
- Peñuelas, J., J. A. Gamon, A. L. Fredeen, J. Merino and C. B. Field. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen -and water- limited sunflower leaves. *Remote Sensing Environment* 48:135-146.
- Pérez G., M. 2002. Estudio genético y fisiológico del crecimiento, rendimiento y calidad de fruto de chile manzano (*Capsicum pubescens* R y P). Tesis de doctor en ciencias. Especialidad en Genética. Colegio de postgraduados. Montecillo, México. 106 p.
- Pérez G., M. y R. Castro B. 1998. Guía para la producción intensiva de chile manzano. Boletín de divulgación número 1. Programa Nacional de Investigación en Olericultura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. 17 p.
- Pérez G., M. y Castro B. R. (2008). El chile manzano. Universidad Autónoma Chapingo. 1ra edición. México.

- Rangel-Lucio, J.A., G. Alcántar-González, J. Z. Castellanos-Ramos, E. García-Moya, C. Trejo-López y H. Vaquera-Huerta. 2002. Comparación de dos pruebas para diagnosticar nitrógeno en sorgo. *Terra* 20: 383-390.
- Reuter, D.J. y J.B. Robinson. 1986. *Plant analysis and interpretation manual*. Inkata Press. Sydney, Australia.
- Rodríguez-Mendoza, Ma. de las N., G. Alcántar-González, A. Aguilar-Santelises, J. D. Etchevers-Barra y J. A. Santizo-Rincón. (1998). Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra* 16: 135-141.
- Sainz-Rozas, H. y H. E. Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 103: 37-44.
- SAS Institute. 2003. *SAS/STAT user's guide*. Release 9.1 SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Sims, D. A. y J. A. Gamon. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81:337-354.
- Solari, F., J. Shanahan, R. Ferguson, J. Schepers, and A. Gitelson. 2008. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal* 100: 571–579.
- Soria R. C., C. A. Ortiz-Solorio, F. G. Islas y F. H. Volke. (1998). *Sensores remotos: Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales; Experiencias en México*. Colegio de Postgraduados, CONACYT, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Publicación especial 7. México. pp. 93.
- Steiner, A. 1984. The Universal Nutrient Solution. pp. 633–649. *In: Proceedings of the 6th International Congress on Soils Culture*. ISOSC. Wageningen, The Netherlands.
- Taiz L. and Zeiger E. 2002. *Plant Physiology*. The Benjamin /Cummings Company. Inc. California. USA.
- Thomas, J. R., C. L. Wiegand and V. I. Myers. 1967. Reflectance of cotton leaves and its relation to yield. *Agronomy Journal* 59:551-554.

- Thomas, J.R. y G.F. Oerther. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. *Agronomy Journal* 83:11-13.
- Varvel, G. E., W. W. Wilhelm, J. F. Shanahan and J. S. Schepers. 2007. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. *Agronomy Journal* 99: 701-706.
- Zhao, D., K. R. Reddy, V. G. Kakani and V. R. Reddy. (2005). Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyper spectral reflectance properties of sorghum. *European Journal of Agronomy* 22:391-403
- Zhao, D, J. L. Li and J. G. Qi. 2005. Identification of red and NIR spectral regions and vegetative indices for discrimination of cotton nitrogen stress and growth stage. *Computers and Electronics in Agriculture* 48:155-169
- Zebarth, B. J., M. Younie, J. W. Paul and S. Bittman. 2002. Evaluation of leaf chlorophyll index formaking fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in a high fertility environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 33: 665–684.