



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUTO DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO  
POSTGRADO DE EDAFOLOGIA**

**DIAGNOSIS DE NITRÓGENO EN  
CHILE DE AGUA IDENTIFICADA  
POR REFLECTANCIA**

ERWIN SAN JUAN MARTÍNEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. MÉXICO**

2014

La presente tesis titulada: DIAGNOSIS DE NITRÓGENO EN CHILE DE AGUA IDENTIFICADA POR REFLECTANCIA realizada por el alumno: Erwin San Juan Martínez 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

EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

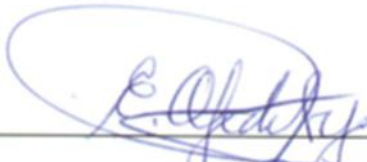
CONSEJERO



---

Dr. Prometeo Sánchez García.

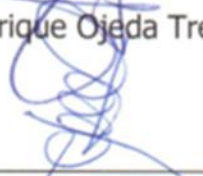
ASESOR



---

Dr. Enrique Ojeda Trejo.

ASESOR



---

Dr. José Alfredo Carrillo Salazar.

ASESOR



---

Dr. Mateo Vargas Hernández.

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Marzo de 2014

## Resumen

### **Diagnóstico de nitrógeno en chile de agua identificada por reflectancia.**

El diagnóstico oportuno del estado nutrimental de los cultivos en la agricultura de precisión es de suma importancia y vitalidad; por lo que cada vez se hacen más necesarias técnicas que permitan conocer el estado nutrimental del cultivo de forma rápida, precisa y confiable. Es por ello que el presente trabajo tuvo como objetivo determinar la concentración de nitrógeno foliar en chile de agua mediante reflectancia, dicha característica se obtuvo por medio de equipos como: radiómetro (CROPSCAN), escáner de escritorio y cámara fotográfica digital, de igual forma se determinó un índice de verdor utilizando el medidor portátil SPAD Minolta 502 y, la concentración de nitrógeno foliar por el método Kjeldahl. A partir de esas mediciones y con el programa Curve Expert Professional 1.2 se crearon modelos tipo Weibull para relacionar la reflectancia de las plantas con su concentración de nitrógeno foliar. Los modelos obtenidos para cada uno de los equipos presentaron coeficientes de determinación altos. Para el radiómetro el mejor modelo se obtuvo con la reflectancia en la longitud de onda 560 nm, con un  $R^2$  de 0.74; para el caso de las imágenes digitales obtenidas con cámara fotográfica se encontró que el mejor modelo fue el generado a partir del canal “b” del sistema de color CIE<sub>lab</sub>, con un valor  $R^2$  de 0.85, mismo valor que presentó el modelo que correlacionó las lecturas SPAD con el contenido de nitrógeno. Mientras que el modelo generado a partir del croma de las imágenes obtenidas con escáner de escritorio al presentar un grado de asociación de 93% ( $R^2$  de 0.93) lo convierte en el modelo con mayor potencial para ser aplicado en campo para estimar el porcentaje de nitrógeno foliar del chile de agua.

**Palabras clave:** agricultura de precisión, firmas espectrales, nutriente.

## **Abstract**

### **Nitrogen content in chile de agua identified by reflectance**

A timely diagnosis of the nutritional status of crops in precision agriculture is of paramount importance and vitality, so it increasingly become more necessary techniques to quickly, accurately and reliably meet the nutritional status of the crop. This study aimed to determine the concentration of foliar nitrogen in chile de agua by reflectance, using equipment such as radiometer (CROPSCAN), desktop scanner, and digital camera. Also a greenness index using the Minolta SPAD 502 meter portable and foliar nitrogen concentration by the Kjeldahl method were determined. From these measurements and the program Curve Expert Professional 1.2 were developed Weibull type models to relate the reflectance of plants with leaf nitrogen concentration. The models obtained for each of the equipments presented high determination coefficients between reflectance and nitrogen concentration.

For the radiometer the best model was obtained with the reflectance in the wavelength 560 nm, with an  $R^2$  of 0.74, for the case of the digital images taken with camera was found that the best model was generated from the channel "b" of the color system CIE\_lab, with an  $R^2$  of 0.85, which was the same value that presented the model with SPAD readings correlated against the nitrogen content.

The model that related chroma of the images obtained with desktop scanner and the nitrogen content ( $R^2$  of 0.93) was the best for field estimation of leaf nitrogen concentration of chile de agua

*Index words: precision agriculture, spectral signatures, Nitrogen content.*

## **Agradecimientos**

A Dios por conducirme a esta etapa de mi vida.

A mi Madre y Hermanos por siempre creer en mí y apoyarme en cada decisión que he tomado.

Al Colegio de Postgraduados y al CONACYT por las facilidades brindadas para la realización de mis estudios de Maestría.

A los Doctores: Prometeo Sánchez García, José Alfredo Carrillo Salazar, Mateo Vargas Hernández y Enrique Ojeda Trejo; por el apoyo brindado en la realización de este trabajo de investigación.

A la M.C. Pilar Lourdes Guerreo, a la QFB. María Reina Guadalupe Mata Velasco, al Ing. Alfonso Muñoz Alcalá y a Pablo Espejel Pineda por el apoyo brindado durante todo el desarrollo de este proyecto.

## **Dedicatoria**

A mi Madre y Hermanos.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
DEDICATORIA .....	IV
ÍNDICE GENERAL .....	V
ÍNDICE DE CUADROS .....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 CHILE DE AGUA.....	3
2.1.1 Origen y distribución del chile de agua .....	3
2.1.2 Necesidades agroclimáticas del chile de agua.....	3
2.1.3 Características botánicas del chile de agua. ....	4
2.1.4 Descripción morfológica del chile de agua.....	4
2.2 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN Y LA PLANTA .....	5
2.3 PROPIEDADES ESPECTRALES DE LAS PLANTAS .....	6
2.4 ESTRÉS NUTRIMENTAL Y REFLECTANCIA ESPECTRAL .....	7
2.5 IMPORTANCIA DEL N PARA LAS PLANTAS .....	8
2.6 DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL .....	9
2.7 RELACIÓN CLOROFILA - DÉFICIT DE NITRÓGENO .....	10
2.8 USO DE SENSORES REMOTOS EN LA AGRICULTURA .....	12
2.9 USO DE RADIÓMETRO EN LA DIAGNOSIS DE NITRÓGENO.....	12
2.10 USO DE FOTOGRAFÍAS PARA LA DIAGNOSIS DE N .....	13
2.11 USO DE ESCÁNER DE ESCRITORIO EN LA DIAGNOSIS DE N .....	13
2.12 MODELOS DE COLOR.....	14
2.12.1 El modelo de color CIELAB ( $L^*a^*b^*$ ) .....	14
2.13 ESPACIOS DE COLOR .....	15
2.13.1 Espacio de color RGB .....	15
2.14 PROPIEDADES DE LOS COLORES .....	16
2.14.1 Matiz (Hue).....	16
2.14.2 Saturación o Intensidad.....	17
2.15 USO DEL SPAD EN LA DIAGNOSIS DE N.....	18

<b>3</b>	<b>OBJETIVO E HIPÓTESIS .....</b>	<b>20</b>
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	20
3.1.1	<i>Objetivos específicos</i> .....	20
3.2	HIPÓTESIS GENERAL .....	20
3.2.1	<i>Hipótesis específicas</i> .....	20
	<b>MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>21</b>
3.3	SITIO EXPERIMENTAL .....	21
3.4	MATERIAL VEGETAL.....	21
3.5	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	21
3.6	VARIABLES RESPUESTA .....	23
3.6.1	<i>Valores de reflectancia</i> .....	23
3.6.1.1	Reflectancia de hojas obtenida a partir de un radiómetro .....	23
3.6.1.2	Reflectancia de hojas obtenida a partir de imágenes de cámara digital .....	23
3.6.1.3	Reflectancia de hojas a partir de un escáner de escritorio .....	24
3.6.2	<i>Lecturas SPAD</i> .....	24
3.6.3	<i>Morfológicas</i> .....	24
3.6.3.1	Altura de planta .....	24
3.6.3.2	Número de hojas.....	24
3.6.3.3	Área foliar .....	25
3.6.4	<i>Fisiológicas</i> .....	25
3.6.5	<i>Rendimiento</i> .....	25
3.6.5.1	Numero de frutos.....	25
3.6.5.2	Peso de fruto.....	25
3.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	25
3.8	OBTENCIÓN DE MODELOS .....	26
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>27</b>
4.1	CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO EN HOJAS DE CHILE DE AGUA. ....	27
4.2	REFLECTANCIA DE HOJAS DE CHILE DE AGUA .....	28
4.2.1	<i>Reflectancia de hojas de chile de agua en la región visible</i> .....	30
4.2.2	<i>Reflectancia de hojas de chile de agua en el infrarrojo</i> .....	34
4.3	ESTIMACIÓN DE NITRÓGENO FOLIAR EN CHILE DE AGUA MEDIANTE IMÁGENES DIGITALES OBTENIDAS CON UN ESCÁNER .....	37
4.4	ESTIMACIÓN DE NITRÓGENO FOLIAR EN CHILE DE AGUA MEDIANTE IMÁGENES DIGITALES OBTENIDAS CON CÁMARA FOTOGRÁFICA.....	42
4.5	ESTIMACIÓN DE NITRÓGENO FOLIAR EN CHILE DE AGUA MEDIANTE VALORES DE LECTURAS SPAD .....	45



5 CONCLUSIONES .....49

6 LITERATURA CITADA .....51

7 ANEXOS.....60

## Índice de Cuadros

Cuadro 1. Distribución al interior del invernadero de los tratamientos aplicados a plantas de chile de agua. ....	22
Cuadro 2. Concentración nutrimental de las soluciones nutritivas Steiner aplicadas como tratamientos a plantas de chile de agua. ....	22
Cuadro 3. Modelos Weibull para estimar la concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) a 560 nm de las hojas del tercio medio y superior del cultivo. ....	33
Cuadro 4. Modelos Weibull para estimar la concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) a 710 nm de las hojas del tercio medio y superior del cultivo. ....	36
Cuadro 5. Modelos Weibull para estimar la concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) en los tres canales del modelos de color RGB y Cie-Lab así como del Cromo obtenido de imágenes digitales escaneadas de hojas del tercio medio del cultivo. ....	38
Cuadro 6. Modelos Weibull para estimar concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) en los tres canales del sistema de color RGB, L y b del sistema de color Cie-Lab, así como del Cromo y Hue obtenidos de imágenes digitales de hojas escaneadas del tercio superior del cultivo. ....	40
Cuadro 7. Modelos Weibull para estimar concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) en el canal G del sistema de color RGB, L y b del sistema de color Cie-Lab, así como del Cromo y Hue obtenidos de imágenes fotográficas del cultivo. ....	45

## Índice de figuras

Figura 1. Reflectividad de vegetación sana, enferma y suelo desnudo, en diferentes longitudes de onda. ....	11
Figura 2. Modelo de color CIELAB.....	15
Figura 3. Sistema de color RGB.....	16
Figura 4. Matices en el círculo cromático. ....	17
Figura 5. Saturación de los colores. ....	18
Figura 6. Concentración de nitrógeno foliar del tercio medio y superior de plantas de chile de agua, a los 73 ddt, en respuesta de los meq L <sup>-1</sup> N suministrados en la solución nutritiva.....	27
Figura 7. Reflectancia obtenida con radiómetro 73 ddt, en el espectro de luz visible e infrarrojo de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L <sup>-1</sup> ) a través de la solución nutritiva Steiner. ....	29
Figura 8. Reflectancia obtenida con radiómetro 73 ddt, en el espectro de luz visible e infrarrojo de hojas del tercio superior de plantas de chile de agua, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L <sup>-1</sup> ) a través de la solución Steiner.....	29
Figura 9. Reflectancia de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua, obtenida con radiómetro 73 ddt, en las longitudes de onda de 460 a 660 nm, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L <sup>-1</sup> ) en la solución nutritiva Steiner. ....	31
Figura 10. Reflectancia de hojas del tercio superior de plantas de chile de agua, obtenida con radiómetro 73 ddt, en las longitudes de onda 460 a 660 nm, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L <sup>-1</sup> ) en la solución nutritiva Steiner. ....	31
Figura 11. Relación de nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con reflectancia a 560 nm transcurridos 73 ddt. ....	32
Figura 12. Reflectancia de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua, obtenida con radiómetro 73 ddt, en las longitudes de onda de 710 a 1650 nm, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L <sup>-1</sup> ) en la solución nutritiva Steiner.. ....	34
Figura 13. Reflectancia de hojas del tercio superior de plantas de chile de agua, obtenida con radiómetro 73 ddt, en las longitudes de onda de 710 a 1650 nm, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L <sup>-1</sup> ) en la solución nutritiva Steiner. ....	35
Figura 14. Relación de nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con reflectancia a 710 nm, 73 ddt.....	36

Figura 15. Reflectancia de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua, en los tres canales del sistema de color RGB, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno ( $\text{meq L}^{-1}$ ) en la solución nutritiva Steiner, obtenidas con escáner de escritorio de 73 ddt. ....	37
Figura 16. Relación de nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con el valor Cromo de imágenes de hojas del cultivo escaneadas, 73 ddt. ....	39
Figura 17. Relación de nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con la reflectancia el canal b del espacio de color CIE-Lab de imágenes de hojas del cultivo escaneadas 73 ddt. ....	39
Figura 18. Relación de nitrógeno foliar del tercio superior de plantas de chile de agua con el valor Cromo de imágenes de hojas del cultivo escaneadas 73 ddt. ....	41
Figura 19. Relación de nitrógeno foliar del tercio superior de plantas de chile de agua con la reflectancia en el canal b del espacio de color CIE-Lab de imágenes de hojas del cultivo escaneadas 73 ddt. ....	42
Figura 20. Reflectancia de hojas del cultivo de chile de agua, en los tres canales del sistema de color RGB, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno ( $\text{meq L}^{-1}$ ) en la solución nutritiva Steiner, obtenida de fotografías digitales 73 ddt. ....	43
Figura 21. Relación de nitrógeno foliar del tercio superior de plantas de chile de agua con reflectancia en el canal b del sistema de color CIE-Lab, obtenido mediante fotografías, 73 ddt. ....	44
Figura 22. Relación de nitrógeno foliar del tercio superior de plantas de chile de agua con el valor del Cromo, 73 ddt. ....	44
Figura 23. Valores SPAD de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua en respuesta a los $\text{meq L}^{-1}$ N suministrados en la solución nutritiva. ....	46
Figura 24. Relación entre nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con valores SPAD de las mismas, 73 ddt. ....	48

## 1 INTRODUCCIÓN

México es el país considerado el centro de origen del *Capsicum annuum*, especie domesticada por los mesoamericanos, situación que permitió la expansión de este género en sus diversas variedades (ASERCA, 1998).

El *Capsicum spp.* representa una gran tradición cultural en la población de México, donde comúnmente se le conoce como chile (López *et al.*, 2007; Ortega *et al.*, 2000). El chile junto con el maíz y el frijol son considerados los productos de mayor consumo por parte de la población mexicana, debido a que forman parte fundamental de su dieta. Su consumo se remonta hasta los tiempos de la cultura azteca (ASERCA, 1998; López y Castro, 2007). Aunque se cultivan varias especies de *Capsicum*, la especie *annuum* es la de mayor importancia económica (López y Castro, 2007).

En el estado de Oaxaca se establecen anualmente alrededor de 1,000 hectáreas de chile destacando los tipos: De agua, Jalapeño, Taviche, Soledad, Costeño, Tusta, Pasilla y Huacle (Valentín, 2011). En la región de los Valles Centrales de Oaxaca destaca por su importancia el cultivo de chile de agua (López, 2007). La producción de esta hortaliza se destina principalmente a los mercados de la capital oaxaqueña, es especial a de la central de abastos, donde se comercializa en fresco y/o en seco, siendo la primera presentación la de mayor venta. Actualmente cada fruto en fresco cuesta entre \$2.00 y \$3.00, lo que convierte a esta hortaliza en un cultivo altamente redituable, la cual además constituye una fuente importante de ingresos para un gran número de familias campesinas (López y Castro, 2007). Además que dicho cultivo cumple una función social y económica importante para los productores de la región.

El uso del chile de agua es principalmente con fines gastronómicos, ámbito en el cual el fruto es muy apreciado por su sabor y picor para la preparación de platillos típicos (Martínez *et al.*, 2010); sin embargo, en ocasiones este tipo de chile puede ser empleado en arreglos florales, inclusive en ritos ceremoniales (Vázquez *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2005; López y Castro, 2009).

Por lo anterior y aunado a la escasa información que se tiene de las necesidades de fertilización del cultivo, específicamente de nitrógeno, en esta investigación se plantea determinar la concentración de nitrógeno foliar en chile de agua, mediante la medición de reflectancia en sus hojas con el fin de poder aportar los requerimientos nutrimentales de nitrógeno en forma suficiente y oportuna, para incrementar el rendimiento y calidad del fruto o bien para evitar una aplicación excesiva de fertilizantes.

## **2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Chile de Agua**

En el estado de Oaxaca, el chile de agua es una de las hortalizas de mayor importancia económica, social y cultural (Velasco *et al.*, 1998; Vázquez *et al.*, 2004; López, 2007; Carrillo *et al.*, 2009; López y Castro, 2009; Martínez *et al.*, 2010; López y Carrillo, 2012), dicho cultivo solo se siembra en la Región de los Valles Centrales, y su importancia radica en la alta demanda del mercado regional, además de que forma parte de la gastronomía típica regional. Por lo anterior el chile de agua es reconocido como símbolo de la horticultura regional en ese estado (López, 2007), y es un cultivo altamente redituable pues tiene una relación beneficio costo mayor a dos. (Vázquez *et al.*, 2004; López, 2007; López y Castro, 2009).

#### **2.1.1 Origen y distribución del chile de agua**

El origen del chile de agua es incierto, y no hay evidencias suficientes para señalarlo. Sin embargo, existen la teoría que dice que el chile de agua es originario de los Valles Centrales de Oaxaca, argumentando que este cultivo posee una antigüedad de más de 100 años en esta región (CAEVOAX. 1985).

El chile de agua, presenta una gran diversidad en cuanto a forma, tamaño, color, posición, picosidad y grosor de la epidermis del fruto. Su distribución es amplia, pues se puede encontrar en los distritos de: Tlacolula, Centro, Zaachila; Etlá; Ocotlán y Ejutla de la región de los Valles Centrales del estado de Oaxaca (López, 2007).

#### **2.1.2 Necesidades agroclimáticas del chile de agua**

El chile de agua en el estado de Oaxaca se cultiva principalmente en suelos con pendientes del 1 al 5% clasificados dentro de la serie Feozem Cambisoles y Luvisoles (López y Castro 2009), con valores de pH ligeramente alcalino de hasta 7.6 (CAEVOAX, 1985). El rendimiento promedio reportado para esta hortaliza es de seis toneladas por hectárea (CAEVOAX, 1985; Rodríguez *et al.*, 2005; López, 2007).

Las localidades donde se establece el chile de agua presentan básicamente los climas semicálidos subhúmedos (A) C (W<sup>o</sup>) (w) (i') g. El semicálido seco BS1h' w<sup>o</sup> (w) (i') g. El primero es un clima templado semicalido con lluvias en verano, el segundo es un clima semicalido con lluvias en verano, que se caracteriza por ser el menos seco de los BS (secos o esteparios). La precipitación de las localidades productoras de chile de agua es de 561.4 a 746.6 mm. con un período de lluvia definido de abril a octubre, a excepción del mes de agosto en el que con frecuencia se presenta la sequía intraestival o canícula (López, 2007).

### **2.1.3 Características botánicas del chile de agua.**

La planta de chile de agua se clasifica de la siguiente manera (López, 2007) :

Reino: *Vegetal*, División: *Spermatophyta*, Subdivisión: *Angiospermae*, Clase: *Dicotyledonae*, Subclase: *Coroliflorae*, Orden: *Tubiflorae*, Suborden: *Solanaceae*, Tribu: *Solanae*, Género: *Capsicum*, Especie: *annuum*, Tipo: *chile de agua*.

### **2.1.4 Descripción morfológica del chile de agua.**

El chile de agua es una planta herbácea anual, con ramificación dicotómica, presenta una altura promedio de 60 cm, una raíz típica con un gran número de raíces secundarias en longitud promedio de 27 cm, un tallo erecto y de forma cilíndrica en el cual las hojas se encuentran dispuestas de manera alternada, éstas últimas son de forma ovalada, con ápice acuminado, base atenuada, borde liso, pinnadamente nervadas, glabras tanto en haz como en el envés.

Las flores del chile de agua son axilares, solitarias, completas y perfectas, su peciolo mide 3 cm de largo, poseen además un cáliz gamocépalo, formado por siete sépalos y es membranoso corto y resistente, tiene la corola fusionada hacia la base, pétalos blancos en número de cinco y deciduos. El ápice está formado de lóbulos acutados y redondeados, epipétalos, hipogineos y de seis estambres con filamentos cortos. Sus anteras son dehiscentes, longitudinales y basificadas. El gineceo es supero y el estilo corto. Sus estigmas son capitados y de placentación axilar (CAEVOAX, 1985; López, 2007).

El fruto es una baya de forma cónica alargada con un tamaño medio de 15 cm de largo, 6 cm de diámetro en su base, de color verde amarillo, verde oscuro, rojo intenso y brillante en



su madurez. El pericarpio mide de 1 a 3 mm de espesor, tiene un pedúnculo grueso (4 a 10 mm), glabro y de aproximadamente 3 cm de largo (López, 2007).

Las semillas son de forma reniforme, lisas y sin brillo, de color blanco en fruto fresco y amarillentas en fruto seco. Su diámetro promedio es de 4 mm. Un gramo contiene de 160 a 170 semillas. Conservan su poder germinativo hasta por diez meses, después de este periodo su poder germinativo se pierde considerablemente (López, 2007).

## **2.2 Interacción de la radiación y la planta**

La reflectancia y transmisión son definidas como las tasas de radiación reflejada o transmitida de la radiación incidente. La radiación incidente que no es reflejada o transmitida por la hoja es absorbida.

La interacción de la radiación solar con las moléculas de las plantas controla la reflectancia visible e infrarroja. Los componentes bioquímicos y estructurales influyen la tendencia de las plantas para absorber, transmitir, y reflejar diferentes longitudes de onda de la radiación solar de 300 a 3000 nm.

Todo objeto en la naturaleza posee una distribución única de radiación electromagnética 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 y de humedad. La señal que recibe un determinado sensor en la banda visible corresponde a la energía electromagnética reflejada, a lo que le llamamos o designamos el color (Soria *et al.*, 1998).

Los dos componentes de las hojas de las plantas que absorben radiación en las bandas visible e infrarroja son clorofila y agua. La absorción por clorofila es principalmente afectada por las transiciones de electrones entre 430 – 460 y 640 – 660 nm (Taiz y Zeiger, 2002), mientras que las bandas de absorción del agua se centran alrededor de 970, 1200, 1450 y 1780 nm. Otros compuestos bioquímicos absorbentes importantes son: proteínas, lípidos, almidón, celulosa, nitrógeno y aceites. La estimación de la concentración de estos

compuestos bioquímicos por medio de la reflectancia infrarroja es difícil debido a los traslapes de las bandas de absorción de estos componentes bioquímicos.

### **2.3 Propiedades espectrales de las plantas**

Aunque la clorofila es el pigmento más importante en la fotosíntesis, en el proceso intervienen otros pigmentos auxiliares que la complementan. Existen en la membrana interna de los cloroplastos la clorofila a (azul-verdoso), la clorofila b (verde-amarillenta) y en menor grado carotenos y xantofilas formando, junto con proteínas portadoras, dos sistemas de pigmentos llamados fotosistema I (FSI) y fotosistema II (FSII), cada uno con cierto número de moléculas individuales. El FSI contiene moléculas de clorofila a, clorofila b y carotenos; mientras que el FSII contiene las dos clorofilas y carotenos en otras proporciones. Cada tipo de pigmento absorbe ciertas longitudes de onda de luz. Al haber un sistema formado con diferentes pigmentos, es más amplia la gama de longitudes de onda que pueden absorberse. Parece ser que la energía de excitación del electrón puede transferirse de molécula a molécula por un fenómeno llamado resonancia magnética, y los receptores finales de esta energía son ciertas moléculas de la clorofila a, a las que se les ha dado el nombre de centros de reacción. Ahí los electrones son excitados hasta un grado energético tal que abandonan la molécula y fluyen por una cadena de sustancias captoras y transportadoras de electrones a través de reacciones de óxido-reducción.

Existen aproximadamente 400 moléculas de pigmentos receptores de fotones en el centro de reacción; a dicho grupo de moléculas se le da el nombre de antena o complejo cosechador de luz. Se cree que solo las moléculas de los centros de reacción son capaces de lanzar electrones fuera de la clorofila, hacia los compuestos receptores de electrones.

Todas las demás moléculas de clorofila a, clorofila b y demás pigmentos actúan como antenas para captar diversas longitudes de onda (azul-rojo) y transmitir esta energía de excitación de molécula en molécula hasta los centros de reacción.

En el FSI las moléculas de clorofila a que se activan (oxidán) por una longitud de onda de 700 nm, son las que constituyen el centro de reacción. Por ello al FSI se le conoce como P<sub>700</sub>. En el FSII, el centro de reacción lo constituyen las moléculas de clorofila a, que se

activan con longitudes de onda de 680 nm, por esta razón al FSII se le conoce como  $P_{680}$  (Salisbury y Ross, 1994).

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 absorbencia por el follaje de los cultivos en el espectro visible depende principalmente de la concentración de moléculas de clorofilas y carotenoides, dicha absorbencia 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 nutrientes influye a que exista una menor cantidad de pigmentos y consecuentemente el color de la hoja presenta una menor intensidad, ocasionando una mayor reflectancia. Plantas saludables reflejan más luz verde que plantas enfermas o cloróticas (Palacios y Palacios, 2003).

#### **2.4 Estrés nutrimental y reflectancia espectral**

El nitrógeno (N) es un componente principal de la clorofila (Taiz y Zeiger, 2002); la clorofila domina la reflectancia y transmisión de radiación visible de la hoja, absorbe la radiación roja y azul, resultando en poca reflectancia de estos colores en la vegetación verde. La concentración de clorofila a menudo se correlaciona estrechamente con la concentración de N en las hojas (Costa *et al.*, 2001).

El pico de absorción azul se traslapa con la absorción de carotenoides, por lo tanto, la reflectancia azul generalmente no es usada para estimar la concentración de clorofila (Sims y Gamon, 2002). La máxima absorción roja se da entre 660 y 680 nm (Curran, 1989), pero bajas concentraciones de clorofila pueden saturar esta región de absorción (Sims y Gamon, 2002). Por lo tanto, la concentración de clorofila se predice generalmente de la reflectancia en el intervalo de 550 ó 700 nm, porque estas regiones se saturan con mayores concentraciones de clorofila. Los cambios en la forma del espectro de reflectancia entre 550 y 660 nm en ocasiones pueden ser usados para identificar clorosis (Carter y Spiering, 2002).

El mesófilo de la hoja refleja una gran proporción de la radiación en el infrarrojo cercano (NIR) (Taiz y Zieger, 2002). La región de rápido incremento en reflectancia entre las

regiones roja e infrarroja del espectro, es usada a menudo para indicar la salud de la planta (Jago *et al.*, 1999). Horler *et al.* (1983) observaron que la concentración de clorofila en las hojas se correlaciona con la máxima pendiente de reflectancia en el límite entre los dominios espectrales rojo y NIR.

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 un incremento lineal significativo en la reflectancia en las longitudes de onda 555 y 715 nm ( $R^2 = 0.67$ ). Estos autores concluyen que la concentración de N 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.* (2005) establecieron un experimento con algodón en el que aplicaron N a 0, 50, 100 y 200 % de la dosis recomendada y mediante la cuantificación de la reflectancia, lograron identificar el contenido de N y la etapa de crecimiento del cultivo en un 62.4 % de las muestras analizadas. Lo que hace posible detectar la deficiencia de N de forma temprana, antes que ocurra un efecto irreversible en el cultivo. Noh *et al.* (2006) mencionan que las plantas deficientes en N presentan una coloración amarilla, por lo que no sólo se puede detectar la deficiencia sino también el grado de deficiencia de dicho nutrimento.

## **2.5 Importancia del N para las plantas**

El N es un nutrimento de alta demanda por las plantas; los requerimientos en las primeras etapas de desarrollo son bajos, pero la demanda de N se incrementa conforme la planta crece. Algunas plantas en la etapa máxima de desarrollo pueden demandar cantidades de 3 a 5 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>. Posteriormente cuando la planta madura, la demanda de N disminuye. El N es un elemento constituyente de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos. Por esta razón la materia seca vegetal puede alcanzar hasta 6.0 % de N, y el intervalo de concentración en el tejido normalmente varía desde 0.5 hasta 6.0 %. 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; además participa en todas las reacciones enzimáticas y en todo el metabolismo de la planta. 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, así como el desarrollo de los cloroplastos, por lo que se producen plantas débiles, raquílicas, con crecimiento lento, que maduran precozmente y con rendimientos 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 involucrado en la reducción de los compuestos nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADP<sup>+</sup>) y adenosin trifosfato (ATP). Estos compuestos son utilizados por la ribulosa-1-5-bisfosfato carboxilasa-oxigenasa (Rubisco) para la fijación de CO<sub>2</sub>. Por el contrario, 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 *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 para determinar el contenido de N en las hojas, desde los que emplean un balance entre demanda y suministro de N (Palma *et al.*, 2002), los cuales requieren de análisis de laboratorio; otros métodos utilizan equipos portátiles, como el medidor de nitratos en savia (Rangel *et al.*, 2002), el estimador de clorofila (Varvel *et al.*, 2007), hasta sensores remotos (Solari *et al.*, 2008).

## **2.6 Diagnóstico nutrimental**

Mediante el estudio de la nutrición vegetal se pretende establecer con qué capacidad actúan cada uno de los elementos esenciales para la planta; también en qué cantidad son

necesarios, cómo asegurar que las plantas reciban estos elementos en la proporción y cantidad adecuada, diagnosticar y evitar problemas nutrimentales (Castro, 1998; De la Cruz, 2013).

El diagnóstico nutrimental se basa en métodos para identificar deficiencias, toxicidades o desbalances nutrimentales. Una deficiencia nutrimental ocurre cuando un nutriente es insuficiente o no puede ser asimilado por la planta. De manera similar, una toxicidad nutrimental ocurre cuando existen condiciones de exceso, desbalance o condiciones ambientales desfavorables (De la Cruz, 2013)

Desde el punto de vista nutrimental, las plantas cultivadas pueden manifestar deficiencia o exceso del nutriente. 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 nutriente son más específicos que los de su toxicidad (Gárate y Bonilla, 2001; De la Cruz, 2013).

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 nutriente que la planta extrae del suelo e incorpora 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; De la Cruz, 2013).

## **2.7 Relación clorofila - déficit de nitrógeno**

El contenido de clorofila es uno de los parámetros biofísicos más relacionado con la cantidad de nitrógeno en la planta, dado que la mayor parte de éste se encuentra en las moléculas de clorofila (Daughtry *et al.*, 2000; Taiz y Zeiger, 2002) de manera tal que un déficit de nitrógeno está altamente correlacionado con una reducción en la concentración de

clorofila y claramente asociado con un cambio de la reflectancia del verde (Costa *et al.*, 2001; Brizuela *et al.*, 2007).

La fotosíntesis a menudo disminuye en las plantas que se desarrollan en condiciones adversas como son: déficit de agua, niveles extremos de temperatura, deficiencia de nutrientes, ambientes contaminados, ataque de patógenos, entre otras (Lang *et al.*, 1998). 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, de modo que plantas saludables reflejan más luz verde que plantas enfermas o cloróticas tal como se aprecia en la Figura 1.

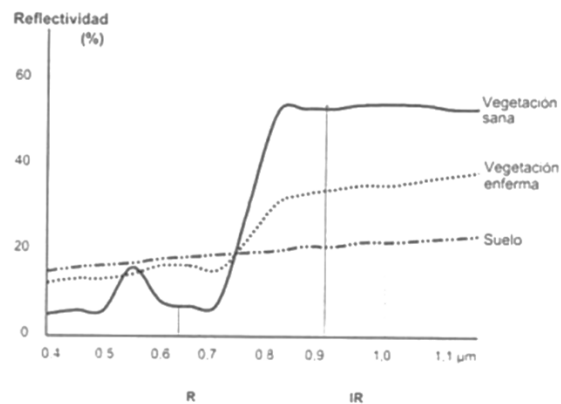


Figura 1. Reflectividad de vegetación sana, enferma y suelo desnudo, en diferentes longitudes de onda.

Las formas de reflectancia por las hojas en el espectro visible fluctúa entre la máxima reflectancia cercana a 550 nm y la mínima cercana a 660 nm, de esta manera cuando existen cambios de concentración de la clorofila; esos cambios de forma del espectro visible se pueden usar para identificar clorosis asociada a deficiencias de nitrógeno (Carter y Spiering, 2002), hay que tener en cuenta que la reflectancia varía en función del desarrollo de las hojas (Poni *et al.*, 1994), y que es fundamental entender el efecto de la edad de la hoja sobre sus propiedades ópticas con el fin de generar índices espectrales confiables para el reconocimiento de ciertas variables tales como el nitrógeno (Cabello y Macia, 2011).

## **2.8 Uso de sensores remotos en la agricultura**

La percepción remota se ha utilizado desde mucho tiempo atrás en el seguimiento y análisis de las actividades agrícolas. En los últimos años, se han realizado importantes avances en el terreno de la teledetección aplicada a la agricultura, en específico en áreas como el monitoreo de la salud y nutrición de los cultivos así como en la evaluación del rendimiento y otros problemas relacionados con el desarrollo de los cultivos (Duane *et al.*, 2009).

Las firmas espectrales obtenidas a través de sensores remotos permiten obtener información del estado fisiológico de una planta de manera específica y en tiempo real, debido a su capacidad para medir indicadores biofísicos y detectar su variabilidad espacial (ASD, 1999).

## **2.9 Uso de Radiómetro en la diagnosis de Nitrógeno**

Un radiómetro es un dispositivo capaz de medir el flujo radiante o energía dentro de la radiación electromagnética (Aguilar, 2011), actualmente el uso de esta tecnología ha generado métodos novedosos que involucran la firma espectral de los cultivos, los cuales pueden ser empleados en la agricultura de precisión, pues dichos métodos evalúan las condiciones del cultivo de forma objetiva, rápida, no destructiva, fácil y relativamente barata (Adams *et al.*, 2000; Curran *et al.*, 2001). En particular los radiómetros multiespectrales (MSR) de la compañía CROPSCAN, han sido desarrollados para mejorar las evaluaciones de varios factores sobre la salud y el rendimiento de las plantas, lo que los convierte en excelente herramienta que permite diagnosticar en tiempo real el estado de estrés nutrimental causado por nitrógeno en los cultivos, incluso antes de que dicho estrés se pueda apreciar de forma visual (Brizuela *et al.*, 2007).

Ejemplos de trabajos que reportan el uso del radiómetro para la determinación de nutrimentos en cultivos son: De la Cruz (2013) quien encontró la existencia de una asociación entre la concentración de nitrógeno foliar del cultivo de pimiento y la reflectancia en la banda 610 nm, con una correlación negativa ( $r = -0.724$ ), lo que le permitió estimar de manera adecuada la concentración de nitrógeno en el cultivo. Por su parte Cabello y Macías (2011) reportan que el uso de radiómetro puede obtener una estimación confiable del contenido de clorofila en las hojas de *Vitis vinífera* pues



obtuvieron modelos con  $R^2$  de 0.76 a 0.93 en tres variedades diferentes de vid; Jiménez (2009) reportó modelos que muestran una relación negativa y altamente significativa ( $\alpha < 0.0002$ ) entre la reflectancia de plantas medida con radiómetro y la concentración de nitrógeno en la parte aérea, y donde el mejor ajuste fue la reflectancia a 560 nm con un  $R^2$  de 0.67.

## **2.10 Uso de Fotografías para la diagnosis de N**

La evaluación del estado nutrimental en cultivos intensivos, mediante imágenes digitales es una alternativa prometedora para llevar a cabo estrategias de manejo nutricional de los cultivos (Ma *et al.*, 1996; Huber *et al.*, 2008) ya que los cambios en el espectro de reflectancia de las hojas sirven como indicadores de deficiencias nutricionales; además este método es rápido, no destructivo y relativamente económico (Adams *et al.*, 2000; Yuzhu *et al.*, 2011).

Recientemente, la fotografía digital se ha utilizado para detectar el nivel de la fertilización nitrogenada (Jia *et al.*, 2004). Algunos ejemplos del estudio del estado nitrogenado de los cultivos a través del análisis de color de una imagen tomada con cámara digital son los realizados por Yuzhu *et al.* (2011) quien al aplicar esta técnica en cultivo de chile pimiento obtuvo modelos de predicción de nitrógeno con un  $R^2$  de 0.655. Otro ejemplo de uso de imágenes de cámara digital para evaluar el estado nutrimental de nitrógeno es el reportado por Jiménez (2009) quien obtuvo modelos lineales y cuadráticos en las bandas rojo, verde y azul para el cultivo de trigo y con valores promedio de  $R^2$  de 0.58 y 0.70 respectivamente.

## **2.11 Uso de Escáner de escritorio en la diagnosis de N**

El uso de dispositivos de captura de imágenes digitales y el desarrollo de programas para su procesamiento y análisis, ha sido utilizado en la evaluación de enfermedades, alimentos y nutrimentos (Martin y Rybicki, 1998; Niemira *et al.*, 1999; Olmstead *et al.*, 2000). Diversas investigaciones han mostrado que la precisión y exactitud de las mediciones hechas a través del análisis de imágenes con computadoras son mejores que las obtenidas por el método de análisis visual (Lindow y Webb, 1983; Martin y Rybicki, 1998). Actualmente los métodos de análisis digital no requieren programas de computadora especiales para evaluar imágenes obtenidas con diversos dispositivos (Bock, 2010).

Un scanner de escritorio permite obtener información espectral concentrada en el espectro visible. Los datos se almacenan en imágenes como coordenadas en las regiones del espacio rojo, verde y azul (RGB). En este espacio los colores se representan como una mezcla de rojo, verde y azul en una escala de 8 bit, esto es, en un rango donde las intensidades de estos colores varían de 0 a 255. (Leon *et al.*, 2006); así, mediante un protocolo de digitalización para calcular el porcentaje de cobertura del cultivo es posible obtener información asociada a las deficiencias de nitrógeno (Brizuela *et al.*, 2007).

## **2.12 Modelos de color**

Un modelo de color es una fórmula matemática abstracta que describe cómo se representan los colores. Para ello, se basa en tuplas numéricas compuestas normalmente por tres o cuatro valores o componentes de color. Los modelos de color más conocidos son el RGB (Red, Green y Blue) y el CMYK (Cyan, Magenta, Yellow y Key).

La CIE (Comisión Internacional de Iluminación) es la autoridad internacional en cuestiones de luz, iluminación, color y espacios de color. Gracias a esta entidad, se entiende mejor el funcionamiento del color. La CIE estableció en los años 30 una serie de normas para los diferentes espacios de color que representan el espectro visible. Gracias a estas normas, se pueden hacer comparaciones entre los diversos espacios de color de los visores y dispositivos.

La CIE desarrolló el sistema de color XYZ o estándar. En la actualidad, este sistema se sigue usando como referencia para definir los colores que percibe el ojo humano y otros espacios de color. El modelo RGB se basa en colores primarios aditivos. Por el contrario, el CIE-XYZ se basa en 3 primarios imaginarios con caracterización espectral (X, Y y Z), que son los que representan el color (ondas electromagnéticas). Éstos se combinan para formar todos los colores visibles por el ojo humano.

### **2.12.1 El modelo de color CIELAB ( $L^*a^*b^*$ )**

La CIE desarrolló en 1976 el modelo de color Lab. Es el modelo de color más completo. Se usa habitualmente para describir todos los colores que puede ver el ojo humano (Figura 2).

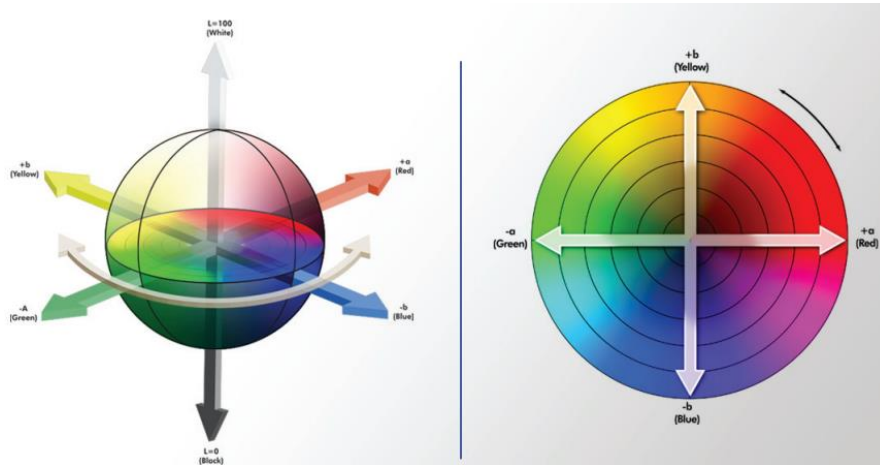


Figura 2. Modelo de color CIELAB

En el Modelo de color CIELAB se puede identificar cada color de forma precisa mediante sus valores “a” y “b” y su brillo (“L”). Los tres parámetros del modelo representan la luminancia del color. “L” es la posición entre el rojo y el verde (el valor mínimo corresponde al negro), “a” es la posición entre el amarillo y el azul (el valor mínimo corresponde al verde), y “b”, la escala en referencia al punto blanco (el valor mínimo corresponde al azul).

La ventaja de este espacio de color en comparación con otros espacios de color, es que es más objetivo, ya que no depende del dispositivo. Así misma combinación de a, b y L sirve para describir siempre el mismo color de forma exacta.

## 2.13 Espacios de color

Los espacios de color se derivan de modelos de color. Dan información adicional importante sobre escalas o referencias.

### 2.13.1 Espacio de color RGB

El espacio de color RGB es un espacio de color creado por Hewlett-Packard y Microsoft (Figura 3), y adoptado por las más destacadas empresas. El RGB utiliza el rojo, verde y azul como colores primarios, se diseñó en 1996 para usarlo en monitores de tubos de rayos catódicos (CRT). Se suele utilizar en imágenes pensadas para Internet. El RGB tiene una

amplísima difusión en la industria de las artes gráficas. Se ha convertido en el espacio de referencia para Windows y para los expertos de la imagen. Sin embargo, los editores profesionales suelen criticar su reducida gama de colores. Hay colores que son visibles y pueden reproducirse en el modelo de color CMYK, pero que el espacio RGB no puede mostrar.

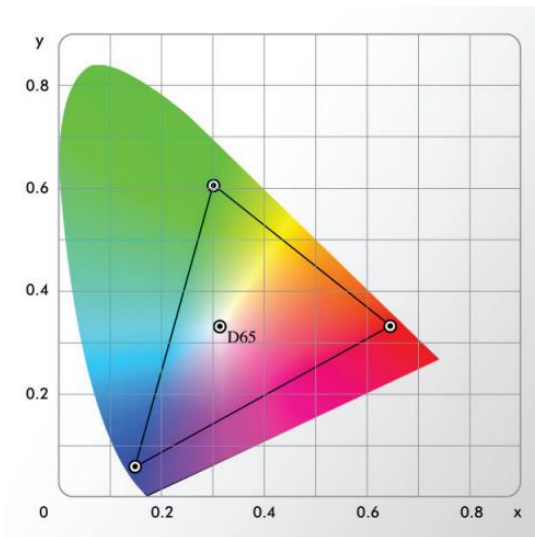


Figura 3. Sistema de color RGB.

## 2.14 Propiedades de los colores

Todo color posee una serie de propiedades que le hacen variar de aspecto y que definen su apariencia final. Entre estas propiedades cabe distinguir matiz (hue) y saturación o intensidad

### 2.14.1 Matiz (Hue)

Es el estado puro del color, sin el blanco o negro agregados, y es un atributo asociado con la longitud de onda dominante en la mezcla de las ondas luminosas. El Matiz se define como un atributo de color que nos permite distinguir el color de un objeto, (rojo, amarillo, verde o azul), y se refiere al recorrido que hace un tono hacia uno u otro lado del círculo cromático (Figura 4), así el verde amarillento y el verde azulado serán matices diferentes del verde.



Figura 4. Matices en el círculo cromático.

Los 3 colores primarios representan los 3 matices primarios, y mezclando estos se obtienen los demás matices o colores. Dos colores son complementarios cuando están uno frente a otro en el círculo de matices (círculo cromático).

#### **2.14.2 Saturación o Intensidad**

También llamada Croma, este concepto representa la pureza o intensidad de un color particular, la viveza o palidez del mismo, y puede relacionarse con el ancho de banda de la luz que se esté visualizando.

La pureza o croma de un color es un atributo de él mismo de difícil comprensión, pues es proporcional a la cantidad de colorido que tiene, así los colores puros del espectro están completamente saturados (Figura 5)

El croma también está definido por la cantidad de gris que contiene un color: mientras más gris o más neutro es, menos brillante o menos "saturado" es. Igualmente, cualquier cambio hecho a un color puro automáticamente baja su saturación.

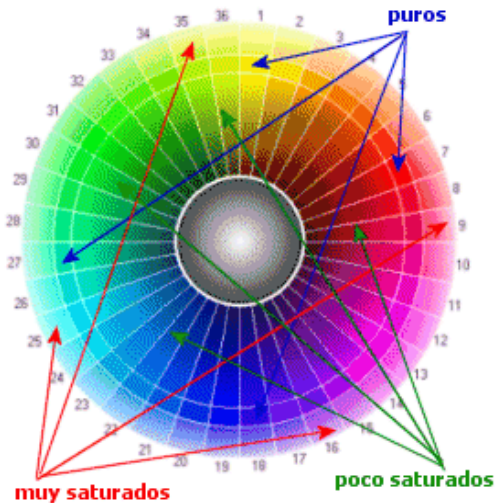


Figura 5. Saturación de los colores.

Por ejemplo, decimos "un rojo muy saturado" cuando nos referimos a un rojo puro y rico. Pero cuando nos referimos a los tonos de un color que tiene algún valor de gris, los llamamos menos saturados. La saturación del color se dice que es más baja cuando se le añade su opuesto (llamado complementario) en el círculo cromático.

### 2.15 Uso del SPAD en la diagnosis de N

El medidor de clorofila SPAD 502 es un instrumento que permite evaluar indirectamente y en forma no destructiva el contenido de clorofila en la hoja y por ende, el estado nutricional del cultivo a través de una simple lectura (Sainz y Echeverría, 1998). Lo anterior gracias a que dicho instrumento mide el "índice de verdor" (IV) que se correlaciona con el contenido de clorofila y de nitrógeno de las hojas (García, 2005); la concentración relativa de clorofila es medida por medio de la luz transmitida a través de la hoja en 650 nm (longitud de onda fotosintéticamente activa) y 940 nm (Sainz y Echeverría, 1998): por lo que el medidor de clorofila SPAD constituye una herramienta apropiada para el monitoreo de la disponibilidad de nitrógeno.

Rodríguez *et al.* (1998) reporta la existencia de correlación altamente significativa ( $\alpha = 0.01$ ) entre la concentración de clorofila y nitrógeno con las unidades SPAD, donde obtuvo modelos con  $R^2$  de 0.86 y 0.89 para la estimación de nitrógeno y clorofila, respectivamente,

en el cultivo de tomate, lo cual representa una gran ventaja al poder substituir la determinación de clorofila por el método tradicional (que es un método destructible) por la simple lectura de unidades SPAD, y teniendo también un ahorro de tiempo en la obtención de los resultados por la rapidez con la que se hacen las determinaciones.

Trabajos como los de Vitosh y Silva (1996); Gaviola y Lipinski (2002) y Sainz y Echeverría (1998) en los cuales se usó el SPAD como estimador de nitrógeno foliar del cultivo de maíz, se encontró que la estimación del contenido de nitrógeno en el cultivo por parte del equipo SPAD sirvió de base para la fertilización del cultivo y la obtención de rendimientos del 85 % respecto al máximo esperado.

### **3 OBJETIVO E HIPÓTESIS**

#### **3.1 Objetivo general**

Determinar la concentración de nitrógeno en chile de agua mediante la medición de reflectancia en sus hojas.

##### **3.1.1 Objetivos específicos**

- Obtener la reflectancia de hojas de plantas de chile de agua regadas con diferentes concentraciones de nitrógeno, por medio de un radiómetro, un escáner y una cámara fotográfica,
- Calcular la concentración de nitrógeno foliar de plantas de chile de agua, sometidas a diferentes tratamientos con nitrógeno.
- Determinar el efecto de la concentración de nitrógeno de la solución nutritiva en la morfología y rendimiento de plantas de chile de agua en condiciones de hidroponía.

#### **3.2 Hipótesis general**

La reflectancia de hojas recientemente maduras proporciona información para estimar la concentración de nitrógeno en plantas de chile de agua.

##### **3.2.1 Hipótesis específicas**

- La reflectancia de hoja obtenida con radiómetro, escáner y cámara fotográfica permiten conocer la concentración de nitrógeno en tiempo real en plantas de chile de agua.
- La concentración de nitrógeno foliar de chile de agua se incrementa proporcionalmente a la concentración de éste en la solución nutritiva.
- La concentración de nitrógeno de la solución nutritiva se relaciona positivamente con el incremento en las características morfológicas y de rendimiento de la planta de chile de agua.



## **MATERIALES Y METODOS**

### **3.3 Sitio experimental**

El experimento se desarrolló del 16 de abril al 3 de septiembre del 2011, en un invernadero de estructura metálica tipo baticenital con cubierta plástica, ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, con coordenadas 19° 29' 17'' N y 98° 53' 13'' O, a una altura de 2250 MSNM.

### **3.4 Material vegetal**

El material vegetal del experimento correspondió a un tipo de chile denominado chile de agua (*Capsicum annun* L.), las semillas pertenecieron a la colecta "Ocotlán" procedente de los Valles Centrales del Estado de Oaxaca, dicha colecta ha sido evaluada y descrita dentro del proyecto de mejoramiento genético de chiles de la Universidad Autónoma Chapingo. Este material fue seleccionado por presentar características como: precocidad, buen tamaño y peso de fruto, además de grosor de pericarpio.

Las semillas fueron colocadas en charolas de polipropileno con 200 cavidades y se utilizó turba canadiense (peat moss®) como sustrato. Las plántulas emergidas se regaron ligeramente cada tercer día y a partir del día 10 se hicieron riegos con solución nutritiva de Steiner (1984) con una CE = 0.5 dS m<sup>-1</sup>. A los 39 días después de la siembra (dds), las plántulas se pasaron a vasos de unicel de 250 mL de capacidad y se regaron con solución nutritiva de Steiner con CE = 1.0 dS m<sup>-1</sup>. Las plántulas se mantuvieron con dicho manejo hasta que tuvieron dos pares de hojas verdaderas (51 dds). Se seleccionaron 120 plántulas de tamaño y apariencia similares y fueron trasplantadas en bolsas de polietileno negro de 40 x 40 cm que contenían tezontle de calibre 5 a 10 mm de diámetro como sustrato.

### **3.5 Diseño del experimento**

Al interior del invernadero las bolsas con plantas se colocaron en 4 filas dobles, con una separación de 50 cm entre filas y 45 cm entre plantas. Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con 4 repeticiones y cinco tratamientos; cada bolsa contenía una planta, que fue la unidad experimental. La distribución de los tratamientos en el invernadero se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Distribución al interior del invernadero de los tratamientos aplicados a plantas de chile de agua.

Bloques \ Parcelas	Parcelas				
	1	2	3	4	5
1	T2	T4	T5	T3	T1
2	T2	T1	T4	T3	T5
3	T4	T3	T5	T1	T2
4	T1	T5	T2	T4	T3

Los tratamientos fueron cinco concentraciones de N en forma de  $\text{NO}_3^-$  en la solución nutritiva (SN) Steiner (1984) y teniendo como fuente de nutrientes los siguientes fertilizantes: nitrato de calcio, nitrato de potasio, fosfato monoamónico, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, sulfato de calcio y cloruro de calcio. Para éste último, se utilizaron menos de  $2 \text{ meq L}^{-1}$  para evitar toxicidad por  $\text{Cl}^-$ . Las concentraciones nutrimentales de los tratamientos se reportan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Concentración nutrimental de las soluciones nutritivas Steiner aplicadas como tratamientos a plantas de chile de agua.

Trat	$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{+2}$	$\text{SO}_4^{-2}$	$\text{Cl}^-$	CE $\text{dS m}^{-1}$
	$\text{meq L}^{-1}$							
1	0	1	7	9	4	22	1.4	1.5
2	4	1	7	9	4	15	1.4	1.6
3	8	1	7	9	4	10.5	1.4	1.7
4	12	1	7	9	4	7	0	1.9
5	16	1	7	9	4	4.5	0	2.0

Trat = tratamientos;  $\text{meq L}^{-1}$  = miliequivalentes por litro; CE = Conductividad eléctrica;  $\text{dSm}^{-1}$  = decisiemens por metro.

Los tratamientos se aplicaron 38 días después del trasplante (ddt). A partir de ésta fecha se realizaron seis muestreos destructivos para la obtención de variables respuestas; con intervalo de tiempo de siete días entre cada uno de ellos.

### **3.6 Variables respuesta**

A los 73 ddt se tomaron las siguientes variables:

#### **3.6.1 Valores de reflectancia**

##### **3.6.1.1 Reflectancia de hojas obtenida a partir de un radiómetro**

La reflectancia de hojas del tercio medio y superior de chile de agua, en las longitudes de onda 460, 485, 510, 560, 610, 660, 710, 760, 810, 830 y 1650 nm, se obtuvo con un radiómetro multiespectral de la marca CROPSCAN® modelo MSR5. Dichas lecturas se obtuvieron colocando el sensor del cropscan a un metro de altura sobre tapete de hojas del cultivo puesto en una tabla de madera de dimensiones 0.5 x 0.5 m de color negro.

##### **3.6.1.2 Reflectancia de hojas obtenida a partir de imágenes de cámara digital**

Las fotografías de las plantas de chile de agua se obtuvieron con ayuda de una cámara CANON EOS Rebel XS de 10.1 megapíxeles con un objetivo EF-S 18-55 mm f/3.5-5.6 IS, con  $f = 6.3$ ,  $1/80$  s de exposición, ISO 800 y a 0.5 m de altura sobre el ápice de la planta. Las imágenes digitales fueron tomadas al interior de una caja de color negro, de dimensiones 1.20 m \* 0.80 m \* 2.50 m, iluminada constantemente con 2 lámparas fluorescentes en forma de espiral compacto de 65 W, colocadas en los extremos de la caja a 45° de inclinación con respecto a la vertical y a la misma altura del objetivo de la cámara

Con un programa en Microsoft Visual Basic ver. 6.0 se obtuvieron los canales de los espacios de color RGB y Ciel-Lab, además del Cromo y Hue de las imágenes digitales del follaje del cultivo: canal rojo (R\_F), canal verde (G\_F), canal azul (B\_F), canal L (Cie\_L\_F), canal a (Cie\_a\_F), canal b (Cie\_b\_F), croma (C\_F), y matiz (H\_F)

### **3.6.1.3 Reflectancia de hojas a partir de un escáner de escritorio**

Las imágenes digitales de hojas del cultivo se obtuvieron con un escáner multifuncional SAMSUNG modelo SCX-3200 a 300 dpi. Posteriormente con un programa en Microsoft Visual Basic ver. 6.0 se obtuvieron los canales del espacio de color RGB, Ciel-Lab, Croma y Hue para las imágenes digitales escaneadas de hojas del tercio medio de la planta: canal rojo (R\_EM), canal verde (G\_EM), canal azul (B\_EM), canal L (Cie\_L\_EM), canal a (Cie\_a\_EM), canal b (Cie\_b\_EM), cromina (Croma\_EM), y matiz (H\_EM); de la misma forma se obtuvieron los canales de los espacio de color RGB, Ciel-Lab, Cromina y Hue para las imágenes escaneadas de hojas del tercio superior de la planta: canal rojo (R\_ES), canal verde (G\_ES), canal azul (B\_ES), canal L (Cie\_L\_ES), canal a (Cie\_a\_ES), canal b (Cie\_b\_ES), cromina (Croma\_ES), y matiz (H\_ES).

### **3.6.2 Lecturas SPAD**

Los valores de lectura SPAD fueron tomados con el medidor portátil de clorofila SPAD-502, marca Minolta®, dicho valor fue el promedio de doce lecturas en 6 hojas diferentes de cada tercio de la planta analizado.

### **3.6.3 Morfológicas**

#### **3.6.3.1 Altura de planta**

La altura de planta (APL, cm) se tomó desde el primer nudo hasta el punto más alto de la planta, con ayuda de un flexómetro

#### **3.6.3.2 Número de hojas**

El número de hojas del tercio medio de la planta (HTM), así como el número de hojas del tercio superior de la planta (HTS) se obtuvieron contabilizando de forma manual cada uno de los folíolos que se encontraban en los respectivos tercios de las plantas, mientras que el número de hojas totales de la planta (HTP) fue el resultado de la sumatoria de las dos variables anteriores.

### **3.6.3.3 Área foliar**

El área foliar del tercio medio por planta (AFTM, cm<sup>2</sup>/planta) y área foliar del tercio superior por planta (AFTS, cm<sup>2</sup>/planta) se obtuvo con un integrador de área foliar LI-3100 de la marca LI-COR. Mientras que el área foliar total por planta (AFT, cm<sup>2</sup>/planta) es el resultado de la sumatoria de las dos variables anteriores.

### **3.6.4 Fisiológicas**

Al final de cada muestreo, las hojas de las plantas analizadas se secaron en una estufa de convección a 60 °C hasta alcanzar peso constante. Las muestras fueron molidas y posteriormente se determinó el porcentaje de nitrógeno foliar del tercio medio (NM %), y superior de las plantas (NS %) por la técnica de microkjeldahl.

### **3.6.5 Rendimiento**

#### **3.6.5.1 Numero de frutos**

La clasificación de frutos en tres calidades diferentes se hizo de acuerdo al tamaño (cm) que los frutos tenían al momento del muestreo quedando la clasificación de la siguiente manera: frutos de primera (NF1) > 12.0 cm de longitud, frutos de segunda (NF2) 6.0 – 11.9 cm de longitud, frutos de tercera (NF3) < 5.9 cm de longitud y Número de frutos totales (NFT) que resultó de la sumatoria de los frutos de las 3 calidades.

#### **3.6.5.2 Peso de fruto**

El peso de frutos de calidad primera (PF1, g), peso de frutos de calidad segunda (PF2, g) y el peso de frutos de calidad tercera (PF3, g) se obtuvo pesando los frutos de cada una de las tres calidades en una báscula Ohaus<sup>®</sup> modelo TS4KS, y el peso de frutos totales (PFT, g) fue el resultado de la sumatoria de los tres pesos anteriores.

### **3.7 Análisis estadístico**

Se hicieron análisis de varianza y comparación múltiple de medias con el método de Tukey con  $\alpha = 0.05$ , para identificar diferencias estadísticas entre tratamientos. Además se realizó análisis de correlación entre variables respuesta con el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS).

### **3.8 Obtención de modelos**

Con base en los resultados del análisis estadístico y con el programa Curve Expert Professional 1.2 se ajustaron modelos tipo Weibull entre las variables que mostraron significancia estadística con el contenido de nitrógeno de hojas de chile de agua.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Concentración de nitrógeno en hojas de chile de agua.

De acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey, la concentración de nitrógeno foliar del tercio medio (NM, %) se agrupo en tres categorías diferentes, mientras que la concentración de nitrógeno foliar del tercio superior (NS, %) se agrupo en cuatro categorías diferentes (Figura 2), lo anterior es resultado de la concentración de nitrógeno ( $\text{meq L}^{-1}$ ) aplicado en la solución nutritiva Steiner a cada tratamiento; se observa que conforme se incrementa la dosis de nitrógeno en la SN, se incrementa la concentración de nitrógeno foliar, lo cual de acuerdo con Gasga (2011) y De la Cruz (2013) es de importancia, pues el tener unidades experimentales con diferentes concentraciones de nitrógeno y que sean estadísticamente diferentes es fundamental para el análisis de correlación entre la concentración de nitrógeno foliar del cultivo y la reflectancia del follaje.

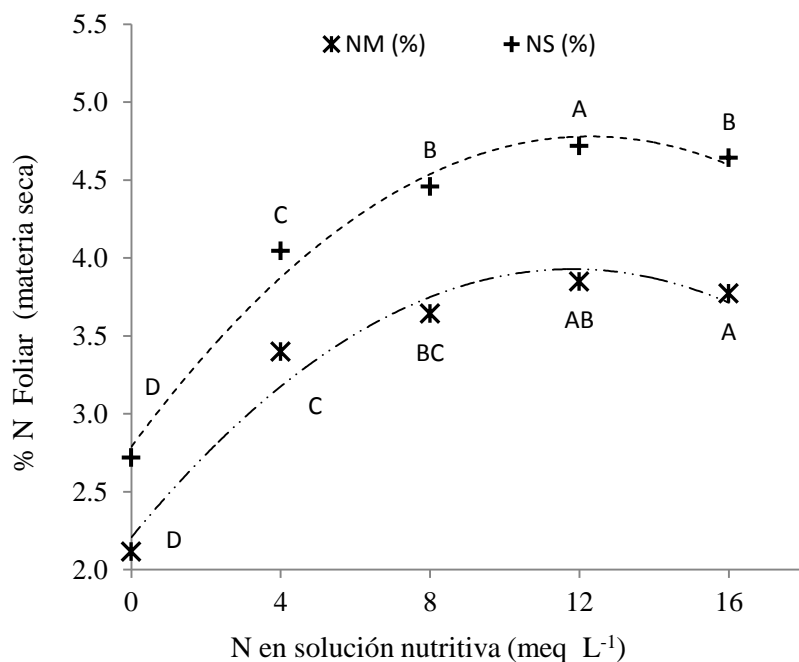


Figura 6. Concentración de nitrógeno foliar del tercio medio y superior de plantas de chile de agua, a los 73 ddt, en respuesta de los  $\text{meq L}^{-1}$  N suministrados en la solución nutritiva. Modelos para tercio medio (---x---) NM (%) =  $2.207 + 0.2913x - 0.0123x^2$  ( $n = 120$ ,  $R^2 = 0.96$ ); para terco superior (---+---) NS (%) =  $2.7883 + 0.3243x - 0.0132x^2$  ( $n = 80$ ,  $R^2 = 0.98$ ).

## 4.2 Reflectancia de hojas de chile de agua

En las Figuras 3 y 4 se aprecia el comportamiento de la reflectancia de hojas de chile de agua en el espectro visible e infrarrojo por efecto de la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva. Se observa que la reflectancia del cultivo corresponde a la firma espectral de dosel de vegetación descrita por Osbourne *et al.* (2002) y Feng *et al.* (2008), quienes afirman que la reflectancia de plantas en condiciones normales es alta en el infrarrojo debido a la estructura micro-celular de la hoja; y baja entre 480 y 680 nm debido a la absorción por la clorofila y otros pigmentos como carotenoides y antocianinas (Thomas y Oerther, 1972; Mirik *et al.*, 2007), específicamente la clorofila es un pigmento que absorbe luz en el espectro azul (400-500 nm) y rojo (600-700 nm) (Curran, 1989; Noh *et al.*, 2006).

El comportamiento de la firma espectral del cultivo de chile de agua en las longitudes de onda 460 a 1650 nm (Figuras 3 y 4) concuerda con lo descrito por Baret *et al.* (1994), Osbourne *et al.* (2002), Jorgensen y Christensen (2004) y Noh *et al.* (2006) quienes mencionan que plantas deficientes de nitrógeno presentan un incremento en su reflectancia en la región comprendida entre 500 - 750 nm, y una disminución de la misma en el infrarrojo cercano, esto debido a un cambio en la coloración de las hojas del cultivo que pasan del color verde al amarillo, tal como lo sucedido con las plantas analizadas en esta investigación.



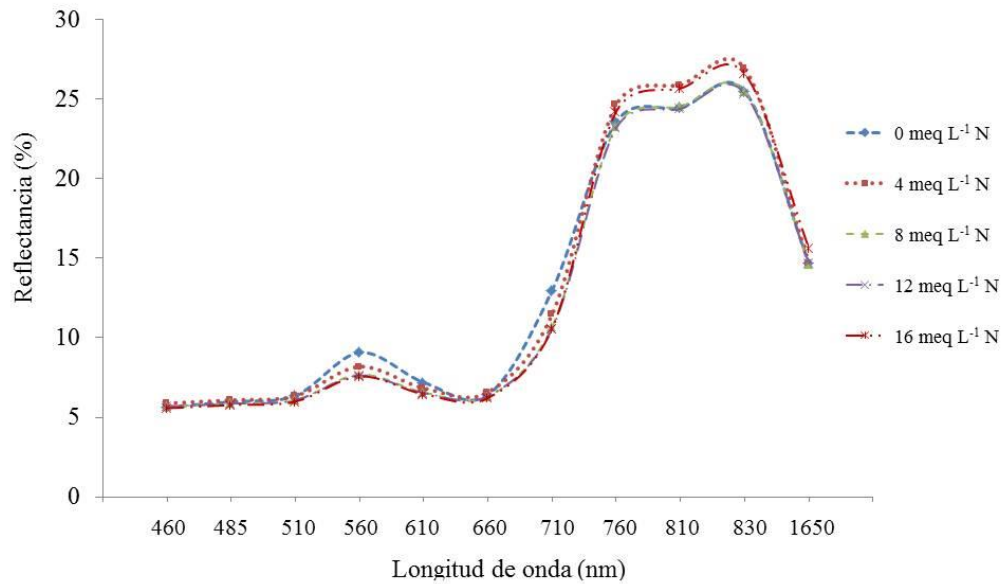


Figura 7. Reflectancia obtenida con radiómetro 73 ddt, en el espectro de luz visible e infrarrojo de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno ( $\text{meq L}^{-1}$ ) a través de la solución nutritiva Steiner.

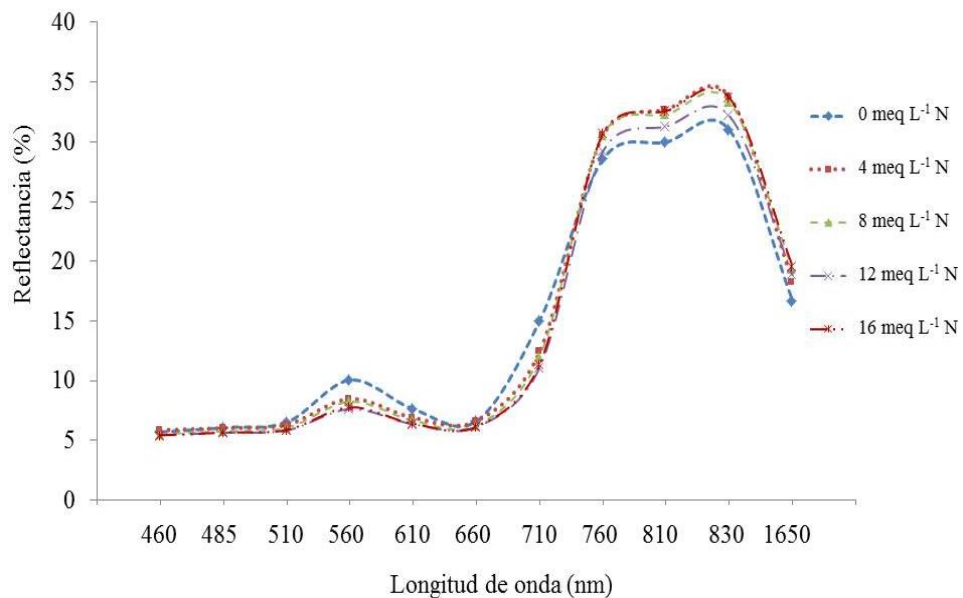


Figura 8. Reflectancia obtenida con radiómetro 73 ddt, en el espectro de luz visible e infrarrojo de hojas del tercio superior de plantas de chile de agua, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno ( $\text{meq L}^{-1}$ ) a través de la solución Steiner.

#### 4.2.1 Reflectancia de hojas de chile de agua en la región visible

La reflectancia de hojas de chile de agua medida con un radiómetro multi espectral en las longitudes de onda 460 – 660 nm disminuyó conforme aumentó la concentración de nitrógeno suministrado en la SN (Figuras 5 y 6). De acuerdo con la prueba de comparación múltiple de medias por el método de Tukey ( $\alpha= 0.05$ ) en la longitud de onda 560 nm, las plantas del tratamiento 5 (16 meq L<sup>-1</sup> N) fueron estadísticamente menores al presentar el porcentaje menor de reflexión comparadas con el resto de los tratamientos (Figuras 5 y 6). Esta disminución de reflectancia se debe principalmente a la concentración de nitrógeno y de clorofila presente en las plantas de dicho tratamiento, puesto que doseles verdes con concentraciones apropiadas de nitrógeno y de clorofila absorben la luz fotosintéticamente activa (roja y azul) y reflejan la luz verde e infrarroja (Gates, 1980; Cho y Skidmore 2006; Brizuela *et al.*, 2007).

Por otro lado, las plantas regadas con 0 meq L<sup>-1</sup> N fueron el grupo estadístico mayor al presentar porcentajes de reflexión superiores a los demás tratamientos (Figuras 5 y 6), esto obedece a un déficit de nitrógeno, pues éste está altamente correlacionado con una reducción en la concentración de clorofila lo que ocasiona un incremento de la reflectancia del verde (Curran *et al.*, 2001; Taiz y Zeiger, 2002; Brizuela *et al.*, 2007) y hace posible estimar el contenido de nitrógeno a partir de la reflectancia en el espectro visible (Carter y Spiering, 2002; España *et al.*, 2006).

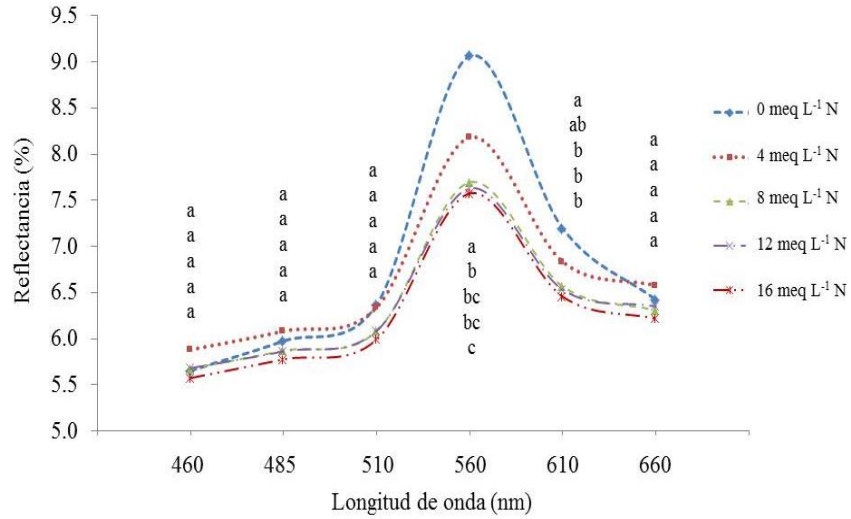


Figura 9. Reflectancia de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua, obtenida con radiómetro 73 ddt, en las longitudes de onda de 460 a 660 nm, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno ( $\text{meq L}^{-1}$ ) en la solución nutritiva Steiner. Valores con la misma letra en cada longitud de onda, no son estadísticamente diferentes, Tukey  $\alpha=0.05$

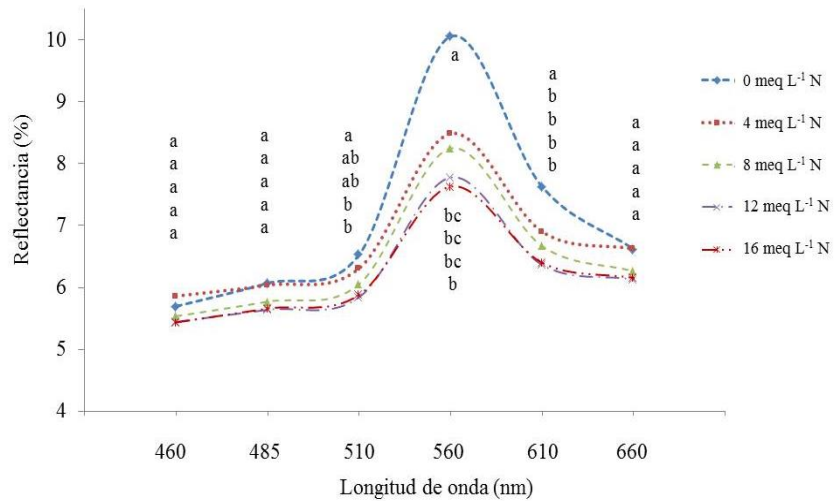


Figura 10. Reflectancia de hojas del tercio superior de plantas de chile de agua, obtenida con radiómetro 73 ddt, en las longitudes de onda 460 a 660 nm, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno ( $\text{meq L}^{-1}$ ) en la solución nutritiva Steiner. Valores con la misma letra en cada longitud de onda, no son estadísticamente diferentes, Tukey  $\alpha=0.05$ .

El modelo que relaciona el contenido de N foliar del tercio medio de chile de agua y el porcentaje de reflectancia a 560 nm se puede apreciar en la Figura 7 y Cuadro 3; dicho modelo presenta un  $R^2 = 0.74$ , lo que permite que sea utilizado para determinar el contenido de nitrógeno foliar del cultivo; lo anterior concuerda con los resultados de Blackmer *et al.* (1994) y Blackmer *et al.* (1996) quienes mencionan que la luz reflejada en la banda de 550 nm (verde) fue mejor para identificar deficiencia de nitrógeno en plantas de maíz; similar también a lo reportado por Zhao *et al.* (2005) quienes encontraron que el modelo generado a partir de los valores de reflectancia de luz en la longitud de onda de 555 nm tiene un  $R^2 = 0.82$ , lo que explica en buena medida el estado nitrogenado del cultivo de sorgo. Por su parte Costa *et al.* (2001), Noh *et al.* (2006) y Brizuela *et al.* (2007) reportan que la concentración de clorofila se estima a partir de la reflectancia entre 550 a 600 nm.

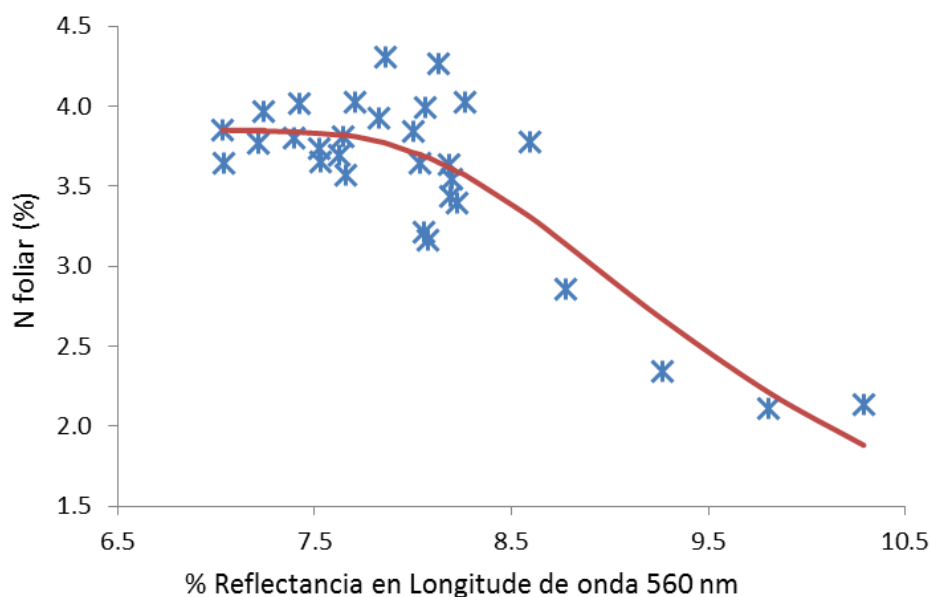


Figura 11. Relación de nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con reflectancia a 560 nm transcurridos 73 ddt. Modelo Weibull (—):  $Nf = 3.85576 - 2.80143 * e^{(-1.63E+08 * X^{-8.56012})}$ , Nf = concentración de nitrógeno foliar en %, X= reflectancia a 560 nm de las hojas (%), (n=120,  $R^2=0.74$ ).

El modelo obtenido con la reflectancia de hojas del tercio superior tiene un  $R^2 = 0.50$  (Cuadro 3), por lo cual no se recomienda para el cálculo del porcentaje de nitrógeno foliar del cultivo de chile de agua; de hacerlo habría una subestimación de N debido a que las

hojas de esta parte de la planta no han madurado completamente y son susceptibles de presentar respuesta a la fertilización, o a la movilidad del nitrógeno dentro de la misma planta, de las hojas adultas o basales que son las primeras en mostrar síntomas de deficiencia hacia las hojas jóvenes o superiores (Villar y Ortega; 2011).

Cuadro 3. Modelos Weibull para estimar la concentración de nitrógeno foliar (%) en Chile de agua con base en la reflectancia (%) a 560 nm de las hojas del tercio medio y superior del cultivo.

<b>Estrato</b>	<b>Modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Tercio medio de la planta	$Nf = 3.85576 - 2.80143 * e^{(-1.63E+08 * X^{-8.56012})}$	0.74
Tercio superior de la planta	$Nf = 4.55335 - 2.50595 * e^{(-9.95E+07 * X^{-8-8.15978})}$	0.50

$Nf$  = concentración de nitrógeno en las hojas (%),  $X$  = Reflectancia (%) a 560 nm de las hojas.

En lo que respecta a la reflectancia en la banda roja de 610 nm, tanto del tercio medio como del tercio superior, se encontró un comportamiento similar a la reflectancia a 550 nm, debido a que las plantas del tratamiento 1 (0 meq L<sup>-1</sup> N) presentaron el mayor porcentaje de reflectancia y, fueron diferentes y superiores estadísticamente al resto de los tratamientos (Figuras 5 y 6). De acuerdo con Walburg *et al.* (1982), cuando un cultivo de maíz fue expuesto a deficiencias de nitrógeno éste presentó un incremento de reflectancia en el espectro rojo mientras que disminuyó la reflectancia en el espectro infrarrojo. Así mismo, Stone *et al.* (1996) demostraron que el nitrógeno total de la planta puede ser estimado a partir de las mediciones de radiancia espectral en el rojo (671 nm). Para el caso del Chile de agua, el modelo obtenido a partir de la reflectancia de las hojas del tercio medio a 610 nm fue:  $Nf = 3.85595 - 3.77827 * e^{(-7.56E+07 * X^{-8.92381})}$ ; con un R<sup>2</sup>=0.62, ( $Nf$  = concentración de nitrógeno foliar en %,  $X$ = reflectancia a 610 nm de las hojas (%), n=120), lo cual hace que no se pueda utilizar para diagnosticar el contenido de nitrógeno foliar en Chile de agua; mientras que la correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio superior de Chile de agua con la longitud de onda 610 resultó ser no significativa (Cuadro 7A).

#### 4.2.2 Reflectancia de hojas de chile de agua en el infrarrojo

La reflectancia de las hojas del tercio medio y superior de chile de agua en el espectro infrarrojo específicamente en la longitud de onda de 710 nm, fue agrupada en dos clases estadísticamente diferentes (Figuras 8 y 9). De los cuales el grupo de plantas del tratamiento 1 (0 meq L<sup>-1</sup> N) presentó el mayor porcentaje de reflectancia.

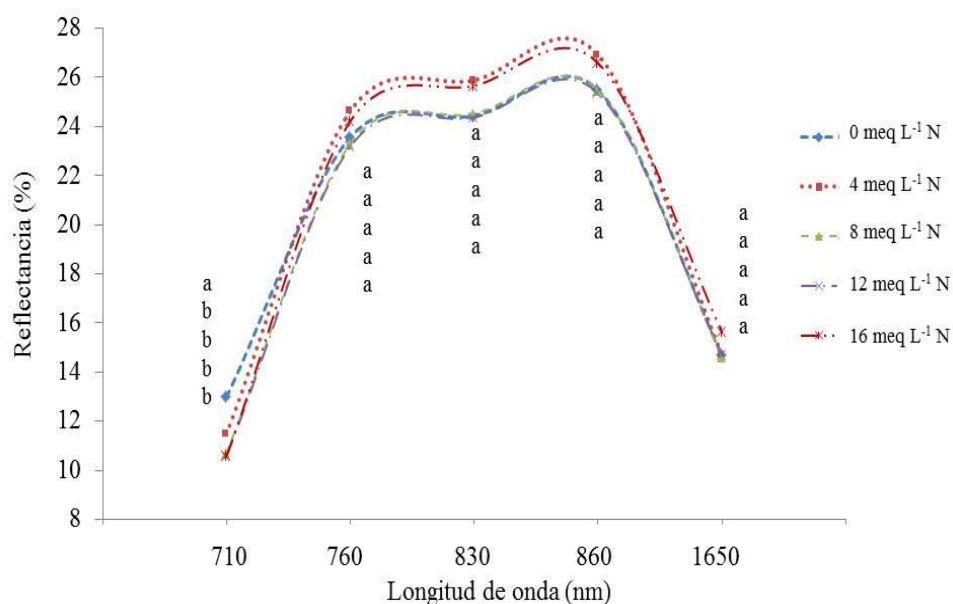


Figura 12. Reflectancia de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua, obtenida con radiómetro 73 ddt, en las longitudes de onda de 710 a 1650 nm, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L<sup>-1</sup>) en la solución nutritiva Steiner. Valores con la misma letra en cada longitud de onda, no son estadísticamente diferentes, Tukey  $\alpha=0.05$ .

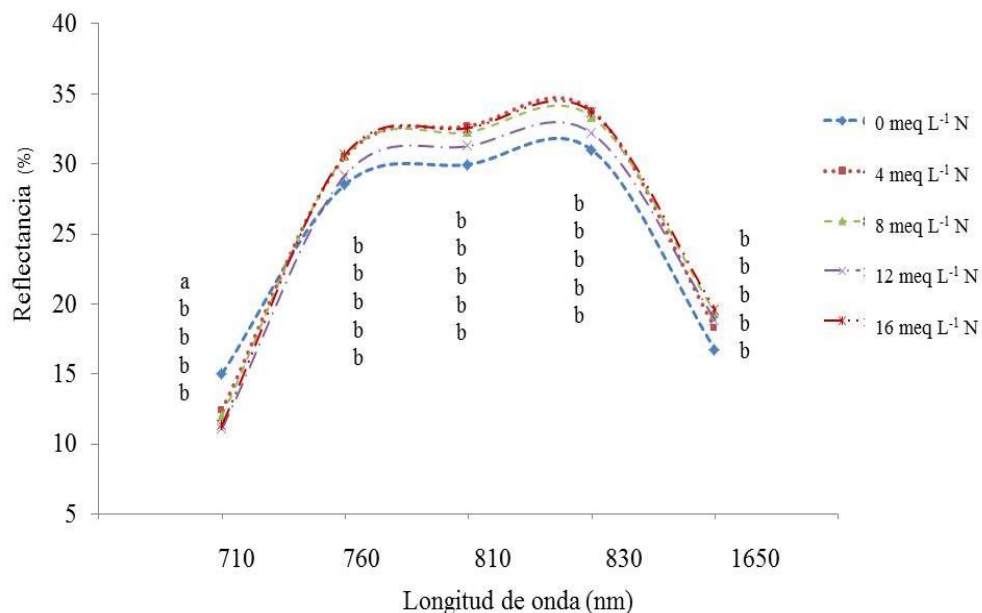


Figura 13. Reflectancia de hojas del tercio superior de plantas de chile de agua, obtenida con radiómetro73 ddt, en las longitudes de onda de 710 a 1650 nm, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L<sup>-1</sup> N) en la solución nutritiva Steiner. Valores con la misma letra en cada longitud de onda, *no son* estadísticamente diferentes, Tukey  $\alpha=0.05$ .

El modelo generado con valores de reflectancia de hojas del tercio medio a 710 nm puede ser utilizado para estimar el contenido (%) de nitrógeno foliar de chile de agua, debido a que presenta un coeficiente de determinación de 0.72 (Figura. 10, Cuadro 4). De acuerdo con Zhao *et al.* (2005) la reflectancia de hojas de sorgo a 710 nm permite estimar la concentración de nitrógeno del follaje con un modelo que presentó un coeficiente de determinación de 0.82; además, Stone *et al.* (1996) reportan que el nitrógeno total de la planta puede ser estimado con mediciones de reflectancia en el infrarrojo cercano (780 nm).

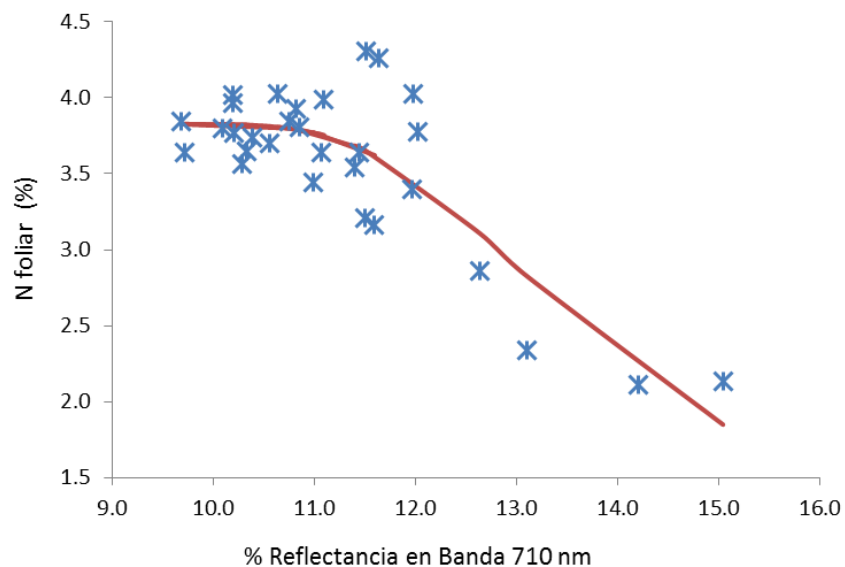


Figura 14. Relación de nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con reflectancia a 710 nm, 73 ddt. Modelo Weibull (—):  $Nf = 3.82726 - 2.87551 * e^{(-2.67E+08 * X^{-7.52169})}$ ,  $Nf$  = concentración de nitrógeno foliar (%),  $X$ = reflectancia a 710 nm de las hojas (%), (n= 120,  $R^2=0.72$ ).

Por su parte el modelo del tercio superior no se recomienda utilizarlo para diagnosticar el nitrógeno foliar del cultivo debido a que presenta un coeficiente de determinación de 0.42 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Modelos Weibull para estimar la concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) a 710 nm de las hojas del tercio medio y superior del cultivo.

Estrato	Modelo	$R^2$
Tercio medio de la planta	$Nf = 3.82726 - 2.87551 * e^{(-2.67E+08 * X^{-7.52169})}$	0.72
Tercio superior de la planta	$Nf = 4.52123 - 2.69635 * e^{(-1.44E+07 * X^{-6.11903})}$	0.42

$Nf$  = concentración de nitrógeno foliar (%),  $X$  = reflectancia a 710 nm de las hojas (%).



### 4.3 Estimación de nitrógeno foliar en chile de agua mediante imágenes digitales obtenidas con un escáner

Los canales R, G y B del espacio de color RGB y, L, a y b del espacio de color CIE-Lab, así como el Cromo obtenidos de imágenes de hojas escaneadas del tercio medio y superior de la planta de chile de agua, correlacionaron significativamente ( $\alpha=0.05$ ) (Cuadros 2A y 6A) y de forma negativa con el contenido de nitrógeno foliar del tercio medio (NM, %) y superior (NS, %). La Figura 11 muestra la reflectancia en las bandas roja (R), verde (G) y azul (B) de imágenes de hojas escaneadas del tercio medio de chile de agua; en ella se observan dos grupos estadísticamente diferentes debido al efecto de la dosis de N aplicado a través de la solución nutritiva, se aprecia que el grupo de plantas fertilizadas con el tratamiento 1 (0 meq L<sup>-1</sup> N) presentó la mayor reflectancia (Tukey,  $\alpha=0.05$ ), comparado con los grupos de plantas fertilizadas con 4, 8, 12 y 16 meq L<sup>-1</sup> N, lo que indica que una mayor concentración de nitrógeno en la SN implica una disminución de la reflectancia del follaje del cultivo, puesto que las plantas fertilizadas con nitrógeno presentan mayor concentración de pigmentos como la clorofila, la cual es responsable de la reflectancia de las hojas de los cultivos (Guyot, 1997; Peñuelas y Filella, 1998).

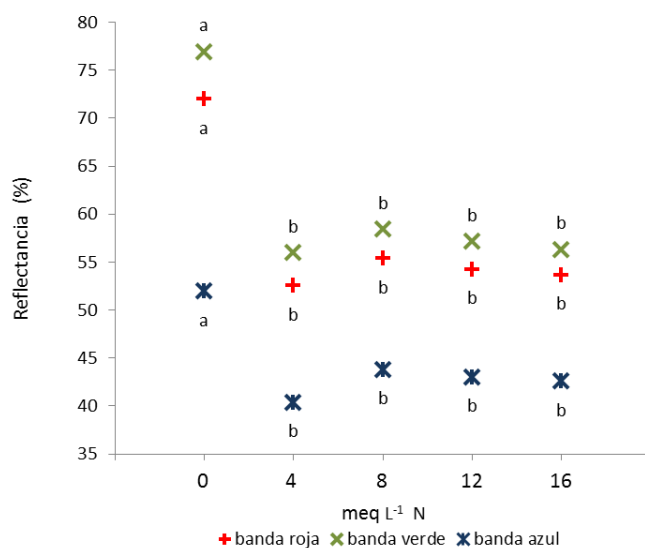


Figura 15. Reflectancia de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua, en los tres canales del sistema de color RGB, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno (meq L<sup>-1</sup>) en la solución nutritiva Steiner, obtenidas con escáner de escritorio de 73 ddt. Valores con la misma letra en la banda del mismo color, *no son* estadísticamente Diferentes, Tukey  $\alpha=0.05$ .

El resultado obtenido en esta investigación concuerda con lo reportado por De la Cruz (2013) quien relacionó el contenido de nitrógeno de hojas de pimiento con la reflectancia en el espacio de color RGB obtenida a partir de imágenes digitales de hojas escaneadas y, encontró que el tratamiento con 0 meq L<sup>-1</sup> de N fue estadísticamente diferente y menor que aquellos tratamientos a los que se les suministraron dosis mayores del elemento.

Los modelos resultantes entre la relación de los canales R, G, B, L y b así como el Croma de imágenes de hojas escaneadas del tercio medio de plantas de chile de agua con el nitrógeno foliar del tercio medio, presentan coeficientes de determinación superiores a 0.70 (Cuadro 5), mientras que el valor “a” del sistema Cie-Lab presentó un coeficiente de determinación de 0.67 y correlacionó de forma positiva; por lo cual se determinó que los modelos generados a partir de las variables: R, G, L, b y Croma pueden usarse para calcular el contenido de nitrógeno foliar en el cultivo de chile de agua. Cabe mencionar que el mejor modelo se obtuvo con base en el Croma con un R<sup>2</sup> de 93 % (Cuadro 5; Figura 12), seguido del modelo generado a partir del canal “b” con un R<sup>2</sup> de 91 % (Cuadro 5, Figura 13).

Cuadro 5. Modelos Weibull para estimar la concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) en los tres canales del modelos de color RGB y Cie-Lab así como del Croma obtenido de imágenes digitales escaneadas de hojas del tercio medio del cultivo.

<b>Variable independiente</b>	<b>Modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
R	$Nf = 3.838 - 2.54946 * e^{(-2.33858e+08 * X^{-4.50408})}$	0.77
G	$Nf = 3.88662 - 2.54946 * e^{(-1.25E+08 * X^{-4.333})}$	0.77
B	$Nf = 3.81902 - 4.70263 * e^{(-4.71E+07 * X^{-4.29708})}$	0.71
Cie_L	$Nf = 3.82935 - 2.12042 * e^{(-2.16427e+08 * X^{-5.69927})}$	0.79
Cie_a	$Nf = 2.86918 + 1.00235 * \cos(0.598772 * X + 2.17685)$	0.67
Cie_b	$Nf = 4.16111 - 2.13529 * e^{(-28494.4 * X^{-4.55614})}$	0.91
Croma	$Nf = 4.37341 - 2.68640 * e^{(-1.14777E+03 * X^{-2.94625})}$	0.93

*Nf* = concentración de nitrógeno foliar (%), *X* = variable independiente.

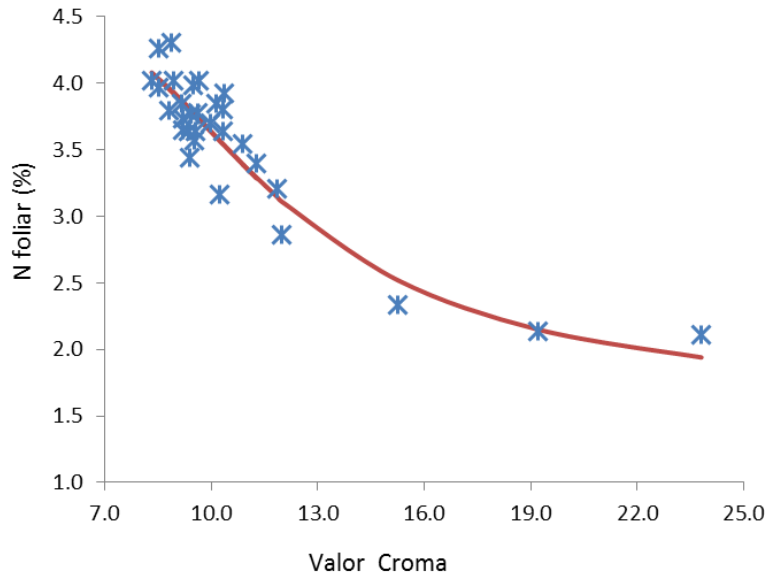


Figura 16. Relación de nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con el valor Croma de imágenes de hojas del cultivo escaneadas, 73 ddt. Modelo Weibull (—):  $Nf = 4.37341 - 2.68640 * e^{(-1.14777E+03 * X^{-2.94625})}$ ; Nf = concentración de nitrógeno foliar en (%), X= valor del Croma (%) (n= 120, R<sup>2</sup>=0.93).

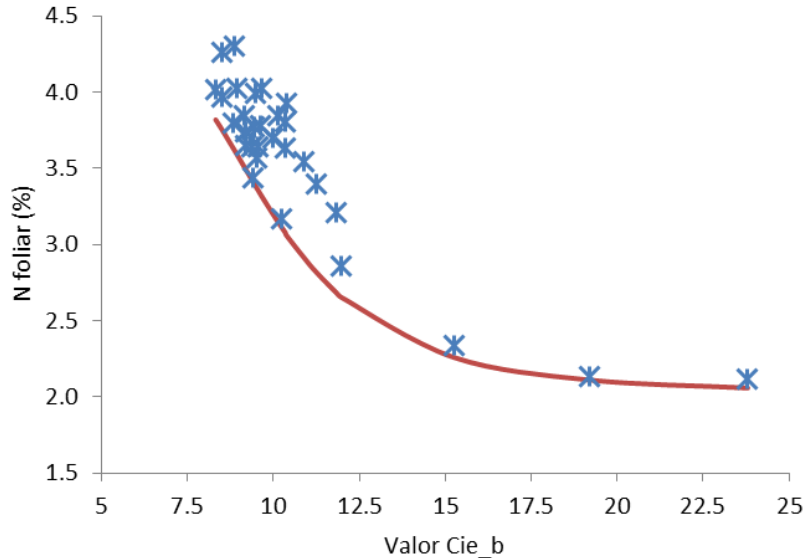


Figura 17. Relación de nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con la reflectancia el canal b del espacio de color CIE-Lab de imágenes de hojas del cultivo escaneadas 73 ddt. Modelo Weibull(—):  $Nf = 4.16111 - 2.13529 * e^{(-28494.4 * X^{-4.55614})}$ ; Nf = concentración de nitrógeno foliar en (%), X= reflectancia del canal b (%), (n=120, R<sup>2</sup>=0.91).

El análisis de regresión entre la concentración de nitrógeno foliar del tercio superior y los canales: R, G, B, L, b y Croma de las hojas del tercio superior de plantas de chile de agua también presentaron significancia ( $\alpha=0.05$ ) (Cuadro 6A). Los modelos para estimar la concentración de nitrógeno foliar de plantas de chile de agua a partir de los canales R, G, B, L, b y Croma se muestran en el Cuadro 6. En él se aprecia que dichos modelos presentan coeficientes de ajuste superiores a 83 % lo que los hace mejores que los modelos obtenidos con base en las variables independientes del tercio medio.

Cuadro 6. Modelos Weibull para estimar concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) en los tres canales del sistema de color RGB, L y b del sistema de color Cie-Lab, así como del Croma y Hue obtenidos de imágenes digitales de hojas escaneadas del tercio superior del cultivo.

Variable independiente	Modelo	R <sup>2</sup>
R	$Nf = 4.64707 - 5.16539 * e^{(-6.02E+07 * X^{-4.15465})}$	0.83
G	$Nf = 4.64214 - 4.17183 * e^{(-1.49E+08 * X^{-4.33757})}$	0.84
B	$Nf = 4.58292 - 27.3728 * e^{(-280975 * X^{-2.90577})}$	0.91
Cie_L	$Nf = 4.61836 - 3.3841 * e^{(-8.55E+07 * X^{-5.38838})}$	0.86
Cie_b	$Nf = 4.70363 - 2.1082 * e^{(-4.34E+06 * X^{-6.57008})}$	0.91
Croma	$Nf = 4.72321 - 2.12713 * e^{(-1.04E+07 * X^{-6.62883})}$	0.92

Nf = concentración de nitrógeno foliar (%), X = variable independiente.

Al igual que con los modelos de la parte media, los modelos generados a partir de la información de reflectancia de las hojas del tercio superior del chile de agua, presentan correlación negativa con el contenido de nitrógeno (Cuadro 6). Esto implica que la reflectancia de las plantas de chile de agua en las bandas del espectro visible disminuyó conforme incrementó la dosis de nitrógeno en la solución nutritiva, lo que coincide con Carter *et al.* (1996) y Glitelson *et al.* (1996) quienes indican que la concentración de clorofila es inversamente proporcional al grado de estrés por nitrógeno de un cultivo, lo que origina un cambio en la proporción de irradiancia absorbida en la banda visible; haciendo posible estimar la concentración de nitrógeno del follaje de las plantas con base en el contenido de clorofila (Filella *et al.*, 1995; Moran *et al.*, 2000).

Los modelos generados a partir del Cromo, del canal b del espacio de color CIE-Lab y B del espacio de color RGB, fueron los mejores para estimar el nitrógeno foliar de chile de agua a partir de la reflectancia de hojas del tercio superior, pues presentan  $R^2$  de 0.92 para el caso del Cromo y  $R^2$  de 0.91 para los canales b y B de los dos espacios de color (Figura 14 y 15; Cuadro 6).

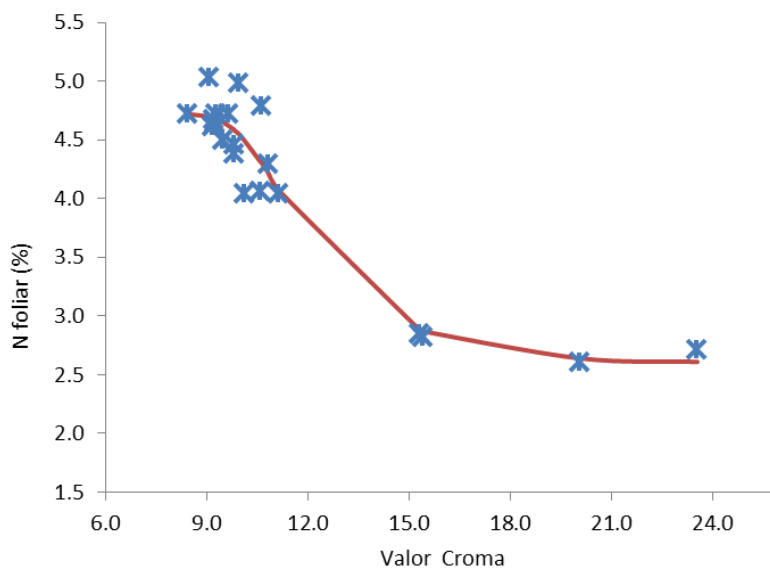


Figura 18. Relación de nitrógeno foliar del tercio superior de plantas de chile de agua con el valor Cromo de imágenes de hojas del cultivo escaneadas 73 ddt. Modelo Weibull (—):  $Nf = 4.72321 - 2.12713 * e^{(-1.04E+07 * X^{-6.62883})}$ ;  $Nf$  = concentración de nitrógeno foliar en (%),  $X$  = valor del croma (%) ( $n = 80$ ,  $R^2 = 0.92$ ).

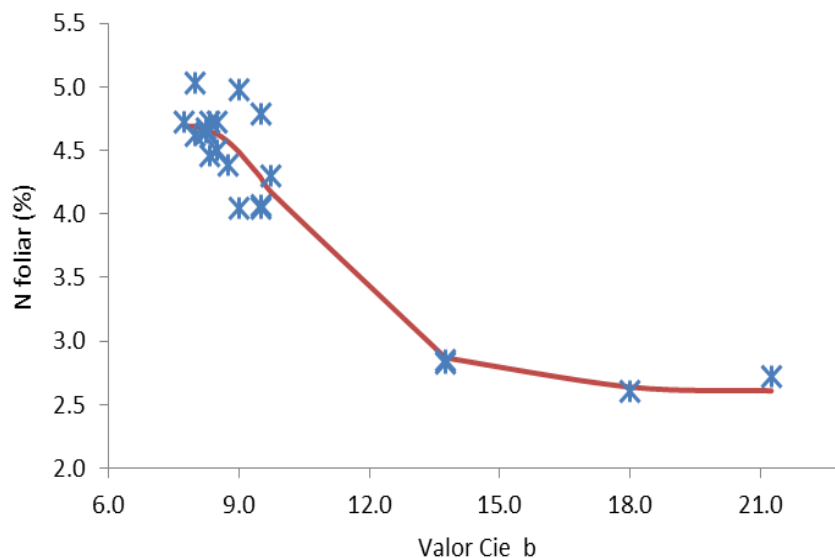


Figura 19. Relación de nitrógeno foliar del tercio superior de plantas de chile de agua con la reflectancia en el canal b del espacio de color CIE-Lab de imágenes de hojas del cultivo escaneadas 73ddt. Modelo Weibull (—):  $N_f = 4.70363 - 2.1082 * e^{(-4.34E+06 * X^{-6.57008})}$ ;  $N_f$ =concentración de nitrógeno foliar en (%),  $X$ = reflectancia del canal b (%) (n= 80,  $R^2=0.91$ ).

#### 4.4 Estimación de nitrógeno foliar en chile de agua mediante imágenes digitales obtenidas con cámara fotográfica

En la Figura 16 se observa la reflectancia de hojas de chile de agua en los tres canales del espacio de color RGB de imágenes digitales obtenidas de una cámara fotográfica, se aprecia que no existe diferencia significativa en el porcentaje de reflectancia en la banda azul ( $\alpha=0.05$ ), mientras que en las bandas roja y verde se formaron dos grupos estadísticamente diferentes, de los cuales el grupo de plantas irrigadas con 0 meq L<sup>-1</sup> N presentó la mayor reflectancia, debido a la poca concentración de clorofila en sus hojas (Curran *et al.*, 2001; Gitelson *et al.*, 2005) causada por la deficiencia de nitrógeno (Noh *et al.*, 2006), ya que la clorofila está relacionada con la reflectancia de luz fotosintéticamente activa (Gitelson *et al.*, 2005; Noh *et al.*, 2006; Varvel *et al.*, 2007).

La baja reflectancia encontrada en la región visible del espectro electromagnético de las plantas irrigadas con 4, 8, 12 y 16 meq L<sup>-1</sup> N se deben principalmente a la intensa absorción

de lo molécula de la clorofila ya que ésta absorbe la radiación azul y roja y refleja la verde (Cho y Skidmore, 2006; Brizuela *et al.*, 2007; Terashima *et al.*, 2009).

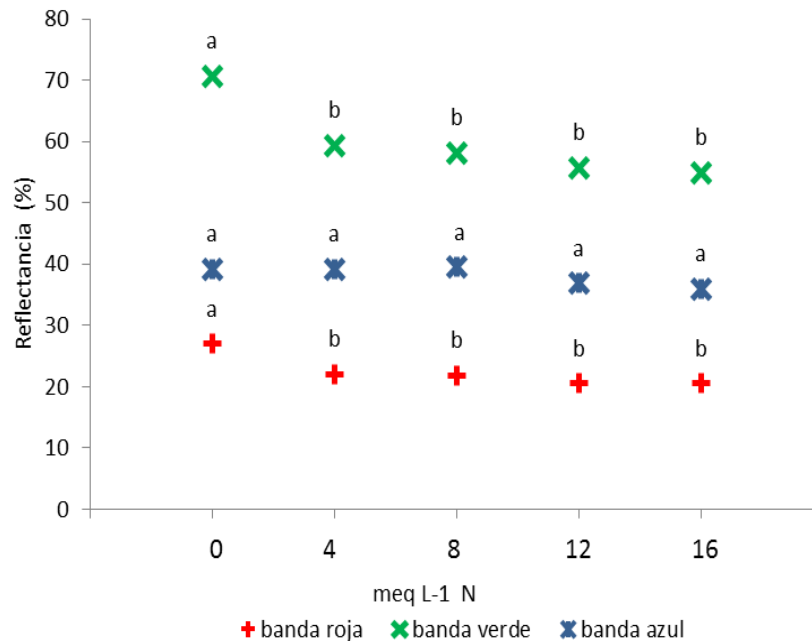


Figura 20. Reflectancia de hojas del cultivo de chile de agua, en los tres canales del sistema de color RGB, fertilizadas con diferentes dosis de nitrógeno ( $\text{meq L}^{-1}$ ) en la solución nutritiva Steiner, obtenida de fotografías digitales 73 ddt. Valores con la misma letra en la banda del mismo color, *no son* estadísticamente Diferentes, Tukey  $\alpha=0.05$ .

Los modelos que se ajustan mejor a la relación entre los canales de color obtenidos a partir de imágenes fotográficas digitales y la concentración de nitrógeno foliar ( $\alpha=0.05$ ) son con base en el canal b del modelo de color Cie-Lab (Figura 17) y el Cromo (Figura 18) pues presentan  $R^2$  de 0.87 y 0.85 respectivamente. Mientras que los demás modelos tienen coeficientes de determinación menores (Cuadro 7).

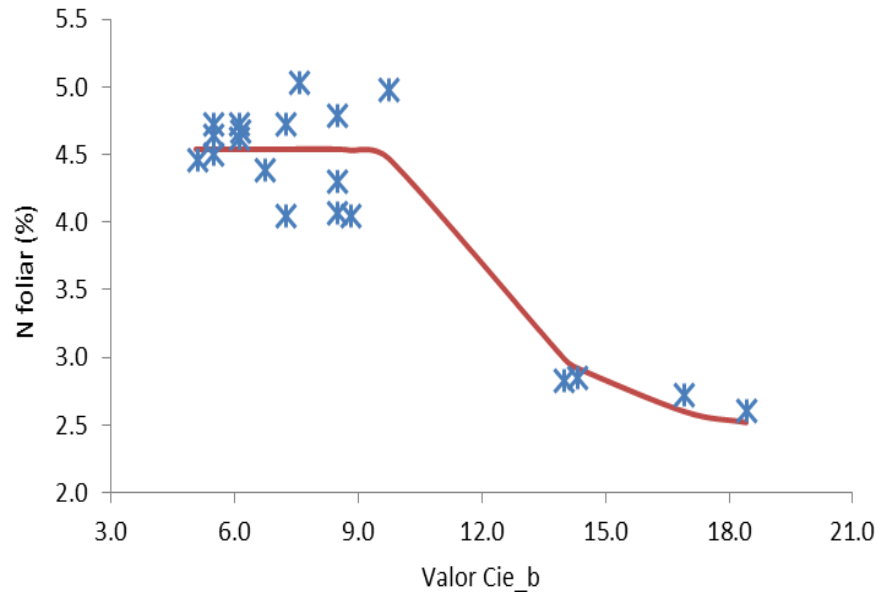


Figura 21. Relación de nitrógeno foliar del tercio superior de plantas de chile de agua con reflectancia en el canal b del sistema de color CIE-Lab, obtenido mediante fotografías, 73 ddt. Modelo Weibull (—):  $Nf = 4.54216 - 2.13088 * e^{(-9.11E+06 * X^{-6.50079})}$ ;  $Nf$  = concentración de nitrógeno foliar en %,  $X$  = reflectancia en el canal b (%) (n= 80,  $R^2=0.87$ ).

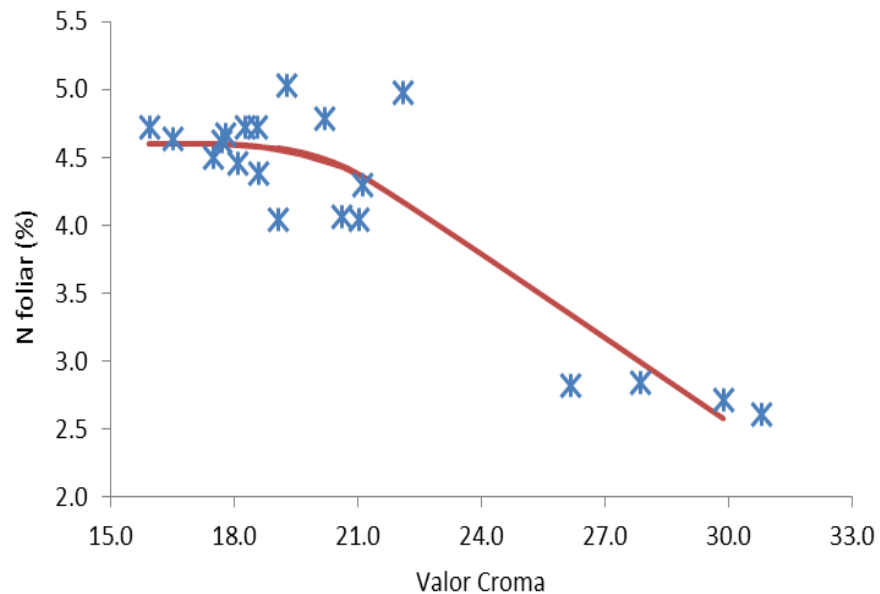


Figura 22. Relación de nitrógeno foliar del tercio superior de plantas de chile de agua con el valor del Cromo, 73 ddt. Modelo Weibull (—):  $Nf = 4.60319 - 2.74676 * e^{(-1.83E+08 * X^{-5.94573})}$ ;  $Nf$  = concentración de nitrógeno foliar en %,  $X$  = reflectancia en el canal b (%) (n= 80,  $R^2=0.85$ ).



La banda verde (G) del modelo de color RGB correlacionó significativa ( $\alpha=0.05$ ) e inversamente con el porcentaje de nitrógeno foliar, obteniéndose un modelo con un  $R^2=0.74$  (Cuadro 7), lo que concuerda por lo reportado por Jia *et al.* (2004) quienes utilizaron una cámara digital para registrar la banda verde reflejada por el follaje de trigo y encontraron una correlación significativa e inversa entre la intensidad de verdor y el contenido de nitrógeno foliar. Aunado a lo reportado por Blackmer *et al.* (1996) y Osbourne *et al.* (2002) quienes encontraron correlación alta entre el contenido de nitrógeno y la reflectancia en la banda verde de imágenes digitales del cultivo de maíz.

Cuadro 7. Modelos Weibull para estimar concentración de nitrógeno foliar (%) en chile de agua con base en la reflectancia (%) en el canal G del sistema de color RGB, L y b del sistema de color Cie-Lab, así como del Croma y Hue obtenidos de imágenes fotográficas del cultivo.

<b>Variable independiente</b>	<b>Modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
G	$Nf = 4.69588 - 5.69187 * e^{(-8.88E+07 * X^{-4.21457})}$	0.74
Cie_L	$Nf = 4.66129 - 4.33331 * e^{(-1.56E+07 * X^{-5.04122})}$	0.73
Cie_b	$Nf = 4.54216 - 2.13088 * e^{(-9.11E+06 * X^{-6.50079})}$	0.87
Croma	$Nf = 4.60319 - 2.74676 * e^{(-1.83E+08 * X^{-5.94573})}$	0.85
Hue	$Nf = 4.8095 - 6.09094 * e^{(-9.80E-27 * X^{-12.0191})}$	0.79

$Nf$  = concentración de nitrógeno foliar (%),  $X$  = variable independiente.

#### **4.5 Estimación de nitrógeno foliar en chile de agua mediante valores de lecturas SPAD**

El análisis de varianza realizado a los valores de lecturas SPAD de las hojas del tercio medio de chile de agua indicó que al menos uno de los tratamientos fue estadísticamente diferente. Los resultados de la prueba de medias de Tukey se muestran en la Figura 19; se observa un incremento gradual en el valor de las lecturas SPAD conforme aumenta la dosis de nitrógeno en la solución nutritiva.

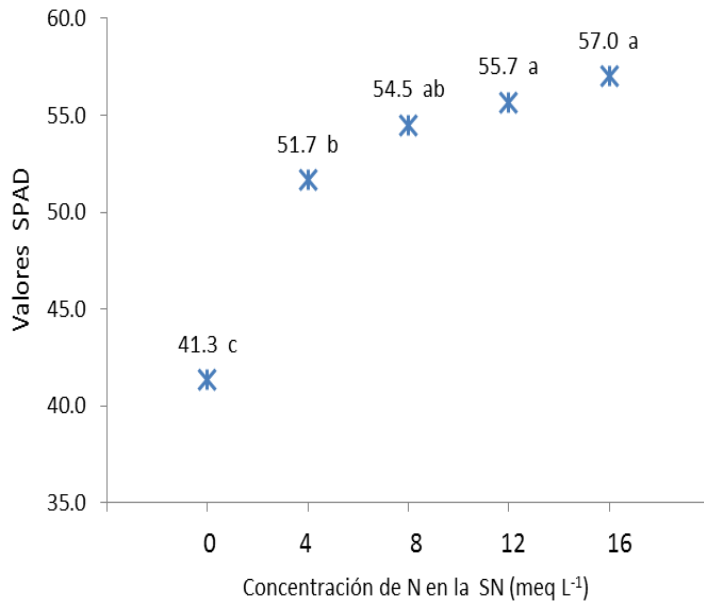


Figura 23. Valores SPAD de hojas del tercio medio de plantas de chile de agua en respuesta a los meq L<sup>-1</sup> N suministrados en la solución nutritiva. Valores con la misma letra no son estadísticamente Diferentes, Tukey  $\alpha=0.05$ .

La prueba de medias de Tukey de los valores SPAD de las hojas del tercio medio de chile de agua, formó 4 grupos estadísticamente diferentes ( $\alpha= 0.05$ ) (Figura 19); las plantas del tratamiento 1 (0 meq L<sup>-1</sup> N) presentaron las lecturas menores, lo cual de acuerdo con Navarro *et al.* (2003) se debe a una deficiencia de nitrógeno en el cultivo, tal como lo observó en plantas de alcornoque, donde las deficientes de nitrógeno presentaron valores SPAD inferiores a los obtenidos por las plantas testigo; por su parte Wolfe *et al.* (1988) mencionan que la concentración de nitrógeno en la hoja esta estrecha y positivamente relacionada con el contenido de clorofila de la misma; y a su vez la clorofila se relaciona con el color verde del follaje, por lo que un suministro bajo de nitrógeno al cultivo provoca una disminución del color verde de las hojas (clorosis), lo que afecta en la disminución de los valores SPAD, tal como sucedió en las plantas de chile de agua de esta investigación, donde los valores SPAD más bajos se obtuvieron con hojas que presentaban síntomas de clorosis y los más altos en hojas maduras de color verdes.

Rodríguez *et al.* (1998) coinciden con lo reportado por Wolfe *et al.* (1988) pues reportan la existencia de una correlación altamente significativa ( $\alpha = 0.01$ ) en el cultivo de tomate,

entre la concentración de clorofila y las unidades SPAD; lo mismo que Reeves *et al.* (1993) quienes además de haber encontrado existencia de una alta correlación entre las unidades SPAD y la cantidad de clorofila, la encontraron entre unidades SPAD y nitrógeno en cultivos como leguminosas, frutales y hortalizas. Turner y Jund (1991) demostraron que las unidades SPAD son un valor proporcional al contenido de nitrógeno en la planta de arroz, lo que les permitió establecer de forma inmediata el estado nutrimental del cultivo; de la misma forma Sainz y Echeverría (1998) encontraron que existe una estrecha asociación entre el contenido de nitrógeno y clorofila en hojas de maíz. En consecuencia, el estado nutricional de un cultivo puede ser evaluado a través de la medición del contenido de clorofila de la hoja con ayuda del equipo Minolta SPAD-501.

De acuerdo con lo anterior, los valores de lecturas SPAD bajos y la clorosis observada en las hojas del chile de agua se pueden deber a un proceso de destrucción de clorofilas de las hojas maduras para sintetizar aminoácidos y amidas necesarias para solventar la deficiencia del elemento en las hojas jóvenes y de reciente formación (Wilcox, 1994; Grundon *et al.*, 1997; Bonilla, 2003; Sánchez *et al.*, 2007).

La correlación entre los valores SPAD de las hojas del tercio medio de chile de agua y el contenido de nitrógeno foliar obtenido en laboratorio fue alta, de dicha relación se obtuvo el modelo:  $N_f = 3.98272 - 2.00006 * e^{(-8.00E-13 * X^{-7.18314})}$ ; con un  $R^2$  de 0.85 (Figura 20); con lo cual se puede decir que el SPAD puede ser utilizado para el monitoreo de nitrógeno foliar de chile de agua, tal como lo hicieron Varvel *et al.* (2007), Sainz y Echeverría, (1998); Zebarth *et al.* (2002) quienes cada uno por su parte utilizaron las lecturas SPAD para diagnosticar deficiencias de nitrógeno en el cultivo de maíz, con modelos que tienen coeficientes de determinación desde 0.46 hasta 0.87. Por su parte Rodríguez *et al.* (1998) hicieron lo mismo para el cultivo de tomate, al obtener un modelo con un  $R^2 = 0.92$ .

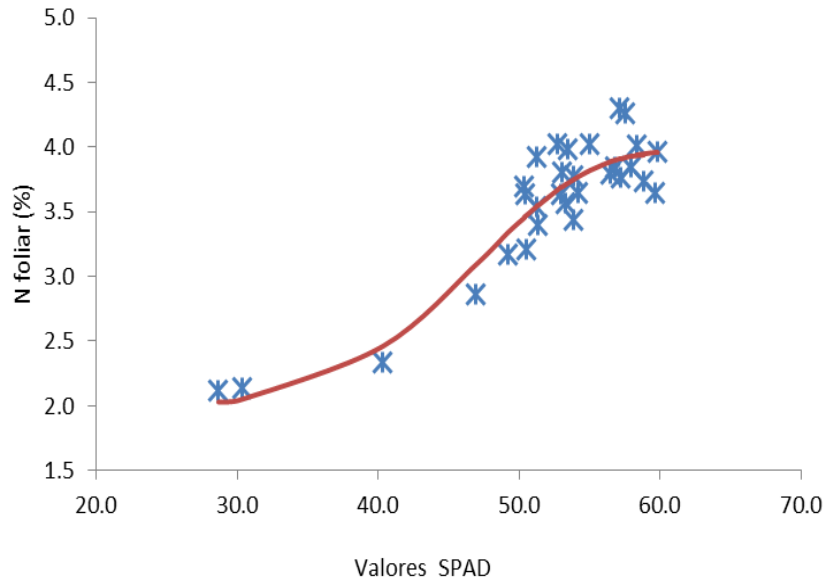


Figura 24. Relación entre nitrógeno foliar del tercio medio de plantas de chile de agua con valores SPAD de las mismas, 73 ddt. Modelo Weibull (—)  $Nf = 3.98272 - 2.00006 * e^{(-8.00E-13 * X^{-7.18314})}$ ; Nf= concentración de nitrógeno foliar en %, X= valor de lectura SPAD del cultivo (%) (n= 120, R2=0.85).

## 5 Conclusiones

Los modelos matemáticos que relacionan el contenido de nitrógeno foliar del cultivo con la reflectancia foliar del cultivo de chile de agua registrada con un radiómetro, escáner, cámara digital y SPAD, correlacionan positiva y significativamente. De los modelos generados los obtenidos a partir del Croma y b del espacio de color Cie-Lab de imágenes de hojas digitalizadas en un escáner de escritorio, son los que presentan mayor grado de asociación entre variables con  $R^2$  de 0.93 y 0.91, respectivamente; seguidos de los modelos ajustados a partir del Croma de imágenes de hojas digitalizadas con una cámara digital, y de las lecturas SPAD con  $R^2$  de 0.85 en ambos casos, y por último el modelo obtenido con base en el canal verde (G) del modelo de color RGB (longitud de onda de 560 nm) con un  $R^2$  de 0.74.

Las dosis crecientes de N, aplicadas a las plantas de chile de agua vía solución nutritiva, causaron un incremento proporcional y positivo en la concentración de este nutriente en las hojas; las plantas irrigadas con 0 y 16 meq L<sup>-1</sup> N presentaron la menor y mayor concentración de N foliar respectivamente.

Se encontró una correlación negativa y altamente significativa entre la reflectancia obtenida con radiómetro, cámara digital y escáner con la concentración de nitrógeno foliar del cultivo, no así en las lecturas SPAD las cuales presentaron correlación fue positiva.

Las variables morfológicas como altura de planta, número frutos, número de hojas y área foliar se vieron afectadas por la concentración de nutrimentos en la solución nutritiva; en todos los casos las plantas regadas con 0 meq L<sup>-1</sup> N presentaron valores bajos durante todo el ciclo de cultivo con respecto a las obtenido en plantas regadas con 4, 8, 12 y 16 meq L<sup>-1</sup> N. Se encontró correlación positiva entre la concentración de nitrógeno aplicada vía solución nutritiva a las plantas de chile de agua con la altura de la misma. La concentración de nitrógeno también afectó el número de frutos de calidad segunda y tercera los cuales variaron de forma poco considerable, mientras que los frutos de calidad primera no se vieron afectados por las diferentes dosis de nitrógeno aplicadas.

En cuanto a la producción total de chiles, se concluye que aunque estadísticamente no se obtuvo el mayor rendimiento en fruto de tercera calidad con plantas regadas con  $4 \text{ meq L}^{-1} \text{ N}$ , si se obtuvo para frutos de primera y segunda calidad por lo que con una concentración de  $4 \text{ meq L}^{-1} \text{ N}$  en la solución nutritiva se pueden obtener rendimientos aceptables y de buena calidad,

Por ultimo una mayor producción de hojas por parte de la planta así como un mayor área foliar no afectan el rendimiento de chiles de primera y segunda calidad.

## 6 LITERATURA CITADA

Alcántar G. G., L. Trejo-T., I., L. Fernández P., y M. Rodríguez M. 2007. Elementos esenciales. Pp: 7-48. In: Nutrición de Cultivos. Editorial Mundi-Prensa. México.

Adams M., L., A. Norvell W., D. Philpot W., H. Peverly J. 2000. Spectral Detection of Micronutrient Deficiency in Bragg Soybean. *Agronomy Journal* 92: 261-274.

Aguilar R., M., del R., 2011. Identificación de la deficiencia de magnesio en pepino mediante espectroradiometría. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados 70p.

ASD (Analytical Spectral Devices). 1999. Inc. Technical Guide. 3rd. ed. Boulder, Colorado. USA. pp: 5-12.

ASERCA. 1998. Chile verde. *Revista Claridades Agropecuarias*. 56: 1-16.

Baret, F., V. Vanderbilt C., M. Steven D. y S. Jacquemoud. 1994. Use of spectral analogy to evaluate canopy reflectance sensitivity to leaf optical properties. *Remote Sensing of Environment* 48: 253-260.

Barraza A., F., V. 2000. Crecimiento del chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) en cuatro soluciones nutritivas bajo invernadero. Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. Instituto de Horticultura. Texcoco, Estado de México. 142 p.

Blackmer T., M., S. Schepers J., y E. Varvel G. 1994. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurement in corn leaves. *Agronomy Journal* 86: 934-938.

Blackmer T., M., S. Schepers J., E. Varvel G., y A. Walter-Shea E. 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agronomy Journal* 88: 1-5.

Bock C., H., H. Poole G., E. Parker P., y R. Gottwald T. 2010. Plant Disease Severity Estimated Visually, by Digital Photography and Image Analysis, and by Hyperspectral Imaging. *Crit. Rev. Plant Sci* 29: 59-107.

Bonilla I. 2003. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. In: Azcón B., J., y M. Talón (Ed). *Fundamentos de fisiología vegetal*. España. pp. 83-98.

Brizuela B., A., P., G. Alcántar G., P. Sánchez G., Y. Pea k., J. Crumbaugh., C. Olive., L. Tijerina C. y R. Maldonado T. 2007. Establecimiento de índices espectrales en el diagnóstico nutrimental de nitrógeno en maíz. *Agrociencia* 41(8): 827-835.

Cabello P., A., y V. Macías C. 2011. Propiedades ópticas de las hojas de vid: reflectancia, Transmitancia, absorptancia y concentración de clorofila. *Agrociencia* 45(8): 943-957.

CAEVOAX. 1985. Problemática de los Valles Centrales de Oaxaca y Enfoque de Investigación Agrícola. CAEVOAX. CIAPAS. INIA. 33 p.

Carter G., A., y A. Spiering B. 2002. Optical properties of intact leave for estimating chlorophyll concentration. *Journal of Environmental Quality* 31: 1424-1432.

Carrillo P., E., J. A. Mejía C., A. Carballo C., G. García de los S., V. H. Aguilar R., T. Corona T. 2009. Calidad de semilla en colectas de chile de agua (*Capsicum annum* L.) de los Valles Centrales de Oaxaca, México. *Agricultura Técnica en México* 35(3): 257-266.

Castro B. R. 1998. Índices nutrimentales en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 87 p.

Cho M., A., y K. Skidmore A. 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. y D. Godfrey L. 2001. Midseason pest status of the cotton aphid (Homoptera: Aphididae) in California cotton: is nitrogen a key factor?. *Environmental Entomology* 30: 501-510.

Costa C., M. Dwyer L., P. Dutilleul., W. Stewart D., L. Ma B., y D. Smith J. 2001. Interrelationships of applied nitrogen, spad, and yield of leafy and nonleafy maize genotypes. *Journal Plant and Nutrition* 24: 1173-1194.

Curran P., J. 1989. Remote sensing of foliar Chemistry. *Remote Sense of Environment* 30: 271-278.

Curran P., J., J. Dungan J., y L. Peterson D. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves reflectance spectrometry testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sense of Environment* 76: 349-359.

Daughtry C., S., C. Walthall T., M. S., Kim L., E. Brown de C., y E. McMurtrey III J. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote. Sens. Environ* 74: 229-239.



De la Cruz D., J., A. 2013. Reflectancia en hojas de pimiento y fresa para el diagnóstico nutrimental. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Motecillo, Texcoco, Estado de México. 76p.

Duane M., N., M., K. Price P., y D. Rundquist. 2009. Remote Sensing of Cropland Agriculture. Papers in Natural Resources. 217.

Epstein E. y J. Bloom A. 2005. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. Second edition. Sinauer Associates. USA.

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.

España B., Ma., L., P. López L., V. del C., Castellanos M., R. Cárdenas N. 2006. Estimación del estado nitrogenado de plantas de fresa a partir de su respuesta espectral. Revista Fitotecnia Mexicana 29(4): 349-356.

Feng W., X. Yao., Y. Zhu., Y. C., Tian., X. Cao W. 2008. Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat. European Journal of Agronomy 28: 394-404.

Gárate A., y Bonilla I. 2001. Nutrición mineral y producción vegetal. In: 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.

García O., F. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. INPOFOS- Cono Sur. 19 p.

Gasga P., R. 2011. Reflectancia en hojas de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) para estimar contenido de nitrógeno. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 32 p.

Gates D., M., J. Keegan H., C. Schleter J., y R. Weidner V. 1965. Spectral properties of plants. Applied Optics 4(1): 11-20.

Gates D., M. 1980. Biophysical ecology. Springer-Verlag, New York, Estados Unidos. 611 p.

Gaviola S., y V. Lipinski M. 2002. Diagnóstico rápido de nitrato en ajo cv. Fuego inta con Riego por goteo. Ciencia del suelo 20(1): 43-49.

Gitelson A., A., A. Viña., V. Ciganda., C. Rundquist D., y J. Arkebauer T. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters* 32.

Guyot G. 1997. *Climatologie de l'Environnement. De la Plante aux Écosistemés*. Ed Masson, Paris, Francia.

Grundon N., J., D. Robson A., J. Lambert M., y K. Snowball. 1997. Nutrient deficiency and toxicity symptoms. In Reuter D., J., and B. Robinson J. Ed. *Plant analysis: An interpretation manual*. Second edition. CSIRO Publishing. Australia. pp: 36-48.

Horler D., N., M. Dockray H., J. Barber, y A. Barringer R. 1983. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content. *Advances in Space Research* 3: 273-277.

Huber S., M. Kneubuhler., A. Psomas., K. Itten., E. Zimmermann N. 2008. Estimating foliar biochemistry from hyperspectral data in mixed forest canopy. *Forest Ecology and Management* 256: 491-501.

Jago R., A., M. E., Cutier J., y P. Curran J. 1999. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. *Remote Sense Environmental* 68: 217-224.

Jia L., X. Chen., F. Zhang., A. Buerkert., y V. Römheld. 2004. Use of Digital Camera to Assess Nitrogen Status of Winter Wheat in the Northern China Plain. *Journal of plant nutrition* 27(3): 441-450.

Jiménez M., V., M. 2009. *Propiedades ópticas de trigo y deficiencias de nitrógeno*. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, Estado de México. 79 p.

Jones J., B., B. Wolf Jr., y A. Mills H. 1991. *Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. Micro-Macro-Publishing, Athens, GA, USA.

Jorgensen N., R., y K. Christensen L. 2004. Nutrient stress discrimination of N, P, and K deficiencies in barley utilising multi-band reflection at sub-leaf scale. International Commission of Agricultural Engineering (CIGR) International Conference, Beijing, China, Oct. 11-14, 2004.

Lang N., S., L. Wample R., R. Smithyman., y L. Mills. 1998. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence in blackleafaffected concord leaves. *Am. J. Enol. Vitic* 49: 367-374.

Leon A., K., B. Domingo M., C. Franco P., y A. J., Leon C. 2006. Color measurement in L\*a\*b\* units from RGB digital images. Food Research international 39: 1084–1091.

Lindow S., E., y R. Webb R. 1983. Quantification of foliar plant disease symptoms by microcomputer-digitized video image analysis. Phytopathology 73: 520-524.

López L., P. 2007. El chile de agua un chile típico de los Valles Centrales de Oaxaca. Agroproduce 18: 8-12.

López L., P., y H. Castro G. 2007. La diversidad genética del chile (*Capsicum spp*) en Oaxaca, México. Agroproduce 18: 3-6.

López L., P., y H. Castro G. 2009. Los chiles *Capsicum spp* domesticados de Oaxaca, México. In Sexta convención mundial del chile, Mérida Yucatan, México octubre 2009. pp: 56:62.

López M., H., y J. C., Carrillo R. 2012. Effects of gamma-irradiated seeds on germination and growth in *Capsicum annum* L. Plants grown in a greenhouse. Acta Horticulturae 947: 77-82.

Ma B., L., J. Morrison M., M. Dwyer L. 1996. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. Agronomy Journal 88: 915-920.

Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. San Diego, CA. USA.

Martin D., P., y P. Rybicki E. 1998. Microcomputer-based quantification of maize streak virus symptoms in *Zea mays*. Phytopathology 88: 422–427.

Martínez A., N. 2006. Análisis de crecimiento y dinámica nutrimental del chile poblano (*Capsicum annum* L. var. Grossum sendt), en cuatro soluciones nutritivas bajo invernadero. Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. Instituto de horticultura.. Texcoco, Estado de México. 90 p.

Martínez S., D., M. Pérez G., J. E. Rodríguez P., E. del C. Moreno P. 2010. Colecta y caracterización morfológica de ‘chile de agua’ (*Capsicum annum* L.) En Oaxaca, México. Revista Chapingo Serie Horticultura 16(3): 169-176.

Mirik M., J. Michels Jr., G., S. Kassymzhanova M., C. Elliott N. 2007. Reflectance characteristics of Russian wheat aphid (Hemiptera: Aphididae) stress and abundance in winter wheat. Computers and Electronics in Agriculture 57: 123-134.

Navarro C., R., M., M. A., Arribas G., V. Gallegos P., y E. Alcántara V. 2003. Invest. Agrar.: Sist. Recur. For. 12(1): 61-73.

Niemira B., A., W. Kirk W., y M. Stein J. 1999. Screening for late blight susceptibility in potato tubers by digital analysis of cut tuber surfaces. Plant Dis. 83: 469–473.

Noh H., Q. Zhang., B. Shin., S. Han., y L. Feng. 2006. A neural network model of maize crop nitrogen stress assessment for a multi-spectral imaging sensor. Biosystems Engineering 94: 477-485.

Olmstead J., W., A. Lang G., y G. Grove G. 2000. Assessment of severity of powdery mildew infection of sweet cherry leaves by digital image analysis. HortScience 36:107-111.

Ortega A., L., D., A. D., Miranda A. y M. Sandoval V. 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.

Ortega P., R., M. A., Martínez A., y J. Sánchez J., de J. 2000. Recursos Fitogenéticos Autóctonos. In: Recursos Fitogenéticos de México para la Agricultura, Informe Nacional. SNICS y SOMEFIA. C. Chapingo, México.

Osbourne S., L., S., J. Schepers S., D. Francis., y M. Schelemmer R. 2002. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. Agronomy Journal 94(6): 1215–1221.

Palacios V., E., y J. E., Palacios S. 2003. Introducción a los sensores remotos y a los sistemas de información geográfica (Agricultura Asistida por Sensores Remotos). Colegio de Postgraduados. Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Palma L., D., J., S. Salgado G., J. J. Obrador O., A. Trujillo N., L. del C., Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruiz B., y M. A., Carrera M. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). Terra 20: 347-358.

Pérez G. M. y R. Castro B. 2010. El chile manzano. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 128 p.

Peñuelas J., y I. Filella. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. Trends Plant Sci 3: 151-156.

Poni S., C. Intrieri., y O. Silvestroni. 1994. Interactions of leaf age, fruiting and exogenous cytokinins in Sangiovese grapevines under non-irrigated conditions. II. Chlorophyll and nitrogen content. *Am. J. Enol. Vitic* 45: 278-284.

Rangel L., J., A., G. Alcántar G., J. Z. Castellanos R., E. García M., C. Trejo L., y H. Vaquera H. 2002. Comparación de dos pruebas para diagnosticar nitrógeno en sorgo. *Terra* 20: 383-390.

Reeves W., D., P. Mask L., C. Wood W. y D. Delay P. 1993. Determination of wheat nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. Influence of management practices. *Journal Plant Nutrition* 16: 7781-7796

Ritchie L., G. 2003. Use of Ground- Based Canopy Reflectance to Determine Ground Cover, Nitrogen and water Status and Final Yield in Wheat. Utah State University Press. pp: 31-71.

Rodríguez M., Ma. de las N., G. Alcántar G., A. Aguilar S., J. D., Etchevers B., J. A., Santizó R. 1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra Latinoamericana* 16(2): 135-141.

Rodríguez H., R., P. López L., F. Cuevas A. 2005. Maíz con agave mezcalero, dos sistemas de cultivo alternativos para laderas degradadas en Oaxaca. México. [En línea]. Cuba. 2005. ISBN 959-250-156-4. Disponible en: [www.dama.gov.com](http://www.dama.gov.com)

Salisbury B., F., y C. Ross W. 1994. *Fisiología Vegetal*. Grupo Editorial Interamericana. México DF. 759 pp.

Sánchez G., P., C. Molinos S., G. Alcántar G., y M. Sandoval V. 2007. Diagnóstico nutrimental en plantas. *In: Alcántar G., G., y L. Trejo T., I., (Coordinadores). Nutrición de cultivos Mundi-Prensa*. México. Pp: 201-248.

Sainz R., H., y H. Echeverría E. 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(1): 37-44.

Sims D., A., y J. Gamon A. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sense Environmental* 81: 337-354.

Solari F., J. Shanahan, R. Ferguson, J. Schepers, y 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 S., G. Islas F. y V. Volke H. 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. 93 pp.

Steiner A., A. 1984. The universal nutrient solution. Proc. Sixth International Congress on Soilless Culture. ISOSC. Lunteren, Wageningen, The Netherlands. pp: 633-649.

Stone M., L., B. Solie J., R. Raun W., W. Whitney R., L. Taylor S., y D. Ringer J. 1996. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 39: 1623–1631.

Taiz L. y E. Zeiger. 2002. Plant physiology. The Benjamin/Cummings Publishing Company, CA, USA. 565 pp.

Terashima I., T. Fujita., T. Inoue., C. Soon W., y R. Oguchi. 2009. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. Plant Cell Physiology 50: 648–697.

Thomas J., R., y G. Oerther F. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. Agronomy Journal 64: 11-13.

Turner F.,T., y M. Jund F. 1991. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semiwardf rice. Agronomic Journal 83: 926-928.

Valentín M., Ma., C. 2011. Crecimiento y extracción de macronutrientes del chile de agua (*Capsicum annuum* L). Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. Instituto de Horticultura. Texcoco, Estado de México. 92 p.

Valle M., J., C. 2010. Acumulación de biomasa, crecimiento y extracción nutrimental (*Capsicum annuum* L.) Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Instituto de horticultura. Texcoco, Estado de México. 90 p.

Varvel G., E., W. Wilhelm W., J. Shanahan F., y J. Schepers S. 2007. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. Agronomy Journal 99: 701-706.

Vázquez L., A., B. Tlapal B., M. J. Yañez M., y M. Quintos E. 2004. Etiología de la marchitez del chile de agua (*Capsicum Annuum* l.) En tres localidades de los valles centrales de Oaxaca, México. *In: Primera Convención Mundial del Chile*. Guanajuato, México. 2004: 337-339.

- Vázquez L., A., B. Tlapal B., M. de J. Yáñez M., R. Pérez P., y M. Quintos E. 2009. Etiología de la marchitez del 'chile de agua' (*Capsicum annuum* L.) en Oaxaca, México. *Rev. Fitotec. Mex* 32 (2): 127-134.
- Velasco V., V., A., A. Trinidad S., J. L. Tirado T., D. Téliz O., A. Martínez G., y M. Cadena H. 1998. Efectos de algunos nutrimentos en plantas de chile de agua infectadas con virus. *Terra Latinoamericana* 16(4): 317-324.
- Villar Z., D., y R. Ortega B. 2011. Medidor de clorofila bases teóricas y su aplicación para la fertilización nitrogenada en cultivos. *Agronomía forestal* 18: 4-8.
- Walburg G., E. Bauer M., T. Daughtry C., S., y L. Housley T. 1982. Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield, and reflectance characteristics of corn canopies. *Agronomy Journal* 74: 677-683.
- Wilcox E., G. 1994. Tomato. pp. 127-141. *In: Nutrient deficiencies of toxicities in crop plants*. N.F. Bennett (ed.). APS Press. American Phytopathological Society. St. Paul Minnesota. USA.
- Yuzhu H., X. Wang., y S. Song. 2011. Nitrogen determination in pepper (*Capsicum frutescens* L.) plants by color image analysis (RGB). *African Journal of Biotechnology* 10(77): 17737-17741.
- Zebarth B., J., M. Younie J., W. Paul, y S. Bittman. 2002. Evaluation of leaf chlorophyll index formaking fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in a high fertility environment. *Commun. Soil Science Plant Analysis* 33: 665-684.
- Zhao D., K. Reddy R., V. Kakani G., y V. Reddy R. 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., H., J. Li L., y J. Qi G. 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.
- Wolfe D., W., W. Henderson D., C. Hsiao T., y A. Alvino. 1988. Interactive water and nitrogen effects on senescences of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves. *Agronomy Journal* 80: 865-870.

## 7 Anexos

Cuadro 1A. Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio medio de Chile de agua con diferentes variables fisiológicas.

	APL	HTP	NFT	NF1	NF2	NF3	SPAD	AFTM	HTM
M1PNM	-0.08316	0.01316	-0.06358	.	.	-0.06358	0.20758	0.10061	.
M2PNM	0.17094	0.5224	.	.	.	.	0.12042	0.10633	0.10388
M3PNM	0.30424	0.59009	0.18584	0.2206	-0.24027	0.26341	0.8513**	0.45971	0.17268
M4PNM	0.19445	0.30779	0.35113	0.23852	0.67674	-0.12499	0.89743**	0.03938	0.20645
M5PNM	0.36505	0.58198	0.6767	0.10402	0.57269	0.45225	0.84599**	-0.22266	-0.16098
M6PNM	0.52213	0.79715**	0.75841*	0.17275	0.57597	0.57253	0.94868**	0.22644	-0.08639

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\* Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

Continuación Cuadro 1A Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio medio de Chile de agua con diferentes variables fisiológicas.

	PFT	PF1	PF2	PF3	NBF
M1PNM	.	.	.	.	.
M2PNM	.	.	.	.	.
M3PNM	0.26905	0.18662	0.03509	0.33273	0.01137
M4PNM	0.43212	0.18789	0.6128	-0.35217	-0.47695
M5PNM	0.37932	0.07537	0.35386	0.28571	0.13074
M6PNM	0.71467	0.29171	0.55696	0.46995	0.71469

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\* Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )



Cuadro 2A. Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio medio de chile de agua con los canales de los espacios de color RGB y CIE-Lab de imágenes de hojas del cultivo escaneadas.

	R_EM	G_EM	B_EM	CIE_L_EM	CIE_a_EM	CIE_b_EM	Croma_EM	Hue_EM
M1PNM	-0.19108	-0.16842	-0.18586	-0.13683	-0.0917	0.30229	0.28142	-0.0001
M2PNM	-0.4372	-0.46826	-0.13244	-0.54675	0.44847	-0.73227*	-0.69406	0.23314
M3PNM	-0.68595	-0.76938**	-0.57156	-0.73986*	0.59788	-0.8634**	-0.81545**	-0.04029
M4PNM	-0.84845**	-0.86282**	-0.7849**	-0.85828**	0.76459**	-0.88742**	-0.8758**	0.09117
M5PNM	-0.7968**	-0.82813**	-0.72697*	-0.83387**	0.87649**	-0.88146**	-0.89364**	-0.22223
M6PNM	-0.86911**	-0.90897**	-0.77809**	-0.90493**	0.96848**	-0.96549**	-0.97878**	-0.03873

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\*Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

Cuadro 3A. Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio medio de chile de agua con diferentes longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo.

	Longitud de onda (nm)										
	460	485	510	560	610	660	710	760	810	830	1650
M1PNM	0.32541	0.38244	0.36869	0.27494	0.44796	0.40302	0.21985	0.12011	0.1084	0.11107	0.26912
M2PNM	0.09446	0.05055	0.00073	-0.22872	-0.04055	0.03439	-0.24174	-0.06159	-0.00305	-0.01874	-0.01708
M3PNM	-0.21135	-0.2181	-0.2123	-0.32441	-0.25392	-0.17133	-0.21724	0.41838	0.44649	0.41067	0.21471
M4PNM	-0.11488	-0.16668	-0.24305	-0.59301	-0.32157	-0.05076	-0.62178	0.06572	0.12097	0.09321	-0.04554
M5PNM	-0.02039	-0.32528	-0.57899	-0.94092**	-0.80698**	-0.28308	-0.93901**	-0.14011	-0.1341	-0.10068	0.14325
M6PNM	0.00054	-0.3987	-0.63974	-0.83399**	-0.76267*	-0.24605	-0.78716**	0.41976	0.44766	0.43902	0.28321

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\*Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

Cuadro 4A. Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio superior de chile de agua con diferentes variables fisiológicas.

	APL	HTP	NFT	NF1	NF2	NF3	SPAD	AFTS	HTS
M1PNA	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M2PNA	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M3PNA	0.2703	0.53092	0.1109	0.20871	-0.27704	0.20063	0.87778**	0.7167*	0.5401
M4PNA	0.29368	0.42729	0.24957	0.14757	0.65113	-0.17823	0.92045**	0.63142	0.42544
M5PNA	0.43967	0.61274	0.68679	0.01202	0.50763	0.49797	0.84844**	0.68432	0.70442*
M6PNA	0.53207	0.79771**	0.79007**	0.18043	0.65892	0.55929	0.92506**	0.68316	0.79638**

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\*Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

Continuación Cuadro 4A. Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio superior de chile de agua con diferentes variables fisiológicas.

	PFT	PF1	PF2	PF3	NBF
M1PNA	.	.	.	.	.
M2PNA	.	.	.	.	.
M3PNA	0.23239	0.1524	0.02302	0.31349	-0.07644
M4PNA	0.32445	0.10351	0.57179	-0.38535	-0.38784
M5PNA	0.30427	-0.01433	0.29305	0.33156	0.18059
M6PNA	0.73842*	0.33273	0.60861	0.36671	0.70614

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\*Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

Cuadro 5A. Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio superior de chile de agua con los canales de los espacios de color RGB y CIE-Lab de fotografías.

	R_F	G_F	B_F	CIE_L_F	CIE_a_F	CIE_b_F	Croma_F	Hue_F
M1PNA	.	.	.	.	.	.	.	.
M2PNA	.	.	.	.	.	.	.	.
M3PNA	-0.52957	-0.70496*	-0.18739	-0.7069*	0.82984**	-0.82733**	-0.84518**	0.732*
M4PNA	-0.72432*	-0.87884**	0.07163	-0.87391**	0.93118**	-0.90621**	-0.93162**	0.84561**
M5PNA	-0.78584**	-0.87144**	0.04401	-0.84006**	0.93554**	-0.93244**	-0.94942**	0.83646**
M6PNA	-0.73362*	-0.77364*	-0.04198	-0.76275*	0.89918**	-0.93354**	-0.92678**	0.86064**

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\*Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

Cuadro 6A. Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio superior de chile de agua con los canales de los espacios de color RGB y CIE-Lab de imágenes de hojas del cultivo escaneadas.

	R_ES	G_ES	B_ES	CIE_L_ES	CIE_a_ES	CIE_b_ES	Croma_ES	Hue_ES
M1PNA	.	.	.	.	.	.	.	.
M2PNA	.	.	.	.	.	.	.	.
M3PNA	-0.73871*	-0.81775**	-0.541	-0.79963**	0.74119*	-0.87095**	-0.86195**	-0.16642
M4PNA	-0.91963**	-0.94433**	-0.86198**	-0.93127**	0.88561**	-0.94413**	-0.9481**	-0.36192
M5PNA	-0.8269**	-0.86723**	-0.70975*	-0.85389**	0.95264**	-0.94407**	-0.95715**	-0.46701
M6PNA	-0.91036**	-0.9282**	-0.79999**	-0.924**	0.95277**	-0.95169**	-0.95814**	0.04022

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\*Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )

Cuadro 7A. Correlación entre porcentaje de nitrógeno foliar del tercio superior de chile de agua con diferentes longitudes de onda en el espectro visible e infrarrojo.

	Longitud de onda (nm)											
	460	485	510	560	610	660	710	760	810	830	1650	
M1PNA	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M2PNA	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M3PNA	-0.30063	-0.34182	-0.38189	-0.59404	-0.49067	-0.32262	-0.5485	0.5509	0.60721	0.55919	0.58427	
M4PNA	-0.1953	-0.25146	-0.32035	-0.66652	-0.49636	-0.26776	-0.71812*	0.03821	0.10139	0.10165	0.37051	
M5PNA	0.10465	-0.21842	-0.46237	-0.82034**	-0.68649	-0.16639	-0.81202**	0.19049	0.21514	0.2463	0.24135	
M6PNA	-0.59876	-0.64736	-0.62277	-0.68636	-0.60497	-0.52453	-0.68064	0.0925	0.09954	0.09969	0.17042	

\* Significativo ( $\alpha = 0.05$ )

\*\*Altamente significativo ( $\alpha = 0.01$ )