



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS**

**AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**ESPECTRORADIOMETRÍA PARA  
DETECTAR DEFICIENCIA DE  
NITRÓGENO EN FRIJOL**

ESMERALDA CISNEROS VILLEGAS

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Esmeralda Cisneros Villegas, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Abel Quevedo Nolasco, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

Espectroradiometría para detectar deficiencia de nitrógeno en frijol  
y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y  
secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 28 de noviembre de 2017



Firma del  
Alumno (a)



Dr. Abel Quevedo Nolasco

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **ESPECTRORADIOMETRÍA PARA DETECTAR DEFICIENCIA DE NITRÓGENO EN FRIJOL** realizada por la alumna **Esmeralda Cisneros Villegas** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJERO (A)

  
\_\_\_\_\_

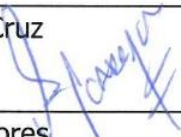
Dr. Abel Quevedo Nolasco

ASESOR (A)

  
\_\_\_\_\_

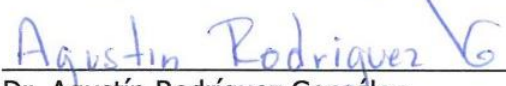
M.C. Enrique Rodríguez Cruz

ASESOR (A)

  
\_\_\_\_\_

M.C. Guillermo Carrillo Flores

ASESOR (A)

  
\_\_\_\_\_

Dr. Agustín Rodríguez González

MONTECILLO, TEXCOCO, DICIEMBRE 2017

# ESPECTRORADIOMETRÍA PARA DETECTAR DEFICIENCIA DE NITRÓGENO EN FRIJOL

Esmeralda Cisneros Villegas, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2017

## RESUMEN

La presente investigación se llevó a cabo en el Colegio de Postgraduados, en el periodo comprendido entre julio y octubre del 2017. El propósito fue evaluar y analizar el comportamiento de la reflectancia en el cultivo de frijol a través de la respuesta espectral de éste, en función de la etapa fenológica y sometido el cultivo a diferentes niveles de nitrógeno. Los sensores remotos ofrecen una alternativa viable para la detección de deficiencias nutrimentales, asumiendo que la reflectancia es un indicador del estado de sanidad de los cultivos. El experimento fue establecido en hidroponía en solución, en un diseño completamente al azar, con tres tratamientos (06, 12 y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a la misma presión osmótica (0.72 atm) y diez repeticiones. Se utilizó frijol var. Flor de mayo que es de semiguía. La recolección de datos de reflectancia se realizó con un radiómetro marca CROPSCAN, mediante el software creado exprofeso, tanto para celular como para computadora. Esta información se analizó a través del índice NDVI (Índice Vegetal de Diferencia Normalizada) correlacionando con altura de la planta, diámetro basal del tallo, número de hojas, número de vainas y área foliar. La radiometría (en particular la reflectancia) provee valiosa información con medidas instantáneas sobre el estado fisiológico de un cultivo. Se observó que este índice puede ser un estimador del rendimiento biológico y agronómico del frijol. Pueden manejarse dosis más pequeñas de las fuentes nutrimentales sin detrimento en la mayoría de las variables respuestas evaluadas.

**Palabras clave:** reflectancia, índice NDVI, soluciones nutritivas

# SPECTRO RADIOMETRY FOR NITROGEN DEFICIENCY DETECTION IN BEAN CROP

Esmeralda Cisneros Villegas, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2017

## ABSTRACT

The present research was carried out at Colegio de Postgraduados, in the period between July and October 2017. The purpose was to evaluate and analyze the behavior of reflectance in bean crops through its spectral response, in function of the phenological stage and given different levels of nitrogen. Remote sensing instruments offer a viable alternative for nutrimental deficiency detection, assuming that reflectance is a health indicator in crops. The experiment was established in hydroponics in solution, in a randomized design, with three different treatments (06, 12 y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) at the same osmotic pressure (0.72 atm) and ten repetitions. Flor de mayo bean variety was used which is a creeping plant. The data collection of reflectance was carried out with a CROPSCAN radiometer, trough software designed for this specific project, both for cellphone devices and PC. This data was analyzed using the NDVI index (Normalized Difference Vegetation Index) correlating with plants height, basal stem diameter, number of leaves, number of pods and leaf area. Radiometry (reflectance in particular) provides valuable information with real time measurements about the physiological state of any given crop. It was observed that NDVI index can be an estimator of biological and agronomic yield of bean. Smaller doses of nutrimental resources can be used without a decrease in most of the response variables evaluated.

**Keywords:** reflectance, NDVI index, nutrimental solutions.

## **DEDICATORIA**

A **Dios** por darme la vida y cuidarme a cada paso que doy.

A mi **madre** y mi **padre** pues lo han dado todo por mí y por mi educación, y me han enseñado a luchar por mis sueños, buscando siempre la nobleza y la justicia.

A **Javier, Rubicel y Obed** por tener el privilegio de ser su hermana.

A **Esteban Villegas** y **Verónica Lora** por encaminarme hacia el logro de mis objetivos mediante el estudio y apoyarme en el proceso.

Al **Ing. Guzmán Luna Roberto** porque de tu mano y a tu lado he cumplido uno de mis mayores sueños.

A mi hijo **Aarón Roberto Guzmán Cisneros** por el tiempo robado a ti para la realización de mi investigación.

Al M.C. **Enrique Rodríguez Cruz**, por compartir momentos gratos y transmitirme valiosas enseñanzas.

A todos los **familiares** y **amigos** que de alguna manera formaron parte de este proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de maestría.

Al **Colegio de Postgraduados** por dar las facilidades mediante catedráticos, espacios y todos los medios que hicieron posible realizar mis estudios. Así como a la comunidad de académicos y administrativos del área de **Hidrociencias**.

A **mi Consejo Particular** a quienes reconozco su alto profesionalismo y extensa experiencia en el tema estudiado, pero sobre todo su alta capacidad humana.

Al Dr. **Abel Quevedo Nolasco**, por la dirección del trabajo de investigación

Al M.C. **Enrique Rodríguez Cruz** por transmitirme parte de sus vastos conocimientos en nutrición vegetal.

A la **C. Agustina Hernández Ibarra**, por brindarme su amistad e invaluable apoyo.

Al **Ing. Roberto Guzmán Luna** por su guía y apoyo en la realización del software radiométrico.

Al **Dr. Diego Martínez Otero** y al **Dr. Humberto Vaquera** por sus valiosas asesorías.

A mis compañeros de la **generación primavera 2015**; a mis amigos: **Roberto, Lilibeth y Juventino Guzmán, Ángeles Soriano, Isabel Villa, Elisa Lyons, Santiago Orta, Miguel Benhumea y Andrés Aguilar\*** (entre otros) por estar siempre a mi lado y compartir parte de esta corta vida.

# CONTENIDO

RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
<i>DEDICATORIA</i> .....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	vii
LISTA DE CUADROS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS .....	2
II.1. General .....	2
II.2. Particulares .....	2
III. HIPÓTESIS .....	2
IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
IV.1. SENSORES REMOTOS.....	3
IV.1.1. Conceptos y leyes de la radiación .....	3
IV.1.2. Interacciones planta-radiación .....	8
IV.1.3. Instrumentación.....	9
IV.1.4. Reflectancia de la hoja y estrés de la planta.....	10
IV.1.5. Etapa de crecimiento y arquitectura de la cubierta vegetal .....	11
IV.1.6. Ángulo del sensor .....	12
IV.1.7. Ángulo solar y hora del día .....	13
IV.1.8. Índices espectrales .....	14
IV.2. NITRÓGENO (N) .....	16
IV.2.1. Nutrición nítrica y amoniacal .....	18
IV.2.2. Estrés nutrimental .....	19
IV.3. SOLUCIÓN NUTRITIVA .....	20
IV.3.1. pH.....	21
IV.3.2. Conductividad eléctrica (CE).....	21
IV.3.3. Presión osmótica (PO) .....	22
IV.3.4. Incremento de nitrógeno en la solución nutritiva.....	22
IV.4. FRIJOL.....	23
IV.4.1. Morfología .....	23
IV.4.2. Fenología .....	25
IV.4.3. Producción mundial y nacional .....	27
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	29
V.1. MATERIALES .....	29
V.2. METODOLOGÍA .....	30



V.2.1.	Sitio experimental.....	30
V.2.2.	Especie empleada y reproducción de plántula .....	30
V.2.3.	Sistema hidropónico.....	31
V.2.4.	Solución nutritiva.....	32
V.2.5.	Determinación de altura para la toma de lecturas con el radiómetro.....	33
V.2.6.	Creación de la aplicación radiométrica .....	34
V.2.7.	Diseño experimental y tratamientos.....	35
V.2.8.	Variables respuesta .....	36
V.2.9.	Análisis espectral .....	38
V.2.10.	Análisis estadístico.....	38
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
VI.1.	CALIBRACIÓN DEL RADIÓMETRO .....	39
VI.1.1.	Altura de medición .....	39
VI.1.2.	Aplicación radiométrica .....	43
VI.2.	DISEÑO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA .....	46
VI.3.	CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO .....	52
VI.4.	VARIABLES RESPUESTA .....	53
VI.4.1.	Reflectancia durante ciclo del cultivo de frijol para cada tratamiento (06, 12 y 14 mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ). .....	53
	Índice NDVI (Índice Vegetal de Diferencia Normalizada) .....	61
VI.4.2.	Número de hojas y área foliar en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo .....	65
VI.4.3.	Altura de la planta en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo .....	67
VI.4.4.	Diámetro de tallo en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo .....	68
VI.4.5.	Número de vainas en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo .....	70
VII.	CONCLUSIONES.....	71
VIII.	RECOMENDACIONES .....	71
IX.	LITERATURA CITADA .....	72

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Dosis de nitrógeno para frijol en el suelo para el estado de Sinaloa. ...	17
Cuadro 2. Fenología del frijol. ....	25
Cuadro 3. Materiales utilizados para la reproducción de plántula, sistema hidropónico y laboratorio. ....	29
Cuadro 4. Materiales utilizados para la solución nutritiva, software y equipo de cómputo.....	29
Cuadro 5. Fuentes de macronutrientes. ....	32
Cuadro 6. Solución Nutritiva Universal de Steiner con presión osmótica de 0.72 atm. ....	33
Cuadro 7. Cálculo para ajustar el nivel de $H_2PO_4^-$ y de $SO_4^{2-}$ en función del nivel de $NO_3^-$ . * .....	47
Cuadro 8. Cálculo para igualar las presiones osmóticas de dos soluciones nutritivas con relaciones mutuas de aniones diferentes, con nivel 12 y 06 de $NO_3^-$ . * .....	48
Cuadro 9. Cálculo para igualar las presiones osmóticas de dos soluciones nutritivas con relaciones mutuas de aniones diferentes con nivel 12 y 14 de $NO_3^-$ . * .....	49
Cuadro 10. Cálculo de las nuevas relaciones de aniones y cationes de las soluciones nutritivas, producto del ajuste de la presión osmótica en los tratamientos 2 y 3.....	50
Cuadro 11. Preparación de la Solución 01 (Testigo con nivel 12 de $NO_3^-$ ) en función de las fuentes nutrimentales del Cuadro 6. ....	51
Cuadro 12. Preparación de la Solución 02 con ajuste de la presión osmótica ( <i>Tratamiento con nivel 06 de <math>NO_3^-</math></i> ) en función de las fuentes nutrimentales del Cuadro 6. ....	51
Cuadro 13. Preparación de la Solución 03 con ajuste de la presión osmótica ( <i>Tratamiento con nivel 14 de <math>NO_3^-</math></i> ) en función de las fuentes nutrimentales del Cuadro 6. ....	52
Cuadro 14. Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda azul 485 nm. ....	56
Cuadro 15. Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda roja 560 nm.....	56
Cuadro 16. Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda roja 660 nm.....	56
Cuadro 17. Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda IRM 1650 nm. ....	57

Cuadro 18. Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda azul 485 nm. ....	57
Cuadro 19. Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda verde 560 nm. ....	58
Cuadro 20. Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda roja 660 nm. ....	58
Cuadro 21. Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda IRC 830 nm. ....	58
Cuadro 22. Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda IRM 1650 nm. ....	59
Cuadro 23. Comportamiento del índice NDVI en el cultivo de frijol, por tratamiento. . .....	61
Cuadro 24. Comportamiento del índice NDVI a través del ciclo de cultivo. ....	62
Cuadro 25. Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad para la variable número de hojas, por tratamiento. ....	65
Cuadro 26. Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad para la variable número de hojas, por días después de tratamiento (ddt). ....	65
Cuadro 27. Área foliar por tratamiento. ....	66
Cuadro 28. Prueba de comparación de medias para la variable altura del frijol por tratamiento ....	67
Cuadro 29. Prueba de comparación de medias para la variable altura de plantas de frijol por días después de tratamiento (ddt). ....	68
Cuadro 30. Prueba de comparación de medias para la variable diámetro de tallo por tratamiento (ddt). ....	69
Cuadro 31. Prueba de comparación de medias para la variable diámetro de tallo por días después de tratamiento (ddt). ....	69
Cuadro 32. Prueba de comparación de medias para la variable número de vainas. . .....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Espectro de radiación solar .....	4
Figura 2.	Energía reflejada, absorbida y transmitida sobre la hoja de un cultivo..	7
Figura 3.	Espectro de reflectancia, transmitancia y absorbancia (% de las plantas). .....	8
Figura 4.	Ubicación del punto Nadir y Zenit. ....	13
Figura 5.	Producción nacional 2006-2016 en miles de toneladas. ....	28
Figura 6.	Estado fenológico del cultivo de frijol a los 12 dds (a) y a los 18 dds, momento del trasplante (b).....	31
Figura 7.	Sistema hidropónico en solución y el sistema de oxigenación. ....	32
Figura 8.	a) Radiómetro, b) datalogger MEX-V1.0 f, c) cable convertidor a USB y d) baterías. ....	35
Figura 9.	Toma de lecturas de reflectancia con radiómetro CROPSCAN. ....	37
Figura 10.	Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color blanco (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular). ....	39
Figura 11.	Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color morado (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular). ....	40
Figura 12.	Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color rojo (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular).....	40
Figura 13.	Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color madera (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular). ....	41
Figura 14.	Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color naranja (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular). ....	41
Figura 15.	Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color negro (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular). ....	42
Figura 16.	Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color verde (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular). ....	42
Figura 17.	Vista de la aplicación para la toma de datos desde una PC.....	43
Figura 18.	Vista de la aplicación para la toma de datos desde celular. ....	44

Figura 19. Aplicación radiométrica en sistema Android mostrando datos de interés. .....	45
Figura 20. Concentración de oxígeno durante la fase experimental en el cultivo de frijol.....	53
Figura 21. Respuesta espectral del frijol bajo efectos de tratamiento con $6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ .....	54
Figura 22. Respuesta espectral del frijol bajo efectos de tratamiento con $12 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ .....	55
Figura 23. Respuesta espectral del frijol bajo efectos de tratamiento con $14 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ .....	55
Figura 24. Respuesta espectral en la banda roja e infrarroja del tratamiento con $6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ en el cultivo de frijol. ....	59
Figura 25. Respuesta espectral en la banda roja e infrarroja del tratamiento con $12 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ en el cultivo de frijol. ....	60
Figura 26. Respuesta espectral en la banda roja e infrarroja del tratamiento con $14 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ en el cultivo de frijol. ....	60
Figura 27. Cultivo de frijol a los 81 dds (amarillamiento del follaje). ....	63
Figura 28. NDVI en frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo. ....	64
Figura 29. Comportamiento del número de hojas en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo ....	66
Figura 30. Comportamiento de la altura de planta de frijol durante su ciclo fenológico.....	67
Figura 31. Diámetro de tallo en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo. ....	69
Figura 32. Número de vainas por tratamiento en el cultivo de frijol var. Flor de mayo. .....	70

## I. INTRODUCCIÓN

El estado nutricional de los cultivos es un factor que limita su producción y calidad, el cual requiere se evalúe de manera continua. La percepción remota ofrece una solución viable para abatir los costos que se asocian con la detección de estrés en plantas (biótico y abiótico) a diferentes escalas en la agricultura. Donde “La radiación solar interactúa con muchos de los compuestos químicos para el crecimiento y funcionamiento de las plantas, manifestándose en características de reflectancia identificables” (Curran, 1989). El estrés nutrimental es producto de la deficiencia de un nutrimento, ya sea porque no está presente en la cantidad necesaria, o porque su presencia está limitada por el exceso de otro y o por las condiciones ambientales (radiación inadecuada, falta de agua, etc.) lo que conlleva a no poder completar un ciclo metabólico esencial para la planta.

El uso de firmas espectrales mediante sensores remotos permite obtener información en tiempo real del estado fisiológico de la planta, que se asocia con la concentración de nitrógeno contenido en la clorofila, área foliar y biomasa. La valoración de estas variables será útil en una agricultura de mayor precisión, competitiva y con productos agrícolas en mercados futuros.

El frijol es uno de los alimentos básicos de la dieta de la población mexicana y una de las principales fuentes de proteína, y es entre las leguminosas el cuarto cultivo más importante en el mundo; México ocupa el segundo lugar por superficie cultivada y el sexto por valor de la producción (SIAP 2016). Es un cultivo de importancia socioeconómica, no solo por la extensión de tierra que ocupa para su producción, sino por el consumo per cápita y aporte de proteínas.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar y analizar el comportamiento de la reflectancia de frijol a través de la respuesta espectral de éste, en función de la etapa fenológica y sometido el cultivo a diferentes niveles de nitrógeno.

## II. OBJETIVOS

### II.1. General

Análisis y evaluación del estrés por deficiencia de nitrógeno mediante la reflectancia en el cultivo de frijol en función de la etapa fenológica.

### II.2. Particulares

- ✚ Analizar y obtener la respuesta espectral de frijol con diferentes niveles de nitrógeno (06, 12 y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a 0.72 atm de presión osmótica.
- ✚ Evaluar la respuesta del cultivo de frijol con diferentes niveles de nitrógeno a la misma presión osmótica de la solución nutritiva.

## III. HIPÓTESIS

La reflectancia emitida por el cultivo de frijol permite identificar el estado o condición nutrimental del mismo.

El índice NDVI (Índice Vegetal de Diferencia Normalizada) en el cultivo de frijol, permite cuantificar/evaluar el estado o condición nutrimental del mismo.

## IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### IV.1. Sensores remotos

#### IV.1.1. Conceptos y leyes de la radiación

##### **Energía radiante o electromagnética**

Se refiere a la forma de energía que se dispersa en forma de ondas-partículas conocidas como fotones, que viajan como paquetes discretos de energía llamados quanta o quantum (quanto en singular). La cantidad de energía de un cuanto depende de la longitud de onda con que viaja el fotón; entre más corta, mayor es la cantidad de energía que posee (Lawlor, 1993).

##### **Irradiancia**

Es el flujo de energía radiante recibido por unidad de superficie plana (ejemplo de unidad:  $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$ , o bien  $\text{Wm}^{-2}$ ). También se ha utilizado la caloría<sup>1</sup> (1 cal = 4.18400 J). La irradiancia también se puede expresar en términos de fotones, como  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Salisbury y Ross, 1999)

##### **Absorbancia**

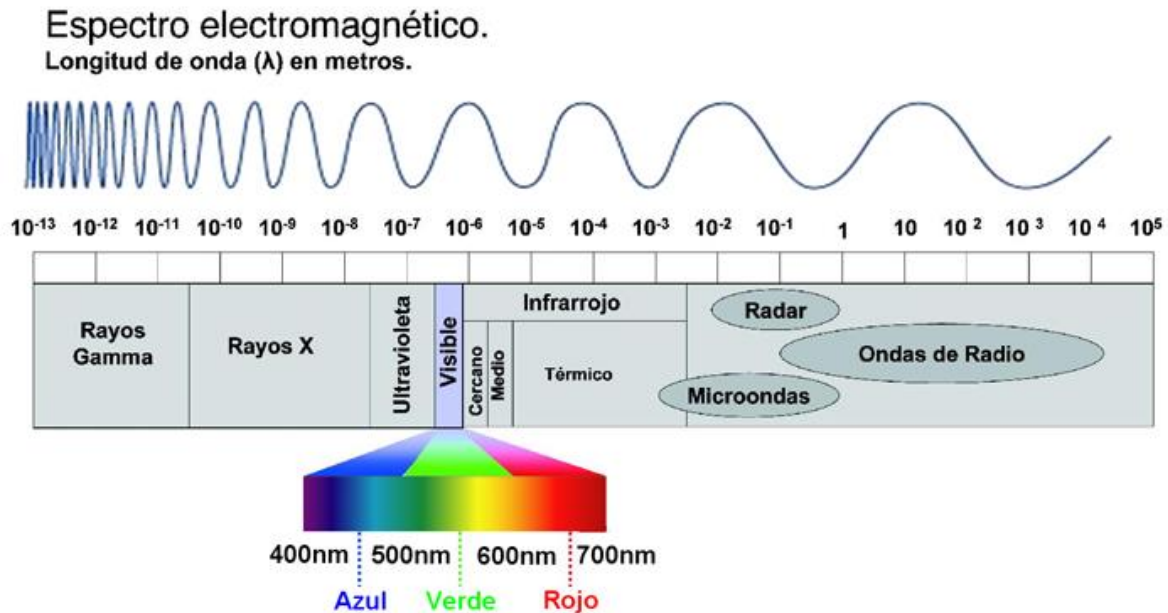
Se define como la fracción de la radiación incidente de una longitud de onda específica del espectro (Figura 1), que es absorbida por un material ( $\text{W m}^{-2}$ ). La absorción es el proceso por el cual la energía radiante incidente es transferida a la estructura de las moléculas de una sustancia. De forma similar la emisividad en una longitud de onda particular es la fracción de radiación máxima posible en una

---

<sup>1</sup> La caloría como la define el U.S. National Bureau of Standards, equivale exactamente a 4.18400 joules.



longitud de onda que puede ser emitida por un cuerpo con determinada temperatura (Jones, 1983).



**Figura 1. Espectro de radiación solar**

Fuente: González, 2010.

El flujo radiante o de la radiación ( $R$ ;  $W m^{-2}$ ) emitido por un cuerpo sigue la ley de Stephan-Botzman:

$$R = \sigma T \varepsilon \quad \text{Ec. 1.}$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stephan-Botzman ( $5.6 \times 10^{-8} W m^{-2} \text{ } ^\circ K^{-4}$ )  $T$  es la temperatura del cuerpo en  $^\circ K$  y el  $\varepsilon$  es el coeficiente de emisividad (Rosenberg *et al.*, 1983).

La longitud de onda de la radiación emitida o absorbida depende de la magnitud del cambio de energía, y de la transición entre los posibles estados de ésta (Jones, 1983).

La reflectividad ( $r$ ) es la porción de energía radiante reflejada del total que incide sobre la superficie.

Transmisividad o transmitancia (t) es la porción de la radiación transmitida del total incidente. La suma de  $\alpha + r + t$  en cualquier longitud de onda es uno (Rosenberg *et al.*, 1983). En forma práctica, t y r se miden, y  $\alpha$  y  $\varepsilon$  se calculan.

La ley del coseno de Lambert señala que cuando la irradiancia (I) que incide sobre una superficie y que forma un ángulo de A con la superficie, la I debe expresarse como:

$$I = I_0 \cos A \quad \text{Ec. 2.}$$

Donde  $I_0$  es la irradiancia sobre una superficie perpendicular a los rayos del sol (Jones, 1986).

La ley de Beer describe la reducción en la densidad de flujo de rayo de luz como una función de la profundidad dentro de un medio homogéneo absorbente:

$$I = I_0 \exp^{-kx} \quad \text{Ec. 3.}$$

Donde  $I_0$  es la irradiancia inicial de los rayos, I es la irradiancia después de pasar a través de una profundidad x de un medio con coeficiente de extinción k (Rosenberg *et al.*, 1983).

La ley de Raleigh indica que la eficiencia de la dispersión es proporcional a  $1/\lambda$ . Así, la luz azul con  $\lambda$  equivalente a 400 nm puede ser dispersada cerca de 10 veces más que la luz roja con  $\lambda$  igual a 700 nm (Rosenberg *et al.*, 1983).

### **Radiación fotosintéticamente activa (RFA)**

En el límite superior de la atmósfera, y a la distancia media de la tierra al sol, la irradiancia total es de  $1,360 \text{ W m}^{-2}$  (la constante solar) que incluye las longitudes de onda del ultravioleta e infrarrojo. Este valor varía aproximadamente  $\pm 2\%$  debido a la órbita un tanto elíptica de la tierra. Cuando esta radiación atraviesa la atmósfera

hacia la superficie terrestre, gran parte de la energía se pierde por absorción y dispersión causadas por vapor de agua, polvo, CO<sub>2</sub> y ozono, por lo que solo unos 900 W m<sup>-2</sup> alcanzan a las plantas, dependiendo de hora del día, época del año, altitud, condiciones atmosféricas y otros factores. De este valor, cerca de la mitad corresponde al infrarrojo, 5% es ultravioleta y el resto de la radiación tiene longitudes de onda entre 400 y 700 nm y es capaz de inducir fotosíntesis. Cuando se expresa en unidades de energía (Watts o Joules por segundo) esta irradiación se conoce como Radiación Fotosintéticamente Activa (Salisbury y Ross, 1999).

Se hace referencia a la naturaleza particulada de la luz cuando se declara que tiene la forma de cuantos o fotones: paquetes discretos de energía, cada uno asociado a una longitud de onda específica. La energía de cada fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda (Salisbury y Ross, 1999).

Cuando un quantum de luz golpea y es absorbido por una molécula de clorofila en una planta, la molécula se energiza y un electrón se eleva a un nivel de energía más alto, éste permanece en el nivel energético más alto, perdiendo como calor toda la energía absorbida al ser transferido a un compuesto aceptor de electrones apropiado. En el proceso, el compuesto que recibe el electrón se reduce y la energía que entra a la molécula de clorofila queda así atrapada y se convierte en potencial químico de un enlace reducido (Bidwell, 2002).

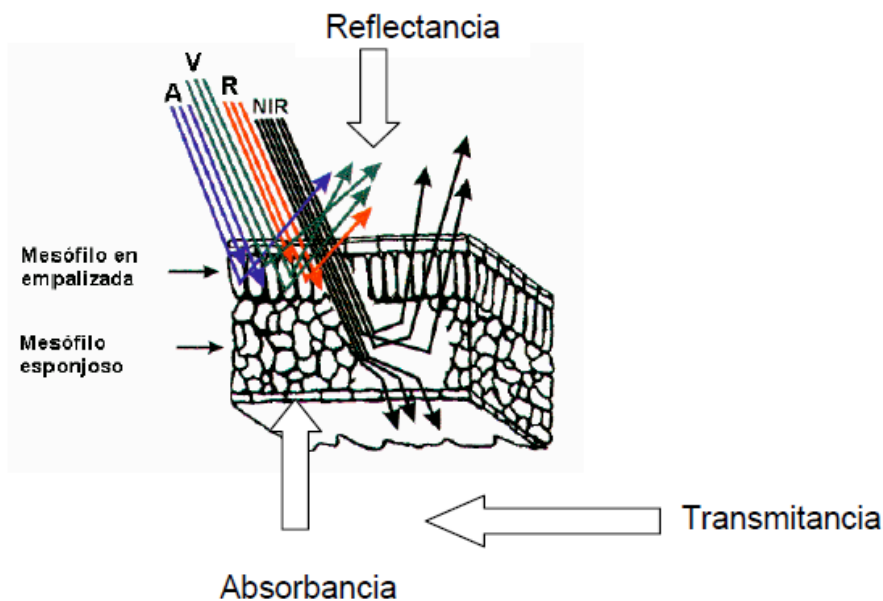
Las propiedades ópticas de las hojas en la región de la RFA dependen de factores como las condiciones de la radiación, especie vegetal, espesor y estructura de las hojas, clorofila, pigmentos y estructura interna (Figura 2) (Salisbury y Ross, 1999).

En la fotosíntesis cooperan dos grupos separados de pigmentos o fotosistemas, el Fotosistemas I (FSI) y Fotosistema II (FSII) los cuales son capaces de absorber quanta de luz. Cada uno contiene moléculas de clorofila especializadas, capacitadas para perder electrones y recuperarlos a partir de otra fuente diferente. Estos centros reactivos contienen moléculas especializadas de clorofila "a" que absorben a una longitud de onda más larga que la usual. El centro reactivo del Fotosistema II absorbe luz de 680 nm y el pigmento se denomina P<sub>680</sub>. El centro de

reacción correspondiente del fotosistema I es  $P_{700}$  nm y tiene una absorción máxima de aproximadamente 700 nm (Bidwell, 2002).

Un principio fundamental de la absorción de la luz se conoce como Ley de Stark Einstein, la cual establece que cualquier molécula sólo puede absorber un fotón a la vez, el cual causa la excitación de un electrón. Electrones de valencia específicos en orbitales que tienen un estado fundamental estable son los que resultan excitados; cada uno de estos electrones puede ser alejado, de su estado basal respecto al núcleo, a una distancia que corresponde a una energía exactamente igual a la energía del fotón que absorbió. Una molécula de pigmento en esta situación está en un estado excitado, y es esta energía de excitación la que se utiliza en la fotosíntesis (Salisbury y Ross, 1999).

Para la fotosíntesis se requiere que la energía de los electrones excitados de varios pigmentos se transfiera a un pigmento colector de energía, un centro de reacción (complejo de varias proteínas, pigmentos y otros co-factores coordinados para ejecutar las principales reacciones en la fotosíntesis) (Salisbury y Ross, 1999).

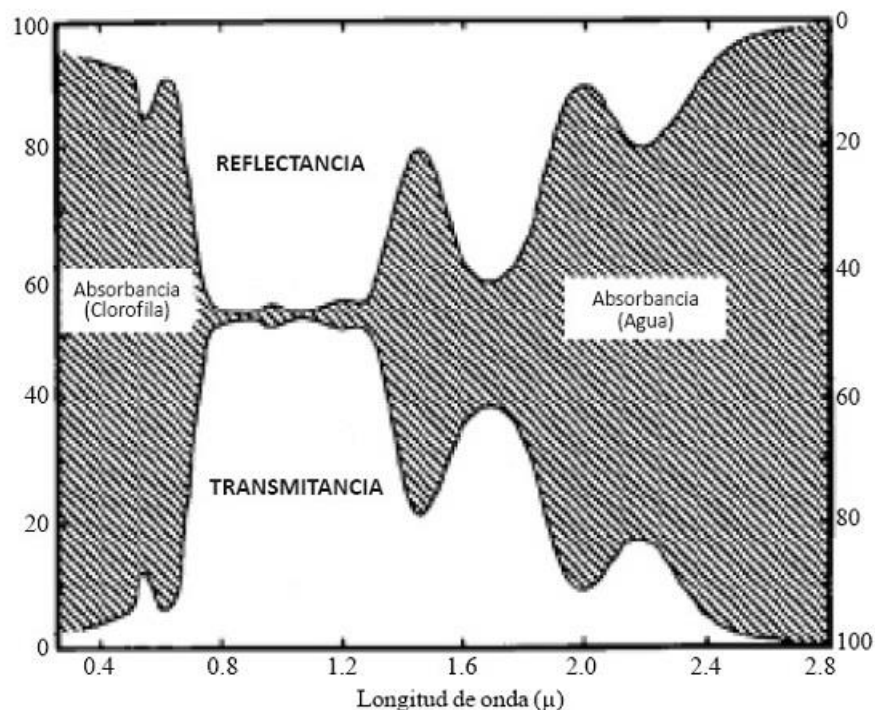


**Figura 2. Energía reflejada, absorbida y transmitida sobre la hoja de un cultivo.**

Fuente: Aguilar, 2011.

#### IV.1.2. Interacciones planta-radiación

La reflectancia y transmisión son definidas como las tasas de radiación reflejada o transmitida con la radiación incidente. Se presume que la radiación incidente que no es reflejada o transmitida por la hoja es absorbida. La reflectancia y la transmisión se presentan como un porcentaje o una fracción de radiación incidente. La absorción se caracteriza como una tasa de radiación incidente, o una función de densidad óptica (Porra *et al.*, 1989). La Figura 3 muestra la reflectancia, transmitancia y observancia en las plantas.



**Figura 3. Espectro de reflectancia, transmitancia y absorción (% de las plantas).**

Fuente: Aguilar, 2015.

### IV.1.3. Instrumentación

Los instrumentos que miden las cantidades de radiación de onda corta usan detectores hechos de materiales fotoexitables como el silicio o el Iridio Galio Arsénico (InGaAs). El silicio es un material fotoexitable común que produce una corriente eléctrica en respuesta a la radiación visible y casi infrarroja (NIR) (300-1,100 nm). Sin embargo, el silicio no responde a radiaciones por encima de 1,100 nm, así que se usan materiales más caros (mezcla de varios elementos) como detectores de InGaAs, para mediciones de onda corta de infrarrojo (por lo regular entre 1,000 y 25,000 nm) (De La Cruz, 2008).

Un espectrómetro mide radiación a intervalos discretos de longitud de onda en una región espectral definida. El espectrómetro de onda angosta, tiene resoluciones espectrales de 10 nanómetros o menos en las regiones espectrales NIR visibles, y de 50 nm o menos en las regiones de onda corta de infrarrojo medio (ASD, 1999).

Baret *et al.*, (1987) indican que un espectrómetro, además de medir la radiación incidente y reflectada, debe compensar la corriente transmitida por los sensores aun en ausencia de radiación entrante. Esta corriente por temperatura a menudo se llama corriente oscura o ruido. Por lo tanto, una medición de reflectancia completa se describe en la Ecuación 4.

$$R = \frac{(\theta_{REF} - C_{INTERFERENCIA})}{(\theta_0 - C_{INTERFERENCIA})} \quad \text{Ec. 4.}$$

Donde  $\theta_{REF}$  es la radiación reflectada medida,  $\theta_0$  es la radiación incidente medida y  $C_{INTERFERENCIA}$  es la corriente de interferencia “ruido”.

La tasa de radiación reflectada-incidente no tiene dimensión, entonces las mediciones de reflectancia a nivel de suelo no requieren calibración de instrumentos. La transmisión y reflectancia de cada hoja se puede medir al usar luz eléctrica, en lugar de radiación solar como fuente. Para determinar la transmisión

de un material se usa, ya sea, una esfera integrante (Carter y Spiering, 2002) o medir el rayo directo (Monje y Bugbee, 1992).

#### **IV.I.4. Reflectancia de la hoja y estrés de la planta**

La clorofila domina la reflectancia y transmisión de radiación visible de la hoja. El nitrógeno es un componente principal de la clorofila, la cual absorbe la radiación roja y azul, resultando en poca reflectancia de esos colores en la vegetación verde (Taiz y Zeiger, 2002).

La máxima absorción roja se da entre 660 y 680 nm (Currán, 1989) pero relativamente 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 rango de 550 o 700 nm, porque estas regiones se saturan con mayores concentraciones de clorofila. Los cambios en la forma del espectro de reflectancia entre 550 y 650 nm a veces se pueden usar para identificar clorosis (Carter y Spiering, 2002).

La región de rápido incremento en reflectancia entre las regiones roja e infrarroja de espectro, llamada rojo lejano, a menudo se usa para indicar la sanidad de la planta (Jago *et al.*, 1999). Esa parte del espectro visible al ojo humano se extiende de alrededor de 400 nm a 800 nm, mientras que el espectro infrarrojo se extiende de aproximadamente 2,500 nm a 25,000 nm. El infrarrojo cercano es considerado esa parte del espectro situada entre la región visible y la región infrarroja. El rango de longitudes de onda que el NIR cubre, está entre 750 nm a 2,600 nm (Figura 1)

Horler *et al.*, (1983b) 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 (radiación visible y casi infrarroja). El rojo lejano o profundo tiende a ser sensible a un amplio rango de concentración de clorofila, pero es sensible al tipo de planta y cambios en la cubierta del suelo (Carter y Spiering, 2002).

Peñuelas *et al.*, (1994) identificaron un incremento en reflectancia entre los 500 y 600 nm en hojas de girasol estresadas por nitrógeno, comparadas con hojas no estresadas y lo examinaron usando espectros derivados. Gamon *et al.*, (1992) notaron un patrón similar en la reflectancia de la cubierta foliar en girasol, y específicamente observaron cambios entre las 8:00 y 12:00 horas en reflectancia entre plantas estresadas y no estresadas.

El primer contacto de la radiación es con la superficie de las hojas, las cuales consisten de la cutícula y capas de la epidermis. El valor de la luz que es absorbida o transmitida entre las hojas depende de su longitud de onda y de la selectividad de la absorción de los pigmentos de la hoja, que pueden ser una característica de la misma especie o estar causadas por enfermedades o deficiencias nutrimentales (Meer *et al.*, 2002).

Cuando la hoja está enferma, la clorofila se degrada más rápido que los carotenos (Sanger, 1971); este efecto genera un incremento en la reflectancia de la longitud de onda roja, debido a la reducción de la absorción de la clorofila. Carotenos y xantófilos ahora son los dominantes en las hojas, y las hojas aparecen amarillas debido a que los carotenos y xantófilos absorben la luz azul y reflejan la luz verde y roja (Araque y Jiménez, 2009). Cuando las hojas mueren, los pigmentos de coloración café aparecen y la reflectancia de la hoja y transmitancia en el rango de longitudes de onda entre los 400 y 750 nm decrecen (Boyer *et al.*, 1988).

#### **IV.I.5. Etapa de crecimiento y arquitectura de la cubierta vegetal**

La reflectancia es influenciada por la arquitectura (ángulo y distribución de la hoja) de las cubiertas vegetales (Demetriades-Shah *et al.*, 1990). El arqueotipo de la planta cambia durante la temporada de crecimiento, entonces la etapa de crecimiento es un factor importante en la reflectancia vegetal. Baret *et al.*, (1987) reportan que el comportamiento general del espectro de la cubierta de trigo en temporada de crecimiento era independiente de la fecha de siembra y cultivar, pero muy dependiente de la etapa de crecimiento de las plantas.



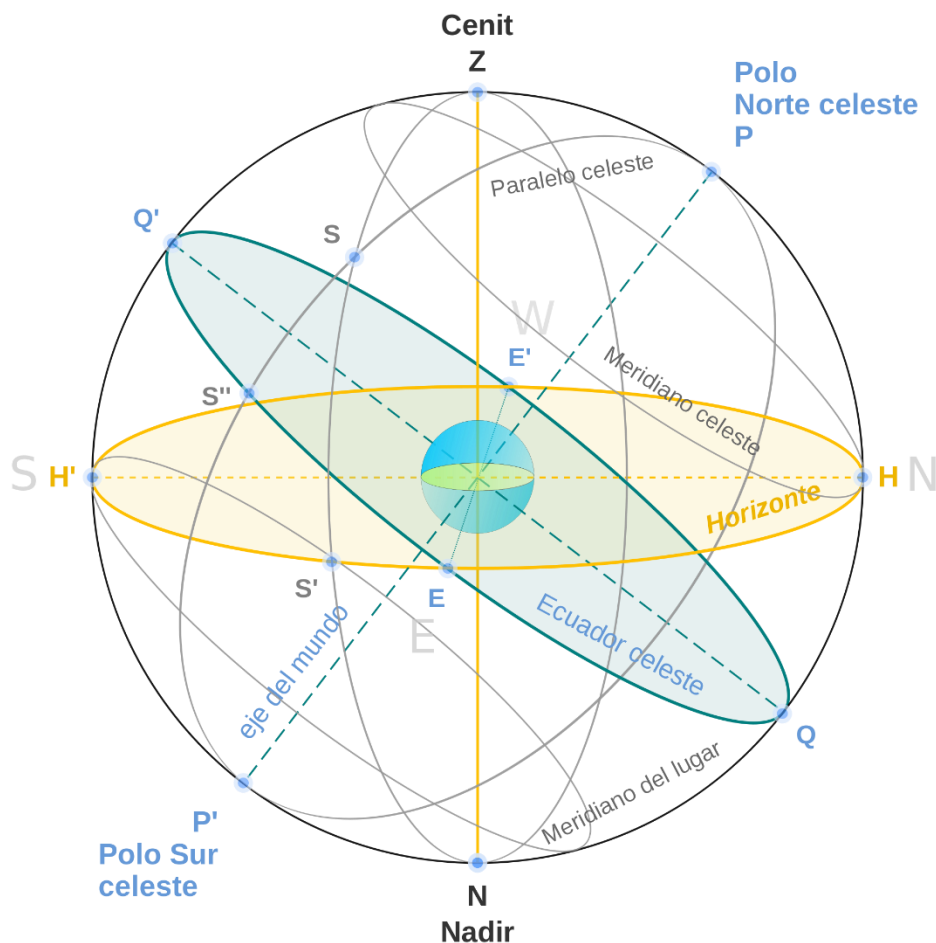
Thenkaball *et al.* (2002) estudiaron índices espectrales de banda ancha y corta y reportaron que la reflectancia NIR del cultivo entre 750 y 950 nm, cambia de plano a una pendiente positiva a medida que la planta se estresa o envejece. También encontraron una pendiente mayor que la reflectancia entre los 750 y 950 nm en plantas erectófilas que en plantas planófilas, sin embargo, no profundizaron en la causa de dicha pendiente.

Un estudio realizado por Malthus *et al.*, (1993) emplearon la espectroradiometría para investigar la reflectancia del frijol infectado por *Botrytis fabae*, observaron un incremento de la reflectancia en la región del visible y un decremento en la región del infrarrojo cercano. Tales cambios fueron atribuidos al colapso en la estructura celular de la hoja con la enfermedad.

#### **IV.I.6. Ángulo del sensor**

El efecto que tiene el ángulo en la reflectancia se ha conocido por años; por ejemplo, Woodley (1971) reportó cambios en la reflectancia de la hoja entre los 400 y 2,500 nm con base en el ángulo del sensor. Él mostró que la reflectancia absoluta se incrementa a medida que el ángulo varió y que las propiedades de reflectancia cambian con base en el análisis de la superficie abaxial o adaxial. Pinter *et al.*, (1987) también observaron que las tasas de banda espectral eran afectadas significativamente en vistas fuera de nadir, y que la tasa NIR/Rojo era mayor cuando el sensor se apuntaba a un lugar ‘caliente’ (al Este en la mañana y al Oeste en la tarde) en la cubierta vegetal, y menor cuando se hacía al revés. Según Otterman *et al.*, (1995) en un terreno con cobertura vegetal muestra fuertes variaciones de “frente y de espaldas”.

Nadir es el punto de la esfera celeste diametralmente opuesto al cenit, el cenit es la intersección de la vertical de un lugar y la esfera celeste (Figura 4).



**Figura 4. Ubicación del punto Nadir y Cenit.**

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Celestial-sphere-ES.svg>

#### IV.I.7. Ángulo solar y hora del día

Las mediciones de reflectancia diurnas en cubiertas de trigo en las regiones visibles y NIR del espectro sugieren que la reflectancia visible se mantiene casi constante a lo largo del día, y la reflectancia infrarroja aumenta junto con el ángulo del azimut. Asrar *et al.*, (1985) observaron que un ángulo de cenit solar superior por lo general incrementa los estimados de LAI (Índice de Área Foliar) que usan índices espectrales rojos e infrarrojos debido al aumento en infrarrojo. Pinter *et al.*, (1987) reportan que los cambios en el ángulo solar impactaron significativamente la tasa NIR/Rojo del trigo en invierno. Encontraron que los máximos en la tasa NIR/Rojo se

lograban a media mañana y media tarde, y los mínimos coincidían con la posición solar más alta cerca del mediodía. Los estudios espectrales a menudo se hacen más cerca del cenit solar para evitar los efectos del ángulo solar sobre la reflectancia de la cubierta vegetal (Osborne *et al.*, 2002).

La posición solar puede influenciar la reflectancia vegetal, al influenciar la cantidad de luz que índice sobre la planta. Gamon *et al.*, (1992) sugieren que los cambios químicos de xantofila debido a cambios en la intensidad de la luz son parcialmente responsables por los cambios en eficiencia de absorción y los cambios en la reflectancia de la hoja entre la mañana y la tarde.

#### **IV.I.8. Índices espectrales**

Los índices de vegetación intentan maximizar la contribución espectral de la vegetación verde y minimizar el efecto del fondo del suelo y otros factores Major *et al.*, (1990). En muchos estudios con reflectancia espectral, y por medio de índices, presentan correlaciones con la sanidad vegetal y varias concentraciones bioquímicas en la hoja (Curran *et al.*, 2001). Existen índices espectrales a partir de la reflectancia, tanto para una hoja como para cubierta vegetal; en una hoja ofrecen la desventaja de una mayor tasa señal-interferencia “ruido” y mayor control sobre el medio operante, mientras que en cubierta permiten mediciones a mayor escala. La reflectancia del follaje también fue analizada para el porcentaje de cubierta verde y concentración de clorofila a niveles de superficie y satelital (Dawson, 2000). Los estudios de datos tanto de hoja (Peñuelas *et al.*, 1994) como de cubierta vegetal (Peñuelas *et al.*, 1997) sugieren el uso de bandas infrarrojas de absorción de agua para determinar estrés hídrico.

Los indicadores espectrales de crecimiento del cultivo incluyen factores de reflectancia de banda, combinaciones lineales de bandas por regresión múltiple, “verdor” ortogonal, y tasas de bandas infrarrojas y rojas (Dusek *et al.*, 1985). Sims y Gamon (2002) sugieren que las bandas múltiples son útiles debido a cambios de absorción de pigmentos confusos, como los carotenoides. Best y Harian (1985)

reportaron que los estimados de área de la hoja, al usar varias bandas, se correlacionaron mejor con IAF que los estimados hechos con dos bandas ( $r^2= 0.73$  vs.  $r^2=0.69$ ) aunque Fernández *et al.*, (1994) concluyen que el NDVI (Índice Vegetal de Diferencia Normalizada) aparenta ser el índice espectral más útil que correlaciona la reflectancia sobre la cubierta con las hojas en trigo invernal.

Los espectrómetros de banda angosta, en la mayoría de las veces, se utilizan en plataformas fijas o en imágenes aéreas, mientras que los satélites con capacidades de imagen espacial suficientes para medir los cultivos usan por lo común espectrómetros de banda ancha. Baret *et al.*, (1987) notaron que aún si los datos espectrales de alta resolución se correlacionan bien con la información de banda ancha clásica, la relación parece depender de la etapa fenológica del cultivo. También mencionan que una resolución espectral de cerca de 5 nm parece ser suficiente para mostrar los detalles de las características espectrales de banda angosta. Los índices espectrales de banda angosta miden pendiente (Peñuelas *et al.*, 1994) y profundidad (Curran *et al.*, 2001) de las bandas de absorción, mientras que los índices de banda ancha se limitan a medir la densidad del follaje (IAF).

#### **IV.I.9.1. Tasa e índices de diferencia vegetal**

Los índices de las tasas de radiación reflejada y transmitida se han empleado desde el siglo pasado, a finales de los años 60, para estimar el crecimiento de la planta. Jordan (1969) fue el primero en publicar sobre el índice vegetal de tasa simple (RVI) donde usó la tasa de radiación transmitida a 800 nm con 675 nm para estimar el índice de área de la hoja en un bosque (De La Cruz, 2008).

Rouse *et al.*, (1973) introdujeron una variación del RVI en la que normalizó la tasa de reflectancia para compensar el ángulo solar. Este índice, después conocido como Índice Vegetal de Diferencia Normalizada (NDVI) representa la relación entre las reflectancias NIR y roja. Otros investigadores emplearon una variación del NDVI llamado NDVI verde, o GNDVI para medir las variaciones en la reflectancia verde

en vez de la roja (Gitelson y Merzlyac, 1997). El NDVI y el RVI son los índices vegetales más comunes que se han usado en sensores remotos.

Verhulst *et al.*, (2010) señala que el índice NDVI logra predecir la actividad fotosintética de la planta ya que incluye tanto el rango de infrarrojo cercano como la luz roja. Se calcula a partir de las mediciones de la reflectancia en el rango de luz roja e infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) del espectro.

$$NDVI = \frac{(NIR - ROJO)}{(NIR + ROJO)}$$

Ec. 5.

El NDVI (Índice Vegetal de Diferencia Normalizada) ha sido correlacionado con numerosas variables como: la deficiencia de nutrimentos en los cultivos, rendimiento de cereales de grano pequeño y estrés hídrico prolongado de cultivos. Sin embargo, más que reflejar el efecto de solo un parámetro, el NDVI debe ser considerado como una medida integral del crecimiento de la planta, incluyendo los factores que intervienen en dicho crecimiento (Verhulst *et al.*, 2010).

El índice Vegetal ajustado para Suelo (SAVI) simplifica la relación del suelo con la reflectancia de la cubierta vegetal, al agregar un factor de luminosidad simple (L), el cual se establece típicamente como 0.5 pero puede ser de 0 a 1 (Elvidge y Chen, 1995).

## **IV.2. Nitrógeno (N)**

El N es esencial en la división y expansión celular, por lo tanto, en el crecimiento. También es constituyente de una magnitud de compuestos llamados alcaloides, que son metabolitos esenciales y se cree que sirven como compuestos que almacenan N (Jones *et al.*, 1997). Como ya se indicó, el nitrógeno es un componente principal de la clorofila, la cual absorbe la radiación roja y azul, resultando en poca reflectancia de esos colores en la vegetación verde y cuando hay una deficiencia de

este nutrimento ocurre un incremento en la reflectancia entre los 500 y 600 nm, comparadas con hojas sin deficiencia.

Apaez *et al.*, (2011) realizaron fertilización con 100-100-100 de NPK para frijol chino con espaldera como sistema de tutoreo, se aplicó todo el P y K; los valores más altos de la tasa de asimilación neta y tasa de crecimiento relativo se presentaron de la emergencia a los 29 dds (días después de la siembra) mientras que la tasa de crecimiento del cultivo más alta se observó de los 75 a los 100 dds.

Rodríguez *et al.*, (2003) evaluaron cuatro dosis de fertilización: 0, 20, 40 y 60 kg ha<sup>-1</sup> de N, con sulfato de amonio como fuente de N, obteniendo rendimientos promedio de 500 kg ha<sup>-1</sup>, superior a la media de la región de Coahuila, México.

Escalante *et al.*, (2014) determinaron como influye el suministro de N sobre la dinámica de producción de biomasa, tasa de crecimiento y rendimiento de grano en variedades de frijol con 100 kg de N por hectárea y un testigo sin N. Observaron que la biomasa total, tasa de crecimiento y rendimiento de grano fueron diferentes entre cultivares y se incrementaron con el N.

INIFAP (2013) para la zona de Nayarit recomienda aplicar la dosis de fertilización 30-30-00 NPK en suelos con buena retención de humedad y 40-40-00 en suelos con buena humedad y riego de auxilio, así como no fertilizar en suelos delgados con poca retención de humedad y sin posibilidades de riego.

SAGARPA (2015) la cantidad de nitrógeno atmosférico fijado por las bacterias del género *Rhizobium*, varía de 60 a 120 kg ha<sup>-1</sup>, por lo que cuando no se cuenta con un análisis de suelo y el frijol se siembra después de sorgo o maíz se sugiere aplicar de 80 a 100 kg ha<sup>-1</sup> de N y de 40 a 60 kg ha<sup>-1</sup> en rotación con otra leguminosa en el estado de Sinaloa. Cuando se cuenta con análisis de suelo, fertilizar de acuerdo al Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Dosis de nitrógeno para frijol en el suelo para el estado de Sinaloa.

<b>Nitrógeno disponible en el suelo</b>	<b>Dosis a aplicar con nodulación</b>
Menor que 20	170-210

Nitrógeno disponible en el suelo	Dosis a aplicar con nodulación
20-40	140-180
40-60	110-150
60-80	80-120
80-100	50-90
Mayor o igual que 100	40-60

Fuente: SAGARPA, 2015.

#### IV.2.1. Nutrición nítrica y amoniacal

Las principales formas de N inorgánico absorbidas por las raíces de las plantas superiores son el  $N-NO_3^-$  y el  $N-NH_4^+$ , la asimilación de  $NH_4^+$ , libera  $H^+$ , mientras que la de  $NO_3^-$  produce  $OH^-$ . Al suministrar  $NH_4^+$ , como fuente de nitrógeno a las plantas, éstas acidifican la rizósfera, mientras que con  $NO_3^-$  la alcalinizan en la misma magnitud (Bloom *et al.*, 2003).

Los iones  $NO_3^-$  se pueden almacenar en las vacuolas de la raíz y el tallo, estos iones son muy móviles en el xilema y transportados hacia las hojas, no obstante la tasa de absorción del  $NO_3^-$  en la raíz o en las hojas, está en función de la especie, del cultivar e híbrido y aún puede variar dentro de la misma especie. Generalmente en las plantas tropicales y subtropicales domina la reducción (proceso de desnitrificación) del  $NO_3^-$  en las hojas, mientras que las plantas de climas templados particularmente con bajas concentraciones de  $NO_3^-$  en el medio, la reducción se lleva a cabo principalmente en la raíz (Mashner, 1995).

Bajo condiciones normales de cultivo hidropónico, la mayoría de las especies cultivadas responden de forma favorable al nitrógeno añadido a la solución nutritiva como nitrógeno amoniacal ( $N-NH_4^+$ ) en el orden de hasta 10% del nitrógeno total (Steiner, 1984). Debe también tomarse en cuenta que bien manejado el suministro de nitrógeno amoniacal ( $N-NH_4^+$ ) a la solución nutritiva, se tiene además la ventaja de que el costo comercial unitario del nutrimento es inferior, comparado con el del nitrógeno nítrico ( $N-NO_3^-$ ) Baca *et al.*, (2016)

#### **IV.2.2. Estrés nutrimental**

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

Mashner (1995) menciona que una deficiencia de N limita la división y expansión celular, el desarrollo de los cloroplastos, por lo que se producen plantas débiles y enanas, con crecimiento lento, maduran precozmente, con rendimiento y calidad bajos. Los síntomas iniciales y más severos se ven en 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 de un colapso de cloroplastos, con una disminución en el contenido de clorofila y el amarillamiento de las hojas. Bidwell (2002) indica que todo esto se traduce en una palidez gradual o clorosis de las hojas maduras que llegan a tornarse amarillentas y se desprenden.

La clorosis se extiende de las hojas maduras a las hojas jóvenes, las que usualmente no muestran los síntomas característicos de deficiencia hasta que están muy avanzados en las partes viejas de la planta, lo que indica que el nitrógeno de las hojas maduras se moviliza y transporta a las partes jóvenes en crecimiento conforme se necesita. Un síntoma de deficiencia de N es la producción de antocianinas en tallos, nervaduras foliares y peciolo, los cuales pueden volverse rojos o púrpuras. Las hojas jóvenes de plantas deficientes de N son más erguidas y se extienden menos de lo normal; así mismo, la ramificación o ahijamiento se suprime debido al continuo letargo de yemas laterales (Bidwell, 2002).



Las plantas responden de varias maneras a suministros altos o bajos de nitrógeno. La sobreabundancia causa con frecuencia una gran proliferación de tallos y hojas, pero determina una reducción de frutos en plantas de cultivo (Bidwell, 2002).

En términos de la reflectancia puede concluirse, con base a los reportes, que habrá un incremento de ésta en el rango de los 500 a 700 nm cuando la planta presente una deficiencia de nitrógeno.

### **IV.3. Solución nutritiva**

Una solución nutritiva verdadera es aquella cuya fórmula química indica las especies o formas químicas que se encuentran presentes en la misma y en la concentración indicada. Los resultados del análisis químico de ésta deben coincidir con su fórmula química. Además, por el tipo de especies químicas seleccionadas, los nutrientes se hallan en formas aprovechables para las plantas (Steiner, 1961).

Los nutrientes que constituyen la solución nutritiva son: nitrógeno (N) fósforo (P) potasio (K) calcio (Ca) magnesio (Mg) azufre (S) hierro (Fe) boro (Bo) manganeso (Mn) zinc (Zn) y cobre (Cu). Otros nutrientes como el molibdeno (Mo) y el cobalto (Co) también son requeridos por las plantas, pero en cantidades muy pequeñas (Baca, *et al.*, 2016).

Steiner (1984) indica que su solución nutritiva es en realidad una particular relación de aniones en combinación, también, con una particular relación de cationes. Los aniones son: ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ion fosfato di ácido u ortofosfato monobásico ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en la relación: 60% de  $\text{NO}_3^-$ , 5% de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y 35% de  $\text{SO}_4^{2-}$  (expresados en  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ ). Con respecto a los cationes, éstos son: ion potasio ( $\text{K}^+$ ) ion calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y ion magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en la relación: 35% de  $\text{K}^+$ , 45% de  $\text{Ca}^{2+}$  y 20% de  $\text{Mg}^{2+}$  (también en  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ ). Las concentraciones absolutas de este grupo de iones (aniones y cationes) dependen de la presión osmótica seleccionada para la solución (para una presión osmótica de 0.72 atm, los valores

en mmolc L<sup>-1</sup> son: 12 de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 1 de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, 7 de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, de 7 de K<sup>+</sup>, 9 de Ca<sup>2+</sup> y 4 de Mg<sup>2+</sup>).

#### **IV.3.1. pH**

Según Baca *et al.*, (2016) el grado de acidez o la acidez de una solución se evalúa mediante la determinación del pH, que es por definición el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno o también, el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] = \log [ 1/ \text{H}^+ ] = \log[\text{H}^+]^{-1}$$

El ajuste del pH es el primer paso para la preparación de la solución nutritiva y evitar con ello la precipitación de algunos de los iones presentes. La precipitación es un proceso irreversible, por lo cual puede ocasionar pérdida de nutrimentos y aumentar el costo del manejo de la solución nutritiva.

#### **IV.3.2. Conductividad eléctrica (CE)**

Baca *et al.*, (2016) la medición de la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva mediante un puente de conductividad eléctrica o conductímetro, constituye un medio analítico indirecto que permite estimar la presión osmótica (PO) de la solución. Para esto se utiliza el factor 0.36, el cual se determinó de modo empírico (United States Department of Agriculture, 1962) para calcular en general, la presión osmótica de aguas para uso agrícola. Este factor es aplicable en general a las soluciones nutritivas, sin embargo, en ocasiones cuando en las soluciones nutritivas predomina la presencia de iones divalentes debe utilizarse otro factor.

Presión osmótica (atm) = 0.36 x CE

Si la CE está expresada en dS m<sup>-1</sup> (o mmhos cm<sup>-1</sup>) el cálculo aritmético de la presión osmótica resulta en atmósferas.

En específico, en el caso de la Solución Nutritiva Universal de Steiner, el factor señalado: 0.36, es correcto. Si se trata de una solución nutritiva con una proporción mayor de iones monovalentes con respecto a los contenidos en la Solución Steiner, el valor del factor en cuestión es mayor, lo contrario ocurre cuando la proporción de iones divalentes es mayor.

#### **IV.3.3. Presión osmótica (PO)**

La cantidad total de iones de las sales disueltas en la solución nutritiva ejerce una fuerza llamada presión osmótica, la cual es una propiedad físico-química de las soluciones nutritivas, ésta depende de la cantidad de partículas o solutos disueltos. La importancia de la presión osmótica en una solución nutritiva radica en que cuando ésta aumenta, disminuye la energía libre del agua y por consiguiente la absorción de agua y nutrimentos (principalmente de N, P, K, Ca y Mg) (Favela, *et al.*, 2006) y da como resultado una disminución en el crecimiento y el desarrollo de la planta (Marschner, 1995).

#### **IV.3.4. Incremento de nitrógeno en la solución nutritiva**

El manejo de la solución nutritiva requiere cuidar su balance estequiométrico, por este motivo si a una solución se aumenta en 20% la concentración de nitratos con respecto al total de la concentración de aniones, a la vez debe disminuir 20% la concentración del conjunto de fosfatos y sulfatos, y mantener la relación original entre estos últimos. Una vez realizados estos cálculos, debe realizarse un ajuste

general a la concentración de todos y cada uno de los iones integrantes de la solución nutritiva (inclusive las de los cationes) de modo de obtener la presión osmótica original (Baca *et al.*, 2016).

Es importante que la evaluación de la respuesta del cultivo al grupo de soluciones nutritivas con las relaciones de aniones modificadas, realizarse con la precaución de que todas ellas presenten la misma presión osmótica y relación mutua de cationes. Con esto, el efecto o los efectos en la planta que se determinen (si para el caso se evalúa el rendimiento o los efectos nutrimentales, como la concentración y o la extracción de uno o varios nutrimentos en uno o más órganos de la planta) serán independientes del efecto de la presión y relación de cationes (Baca *et al.*, 2016).

En las soluciones nutritivas en las que se modifica la relación mutua de aniones con respecto a la relación de cationes, podría usarse la propia de la Solución Nutritiva Universal de Steiner a menos que se hayan realizado experimentos que indiquen una mejor opción (Baca *et al.*, 2016).

#### **IV.4. Frijol**

En México, el frijol es el tercer cultivo en importancia por la superficie que ocupa, después del maíz grano y sorgo grano. En todos los estados de la República Mexicana se siembra el frijol (leguminosa que tiene más de 70 variedades entre las que destacan: los claros, negros y pintos. El consumo anual per cápita es de 8.4 kg (SIAP-SAGARPA, 2016).

##### **IV.4.1. Morfología**

El frijol común pertenece a la familia *Fabaceae*, subfamilia *Faboideae*, Tribu *Phaseoleae*, subtribu *Phaseolinae*, género *Phaseolus* y especie *vulgaris* L. Según Debouck e Hidalgo (1985), entre sus estructuras principales se encuentran la raíz, tallo, hojas, flor y fruto, mismos que a continuación se describen.

**Raíz:** en la primera etapa del desarrollo el sistema radical está formado por la radícula del embrión, la cual se convierte posteriormente en la raíz principal. A los pocos días de la emergencia es posible ver las raíces secundarias, sobre éstas se desarrollan las raíces terciarias y otras subdivisiones como los pelos absorbentes, los cuales se encuentran en todos los puntos de crecimiento de la raíz.

Aunque generalmente se distingue la raíz principal por ser de mayor diámetro, el sistema radical tiende a ser fasciculado, fibroso en algunos casos, pero con una amplia variación, incluso dentro de una misma variedad. *Phaseolus vulgaris L.*, presenta nódulos distribuidos en las raíces laterales de la parte superior y media del sistema radical.

**Tallo:** puede ser identificado como el eje central de la planta el cual está formado por una sucesión de nudos y entrenudos. Se origina del meristemo apical del embrión de la semilla. Es herbáceo y con sección cilíndrica o levemente angular, debido a pequeñas corrugaciones de la epidermis. Puede ser erecto, semiprostrado o prostrado, según el hábito de crecimiento de la variedad, puede ser glabro o pubescente.

El tallo comienza en la inserción de las raíces, en orden ascendente, el primer nudo que se encuentra es el de los cotiledones; éste se caracteriza por tener dos inserciones opuestas correspondientes a los cotiledones. La primera parte del tallo comprendida entre la inserción de las raíces y el primer nudo, se llama hipocótilo. El siguiente nudo es el de las hojas primarias, las cuales son opuestas. Entre el nudo de los cotiledones y el de las hojas primarias, se encuentra un entrenudo llamado epicótilo.

En el tallo se encuentran presentes órganos como las hojas, ramas, vainas, los racimos y las flores. Al inicio de la fase reproductiva de la planta, el tallo presenta a lo largo de su estructura diferentes niveles de desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos. En general se observa un cambio en la disposición de las ramas, en la ramificación a partir de los primeros nudos, el de los cotiledones y el de las hojas primarias cuyas ramas están disposición decusada; a partir del tercer nudo, la disposición de las ramas y/o inflorescencias es alterna o dística.

**Hojas:** las hojas del frijol son de dos tipos: simples y compuestas; están insertadas en los nudos del tallo y las ramas. Solo hay dos hojas simples: las primarias: aparecen en el segundo nudo del tallo, éstas son opuestas, cordiformes, unifoliadas, auriculadas, simples y acuminadas. Por su parte, las hojas compuestas son trifoliadas, es decir cuentan con tres folíolos, un peciolo y un raquis. Los folíolos son enteros; la forma tiende a ser de ovalada a triangular, principalmente cordiformes, pero sin aurículas, son glabros o subglabros.

**Flor:** en el proceso de desarrollo de la flor se pueden distinguir dos estados que son el botón floral y la flor completamente abierta. En su estado inicial está envuelto por bractéolas que tienen forma ovalada o redonda; en su estado final la corola que aún está cerrada sobresale y las bractéolas cubren solo el cáliz. Cuando ocurre el fenómeno de antesis la flor se abre.

**Fruto:** el fruto es una vaina con dos valvas, las cuales provienen del ovario comprimido. Dos suturas aparecen en la unión de las valvas; una es la sutura dorsal o placentar y la sutura ventral. Los óvulos que son las futuras semillas, alternan en la sutura placentar; en consecuencia, las semillas también alternan. Las vainas son glabras o subglabras con pelos muy pequeños.

#### IV.4.2. Fenología

Según Feller *et al.*, (1995 b); Meier, (2001) los estadios fenológicos del desarrollo de frijol son: germinación, desarrollo de las hojas, formación de brotes laterales, aparición del órgano floral, floración, formación del fruto, maduración de frutos y semillas y senescencia, mismos que se describen en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Fenología del frijol.

Código	Descripción
<b>Estadio principal 0: germinación</b>	
00	Semilla seca
01	Comienzo de la imbibición de la semilla

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
03	Imbibición de la semilla, terminada
05	La radícula (raíz embrional) sale de la semilla
07	El hipocótilo, con cotiledones rompiendo el tegumento seminal
08	El hipocótilo, con cotiledones crecen hacia la superficie del suelo
09	Emergencia: los cotiledones rompen la superficie de suelo
<b>Estadio principal 1: desarrollo de las hojas</b>	
10	Cotiledones, desplegados completamente
12	Dos hojas enteras (primer par de hojas desplegadas)
13	Tercera hoja verdadera (primera hoja trifoliada) desplegada
1...	Los estadios continúan hasta...
19	Nueve o más hojas (dos hojas enteras y siete o más hojas trifoliadas) desplegadas
<b>Estadio principal 2: formación de brotes laterales</b>	
21	Primer brote lateral, visible
22	Segundo brote lateral, visible
23	Tercer brote lateral, visible
2...	Los estadios continúan hasta...
29	Nueve o más brotes laterales, visibles
<b>Estadio principal 5: aparición del órgano floral</b>	
51	Primeros botones florales, visibles fuera de las hojas
55	Primeros botones florales individuales, visibles fuera de las hojas, pero cerradas todavía
59	Primeros pétalos, visibles; muchos botones florales individuales, cerrados todavía
<b>Estadio principal 6: Floración</b>	
60	Primeras flores abiertas (esporádicamente)
61	Comienzo de la floración: 10% de las flores abiertas <sup>1</sup>
	Comienzo de la floración <sup>2</sup>
62	20% de las flores abiertas <sup>1</sup>
63	30% de las flores abiertas <sup>1</sup>
64	40% de las flores abiertas <sup>1</sup>
65	Plena floración, 50% de las flores abiertas <sup>1</sup>
	Periodo de plena floración <sup>2</sup>
67	Floración decae: la mayoría de los pétalos, caídos o secos <sup>1</sup>
69	Fin de la floración: primeras vainas, visibles <sup>1</sup>
<b>Estadio principal 7: Formación del fruto</b>	
71	El 10% de las vainas alcanza la longitud típica <sup>1</sup>
	Las vainas comienzan a crecer <sup>2</sup>
72	El 20% de las vainas alcanza la longitud típica <sup>1</sup>
73	El 30% de las vainas alcanza la longitud típica <sup>1</sup>
74	El 40% de las vainas alcanza la longitud típica <sup>1</sup>
75	El 50% de las vainas alcanza la longitud típica, las judías comienzan a rellenarse <sup>1</sup>
	Periodo principal de crecimiento de las vainas <sup>2</sup>

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
76	El 60% de las vainas alcanza la longitud típica <sup>1</sup>
77	El 70% de las vainas alcanza la longitud típica. Las vainas aún se rompen limpiamente <sup>1</sup>
78	El 80% de las vainas alcanza la longitud típica <sup>1</sup>
79	Vainas: las judías son fácilmente visibles individualmente <sup>1</sup>
<b>Estadio principal 8: Maduración de frutos y semillas</b>	
81	El 10% de las vainas, maduras (judías duras) <sup>1</sup>
	Las semillas comienzan a madurar <sup>2</sup>
82	El 20% de las vainas, maduras (judías duras) <sup>1</sup>
83	El 30% de las vainas, maduras (judías duras) <sup>1</sup>
84	El 40% de las vainas, maduras (judías duras) <sup>1</sup>
85	El 50% de las vainas, maduras (judías duras). <sup>1</sup>
	Periodo principal de maduración <sup>2</sup>
86	El 60% de las vainas, maduras (judías duras) <sup>1</sup>
87	El 70% de las vainas, maduras (judías duras) <sup>1</sup>
88	El 80% de las vainas, maduras (judías duras) <sup>1</sup>
89	Madurez completa: vainas maduras (judías duras) <sup>2</sup>
	Las semillas comienzan a madurar <sup>3</sup>
<b>Estadio principal 9: Senescencia</b>	
97	Plantas muertas
99	Plantas cosechadas

Fuente: Feller *et al.*, 1995 b; Meier 2001.

#### **IV.4.3. Producción mundial y nacional**

A nivel global anualmente se cosechan alrededor de 29.5 millones de hectáreas de frijol, de las cuales se obtienen 23 millones de toneladas, en sus diferentes variedades. Myanmar es el primer productor a nivel mundial con 3.70 millones de toneladas y México es el cuarto productor con 1.29 millones de toneladas. Dos terceras partes de las exportaciones mexicanas son compradas por Estados Unidos, principalmente de variedades claras; mientras que 90% de las importaciones provienen de ese país (SIAP, 2015).

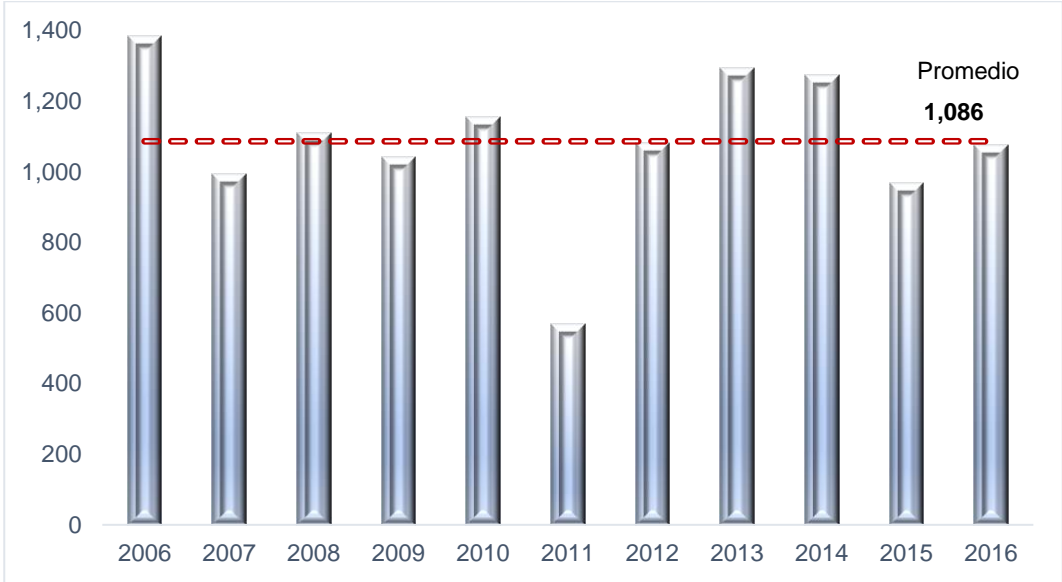
La producción nacional reporta variaciones anuales que se relacionan con el efecto de las condiciones climáticas adversas que afectan al cultivo, debido a que

<sup>2</sup> Para variedades con un periodo de floración limitado

<sup>3</sup> Para variedades en que el periodo de floración no es limitado



se desarrolla principalmente en condiciones de temporal, en 2011 se vio drásticamente afectada por la sequía que se registró en las principales entidades productoras (Figura 5). La variedad Flor de Mayo, es de semiguía, flores blancas, grano mediano de color rosado y crema; madura a los 95 días. Es resistente al “chino” del frijol (Mosaico común).



**Figura 5. Producción nacional 2006-2016 en miles de toneladas.**  
Fuente: SIAP-SAGARPA, 2016.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### V.1. Materiales

A continuación, se indican cada uno de los materiales, equipos y métodos que se emplearon en el experimento (cuadros 3 y 4).

**Cuadro 3.** Materiales utilizados para la reproducción de plántula, sistema hidropónico y laboratorio.

Reproducción de plántula	Sistema hidropónico	Material de laboratorio
-Semilla de frijol var. Flor de mayo	-Tres bombas de pecera con capacidad de 200 L.	-Pipetas -Probetas
-Vasos de unicel de 240 ml.	-45 metros de manguera de 5 mm de diámetro	-Vasos de precipitado
-Agrolita	-Contenedores color negro de 1.5 L.	
-Peat moss	-Vasos de plástico de 60 ml.	

**Cuadro 4.** Materiales utilizados para la solución nutritiva, software y equipo de cómputo.

Solución nutritiva	Software y equipo de cómputo
-Nitrato de calcio	-Computadora
-Nitrato de potasio	-Radiómetro CROPSCAN de cinco bandas
-Sulfato de potasio	-Celular con tecnología OTG <sup>4</sup>
-Fosfato monopotásico	-Aplicación radiométrica
-Sulfato de magnesio	- Visual Studio
-Superfosfato de calcio triple	- Kit de desarrollo para android
-Ácido sulfúrico	-Programa SAS
-Micronutrientes	

<sup>4</sup> Tecnología que permite usar al celular como dispositivo maestro.

## **V.2. Metodología**

### **V.2.1. Sitio experimental**

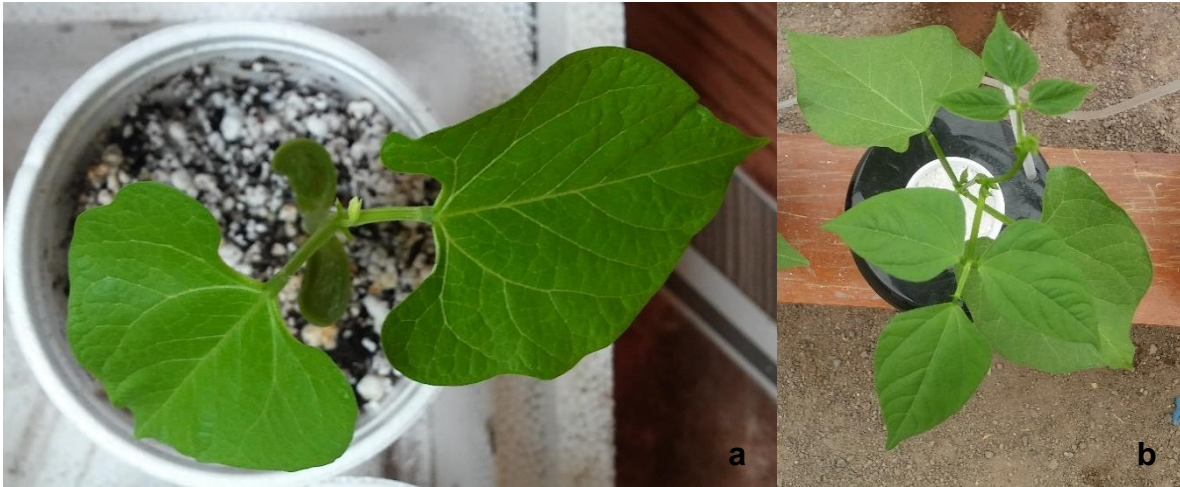
El experimento se realizó durante el periodo julio a octubre del 2017, en un invernadero del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, cuyas coordenadas geográficas son 19° 28' 05" de latitud Norte y 98° 54' 09" de longitud Oeste, a una altitud de 2,220 msnm.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (1981) el clima del sitio donde se realizó el experimento es C(w<sub>o</sub>) (w) b(i') g el cual corresponde a un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal menor que el 5% de la total, con verano fresco largo con una oscilación térmica entre 5 y 7° C, la marcha anual de temperatura es del tipo Ganges). La temperatura promedio máxima fue de 33 °C y la mínima de 15 °C durante el ciclo del cultivo (90 días) en el interior del invernadero.

### **V.2.2. Especie empleada y reproducción de plántula**

Se utilizó frijol (*Phaseolus vulgaris*) var. Flor de Mayo; para la reproducción de plántula, la semilla se sembró en vasos de poliestireno de 250 ml, rellenos de una mezcla de agrolita y peat moss, el 15 de julio del 2017. El trasplante fue a los 18 dds, cuando las plantas presentaron dos hojas verdaderas (Figura 6). Se consideró esta variedad, ya que al ser ésta una variedad de crecimiento indeterminado, es posible el acomodo de las hojas para la toma de lecturas de reflectancia.

Desde la siembra hasta la emergencia, los vasos se regaban de manera individual todos los días a las 8:00 am con agua. Posteriormente, de la emergencia hasta el trasplante el riego fue a las 8:00 am y a las 5:00 pm, con la solución nutritiva Universal de Steiner a 0.36 atm, ya que aún no inicia el crecimiento acelerado y con el propósito de ahorrar recursos.



**Figura 6. Estado fenológico del cultivo de frijol a los 12 dds (a) y a los 18 dds, momento del trasplante (b).**

### **V.2.3. Sistema hidropónico**

El sistema hidropónico empleado fue “Cultivo en Solución Nutritiva”. Las unidades experimentales fueron envases de plástico color negro de 1.5 L de capacidad. A través de bombas de agua para pecera y manguera de 5 mm de diámetro se proporcionó oxígeno a la solución nutritiva en un nivel entre 5 y 6.5 mg L<sup>-1</sup> (Figura 7).

Se utilizó la Solución Nutritiva Universal de Steiner (Cuadro 6) modificada según los tratamientos de nitrógeno como nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) señalados en el apartado V.2.7 y la metodología descrita en Baca, *et al.*, (2016) para mantener la relación mutua de aniones y la relación mutua de cationes, y en todas ellas la misma presión osmótica a 0.72 atmósferas.



**Figura 7. Sistema hidropónico en solución y el sistema de oxigenación.**

#### **V.2.4. Solución nutritiva**

El nivel de la solución nutritiva en las unidades experimentales se aforó diariamente con agua acidulada a pH entre 5.5 y 6.0 mediante la adición de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1N; lo cual a su vez permitió mantener el pH de la solución nutritiva entre 5.5 y 6.5.

La solución nutritiva se preparó con las sales, fertilizantes y ácido grado industrial que se indican en el Cuadro 5; los micronutrientes fueron aportados mediante la adición de 40 g de fertilizante grado comercial por cada 1000 L de agua. La solución nutritiva fue sustituida cada vez que el aforo realizado, alcanzaba el 50% del volumen original de la misma.

**Cuadro 5. Fuentes de macronutrientes.**

<b>Fertilizante, sal o ácido grado industrial</b>	<b>Fórmula química</b>
Nitrato de calcio	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O
Nitrato de potasio	KNO <sub>3</sub>
Sulfato de potasio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Fertilizante, sal o ácido grado industrial	Fórmula química
Fosfato monopotásico	$\text{KH}_2\text{PO}_4$
Sulfato de magnesio heptahidratado	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Superfosfato de calcio triple	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Ácido sulfúrico	$\text{H}_2\text{SO}_4$

**Cuadro 6.** Solución Nutritiva Universal de Steiner con presión osmótica de 0.72 atm.

Aniones			Cationes		
<b>Solución nutritiva base (testigo)</b>					
<b><math>\text{NO}_3^-</math></b>	<b><math>\text{H}_2\text{PO}_4^-</math></b>	<b><math>\text{SO}_4^{2-}</math></b>	<b><math>\text{K}^+</math></b>	<b><math>\text{Ca}^{2+}</math></b>	<b><math>\text{Mg}^{2+}</math></b>
(mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup> )					
12.00	1.00	7.00	7.00	9.00	4.00
$\Sigma A = 12+1+7 = 20.00$			$\Sigma C = 7+9+4 = 20.00$		
(mM)					
12.00	1.00	3.50	7.00	4.50	2.00
$\Sigma \text{mM} = 12 + 1 + 3.5 + 7 + 4.5 + 2 = 30.00$					
$\text{PO} = 30.00 \times 0.024 = 0.72 \text{ atm}$					

### V.2.5. Determinación de altura para la toma de lecturas con el radiómetro

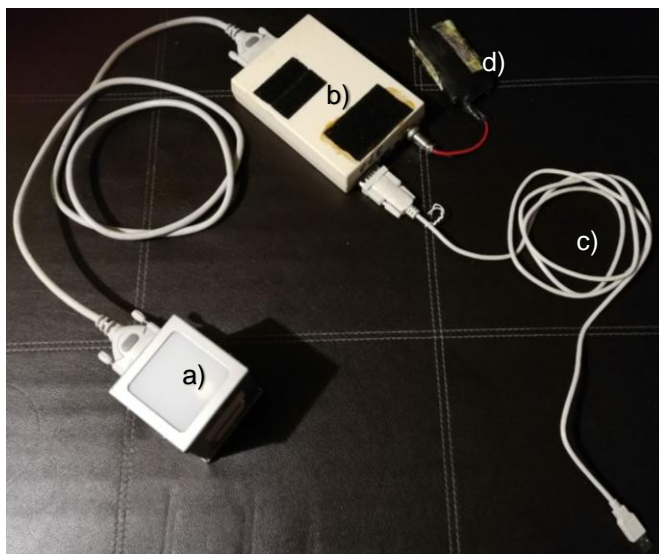
De la Cruz (2008) realizó mediciones en pimiento con un radiómetro CROPSCAN a una altura de 1 m, cubriendo un área de 0.25 m<sup>2</sup>; Aguilar (2011) realizó estudio de espectralradiometría en pepino a una altura de 1 m, el manual del radiómetro menciona que la relación es de dos a uno, es decir para captar un metro de diámetro, el equipo deberá colocarse a dos metros de altura, derivado de esta discrepancia, se decidió calibrar el radiómetro realizando pruebas con recuadros de

madera de 0.25 x 0.25 metros en la siguiente gama de colores (verde, morado, naranja, blanco, rojo y negro), aunque la deficiencia de nitrógeno se manifiesta en tonalidades de verde, se decidió usar estos colores para ampliar la gama de respuesta.

Se colocó el radiómetro a 10, 20, 30, 40, 50 y 70 cm, de los recuadros de colores, asumiendo que se obtendría cierta tendencia en la reflectancia y cuando en ésta se presentara un cambio, el radiómetro estaría captando información fuera del área de interés, encontrando así la altura óptima de medición.

#### **V.2.6. Creación de la aplicación radiométrica**

El radiómetro se conecta a un “disparador“, que se acciona para tomar las medidas realizando un sonido, cada disparo indica que se ha tomado un dato, éste debe accionarse tres veces por punto de muestreo, en la tercera vez se escucha un sonido diferente, lo que indica que es hora de cambiar de punto de muestreo, este procedimiento tiene la desventaja de presentar incertidumbre de si se han tomado tres mediciones, por lo que se identificó un área de mejora en la adquisición de los datos y se desarrolló una aplicación para optimizar la toma de los mismos desde una computadora portátil, tableta o celular con sistema operativo Android, así mismo, se mejoró la aplicación para Windows. Se anexa la aplicación para mayor detalle. En la Figura 8, se muestra el radiómetro y el datalogger mencionados.



**Figura 8. a) Radiómetro, b) datalogger MEX-V1.0 f, c) cable convertidor a USB y d) baterías.**

### **V.2.7. Diseño experimental y tratamientos**

Se establecieron tres tratamientos con 06, 12 y 14 mmol<sub>e</sub> L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y diez repeticiones por cada uno, con un diseño experimental completamente al azar, generando 30 unidades experimentales. Los tres tratamientos seleccionados fueron con base al ajuste de las presiones osmóticas, ya que el nutrimento seleccionado (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) tiene la característica de moverse por difusión. El diseño completamente al azar fue seleccionado por haberse realizado el experimento en invernadero.

Las plantas fueron regadas en un inicio solo con agua hasta la brotación; después fue aplicada la solución “testigo” a los tres tratamientos a una presión osmótica de 0.36 atm y a los 18 días después de la siembra, cuando las plantas presentaron dos hojas verdaderas, fueron preparadas las soluciones nutritivas específicas para cada uno de ellos.



## V.2.8. Variables respuesta

Como ya se mencionó, el N es esencial en la división y expansión celular, por lo tanto, en el crecimiento, lo que determinó la selección de las siguientes variables evaluadas.

**Altura de la planta (cm)** medida al final de la guía principal de cada unidad experimental.

-**Diámetro del tallo (cm)** medido en la parte basal.

-**Número de hojas verdaderas** (se contabilizaron las hojas trifoliadas)

-**Número de vainas** que fueron cortadas cuando alcanzaron la madurez total.

-**Área foliar:** dado que la hoja de frijol es trifoliada fue necesario obtener el área de cada foliolo multiplicando su largo máximo por su ancho máximo para cada una de las hojas en una planta seleccionada al azar por tratamiento. Por otro lado, de una de las plantas se colectaron los foliolos para medirles su área en un integrador de área foliar, con los que se tuvieron los datos necesarios para generar los siguientes modelos:

$$\text{Área} = a + bx \quad \text{Ec. 6.}$$

$$\text{Área} = a + bx_1 + cx_2 \quad \text{Ec. 7.}$$

$$\text{Área} = a + bx_1 + cx_2 + dx_1 x_2 \quad \text{Ec. 8.}$$

Donde  $x_1$ : largo y  $x_2$ : ancho, de las hojas respectivamente.

-**Reflectancia.** Para la medición de reflectancia se configuró el datalogger (Figura 8) con las coordenadas del Colegio de Postgraduados y el valor mínimo de radianza ( $50 \text{ Wm}^{-2}$ ).

La toma de datos se realizó con el radiómetro en posición horizontal a la 13:40 horas, se consideró que para la zona y periodo del experimento a esta hora acontece el ángulo cenital solar. Dichas mediciones se agruparon en plots; cada plot integrado por tres repeticiones obtenidas en un segundo en promedio, con lo que se evitaron errores por cambios drásticos en la radianza.

Dentro del invernadero se midió el diámetro del área foliar para tomar la lectura con el radiómetro a una altura de 1.5 veces este diámetro. Debido a que el radiómetro capta radiación directa, fue necesario trasladar las unidades experimentales fuera del invernadero para la lectura (Figura 9), el traslado de las plantas puede presentar algún tipo de afectación en éstas, por lo que buscó realizarse cuando estuvieran menos turgentes.

La descarga de la información se efectuó con la aplicación creada exprofeso para computadora con el sistema operativo Windows, que produce un archivo con extensión \*.mv indicando previamente el puerto de comunicación. La corrección por reflectancia la ejecutó el programa “postproc.exe” propio del radiómetro CROPSCAN.



**Figura 9. Toma de lecturas de reflectancia con radiómetro CROPSCAN.**

### **V.2.9. Análisis espectral**

Las mediciones de reflectancia se analizaron en las bandas 485, 560, 660, 830 y 1650 nm., así como mediante el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI).

### **V.2.10. Análisis estadístico**

Las variables respuesta se sometieron a un análisis de comparación de medias de Tukey en el software estadístico SAS (Statistical Analysis System).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### VI.1. Calibración del radiómetro

La calibración del radiómetro consistió primeramente en determinar la altura de medición para la reflectancia y posteriormente, el desarrollo de un nuevo software para la adquisición de datos.

#### VI.1.1. Altura de medición

Para la determinación de la altura óptima de medición, se realizaron pruebas con la aplicación operando desde una computadora y desde un celular (figuras 10 a 16). Derivado de dichas pruebas, se encontró que ésta debe ser de 1.5 veces el diámetro del follaje. Las mediciones se realizaron en un día soleado, iniciando a las 12:00 horas, primero desde la computadora y posteriormente con el celular, la diferencia en reflectancia en los dispositivos se atribuye a la hora de medición.

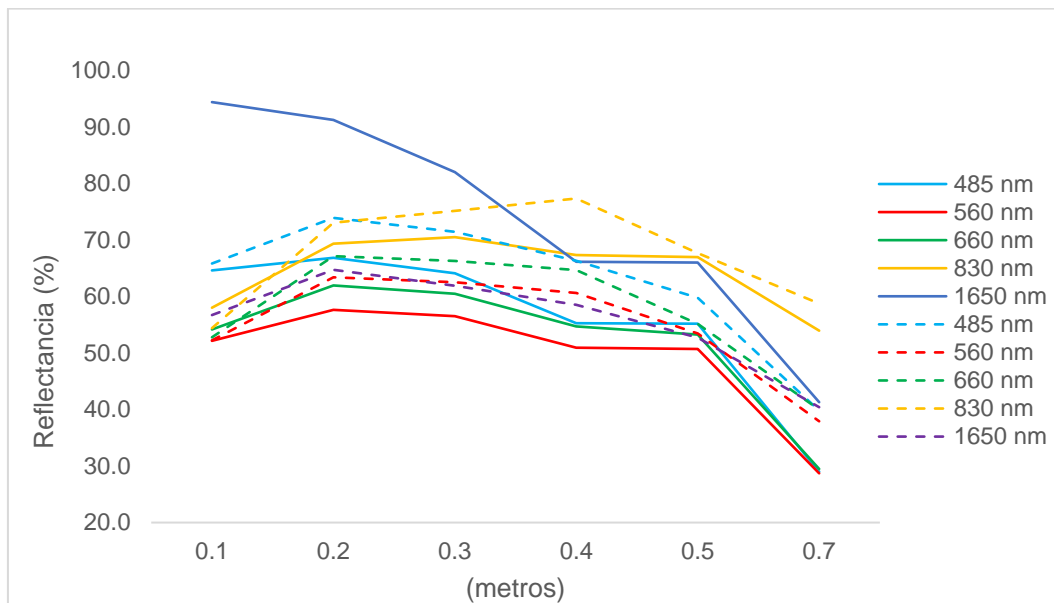
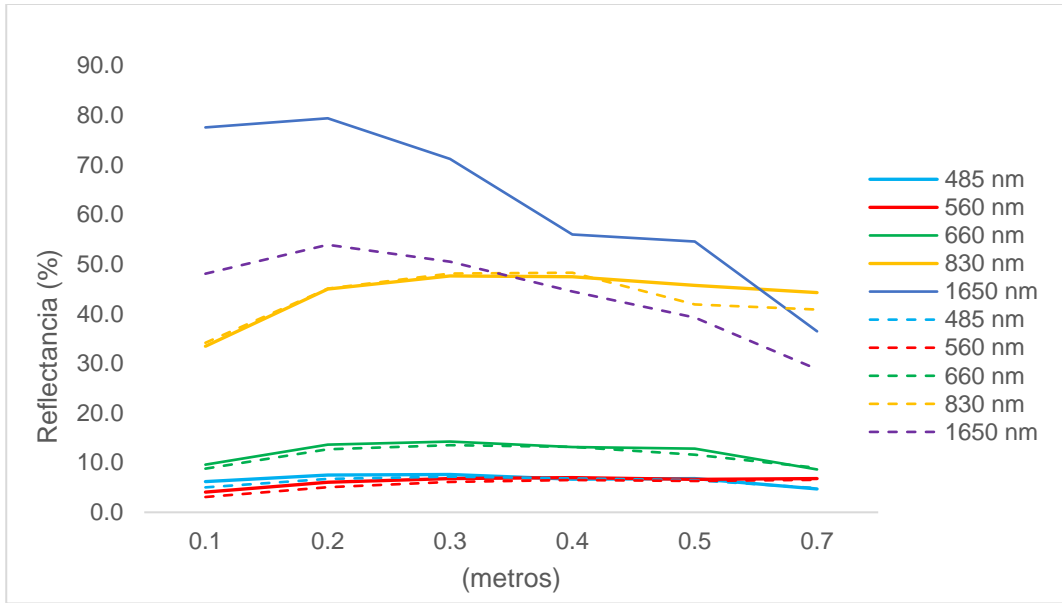
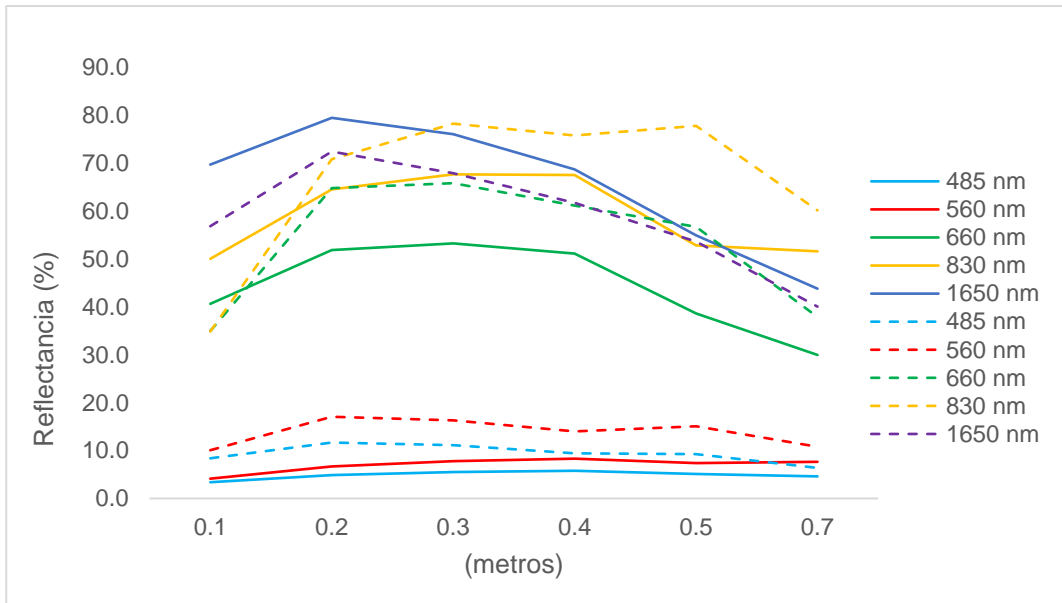


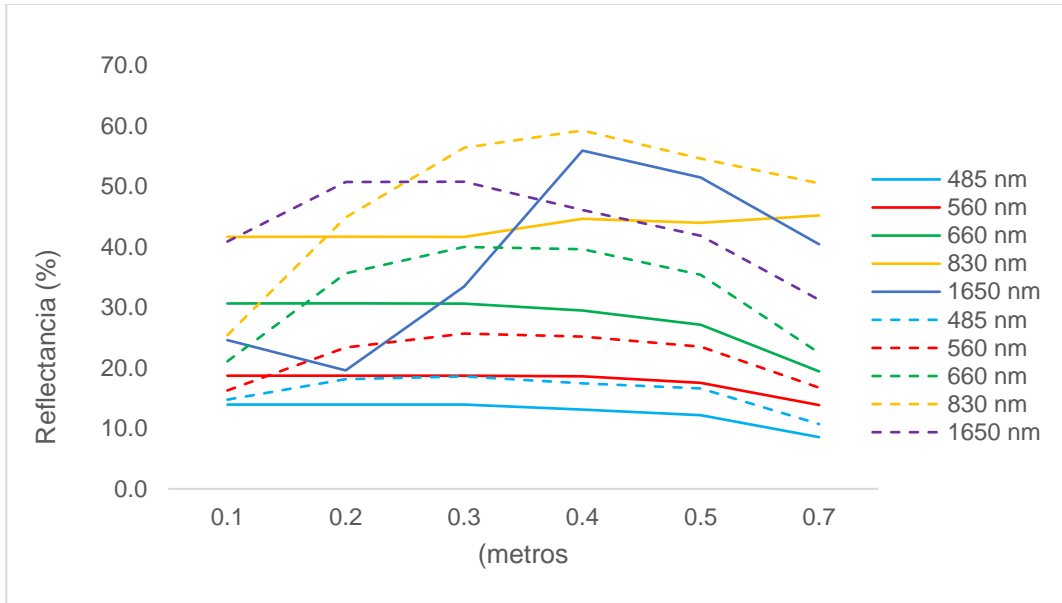
Figura 10. Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color blanco (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular).



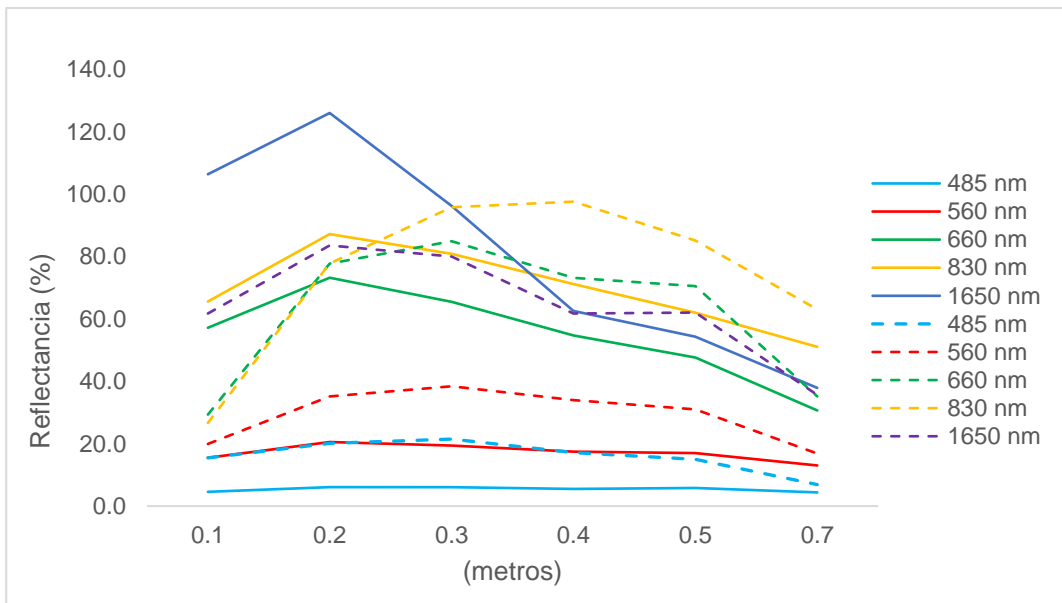
**Figura 11. Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color morado (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular).**



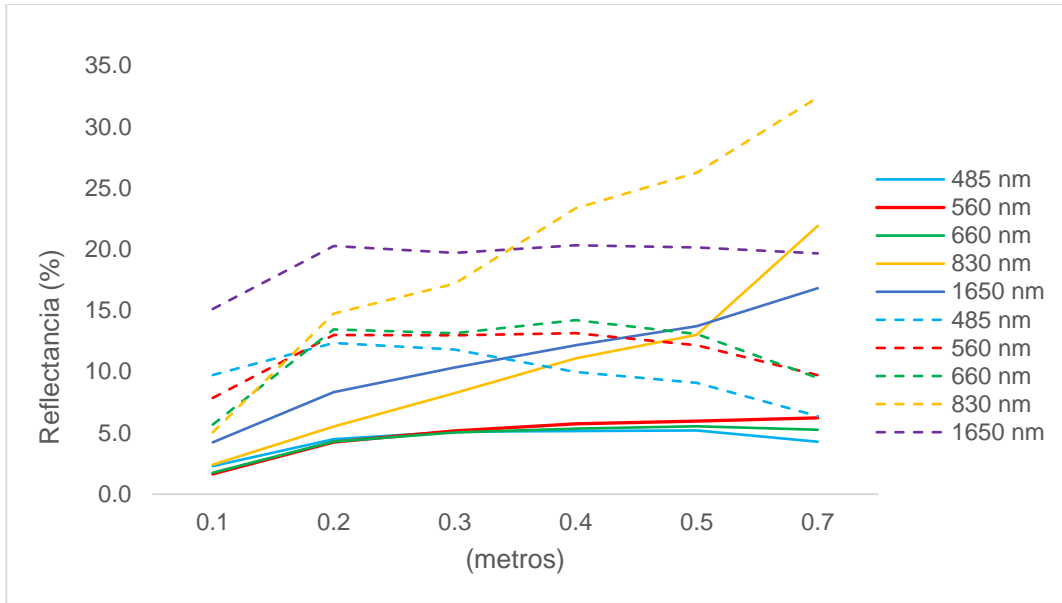
**Figura 12. Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color rojo (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular).**



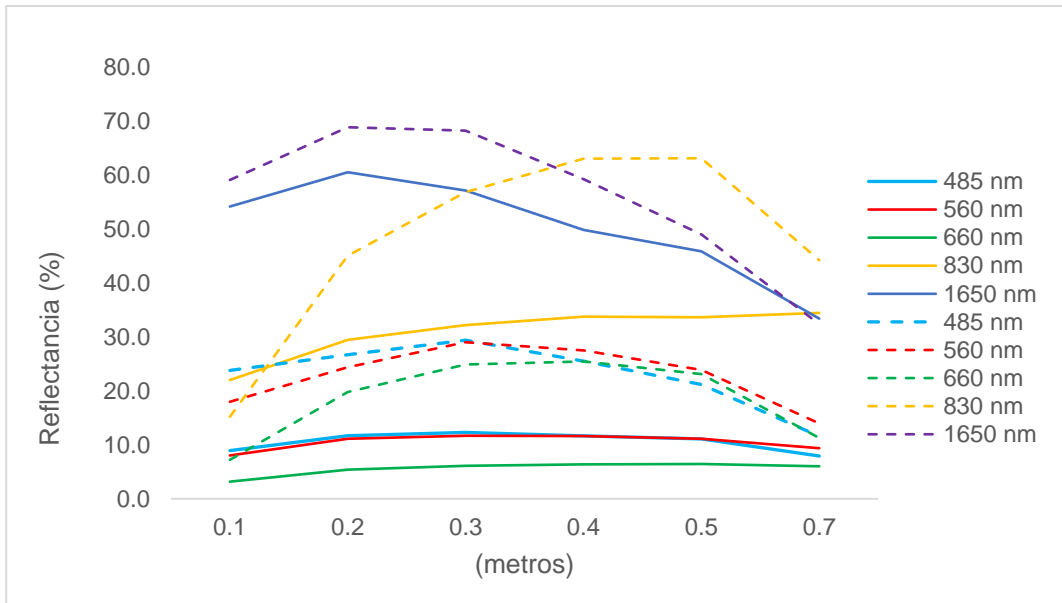
**Figura 13. Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color madera (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular).**



**Figura 14. Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color naranja (de 0.25 m x 0.25 m), línea continua (PC) y punteada (celular).**



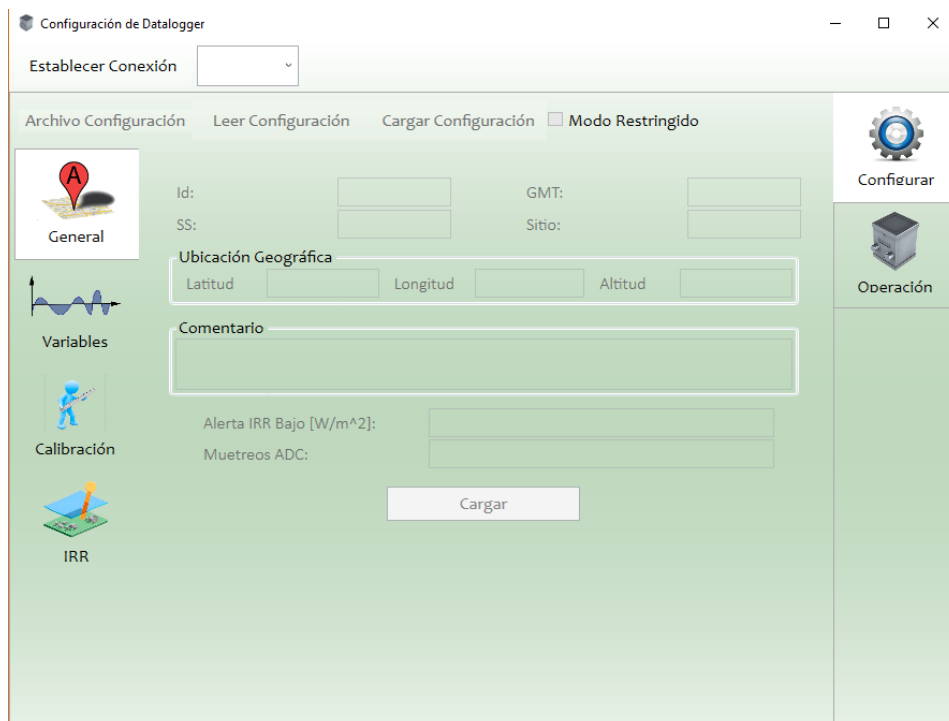
**Figura 15. Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color negro (de 0.25 m x 0.25 m), línea continúa (PC) y punteada (celular).**



**Figura 16. Respuesta de la reflectancia de diferentes frecuencias medida a varias alturas en un objeto color verde (de 0.25 m x 0.25 m), línea continúa (PC) y punteada (celular).**

### VI.1.2. Aplicación radiométrica

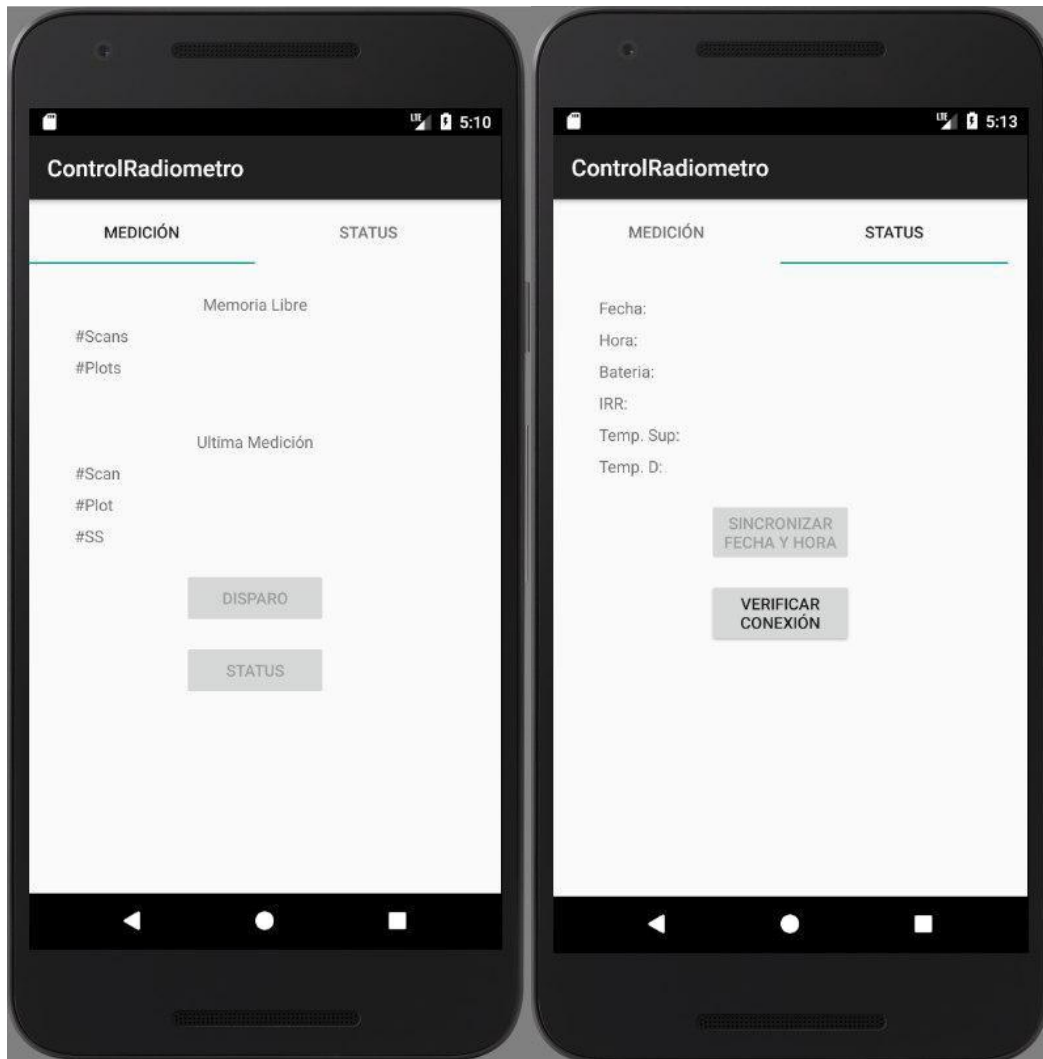
La aplicación se desarrolló en .NET con lenguaje de programación C# y tecnología Windows Presentation Foundation (WPF, por sus siglas en inglés); misma que cuenta con el menú general, variables, calibración, IRR, configuración y operación (Figura 17). La implementación de esta aplicación permitió agilizar y efficientizar el proceso, ya que en tiempo real fue posible consultar el dato de reflectancia, ángulo cenital solar, irradiancia, entre otros. Además, de contar con el botón de disparo en el dispositivo portátil.



**Figura 17. Vista de la aplicación para la toma de datos desde una PC.**

La toma de datos desde un dispositivo portátil como un celular (Figura 18) permite que el trabajo de muestreo sea realizado por una persona, ya que de lo contrario, se requiere una persona para dar el “disparo” y otra persona para que sostenga el radiómetro y con un flexómetro mida la respectiva “altura de medición”.





**Figura 18. Vista de la aplicación para la toma de datos desde celular.**

Por otro lado, el requisito para celulares con sistema operativo android es que cuenten con tecnología "OTG". Esta tecnología permite a los dos dispositivos comunicarse (datalogger y celular) y decidir cual trabajará como maestro y cual como esclavo, es decir, un dispositivo controla y el otro ejecuta; cabe señalar que si el celular no cuenta con dicha tecnología, puede conectarse un cable "usb" que la contenga.

Como se mencionó, los "scans" son agrupados en "plots" por lo que se debe conocer con anticipación el espacio disponible (memoria) en el datalogger. También es importante considerar el nivel de batería, ya que con el radiómetro empleado en

el presente experimento, cuando ésta estuvo por debajo de 10,000 mv, el equipo arrojó errores (Figura 19).



**Figura 19. Aplicación radiométrica en sistema Android mostrando datos de interés.**

Otro dato de utilidad en la aplicación es la IRR (irradianza) ya que si se toman datos cuando ésta es menor de  $50 \text{ W m}^{-2}$ , los resultados de reflectancia contendrán errores. Esto significa que las mediciones deberán efectuarse en días soleados para obtener resultados más confiables, por ello se recomienda realizar estas investigaciones en temporadas libres de nublados.

Así mismo, la aplicación realiza cálculos para que en en campo se visualicen resultados preliminares de reflectancia en la banda 485 nm, 560 nm, 660 nm, 830 y 1650 nm, lo que permite tomar la decisión de corregir en el momento en que se detecta que se ha tenido un error, ya que de lo contrario, la corrección consistiría en volver a tomar los datos una vez que se ha procesado en gabinete de modo que se trabaja con cambios drásticos en radianza, temperatura e incluso fechas.

## **VI.2. Diseño de la solución nutritiva**

En los tres tratamientos del experimento, se manejó la misma presión osmótica (0.72 atm.) con base en la Solución Nutritiva Universal de Steiner (Cuadro 6) por lo que en el Cuadro 7 se presentan los resultados del ajuste del nivel de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{SO}_4^-$  en función de  $\text{NO}_3^-$ . En los cuadros 8 al 13 se muestran los cálculos requeridos para preparar las soluciones nutritivas de los tratamientos 2 (06  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ ) y 3 (14  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ ) con sus presiones osmóticas ya igualadas con la solución “testigo” tratamiento 1 (12  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ ).

**Cuadro 7.** Cálculo para ajustar el nivel de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y de  $\text{SO}_4^{-2}$  en función del nivel de  $\text{NO}_3^-$ .\*

Nivel de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )		Aniones			Cationes					
		$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{-2}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$			
		mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>			mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					
01	Testigo	12	1	7	7	9	4			
		12+1+7 = 20			7+9+4 = 20					
		60%	5%	35%	35%	45%	20%	Se busca mantener la relación		
		60+5+35 = 100%			35+45+20 = 100%					
Nivel de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )		Aniones								
		$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{-2}$						
02	Nivel 14	14	0.75	5.25	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	+	$\text{SO}_4^{-2}$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$		
					01 + 07 = 08		----- -	01		
					20 - 14 = 06		----- -	X <sub>14 A</sub>	=	<b>0.75</b>
					$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	+	$\text{SO}_4^{-2}$	$\text{SO}_4^{-2}$		
					01 + 07 = 08		----- -	07		
					20 - 14 = 06		----- -	X <sub>14 B</sub>	=	<b>5.25</b>
		70%	3.75%	26.25%						Se busca mantener la relación
		70+3.75+26.25 = 100%								
04	Nivel 06	06	1.75	12.25	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	+	$\text{SO}_4^{-2}$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$		
					01 + 07 = 08		----- -	01		
					20 - 06 = 14		----- -	X <sub>06 A</sub>	=	<b>1.75</b>
					$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	+	$\text{SO}_4^{-2}$	$\text{SO}_4^{-2}$		
					01 + 07 = 08		----- -	07		
					20 - 06 = 14		----- -	X <sub>06 B</sub>	=	<b>12.25</b>
		30%	8.75%	61.25%						Se busca mantener la relación
		30+8.75+61.25=100%								

\* Recordar que la solución nutritiva de Steiner es una relación de aniones y una relación de cationes, entre otras características.

**Cuadro 8.** Cálculo para igualar las presiones osmóticas de dos soluciones nutritivas con relaciones mutuas de aniones diferentes, con nivel 12 y 06 de  $\text{NO}_3^-$ . \*

Aniones			Cationes		
<b>Solución nutritiva 1 (Testigo: con nivel 12 de <math>\text{NO}_3^-</math>)</b>					
$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )					
12.00	1.00	7.00	7.00	9.00	4.00
$\Sigma A = 12 + 1 + 7 = 20.00$			$\Sigma C = 7 + 9 + 4 = 20.00$		
mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> / valencia del ion = mM					
12.00 / 1	1.00 / 1	7.00 / 2	7.00 / 1	9.00 / 2	4.00 / 2
(mM)					
12.00	1.00	3.50	7.00	4.50	2.00
$\Sigma \text{mM} = 12 + 1 + 3.5 + 7 + 4.5 + 2 = 30.00$					
<b>PO = 30.00 x 0.024 = 0.72 atm</b>					
<b>Solución nutritiva 2 (con nivel 06 de <math>\text{NO}_3^-</math>)**</b>					
$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )					
6	1.75	12.25	7	9	4
$\Sigma A = 6 + 1.75 + 12.25 = 20.0$			$\Sigma C = 7 + 9 + 4 = 20.0$		
mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> / valencia del ion = mM					
6 / 1	1.75 / 1	12.25 / 2	7.00 / 1	9.00 / 2	4.00 / 2
(mM)					
6.00	1.75	6.125	7.00	4.50	2.00
$\Sigma \text{mM} = 6 + 1.75 + 6.125 + 7 + 4.5 + 2 = 27.375$					
<b>PO = 27.375 x 0.024 = 0.657 atm</b>					
<b>Factor para igualar las PO</b>					
(PO Sol. 4 = 0.657) / (PO Sol. 1 = 0.72) = <b>0.9125</b>					
6 / 0.9125	1.75 / 0.9125	6.125 / 0.9125	7 / 0.9125	4.5 / 0.9125	2 / 0.9125
6.5753	1.9178	6.7123	7.6712	4.9315	2.1917
$\Sigma \text{mM} = 6.5753 + 1.9178 + 6.7123 + 7.6712 + 4.9315 + 2.1917 = 29.9998$					
<b>PO = 29.9998 x 0.024 = 0.71999 atm</b>					
(PO Sol. 1 = 0.72) $\approx$ (PO Sol. 3 = 0.71999)					

\* Las soluciones nutritivas 1 (testigo: nivel 12 de  $\text{NO}_3^-$ ) y 2 (nivel 06 de  $\text{NO}_3^-$ ) difieren en su presión osmótica (PO) y en su relación aniónica, por eso el propósito de igualarlas.

\*\* El nivel de  $\text{NO}_3^-$  está en función del tratamiento.

**Cuadro 9.** Cálculo para igualar las presiones osmóticas de dos soluciones nutritivas con relaciones mutuas de aniones diferentes con nivel 12 y 14 de  $\text{NO}_3^-$ .\*

Aniones			Cationes		
<b>Solución nutritiva 1 (Testigo: con nivel 12 de <math>\text{NO}_3^-</math>)</b>					
$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
(mmolc L <sup>-1</sup> )					
12.00	1.00	7.00	7.00	9.00	4.00
$\Sigma A = 12 + 1 + 7 = 20.00$			$\Sigma C = 7 + 9 + 4 = 20.00$		
mmolc L <sup>-1</sup> / valencia del ion = mM					
12.00 / 1	1.00 / 1	7.00 / 2	7.00 / 1	9.00 / 2	4.00 / 2
(mM)					
12.00	1.00	3.50	7.00	4.50	2.00
$\Sigma \text{mM} = 12 + 1 + 3.5 + 7 + 4.5 + 2 = 30.00$					
<b>PO = 30.00 x 0.024 = 0.72 atm</b>					
<b>Solución nutritiva 3 (con nivel 14 de <math>\text{NO}_3^-</math>)**</b>					
$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
(mmolc L <sup>-1</sup> )					
14	0.75	5.25	7	9	4
$\Sigma A = 14 + 0.75 + 5.25 = 20.0$			$\Sigma C = 7 + 9 + 4 = 20.0$		
mmolc L <sup>-1</sup> / valencia del ion = mM					
14.00 / 1	0.75 / 1	5.25 / 2	7.00 / 1	9.00 / 2	4.00 / 2
(mM)					
14.00	0.75	2.625	7.00	4.50	2.00
$\Sigma \text{mM} = 14 + 0.75 + 2.625 + 7 + 4.5 + 2 = 30.875$					
<b>PO = 30.875 x 0.024 = 0.741 atm</b>					
<b>Factor para igualar las PO</b>					
(PO Sol. 2 = 0.741) / (PO Sol. 1 = 0.72) = <b>1.0291</b>					
14.00 / 1.0291	0.75 / 1.0291	2.625 / 1.0291	7.00 / 1.0291	4.50 / 1.0291	2.00 / 1.0291
13.6041	0.7287	2.5507	6.8020	4.3727	1.9434
$\Sigma \text{mM} = 13.6041 + 0.7287 + 2.5507 + 6.8020 + 4.3727 + 1.9434 = 30.0016$					
<b>PO = 30.0016 x 0.024 = 0.7200 atm</b>					
(PO Sol. 1 = 0.72) ≈ (PO Sol. 2 = 0.7200)					

\* Las soluciones nutritivas 1 (testigo: nivel 12 de  $\text{NO}_3^-$ ) y 3 (nivel 14 de  $\text{NO}_3^-$ ) difieren en su presión osmótica (PO) y en su relación aniónica, por eso el propósito de igualarlas.

\*\* El nivel de  $\text{NO}_3^-$  está en función del tratamiento.

**Cuadro 10.** Cálculo de las nuevas relaciones de aniones y cationes de las soluciones nutritivas, producto del ajuste de la presión osmótica en los tratamientos 2 y 3.

Aniones			Cationes		
<b>Solución nutritiva 1 (Testigo: con nivel 12 de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>					
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>
(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )					
<b>12.00</b>	<b>1.00</b>	<b>7.00</b>	<b>7.00</b>	<b>9.00</b>	<b>4.00</b>
<b>Solución nutritiva 2 (tratamiento con nivel 06 de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>					
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>
(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) calculados Cuadro 5					
6	1.75	12.25	7	9	4
(mM) calculados Cuadro 5					
6.00	1.75	6.125	7.00	4.50	2.00
(mM) calculados Cuadro 6					
6.5753	1.9178	6.7123	7.6712	4.9315	2.1917
(mM) (valencia del ion) = (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )*					
<b>6.5753</b>	<b>1.9178</b>	<b>13.4246</b>	<b>7.6712</b>	<b>9.863</b>	<b>4.3834</b>
<b>Solución nutritiva 2 (tratamiento con nivel 14 de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>					
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>
(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) calculados Cuadro 5					
14	0.75	5.25	7	9	4
(mM) calculados Cuadro 5					
14	0.75	2.625	7.00	4.50	2.00
(mM) calculados Cuadro 7					
13.6041	0.7287	2.5507	6.8020	4.3727	1.9434
(mM) (valencia del ion) = (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )*					
<b>13.6041</b>	<b>0.7287</b>	<b>5.1014</b>	<b>6.8020</b>	<b>8.7454</b>	<b>3.8868</b>

**Cuadro 11.** Preparación de la Solución 01 (Testigo con nivel 12 de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en función de las fuentes nutrimentales del Cuadro 6.

Sal	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					
Nitrato de potasio	3			3		
Nitrato de calcio	9				9	
Fosfato monopotásico (MKP)		1		1		
Sulfato de potasio			3	3		
Sulfato de magnesio			4			4
<b>Σ</b>	<b>12.00</b>	<b>1.00</b>	<b>7.00</b>	<b>7.00</b>	<b>9.00</b>	<b>4.00</b>

**Cuadro 12.** Preparación de la Solución 02 con ajuste de la presión osmótica (*Tratamiento con nivel 06 de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>*) en función de las fuentes nutrimentales del Cuadro 6.

Sal	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					
Nitrato de calcio	6.57				6.57	
Fosfato monopotásico (MKP)		0.265		0.265		
Sulfato de potasio			7.405	7.405		
Sulfato de magnesio			4.38			4.38
Superfosfato triple de calcio		1.645			3.29	
Ácido sulfúrico			1.635			
<b>Σ</b>	<b>6.57</b>	<b>1.91</b>	<b>13.42</b>	<b>7.67</b>	<b>9.86</b>	<b>4.38</b>
<b>Calculada (Cuadro 10)</b>	<b>6.5753</b>	<b>1.9178</b>	<b>13.4246</b>	<b>7.6712</b>	<b>9.863</b>	<b>4.3834</b>



**Cuadro 13.** Preparación de la Solución 03 con ajuste de la presión osmótica (*Tratamiento con nivel 14 de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>*) en función de las fuentes nutrimentales del Cuadro 6.

Sal	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					
Nitrato de potasio	4.9			4.9		
Nitrato de calcio	8.7				8.74	
Fosfato monopotásico (MKP)		0.72		0.7		
Sulfato de potasio			1.22	1.2		
Sulfato de magnesio			3.88			3.88
Σ	13.6	0.72	5.10	6.80	8.74	3.88
<b>Calculada (Cuadro 10)</b>	<b>13.6041</b>	<b>0.7287</b>	<b>5.1014</b>	<b>6.8020</b>	<b>8.7454</b>	<b>3.8868</b>

Es necesario mantener una misma presión osmótica de las soluciones nutritivas empleadas, ya que este factor altera de manera sustantiva el comportamiento de los diferentes nutrimentos que constituyen la solución nutritiva.

Este factor es más relevante cuando se utiliza un sistema hidropónico con el uso de sustratos y se estudian nutrimentos que se mueven por flujo de masas y difusión en la solución del suelo (Baca, *et al.*, 2016).

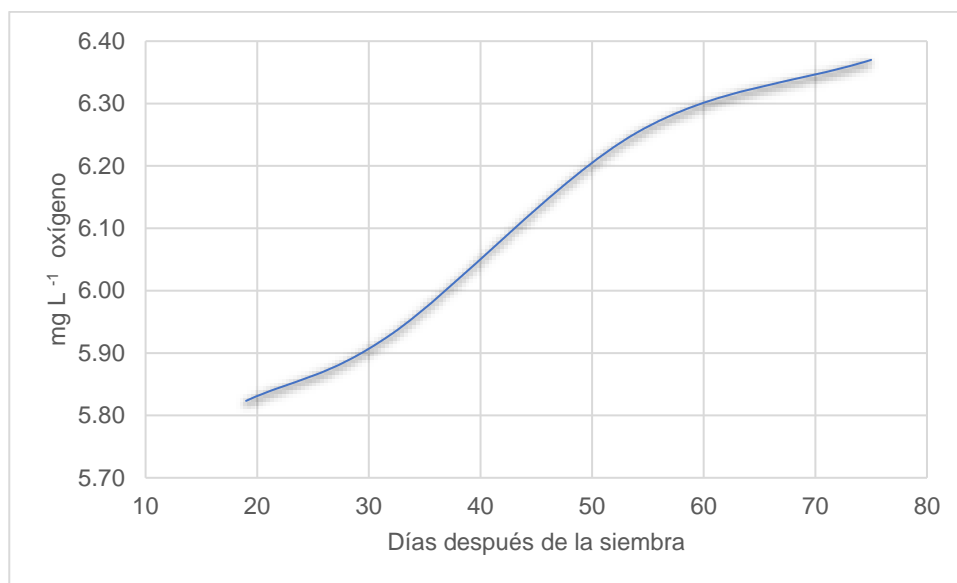
Otro punto a resaltar es el empleo de las unidades milimoles (mM) y milimoles de carga por litro mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>) ya que a diferencia de las partes por millón (ppm) las primeras, si permiten calcular el balance estequiométrico de la misma (Baca, *et al.*, 2016).

La variación en la cantidad de un anión, no sólo modifica la relación mutua de aniones presente en la Solución Universal de Steiner, también altera la relación mutua de cationes (cuadros 6 al 8) sin que por ello deje de ser la solución Steiner (Baca, *et al.*, 2016).

### VI.3. Concentración de oxígeno

El oxígeno en las unidades experimentales, se midió en cuatro fechas durante el ciclo de cultivo (Figura 20), mismo que en promedio se mantuvo entre 5.0 y 6.5

mg L<sup>-1</sup>. Esta cantidad cubre por completo los requerimientos de las plantas y tampoco fue excesivo y provocará la oxidación del Fe<sup>2+</sup> en Fe<sup>3+</sup>, ya que no se presentó una deficiencia del mismo (Baca, *et al.*, 2016).



**Figura 20. Concentración de oxígeno durante la fase experimental en el cultivo de frijol.**

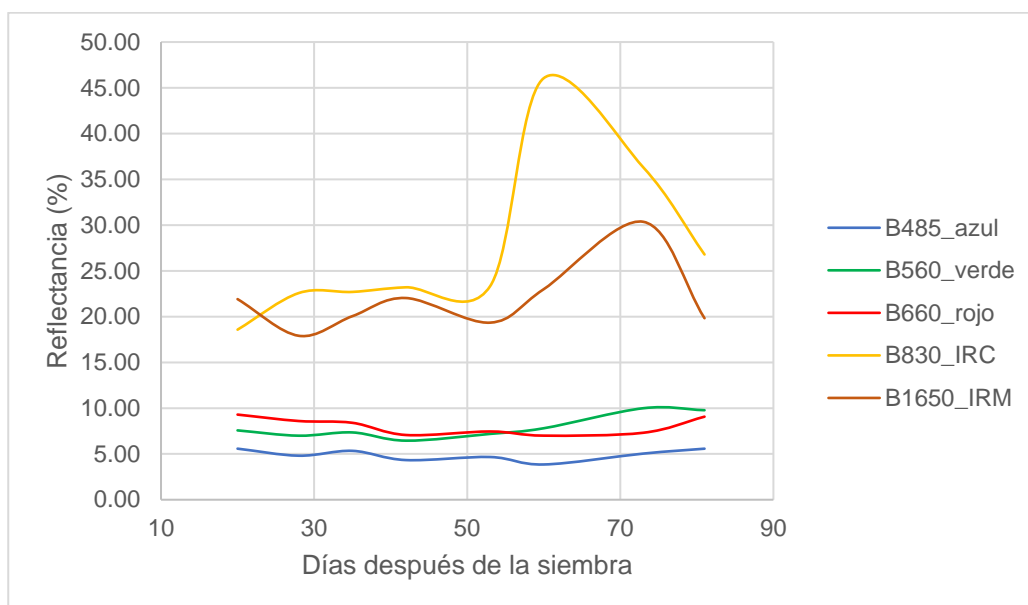
#### **VI.4. Variables respuesta**

##### **VI.4.1. Reflectancia durante ciclo del cultivo de frijol para cada tratamiento (06, 12 y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).**

La búsqueda de estimadores físicos del rendimiento de los cultivos ha sido el objetivo de diferentes investigaciones, dentro de éstas, las técnicas de percepción remota, que con base en la radiometría (en particular la reflectancia) proveen valiosa información con medidas instantáneas sobre el estado fisiológico de un cultivo (Gutiérrez *et al.*, 2004).

El estudio sobre la variación espacio-temporal de la reflectancia, la radiación solar en las bandas del espectro visible, infrarrojo y los índices de vegetación, constituyen enfoques para dar una mirada desde lo geográfico a los problemas

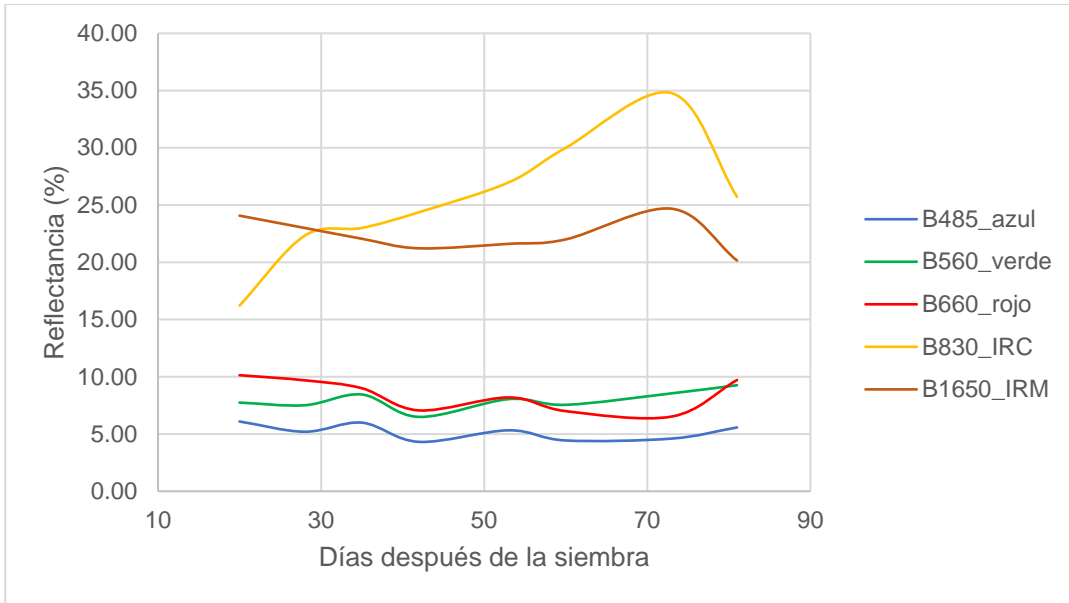
relacionados con la evaluación de riesgos de plagas y enfermedades, su incidencia, propagación y severidad. Estos estudios permitirán generar mapas espectrales para el seguimiento de problemas sanitarios, caracterizando los valores bajos de reflectancia en el espectro visible y muy altos en el infrarrojo cercano (Araque, 2009). En las figuras 21, 22 y 23 se muestra la respuesta espectral que tuvieron los tratamientos con 6, 12 y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup> respectivamente en las bandas azul, verde, rojo, infrarrojo cercano (ICR) e infrarrojo medio (IRM).



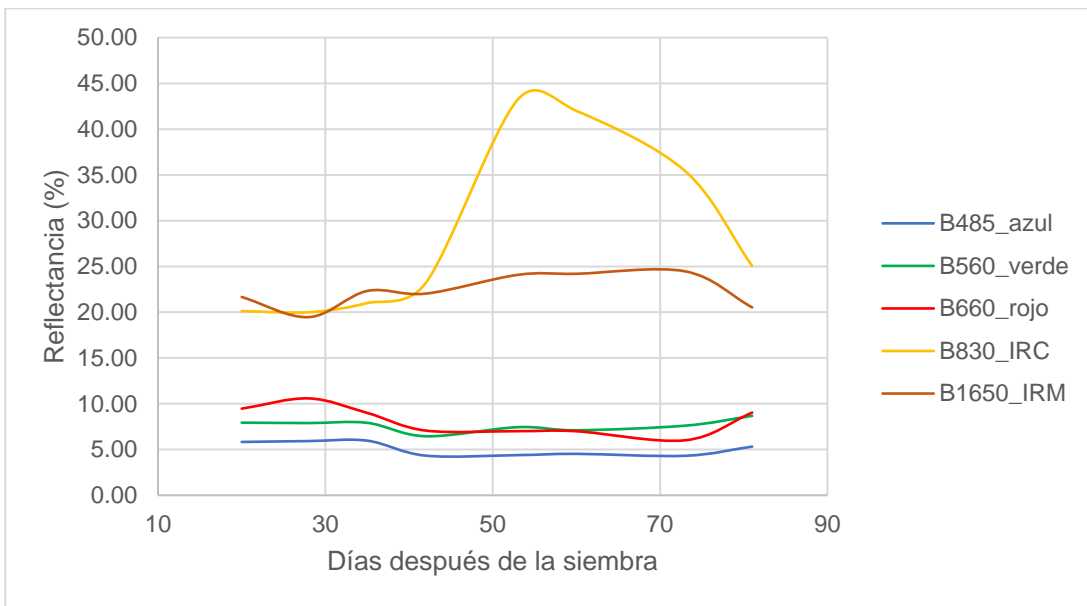
**Figura 21. Respuesta espectral del frijol bajo efectos de tratamiento con 6 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.**

La clorofila absorbe radiación roja y azul, lo que ocasiona que la reflectancia de luz por el cultivo sea pequeña en estas bandas. El pico de absorbancia de la banda azul no se usa para la estimación de la clorofila (Sims y Gamon, 2002). Así mismo la máxima absorbancia del rojo ocurre entre 660 y 680 nm (Currán, 1989).

La combinación de las luces verde y roja da el color amarillo, cuando las hojas mueren, los pigmentos de color café aparecen y la reflectancia y transmitancia en el rango de longitudes de onda entre 400 a 750 nm decrecen (Boyer *et al.*, 1988).



**Figura 22. Respuesta espectral del frijol bajo efectos de tratamiento con 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:**



**Figura 23. Respuesta espectral del frijol bajo efectos de tratamiento con 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:**

En los cuadros 14 a 18 se presentan los valores medios de la reflectancia por tratamiento que fueron obtenidos durante el ciclo de cultivo de frijol en cada una de las bandas, así como en los cuadros 19 al 23 se muestra el comportamiento que se

tuvo por banda durante el ciclo de cultivo es decir considerando los dds (días después de tratamiento).

**Cuadro 14.** Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda azul 485 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>				
<b>Tukey Agrupamiento</b>		<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>Tratamiento</b>
	A	5.0634	70	12
B	A	4.9664	70	14
B		4.7996	70	6

**Cuadro 15.** Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda roja 560 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>				
<b>Tukey Agrupamiento</b>		<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>TRAT</b>
A		7.9829	70	12
A		7.9366	70	6
A		7.7500	70	14

**Cuadro 16.** Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda roja 660 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>				
<b>Tukey Agrupamiento</b>		<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>Tratamiento</b>
A		8.3339	70	12
B		7.8441	70	6
B		7.8074	70	14

Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda IRC 830 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>			
<b>Tukey Agrupamiento</b>	<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>Tratamiento</b>
A	31.7321	70	14
B	28.7104	70	6
C	26.7391	70	12

**Cuadro 17.** Comparación de medias por el método Tukey al 5% de probabilidad por tratamiento para la banda IRM 1650 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>				
<b>Tukey Agrupamiento</b>		<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>TRAT</b>
	A	22.7624	70	14
B	A	22.1040	70	12
B		21.7889	70	6

**Cuadro 18.** Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda azul 485 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>				
<b>Tukey Agrupamiento</b>		<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>DDT</b>
	A	5.7660	30	11
	A	5.4900	30	58
	A	5.3097	30	4
	B	4.7933	30	29
C	B	4.6540	30	49
C		4.3197	30	18
C		4.2693	30	36

**Cuadro 19.** Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda verde 560 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>			
<b>Tukey Agrupamiento</b>	<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>DDT</b>
	A	9.2390	30 58
	A	8.7183	30 49
	B	7.9040	30 11
C	B	7.5630	30 29
C	B	7.4880	30 36
C	B	7.4657	30 4
C		6.8507	30 18

**Cuadro 20.** Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda roja 660 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>			
<b>Tukey Agrupamiento</b>	<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>DDT</b>
	A	9.6233	30 4
	A		
	A	9.2740	30 58
	A	9.1830	30 11
	B	7.5527	30 29
C	B	7.0020	30 36
C	B	6.7133	30 18
C		6.6177	30 49

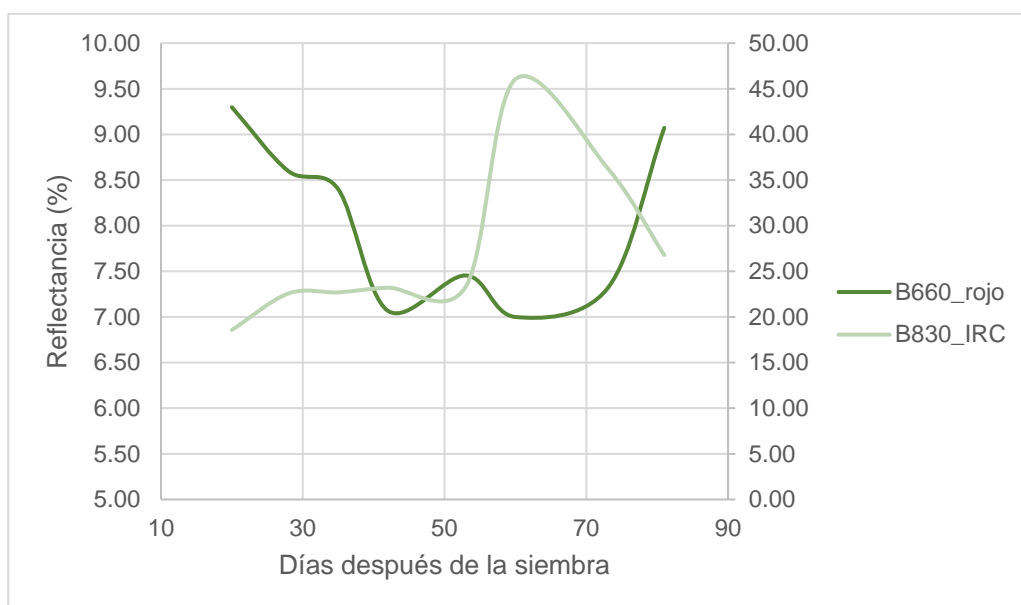
**Cuadro 21.** Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda IRC 830 nm.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>			
<b>Tukey Agrupamiento</b>	<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>DDT</b>
A	39.352	30	36
B	35.500	30	49
C	31.183	30	29
D	27.664	30	18
D	25.854	30	58
E	22.237	30	11

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	DDT
E	21.634	30	4

**Cuadro 22.** Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad de la reflectancia en plantas de frijol a través del ciclo de cultivo, en la banda IRM 1650 nm.

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	DDT
	A	26.5037	30 49
	B	23.0017	30 36
	B	22.5737	30 18
C	B	21.6800	30 29
C	B	21.4780	30 11
C		20.1693	30 58
C		20.1227	30 4

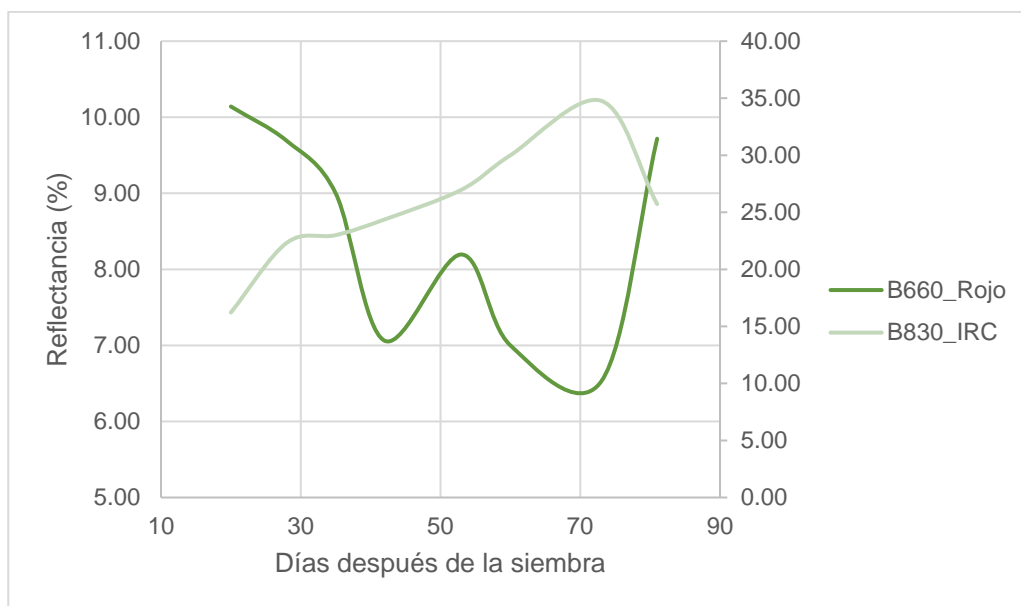


**Figura 24.** Respuesta espectral en la banda roja e infrarroja del tratamiento con  $6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1} \text{ NO}_3^-$  en el cultivo de frijol.

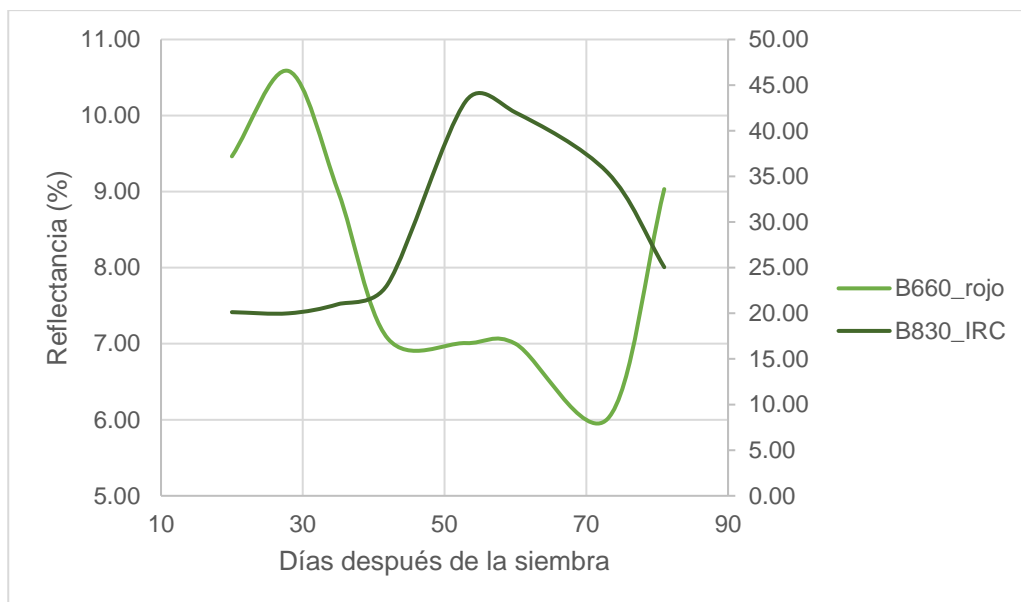
Cuando la hoja está enferma, la clorofila se degrada más rápido que los carotenos (Sanger, 1971). Este efecto genera un incremento de la reflectancia de la longitud de onda roja, debido a la reducción de la absorción de la clorofila. Carotenos



y xantófilos ahora son los dominantes en las hojas y éstas aparecen amarillas debido a que absorben la luz azul y reflejan la luz verde y roja (Araque, 2009). Esta respuesta puede apreciarse en las figuras 24, 25 y 26 para los tratamientos de 6, 12 y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup> respectivamente.



**Figura 25. Respuesta espectral en la banda roja e infrarroja del tratamiento con 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el cultivo de frijol.**



**Figura 26. Respuesta espectral en la banda roja e infrarroja del tratamiento con 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el cultivo de frijol.**

## Índice NDVI (Índice Vegetal de Diferencia Normalizada)

A mayor contraste entre las reflectancias de las bandas rojo e infrarrojo, mayor vigor vegetal presentará una cobertura vegetal, por su parte, los valores bajos de esta relación indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a cobertura sin vegetación como el suelo desnudo que reporta índices cercanos al cero (Soria, *et al.*, 1998). Puede establecerse como umbral crítico para coberturas vegetales un valor de NDVI (Índice Vegetal de Diferencia Normalizada) de 0.1 y para la vegetación densa de 0.5 (Soria y Granados, 2005).

Se encontró diferencia estadística significativa a los 20, 28, 53 y 60 días después de la siembra (dds), obteniendo el valor máximo del índice a los 60 dds en el tratamiento 06 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, (Cuadro 23) durante la etapa fenológica de fin de floración e inicio de llenado de vainas, resultados coincidentes con los encontrados por (Gutiérrez *et al.*, 2004) “el valor más alto de NDVI (Índice Vegetal de Diferencia Normalizada) se presentó en la etapa de floración-llenado de vaina y posteriormente conforme el cultivo llegó a su madurez fisiológica, disminuyó” (Figura 27 y Figura 28). Se observó que este índice puede ser un estimador del rendimiento biológico y agronómico del frijol.

**Cuadro 23.** Comportamiento del índice NDVI en el cultivo de frijol, por tratamiento.

<b>Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.</b>			
<b>Tukey Agrupamiento</b>	<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>TRAT</b>
A	0.57300	70	14
A	0.54871	70	6
B	0.51586	70	12

**Cuadro 24.** Comportamiento del índice NDVI a través del ciclo de cultivo.

Tratamiento	DDS 20 DDT 0 (Dos hojas verdaderas)	DDS 53 DDT 29 (38 hojas verdaderas)
	NDVI	NDVI
06 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.32 A B	0.51 A
12 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.23 A	0.53 A
14 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.35 B	0.70 B
Tratamiento	DDS 28 DDT 4 (Seis hojas verdaderas)	DDS 60 DDT 36 (40 hojas verdaderas)
	NDVI	NDVI
06 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.45 B	0.74 B
12 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.40 B	0.62 A
14 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.31 A	0.71 B
Tratamiento	DDS 35 DDT 11 (Diez hojas verdaderas)	DDS 73 DDT 49 (53 hojas verdaderas)
	NDVI	NDVI
06 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.46 A	0.66 A
12 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.39 A	0.68 A
14 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.40 A	0.71 A
Tratamiento	DDS 42 DDT 18 (18 hojas verdaderas)	DDS 81 DDT 58 (amarillamiento del follaje)
	NDVI	NDVI
06 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.53 A	0.49 A
12 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.54 A	0.45 A
14 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0.51 A	0.47 A

Cifras con letra diferente indican diferencias estadísticas significativas. DDS – Días después de la siembra; DDT- Días después del tratamiento.

De los resultados de NDVI con las diferentes concentraciones de N, se presentaron diferencias significativas en la fase vegetativa a los 20 DDS entre los tratamientos de 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (con un valor mayor de NDVI para este último). Así mismo a los 28 DDT entre las concentraciones de 6 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> y 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (que fueron similares y un valor de NDVI mayor) con respecto a la concentración de 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

A los 35 y 42 DDT respectivamente no se presentaron diferencias significativas en los tratamientos, todos fueron similares en términos de NDVI.

A los 53 DDT se presentaron diferencias significativas entre las concentraciones de 6 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (que fueron similares y con valores de NDVI menor) con respecto a la concentración de 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (que presentó un valor

de NDVI mayor), es decir alcanzó mayor “verdor” con respecto al resto de las concentraciones en este periodo.

Sin embargo, a los 60 DDT entre las concentraciones de 6 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (que fueron similares y con valores de NDVI mayores, correspondiente a un mayor “verdor”) con respecto a la concentración de 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

En los siguientes días de evaluación, a los 73 y 42 DDT respectivamente, no se presentaron diferencias significativas en los tratamientos, todos fueron similares en términos de NDVI (Cuadro 24).

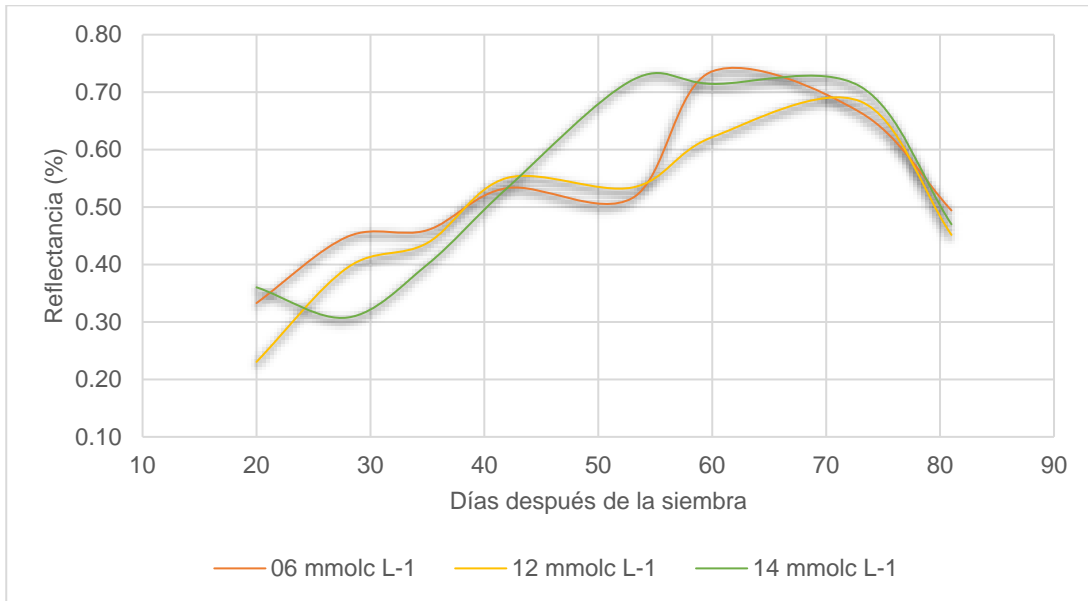


**Figura 27. Cultivo de frijol a los 81 dds (amarillamiento del follaje).**

Abdullah y Umer (2004) proponen que los daños de las enfermedades y las plagas pueden medirse por variaciones en el contenido de clorofila de las plantas, las cuales pueden ser analizadas por cambios en los patrones de las imágenes espectrales tomadas por los satélites. Estas técnicas usan imágenes multiespectrales para detectar las áreas bajo estrés.

Para que un índice pueda discriminar eficazmente los distintos tratamientos, debe presentar poca variabilidad entre las parcelas repetidas dentro de cada uno de los tratamientos y una alta variabilidad entre los tratamientos con diferentes dosis de nitrógeno (Isla y López, 2005).

Los índices de vegetación se utilizan para discriminar masas vegetales de alta actividad fotosintética de otras coberturas en fases iniciales, y se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación. El comportamiento espectral característico de la vegetación sana muestra un alto contraste entre las bandas visibles, especialmente en la banda roja (0.6 a 0.7 mm) y la del infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 mm) (Soria y Granados, 2005).



**Figura 28. NDVI en frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo.**

Las propiedades de la superficie de los cultivos hacen posible el seguimiento de la dinámica de la vegetación y su variabilidad espaciotemporal usando varias plataformas de sensores remotos. Los datos satelitales con base en la detección de la sanidad de la vegetación, dependen de la fuerte relación entre simples transformaciones de reflectancia en la banda roja e infrarroja y la absorción de la

radiación fosintéticamente activa de la superficie de la vegetación (Meer *et al.*, 2002).

#### VI.4.2. Número de hojas y área foliar en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo

Se encontró diferencia significativa en número de hojas, siendo el tratamiento con 06 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> el que presentó la media más alta (Cuadro 25) lo cual indica que el aporte de nutrimentos mediante la solución nutritiva con presión osmótica de 0.72 atm fue suficiente para que ello sucediera. Al tomar en cuenta el número de días después de aplicación de tratamientos para la comparación de medias de esta variable, se tiene que existe diferencia, alcanzando los mayores promedios a partir de los 29 ddt, periodo en el cual comienzan a aparecer los primeros botones florales (Cuadro 26 y Figura 29).

**Cuadro 25.** Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad para la variable número de hojas, por tratamiento.

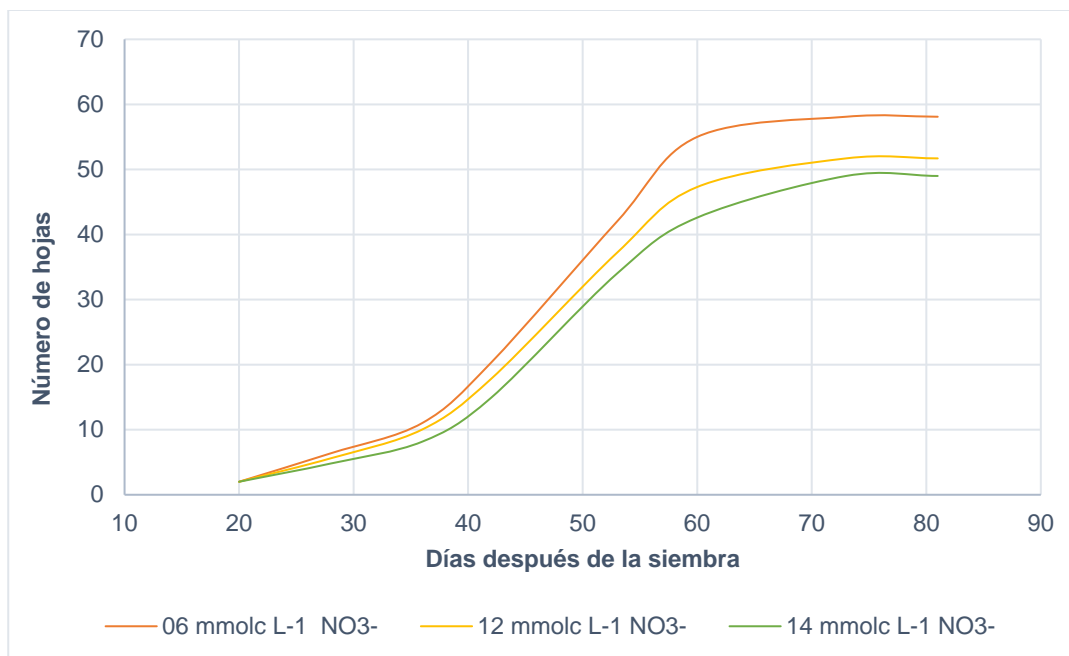
Tratamiento	Media	
06 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	35.843	A
12 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	31.614	B
14 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	28.914	B

Cifras con letra diferente indican diferencia estadística significativa

**Cuadro 26.** Prueba de comparación de Tukey al 5% de probabilidad para la variable número de hojas, por días después de tratamiento (ddt).

Ddt	Media	
58	52.933	A
49	52.933	A
36	48.300	A
29	37.733	B
18	17.667	C
11	9.733	D
4	5.567	D

Cifras con letra diferente indican diferencia estadística significativa



**Figura 29. Comportamiento del número de hojas en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo**

El modelo con mejor ajuste fue el que se presenta en la Ecuación 9, mismo que presentó un coeficiente de determinación de 0.97. Con respecto al área foliar no existen diferencias significativas entre tratamientos, por lo que se concluye que, durante el periodo experimental, el nivel de aporte de los nutrimentos en la solución nutritiva tuvo el mismo efecto sobre esta variable (Cuadro 27).

$$\text{Área} = a + bx_1 + cx_2 + dx_1x_2 \quad \text{Ec. 9.}$$

Donde:

Los coeficientes  $a = -1.1$ ;  $b = -0.2$ ;  $c = 1.12$ ;  $d = 0.53$

**Cuadro 27. Área foliar por tratamiento.**

Tratamiento	Área foliar (cm <sup>2</sup> )
06 mmolc L <sup>-1</sup>	2,346.067
12 mmolc L <sup>-1</sup>	1,966.511
14 mmolc L <sup>-1</sup>	2,103.774

### VI.4.3. Altura de la planta en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo

Con respecto al efecto de los niveles de nitrógeno y su efecto en la altura de las plantas, puede interpretarse que el nivel de 06 mmolc L<sup>-1</sup> resulta suficiente bajo el sistema hidropónico que se empleó (Figura 30 y Cuadro 28). Quizá por una combinación de factores, como el contacto permanente de las raíces con la solución nutritiva.

Es claro que la respuesta a los diferentes niveles de nitrógeno se vea reflejada en los datos que corresponden a “días después del trasplante (DDT)” al ser la variedad Flor de Mayo de semiguía y su crecimiento inducirse en dirección acropétala.

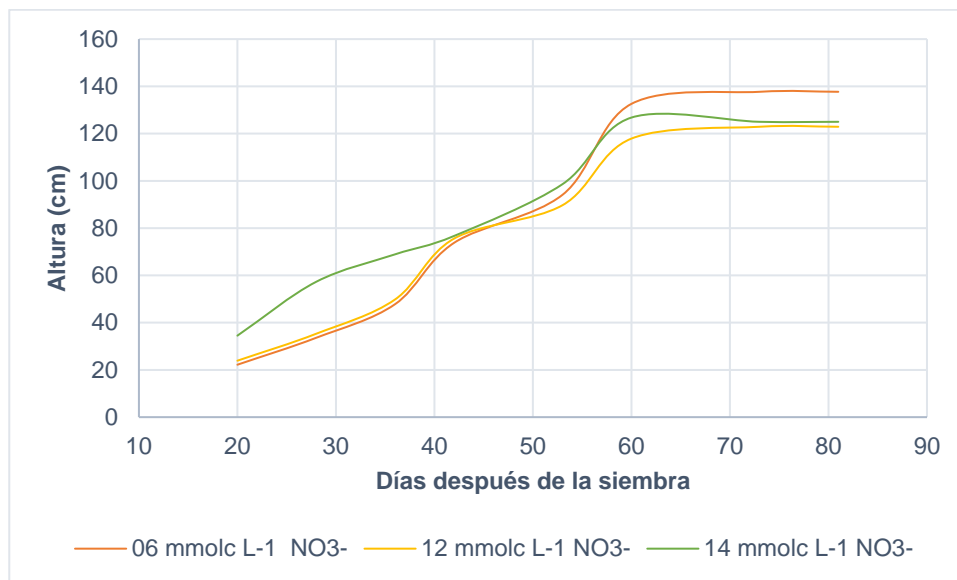


Figura 30. Comportamiento de la altura de planta de frijol durante su ciclo fenológico.

Cuadro 28. Prueba de comparación de medias para la variable altura del frijol por tratamiento

Tratamiento	Media	
06 mmolc L <sup>-1</sup>	93.900	A B
12 mmolc L <sup>-1</sup>	87.729	B



Tratamiento	Media	
14 mmolc L <sup>-1</sup>	96.900	A
Cifras con letra diferente indican diferencia estadística significativa		

Se encontró que no obstante de no existir diferencia significativa entre tratamientos, si se tienen al comparar las fechas de muestreo; la prueba de comparación de medias indica que en los muestreos a los 36, 49 y 58 días después de la aplicación de tratamientos se obtuvo la mayor altura (Cuadro 29) lo cual coincide con la etapa fenológica de floración.

**Cuadro 29.** Prueba de comparación de medias para la variable altura de plantas de frijol por días después de tratamiento (ddt).

Ddt	Media	
58	128.533	A
49	128.533	A
36	125.767	A
29	94.133	B
18	75.367	C
11	55.500	D
4	42.067	D
Cifras con letra diferente indican diferencia estadística significativa		

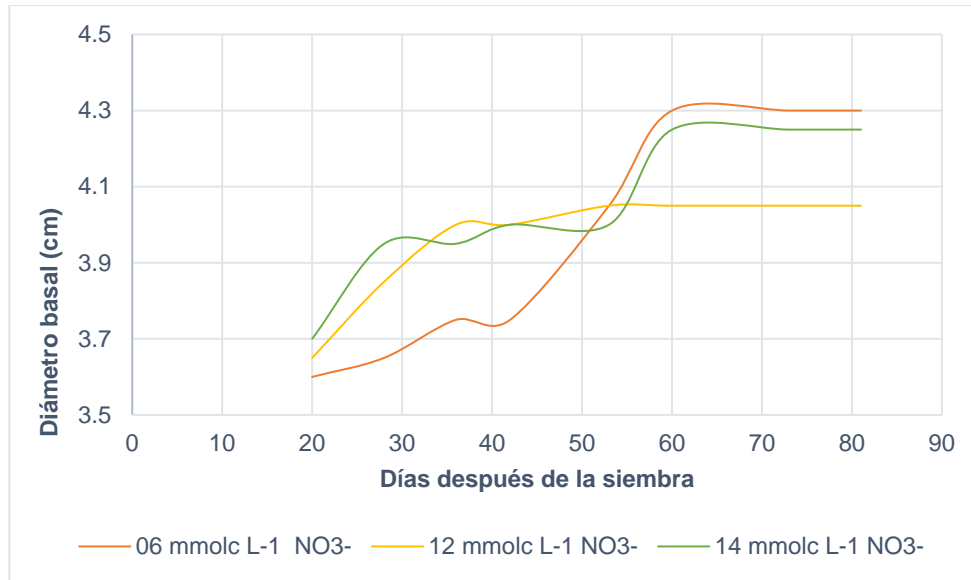
#### **VI.4.4. Diámetro de tallo en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo**

En la variable diámetro de tallo por tratamiento no se encontró diferencia estadística significativa (Cuadro 30), sin embargo, tomando en consideración los días después de tratamiento se observa que el mayor diámetro se alcanzó a los 36 ddt y se mantuvo constante hacia el final del ciclo de cultivo (Cuadro 31 y Figura 31).

**Cuadro 30.** Prueba de comparación de medias para la variable diámetro de tallo por tratamiento (ddt).

Tratamiento	Media	
06 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	4.01429	A
12 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	4.00714	A
14 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	4.09286	A

Cifras con letra diferente indican diferencia estadística significativa



**Figura 31.** Diámetro de tallo en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo.

**Cuadro 31.** Prueba de comparación de medias para la variable diámetro de tallo por días después de tratamiento (ddt).

Ddt	Media	
36	4.20000	A
49	4.20000	A
58	4.20000	A
29	4.03333	A B
18	3.91667	B
11	3.90000	B
4	3.81667	B

Cifras con letra diferente indican diferencia estadística significativa

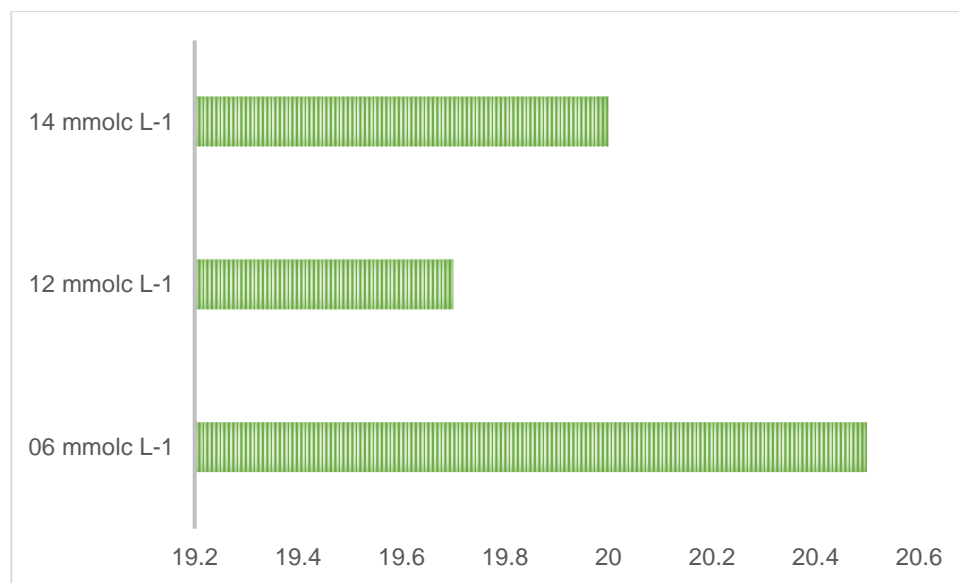
#### VI.4.5. Número de vainas en el cultivo de frijol var. Flor de mayo durante el ciclo de cultivo

Los resultados obtenidos (Cuadro 32 y Figura 32) son superiores a los reportados por (Gutiérrez *et al.*, 2004) quien alcanzó 410 vainas con 25 plantas por metro cuadrado, lo que da 16.4 vainas por metro cuadrado. Esto puede deberse al manejo de la solución nutritiva, ya que “en los cultivos hidropónicos se tiene un control del abastecimiento de nutrimentos a la planta, ya que ésta los obtiene a partir de una solución nutritiva balanceada” (Schwarz, 1995; García *et al.*, 2003). Así como el abastecimiento de oxígeno al sistema radical.

**Cuadro 32.** Prueba de comparación de medias para la variable número de vainas.

Tratamiento	Media	
06 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	20.5	A
12 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	19.7	A
14 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	20.0	A

Cifras con letra diferente indican diferencia estadística significativa



**Figura 32.** Número de vainas por tratamiento en el cultivo de frijol var. Flor de mayo.

## VII. CONCLUSIONES

La respuesta espectral de frijol con diferentes niveles de nitrógeno (06, 12 y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a 0.72 atm de presión osmótica, se evaluó con base al NDVI, donde:

A los 53 DDT se presentaron diferencias significativas entre las concentraciones de 6 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> con respecto a la concentración de 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, que presentó un valor de NDVI mayor, es decir alcanzó mayor “verdor” con respecto al resto de las concentraciones en este periodo.

En términos de crecimiento y desarrollo también se presentaron las siguientes respuestas:

Con relación al número de hojas el tratamiento de 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> son mayores y estadísticamente iguales y diferentes con respecto al tratamiento de 6 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. En altura de planta son estadísticamente diferentes entre los tratamientos 12 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> y 14 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, sin embargo, el tratamiento 6 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> es similar a ambos. En diámetro de tallo y número de vainas no se presentaron diferencias significativas.

## VIII. RECOMENDACIONES

La tecnología de percepción remota (en particular la reflectancia) es una herramienta que permite realizar un análisis confiable del monitoreo de cultivos y recursos naturales en general.

Se pueden manejar dosis más pequeñas de las fuentes nutrimentales sin detrimento en la mayoría de las variables respuestas evaluadas, si existe un contacto permanente de la raíz con la solución nutritiva, por el sistema empleado.

## IX. LITERATURA CITADA

- Abdullah, A., y Umer M. 2004. Applications of Remote Sensing in Pest Scouting: Evaluating Options and Exploring Possibilities. En: proceedings of 7th ICPA, Mineapolis, MN. USA. 25-28.
- Aguilar, R.M.R. 2011. Identificación de la deficiencia de magnesio en pepino mediante espectroradiometría. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. 82 p.
- Aguilar, R.N. 2015. Percepción remota como herramienta de competitividad en la agricultura. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 6:399-405.
- Apaez, B.P., Escalante E.J.A., Rodríguez G.M.T. 2011. Crecimiento y rendimiento del frijol chino en función del tipo de espaldera y clima. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 13:307-315.
- Apaez, B.P., Escalante E.J.A., Rodríguez G.M.T. 2011. Crecimiento y rendimiento del frijol chino en función del tipo de espaldera y clima. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 13:307-315.
- Araque, T.L. y Jiménez A. 2009. Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. Palmas. 30:63-79.
- ASD. 1999. Analytical Spectral Devices. Inc. Technical guide. 3ra ed. Boulder, Colorado. USA.
- Asrar, G., E.T. Kanemasu, and M. Yoshida. 1985. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. Remote Sens. Environ. 17:1-11.
- Baca, C.G.A., Rodríguez C.E, Quevedo N.A. 2016. La solución nutritiva en hidroponía. México. 240 p.
- Baret, F., I. Champion, G. Guyot, and A. Podaire, 1987. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. Remote Sens. Environ. 22:367-378.
- Bidwell, R.G. 2002. Fisiología vegetal. AGT Editor. México, D.F. 784 p.

- Best, R.G., and J.C. Harian. 1985. Spectral estimation of green leaf area index of oats. *Remote Sens. Environ.* 17:27-36.
- Boyer, M., Miller J., Belanger M., Hare E. 1988. Senescence and spectral reflectance in leaves in Northern Pin Oak (*Quercus palustris* Muench). *Remote Sens. Environ.* 25:71-87.
- Bloom, A.J., P.A. Meyerhoff., A.R. Taylor and T.L. Rost. 2003. Root development and absorption of ammonium and nitrate the rhizosphere. *Jornal of Plant Growth Regulation* 21:416-431.
- Carter, G.A. y B.A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. *J. Environ. Qual.* Vol. 31:1424-1432.
- Curran, P.J. 1989. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens. Environ.* Vol. 30:271-278.
- Curran, P.J., J.L. Dungan, and D.L. Peterson. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves reflectance spectrometry testing the Kolaly and Clark methodologies. *Remote Sens. Environ.* 76:349-359.
- Debouck, D., y R. Hidalgo. 1985. Morfología de la planta de frijol común. CIAT, Cali, Colombia. pp:7-47.
- De la Cruz, D.J.A. 2008. Reflectancia e índices espectrales en pimiento para el diagnóstico nutrimental de nitrógeno. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. 79 p.
- Dawson, T.P. 2000. The potential for estimating chlorophyll content from a vegetation canopy using the medium resolution imaging spectrometer (MERIS). *Int. J. Remote Sens.* 21:2043-2051.
- Dusek, D.A., R.D. Jackson, and J.T. Musick. 1985. Winter wheat vegetation index calculated from combinations of seven spectral bands. *Remote Sens. Environ.* 18:225-267.
- Demetriades-Shah, T.H., M.D. Steven, and J.A. Clark. 1990. High resolution derivate spectra in remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 33:55-64.
- Elvidge, C.D., and Z. Chen. 1995. Comparison of broad band and narrow band red and near-infrared vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 54:38-48.

- Escalante, E.J.A., M.T. Rodríguez G., y Y. Escalante E. 2014. Tasa de crecimiento de biomasa y rendimiento de frijol en función del nitrógeno. *Ciencia y Tecnología*. 2:1-8.
- Fernández, S., D. Vidal., E. Simón and L. Solé-Sugrañes. 1994. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *Int. J. Remote Sens.* 15:1867-1884.
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Fecha de consulta: agosto del 2017.
- Favela, C.E., Preciado, R.P., y Benavides M.A. 2006. UAAN. 148 p.
- Gamon, J.A., J. Peñuelas, and C.B. Field. 1992. A narrow-wavelength spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.* 41:35-44.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía de la UNAM. 252 p.
- García, E.A., Kohashi S.J., Baca C.G.A, Escalante E.J.A.S. 2003. Rendimiento y asignación de materia seca de una variedad de frijol en un sistema hidropónico y suelo. *Terra Latinoamericana*. 21-4: 471-480.
- Gitelson, A.A., and M.N. Merzlyak. 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.* 18: 2691-2697.
- González, M. 2010. Escala de las radiaciones electromagnéticas. <https://fisica.laguia2000.com/energia/escala-de-las-radiaciones-electromagneticas>. Fecha de consulta: 01 de noviembre del 2017.
- Gutiérrez, R.M., Escalante E.J.A., Rodríguez, G.M.T., Reynolds, Mathew, P. 2004. Índices de reflectancia y rendimiento de frijol con aplicaciones de nitrógeno. *Terra Latinoamericana*. 22:409-416.
- Horler, D.N.H., M. Dockray, J. Barber, and A.R. Barringer .1983b. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content. *Adv. Space Res.* 3:323-277.

- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Pecuarias y Forestales). 2013. Recomendaciones técnicas para obtener mayor productividad del cultivo de frijol en la Llanura Costera de Nayarit. Folleto técnico. 30 p.
- Isla, R., y López L.R. 2005. Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz. XI Congreso Nacional de Teledetección. Tenerife.
- Jago, R.A. M.E.J. Cutier, and P.J. Currán. 1999. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. *Remote Sens. Environ.* 68:217-224.
- Jones, G.H. 1983. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press. Londres Inglaterra. 323 p.
- Jones, G.H. 1986. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press. Londres, Inglaterra, 323 p.
- Jones, M.J. 1997. *Organic Chemistry*. [www.nortonandcompany.com](http://www.nortonandcompany.com), New York. *Ecology* 50: 663-666.
- Lawlor, D.W. 1993. *Photosynthesis: molecular, physiological and environmental processes*. Longman Scientific and Technical. Hong Kong. 318 p.
- Major, D.J., F. Baret y G. Guyot. 1990. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *Int. J. Remote Sens.* Vol. 11:727-740.
- Malthus, T.J., Madeira A.C. 1993. High resolution spectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by *Botrytis fabae*. *Remote Sens. Environ.* 45:107-116.
- Mashner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press. Londres Inglaterra. 754 p.
- Meer, F., and S. Jong. 2002. *Imaging spectrometry. Remote Sensing and Digital Image Processing*. Kluwe Academic Publishers. 4: 111-197.
- Monje, O., and B. Budgee. 1992. Inherent limitations of nondestructive chlorophyll meters: a comparison of two types of meters. *HortScience* 27:69-71.



- Meier, U. 2001. Estadios de plantas mono y dicotiledóneas. BBHC Monografía. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para la Agricultura y Silvicultura. 149 p.
- Osborne, S.L., J.S. Schepers, D.D. Francis, and M.R. Schlemmer. 2002. Use of spectral radiance to estimate in-season biomass and grain yield in nitrogen and water stressed corn. *Crop Sci.* 42:165-171.
- Otterman, J., T. Brakke, and J. Smith. 1995. Effects of leaf-transmittance versus leaf-reflectance on bi-directional scattering from canopy/soil Surface: an analytical study. *Remote Sens. Environ.* 54:49-60.
- Peñuelas, J., J.A. Gamon, A.L. Freeden, J. Merino, and C.B. Field. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen water-limited sunflower leaves. *Remote Sens. Environ.* 48:135-146.
- Peñuelas, J., Isla, R. Fuella, I. y Araus, J.L. 1997. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley, *Crop Sci.* 37:198-202.
- Pinter, P.J., G. Zipoli, G. Maracchi, and R.J. Reginato. 1987. Influence of topography and sensor view angles on NIR/red ratio and greenness vegetation indices of wheat. *Int. J. Remote Sens.* 8:953-957.
- Porra, R.J., W.A. Thompson and P.E. Kriedemann. 1989. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochim. Biophys. Acta* 975: 384-394.
- Rodríguez, G.R., D. Jasso C., C. Rojas P., y C.A. Salas H. 2003. Rendimiento de frijol en sistemas agrícolas que aprovechan escurrimientos. *UAAN.* 248-254.
- Rosenberg, N.J., Blad, B. y Verma S. 1983. *Microclimate the Biological Environment.* Jones Wiley Sons. New York. EUA. 495 pp.
- Rouse, J.W., R.H. Hass, J.A. Schell and D.W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS symposium, *NASA-SP Vol. 1:309-317.*
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2015. *Agenda técnica agrícola Sinaloa.* 242 p.

- Salisbury, B.F. y C.W. Ross. 1999. Fisiología vegetal. Grupo Editorial Iberoamericana. México, D.F. 759 pp.
- Sanger, J.E. 1971. Quantitative investigation of leaf pigments from their inception in buds through autumn coloration to decomposition in falling leaves. *Ecology*. 52:1075-1089.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2015. Avances de la producción agrícola.  
[http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do).
- Fecha de consulta: agosto de 2017.
- SIAP-SAGARPA (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera-Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2016. Atlas Agroalimentario. México. 231 p.
- Sims, D.A. and J. A. Gamon. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and development stages. *Remote Sens. Environ.* 81:337-354.
- Steiner, A.A., 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*. 15: 134-154.
- Steiner, A.A. 1984. "The universal nutrient solution". ISOSC. Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. Lunteren, Holland. pp.: 633-649.
- Schwarz, M. 1975. "Guide to commercial hydroponics" Israel Universities Press. Jerusalem, Israel. 136 p.
- Soria, R. J., C. Ortiz; F. Islas y V. Volke. 1998. Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de recursos naturales. Experiencias en México. Publicación especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo, México.
- Soria, R.J., y Granados R.R. 2005. Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. *Ciencia Ergo Sum*. 12: 167-174. Universidad Autónoma del Estado de México.

- Taiz L. and Zeiger E. 2002. *Plant Physiology*. 2<sup>a</sup> ed. Sinauer Associates Sunderland, MA. The Benjamin/Cummings Company. Inc. California. USA.
- Thenkaball, P.S., Smith R.B., and D.E. Pauw. 2002. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 68:607-671.
- United States Department of Agriculture. 1962. "Saline and alkali soils". *Diagnosis and improvement of alkali soils*". Agriculture Handbook No. 60. 160 p.
- Verthults, N., Govaerts, B., Fuentes P.M. 2010. Sensor portátil GreenSeeker para la medición del índice NDVI: una herramienta para la evaluación integral de las prácticas agronómicas. Parte A: conceptos y estudios de caso. CIMMYT.
- Woodley, J. 1971. Reflectance y transmittance of light by leaves. *Plant physiology*. 47:656-662.
- Zhao, D., K.R. Reddy, V.G. Kakani and V.R. Reddy. 2005c. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *European Journal of Agronomy* 22(4): 391–403.