

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**USO DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO COMO
ALTERNATIVA PARA EVALUAR EL ESTADO NUTRICIONAL
DE UNA PLANTACIÓN DE *Gmelina arborea* Roxb, SAN
CARLOS, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

CINTHIA MARÍA RAMÍREZ MESÉN

CARTAGO, COSTA RICA

SEPTIEMBRE, 2019

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**USO DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO COMO
ALTERNATIVA PARA EVALUAR EL ESTADO NUTRICIONAL
DE UNA PLANTACIÓN DE *Gmelina arborea* Roxb, SAN
CARLOS, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

CINTHIA MARÍA RAMÍREZ MESÉN

CARTAGO, COSTA RICA

SEPTIEMBRE, 2019

USO DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO COMO ALTERNATIVA PARA EVALUAR EL ESTADO NUTRICIONAL DE UNA PLANTACIÓN DE *Gmelina* *arborea* Roxb, SAN CARLOS, COSTA RICA

Cinthia Ramírez Mesén¹

RESUMEN

La melina es una especie altamente utilizada para reforestación, sin embargo, no se suele fertilizar correctamente, para lo cual es importante conocer el estado nutricional de las plantaciones. Tradicionalmente se realizan análisis químicos foliares y/o del suelo, lo cual demanda tiempo y dinero. El presente estudio tiene como objetivo validar el uso de un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) como una opción para evaluar el estado nutricional en *Gmelina arborea* Roxb. Se establecieron ocho puntos de muestreo y en cada uno se tomaron muestras foliares y de suelo; se midió diámetro, altura y valores de contenido relativo de clorofila, este último mediante un SPAD. Con el VANT se tomaron imágenes RGB y multiespectrales. Se obtuvo valores bajos en los índices de vegetación, principalmente en GLI y NGRDI. La vigorosidad de la plantación es baja (0,21-0,39). Se muestra una correlación alta y positiva entre NGRDI (marzo: $R=0,82$, mayo: $R=0,73$) versus el contenido relativo de clorofila. La relación entre índices de vegetación y volumen es alta y positiva para el NDVI ($R=0,75$), GLI ($R=0,79$) y NRGDI ($R=0,84$), los dos últimos de mayo. El nitrógeno obtuvo una correlación alta y positiva con el NGRDI ($R=0,80$). El volumen y contenido relativo de clorofila presentan correlaciones moderadas (marzo: $R=0,54$, mayo: $R=0,63$). Por otro lado, las relaciones entre volumen y contenido relativo de clorofila versus nitrógeno no siguen un patrón, debido a las variaciones en el contenido de nitrógeno. El uso de imágenes de VANT para el cálculo de índices de vegetación es una herramienta útil que permite obtener una referencia sobre el estado de las plantas, mas no sustituye los métodos tradicionales de análisis nutricional.

Palabras clave: Melina, VANT, Índices de vegetación, Nutrición forestal, Vigor vegetal.

ABSTRACT

Melina is a highly used specie for reforestation, however, it is not usually fertilized correctly, for which it is important to know the nutritional status of the plantations. Foliar and soil analyzes are commonly performed, which requires time and money. The objective of this study is to validate the use of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) as an option to assess the nutritional status of *Gmelina arborea* Roxb. Eight sampling points were established, in each one foliar and soil samples were taken, and diameter, height and chlorophyll content values were measure, the latter using a SPAD. RGB and multispectral images were taken with the UAV. The results of vegetation indices were low, mainly in GLI and NGRDI. The plantation vigor was low (0,21-0,39). A high correlation between NGRDI (March: $R=0,82$, May: $R=0,73$) versus relative chlorophyll content is shown. The relationship between vegetation indices and volume is high and positive for NDVI ($R=0,75$), GLI ($R=0,79$) and NRGDI ($R=0,84$), the last two of May. Nitrogen obtained a positive and high correlation with NGRDI ($R=0,80$). The volume and relative chlorophyll content have moderate correlations (March: $R=0,54$, May: $R=0,63$). On the other hand, the relationships between the volume and the relative content chlorophyll versus nitrogen do not follow a pattern, due to the variations in nitrogen content. The use of UAV images for the calculation of vegetation indices is a useful tool that allows obtaining a reference on the nutritional status of plants, however, this does not replace the traditional methods of nutritional analysis.

Keywords: Melina, UAV, Vegetation indices, Forest nutrition, Plant vigour.

¹Ramírez-Mesén, C. (2019). *Uso de un vehículo aéreo no tripulado como alternativa para evaluar el estado nutricional de una plantación de Gmelina arborea Roxb, San Carlos, Costa Rica* (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Forestal). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

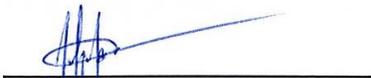
Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por M.Sc. Mario Guevara Bonilla, Ph.D. Edwin Esquivel Segura y M.Sc. Andrea Tapia Arenas como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Mario Guevara Bonilla M.Sc.
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Director de tesis



Edwin Esquivel Segura Ph.D.
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Lector



M.Sc. Andrea Tapia Arenas
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Lectora



Dorian Carvajal Vanegas M.Sc.
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Coordinador Trabajos Finales de
Graduación



Cinthia María Ramírez Mesén
Estudiante

DEDICATORIA

Dedicado a:

Dios.

Mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto Silvicultura Intensiva y de Precisión Para el Aumento de la Productividad de Plantaciones Forestales, por brindarme la oportunidad y los recursos que me permitieron realizar mi trabajo final de graduación.

A Mario Guevara Bonilla, por ser mi guía en este proyecto y orientarme con paciencia, por su comprensión y por toda la enseñanza transmitida.

A Edwin Esquivel Segura, por su colaboración, los consejos, su disposición para colaborar y por el conocimiento aportado.

A Andrea Tapia Arenas, por toda la valiosa ayuda brindada para poder llevar a cabo este estudio y por su constante disposición.

A la Escuela de Ingeniería Forestal, por la formación académica y por ser más que un lugar de estudio.

A todos los que, directa o indirectamente, han sido parte de este proceso.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE CUADROS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
INTRODUCCIÓN	1
MATERIAL Y MÉTODOS	3
Sitio de estudio.....	3
Recolección de datos.....	4
Análisis estadístico de la información	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
Análisis químico foliar y de suelo.....	9
Contenido relativo de clorofila y crecimiento volumétrico	11
Índices de vegetación	12
Vigor vegetal.....	14
Correlación de las variables	17
CONCLUSIONES	25
RECOMENDACIONES.....	26
REFERENCIAS	27

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados del análisis químico foliar para cada punto de muestreo, marzo y mayo, 2019.	9
Cuadro 2. Resultados del análisis químico del suelo para cada punto de muestreo, marzo, 2019.....	10
Cuadro 3. Valores promedio de contenido relativo de clorofila, diámetro, altura y volumen por árbol para cada punto de muestreo, marzo y mayo, 2019.	11
Cuadro 4. Índices de vegetación promedio por punto de muestreo, marzo y mayo, 2019.....	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sitio de estudio, propiedad de Xiomara Murillo Phillips, Pital de San Carlos, Costa Rica.	3
Figura 2. Mapa de vigor vegetal correspondiente al Green Leaf Index (GLI) de marzo y mayo, 2019.	14
Figura 3. Mapa de vigor vegetal correspondiente al Normalized Green-Red Difference Index (NGRDI) de marzo y mayo, 2019.	15
Figura 4. Mapa de vigor vegetal correspondiente al Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y al Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) de marzo, 2019.	16
Figura 5. Relación de los índices de vegetación con respecto al contenido relativo de clorofila, marzo y mayo, 2019.	18
Figura 6. Relación de los índices de vegetación con respecto al volumen por árbol, marzo y mayo, 2019.	19
Figura 7. Relación de los índices de vegetación con respecto al nitrógeno foliar, marzo y mayo, 2019.	20
Figura 8. Relación de los índices de vegetación con respecto a la capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo, marzo, 2019.	21
Figura 9. Relación de los índices de vegetación con respecto al porcentaje de saturación de acidez del suelo, marzo, 2019.	22
Figura 10. Relación del volumen por árbol con respecto al contenido relativo de clorofila, marzo y mayo, 2019.	23
Figura 11. Relación del volumen por árbol con respecto al nitrógeno foliar, marzo y mayo, 2019.	23

Figura 12. Relación del contenido relativo de clorofila con respecto al nitrógeno foliar, marzo y mayo, 2019.24

INTRODUCCIÓN

La especie *Gmelina arborea* Roxb (melina) es originaria del sudeste asiático (Álvarez et al., 2011) y de la India (Wee et al., 2012). La melina ha sido altamente utilizada para proyectos de reforestación ubicados en la zona del trópico (Hernández et al., 2013), principalmente por su rápido crecimiento y su fácil reproducción (Wee et al., 2012).

En Costa Rica es la segunda especie más utilizada en proyectos de reforestación (INEC, 2015) y sus usos son principalmente para producción de embalajes y construcción (ONF, 2018). La especie se desarrolla bien desde los 0 a 600 msnm, con 2500 mm como promedio de precipitación anual y con una estación seca de entre dos y cuatro meses (Murillo y Alvarado, 2012).

A pesar de que existe amplia información sobre su silvicultura (Martínez, 2015), aún existen vacíos de información sobre labores determinantes para su óptimo desarrollo. Una de esas labores es la fertilización. La cual se considera una de las principales etapas que condicionan la productividad (Escobar, 2013; Fernández-Moya et al., 2014; Resende y Coelho, 2014). No obstante, para aplicar una correcta fertilización, es necesario conocer con certeza las deficiencias nutricionales que presentan las plantas.

Para el diagnóstico de la nutrición, tradicionalmente se han utilizado las técnicas de análisis químico de suelo y el análisis químico foliar (Alvarado, 2012; Watt et al., 2019), las cuales presentan desventajas como la alta demanda de tiempo y recursos para su realización (Quintana, 2014; Watt et al., 2019).

Una alternativa para evaluar el estado nutricional de las plantas es el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT), a los cuales se les puede incorporar cámaras multiespectrales (Maresma et al., 2016). Pádua et al. (2017) mencionan que este método es eficaz, preciso, de bajo costo y rápido. Por otra parte, Dash et al. (2017) exponen que los VANT pueden brindar una nueva plataforma para la adquisición de imágenes de muy alta resolución.

Las imágenes multiespectrales generalmente se utilizan para calcular índices de vegetación como el de clorofila, fotoquímico y el índice de verdor (Quemada et al., 2014). Maresma et al. (2016) y Quemada et al. (2014) encontraron que estos índices son tan fiables como las mediciones terrestres para determinar la condición de nitrógeno. Este método se puede combinar con instrumentos como el SPAD, el cual, de acuerdo con Nyi et al. (2012), estiman la clorofila por medio de dos bandas espectrales, una de 650 nm (roja) y otra de 940 nm (rojo cercano). Silla et al. (2010) se refieren al SPAD como un medidor que provee un índice de clorofila que está estrechamente ligado al contenido real de clorofila en las hojas.

Dos de los índices de vegetación más utilizados son el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; Berni et al., 2009) y el GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index; Candiago et al., 2015), el cual muestra la variación de la biomasa vegetal relacionada con la clorofila concentrada en las plantas (Landau et al., 2014). Algunas de las aplicaciones de los índices de vegetación son el análisis del estado fitosanitario, el crecimiento de los cultivos y la evaluación del estado nutricional de las plantas (Vettorazzi y Best, 2014); siendo el estudio de la condición nutricional un aspecto vital para definir la fertilización requerida por el cultivo.

Estudios en cultivos agrícolas sugieren resultados positivos del uso de VANT para determinar el rendimiento de los cultivos y para estimar valores de elementos como el nitrógeno (N) (Duan et al., 2017; Maresma et al., 2016). Asimismo, otros estudios han obtenido resultados positivos al utilizar VANT para determinar el estrés fisiológico en plantaciones forestales (Dash et al., 2018; Dash et al., 2017). Con base en estos hallazgos, en la presente investigación se espera encontrar resultados favorables del uso de este método alternativo.

Es debido al creciente avance tecnológico y a la búsqueda de opciones viables para mejorar la productividad y lograr silvicultura de precisión, que nace este estudio, el cual tiene como objetivo principal validar el uso de vehículos aéreos no tripulados como una herramienta de precisión para diagnosticar el estado nutricional de una plantación de *Gmelina arborea* Roxb.

MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El proyecto de investigación se llevó a cabo en la finca propiedad de Xiomara Murillo Phillips, ubicada en las coordenadas 84°27'09" O 10°26'42" N, del distrito Pital, cantón San Carlos (figura 1). El sitio corresponde a 12 000 m² plantados con la especie melina, la cual fue establecida en mayo del 2018. La precipitación media anual varía entre 3000 y 4000 mm (Tapia, 2014a), la temperatura media anual entre 24 y 26 °C (Tapia, 2014b), altitud promedio de 170 msnm, con pendiente moderada y suelo de orden Inceptisol (CR Suelos, Universidad de Costa Rica, V 1.0, 2015).

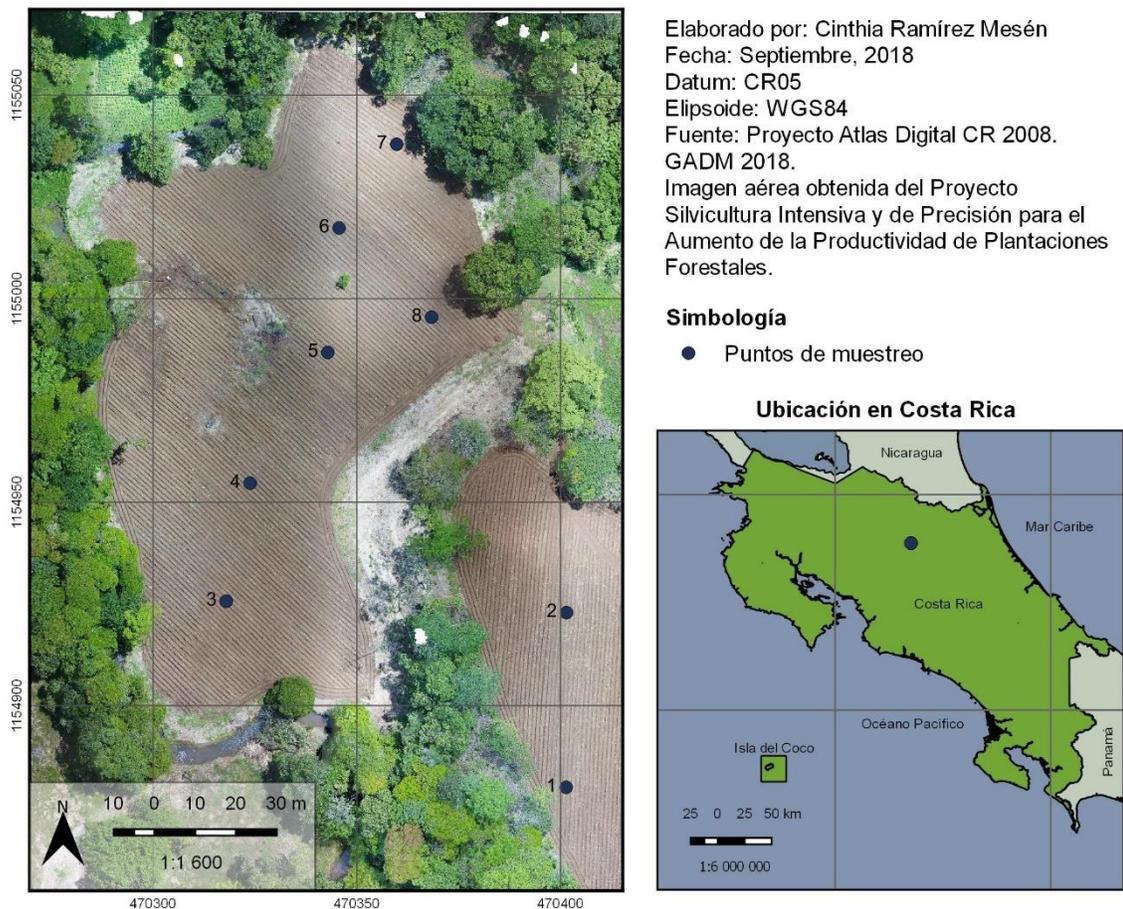


Figura 1. Sitio de estudio, propiedad de Xiomara Murillo Phillips, Pital de San Carlos, Costa Rica.

Preparación del sitio y manejo silvicultural

El sitio fue mecanizado y encalado antes del establecimiento de la plantación. Se aplicó fertilizante granulado (10-30-10 NPK) al momento de plantar, y fertilizante foliar “Bayfolan” a los 15 días y a los 3 meses a partir del establecimiento. Se realizaron aplicaciones de material encalante cada 4 meses de acuerdo con el análisis químico. Se realizaron controles de malezas generales (a la edad de 1 y 3 meses). Se hizo una poda de formación y una poda regular en la primera troza, a los 4 y 7 meses de edad, respectivamente.

Recolección de datos

La recolección de datos de las variables en estudio se realizó a los 10 y 12 meses de edad (marzo y mayo, 2019) a partir de establecida la plantación. Para la toma de datos y muestras se fijaron ocho puntos de muestreo distribuidos sistemáticamente en el campo; cada punto estuvo constituido por un árbol central y cuatro árboles vecinos ubicados a no más de 4 m del árbol central.

Muestras foliares y análisis químico

De cada punto de muestreo se obtuvo una muestra compuesta por 20 hojas (cuatro hojas por árbol). Para la obtención de cada hoja, se utilizó la metodología propuesta por Murillo et al. (2014). Posteriormente, las muestras foliares fueron llevadas al Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) ubicado en la Universidad de Costa Rica (UCR) para su respectivo análisis químico.

Muestras de suelo y análisis químico

De cada punto de muestreo se recolectaron dos muestras de suelo, una de 0-20 cm y otra de 20-40 cm de profundidad. Cada muestra estaba compuesta por cinco submuestras tomadas a menos de un metro de distancia de cada árbol que conformaba el punto de muestreo. Las muestras fueron debidamente etiquetadas y almacenadas en bolsas para su traslado al Centro de Investigaciones Agronómicas

(CIA), donde se procedió con el análisis químico. Esta variable se midió solamente para el mes de marzo.

Contenido relativo de clorofila

Para la medición de la cantidad relativa de clorofila se utilizó un SPAD (Soil Plant Analysis Development) marca Minolta, modelo 502. Se realizaron cinco mediciones con el SPAD en cada hoja de las recolectadas para las muestras foliares (cada muestra foliar corresponde a 20 hojas), esto inmediatamente después de ser colectadas. Posteriormente, se calculó la cantidad relativa de clorofila promedio por hoja y por punto de muestreo.

Crecimiento volumétrico

En cada punto de muestreo se tomaron medidas de altura total y diámetro a la altura de 1,30 m. Posteriormente, se calculó el volumen total de árboles individuales y el volumen promedio por punto de muestreo, bajo la siguiente ecuación:

$$Volumen\ total\ (m^3) = 0,7854 * D^2 * H * ff$$

Donde,

D: diámetro a 1,30 m de altura (m).

H: altura total (m).

ff: factor de forma (0,5).

Imágenes aéreas

Para la obtención de las imágenes aéreas del sitio se utilizó un VANT marca DJI, modelo Mavic Pro, con cámara RGB modelo FC220, de 12 megapíxeles, (DJI, 2019). Adicionalmente se le añadió una cámara multiespectral MAPIR Survey3W RGN, con resolución de 12 megapíxeles, la cual contiene la banda roja (660 nm), verde (550 nm) e infrarrojo cercano (850 nm) (MAPIR CAMERA, 2019a).

La altura de vuelo del VANT fue de 70 m, utilizando un traslape frontal entre fotografías del 85% y un traslape lateral del 70%. Previo al vuelo, se tomó una fotografía, con la cámara Survey3W RGN, al Target de calibración, el cual se colocó sobre el suelo y expuesto a la luz del sol. La cámara Survey3W RGN se configuró para que tomara las fotografías en formato JPG y RAW, con un intervalo de 2,75 s entre fotografías, y una velocidad de captura de 1/500 s.

Se utilizaron ambas cámaras con el objetivo de conseguir dos ortomosaicos para cada mes de medición, uno proveniente de la cámara del VANT y otro obtenido con la cámara Survey3W RGN; esto para efectos del cálculo de diferentes índices de vegetación. No obstante, con las imágenes de la cámara Survey3W RGN solo fue posible obtener el ortomosaico de marzo.

Para obtener los ortomosaicos correspondientes de las imágenes capturadas con la cámara del VANT, se utilizó el software de fotogrametría Pix4Dmapper en su versión libre, de la plataforma Pix4D (Pix4D SA, 2019).

Se utilizó el software MAPIR Camera Control (MAPIR CAMERA, 2019b) para calibrar los valores de reflectancia de las imágenes adquiridas con la cámara Survey3W RGN. Posteriormente, se generó el ortomosaico con la versión libre del software Precision Mapper (Precision Hawk, 2019).

Índices de vegetación

Con el software libre QGIS (QGIS Development Team, V 2.18.13, 2017) se calcularon los siguientes índices de vegetación, según la ecuación que se describe:

- a. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; Rouse et al., 1973)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Donde,

NIR: banda infrarrojo cercano.

Red: banda roja.

Su rango va desde -1 a 1 (Candiago et al., 2015).

b. GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index; Gitelson et al., 1996)

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$$

Donde,

NIR: banda de infrarrojo cercano.

Green: banda verde.

Su rango va de 0 a 1 (Candiago et al., 2015).

c. NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index; Tucker, 1979)

$$NGRDI = \frac{Green - Red}{Green + Red}$$

Donde,

Green: banda verde.

Red: banda roja.

Rango de -1 a 1.

d. GLI (Green Leaf Index; Louhaichi et al., 2001)

$$GLI = \frac{2 * Green - Red - Blue}{2 * Green + Red + Blue}$$

Donde,

Green: banda verde.

Red: banda roja.

Blue: banda azul.

Rango de -1 a 1.

Los índices de vegetación NDVI y GNDVI se calcularon utilizando el ortomosaico de marzo generado a partir de las imágenes de la cámara Survey3W RGN. El NGRDI y el GLI se calcularon a partir de los ortomosaicos obtenidos con las imágenes de la cámara del VANT, tanto para marzo como para mayo.

Vigor vegetal

Las imágenes ráster obtenidas del cálculo de cada índice de vegetación fueron reclasificadas por categorías de vigor vegetal, proceso realizado con el software QGIS (QGIS Development Team, V 2.18.13, 2017). Los rangos utilizados para la clasificación corresponden a los sugeridos por Kharuf-Gutierrez et al. (2018), donde las categorías de vigor vegetal son: nulo ($<0,21$), bajo ($0,21 - 0,39$), medio ($0,39 - 0,49$) y alto ($>0,49$).

Análisis estadístico de la información

Se realizaron análisis de varianza bajo los supuestos de normalidad para los datos de contenido relativo de clorofila, diámetro, altura, volumen e índices de vegetación. Posteriormente se aplicaron pruebas de comparación de Tukey ($\alpha = 0,05$). Adicionalmente, se calcularon las desviaciones estándar para las variables mencionadas. Los análisis mencionados se realizaron utilizando el software estadístico InfoStat (InfoStat, V 2017.1.2, 2017).

Con el software Microsoft Excel (2016) se realizaron diversas correlaciones lineales simples de Pearson (R). Cada índice de vegetación se correlacionó contra los valores de contenido relativo de clorofila, valores de volumen, nitrógeno foliar, capacidad de intercambio catiónico efectivo y con el porcentaje de saturación del suelo. Donde la variable dependiente correspondía a los índices de vegetación. Adicionalmente, se correlacionó el volumen con el contenido relativo de clorofila y con el nitrógeno, y se relacionó el nitrógeno con el contenido relativo de clorofila.

Para cada correlación se determinó la significancia del coeficiente de correlación, lo cual se realizó con el software InfoStat (InfoStat, V 2017.1.2, 2017), donde se generaron los p-valor de cada correlación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis químico foliar y de suelo

Al comparar las concentraciones foliares para ambas fechas de medición se encontró que el mayor valor observado fue para el macroelemento N (3,03% y 2,89%, respectivamente para marzo y mayo), seguido por Ca (1,38% y 1,25%) y K (0,58% y 0,62%). El orden de mayor a menor concentración foliar para ambos meses fue N>Ca>K>Mg>S>P. En el caso de los micronutrientes el orden para ambas mediciones fue Mn>Fe>B>Zn>Cu. El nitrógeno presentó valores dentro del rango adecuado para todos los puntos de muestreo en ambos meses de medición; además, es el elemento con mayores porcentajes de concentración a nivel foliar, lo cual concuerda con Avellán-Zumbado et al. (2015) para un estudio en la zona sur de Costa Rica.

Cuadro 1. Resultados del análisis químico foliar para cada punto de muestreo, marzo y mayo, 2019.

Punto de muestreo	% masa						mg/kg				
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	2,01 - 3,92	0,12 - 0,36	0,53 - 2,20	0,19 - 0,94	0,71 - 1,60	0,10	40 - 600	4 - 19	20 - 80	22 - 205	20 - 64
Marzo											
1	2,91	0,13	0,95	0,13	1,06	0,14	121,00	7,00	23,00	729,00	96,00
2	3,09	0,13	1,18	0,14	0,93	0,14	105,00	6,00	23,00	668,00	83,00
3	3,07	0,09	1,54	0,55	0,30	0,14	79,00	7,00	31,00	225,00	38,00
4	3,19	0,11	1,85	0,60	0,35	0,16	90,00	7,00	28,00	400,00	46,00
5	3,33	0,13	1,53	0,34	0,68	0,16	118,00	9,00	26,00	250,00	30,00
6	2,34	0,07	1,31	0,39	0,29	0,11	62,00	5,00	27,00	263,00	24,00
7	3,13	0,11	1,15	0,36	0,46	0,14	93,00	7,00	25,00	245,00	26,00
8	3,18	0,12	1,52	0,35	0,56	0,16	123,00	8,00	30,00	341,00	40,00
Mayo											
1	3,60	0,19	0,62	0,23	1,26	0,18	114,00	10,00	26,00	580,00	89,00
2	3,15	0,14	0,69	0,22	1,15	0,15	90,00	7,00	21,00	469,00	88,00
3	2,65	0,11	1,62	0,57	0,35	0,14	75,00	8,00	25,00	229,00	39,00
4	2,99	0,13	1,66	0,58	0,35	0,16	64,00	9,00	27,00	303,00	37,00
5	2,96	0,13	1,46	0,33	0,59	0,15	82,00	8,00	24,00	230,00	24,00
6	2,50	0,11	1,28	0,48	0,42	0,13	60,00	7,00	29,00	249,00	22,00
7	2,58	0,11	1,24	0,36	0,37	0,14	80,00	8,00	22,00	247,00	25,00
8	2,70	0,11	1,46	0,30	0,47	0,14	95,00	8,00	23,00	318,00	36,00

Nota: Los valores en negrita corresponden a los niveles foliares de nutrimentos adecuados en plantaciones de *Gmelina arborea*. Fuente: tomado de Murillo y Alvarado (2012).

González-Rojas et al. (2016) mencionan que la melina es demandante del nitrógeno, así como del potasio. Este último elemento presentó valores adecuados para los puntos 1 y 2 en ambos meses, sin embargo, para los demás puntos de muestreo se encontraron deficiencias en este nutriente, tanto a nivel foliar como en el suelo.

La melina es una especie adaptada a condiciones de suelo neutro a básico, por lo que su crecimiento se ve favorecido conforme se incrementan los contenidos de bases cambiables en el suelo (Murillo y Alvarado 2012). Los valores de pH para los puntos de muestreo variaron entre 4,65 y 5,35, cuando los rangos de pH adecuados son mayores a 5,5 (cuadro 2). De acuerdo con Lizcano y Olivera (2000) y Jaramillo (2014) del pH depende la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Partiendo de los valores de referencia del cuadro 2, el porcentaje de saturación de acidez se encuentra alto en todos los puntos, y es aceptable en el punto de muestreo 7 (8,30%). Por otra parte, los datos de CICE se encuentran muy distantes de los recomendados.

Cuadro 2. Resultados del análisis químico del suelo para cada punto de muestreo, marzo, 2019.

Punto de muestreo	pH	cmol (+)/L					%	mg/L				
	H ₂ O	Acidez	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
	5,5 - 6,5	0,5	4	1	0,2	> 15	< 10	10	3	1	10	5
1	4,65	2,47	1,56	0,40	0,17	4,59	54,20	1,50	2,05	10,50	132,00	67,50
2	4,70	2,08	1,69	0,41	0,10	4,27	48,60	1,50	2,55	8,50	118,00	78,50
3	5,00	1,54	4,13	1,63	0,09	7,38	21,55	1,00	2,20	9,00	156,50	58,00
4	4,95	1,56	3,83	1,66	0,09	7,14	22,15	1,00	2,85	10,50	164,50	85,00
5	5,05	1,37	3,22	1,01	0,10	5,69	24,45	1,00	2,70	9,50	150,50	50,50
6	5,00	1,35	2,31	0,94	0,07	4,67	29,50	1,00	1,15	9,00	168,00	31,50
7	5,35	0,41	3,30	1,39	0,12	5,21	8,30	ND	1,40	9,50	112,50	29,00
8	4,85	0,80	3,80	1,83	0,15	6,57	12,70	1,00	1,90	12,00	138,00	59,00

Nota: Los valores en negrita de H₂O, CICE y SA corresponden a valores adecuados para *Gmelina arborea* en la zona sur de Costa Rica. Fuente: Zeaser, 2002, comunicación personal a Alvarado; tomado de Murillo y Alvarado, 2012. Los restantes valores en negrita son los referidos por el CIA.

El calcio no se mostró deficiente en las hojas, no obstante, a nivel de suelo todos los valores están por debajo del dato referido por el CIA (4 cmol (+) / L). Alvarado (2012)

añade que la acidez en el suelo reduce la disponibilidad de elementos como el calcio y el fósforo, pero aumenta la disponibilidad de hierro, manganeso, cobre y zinc. En el caso del manganeso, aparece en niveles muy altos, tanto en los resultados foliares como en los del suelo. Martínez (2015) indica que la acidez favorece el aumento en la concentración de elementos como el Mn y el Al, los cuales pueden ser tóxicos para las plantas. Estos elementos son inmóviles, y su concentración es mayor en época seca y en hojas maduras (Segura et al., 2006). Es importante acotar que la zona con mayor concentración de manganeso (puntos 1 y 2) actualmente limita con una plantación de piña y anteriormente fue aprovechada para el cultivo de este mismo producto agrícola. Las altas aplicaciones de componentes químicos en las plantas de piña podrían ser los causantes de los elevados valores de manganeso en este sitio.

Contenido relativo de clorofila y crecimiento volumétrico

Los valores del contenido relativo de clorofila determinados con el SPAD varían entre 46,05 y 59,10 para el mes de marzo y entre 45,26 y 60,76 para mayo. En ambas mediciones realizadas, los valores más bajos corresponden a los puntos de muestreo 1 y 6, presentando diferencias significativas.

Asimismo, los puntos 1 y 6 homologan significancias en diámetro (mayo) y altura con los puntos de muestreo 2 y 7; siendo que, para la variable de altura, los puntos 1, 2, 6 y 7 se manifiestan estadísticamente diferentes con los puntos 3, 4, 5, y 8 (cuadro 3); lo cual es fácil de categorizar visualmente en campo.

Cuadro 3. Valores promedio de contenido relativo de clorofila, diámetro, altura y volumen por árbol para cada punto de muestreo, marzo y mayo, 2019.

Punto de muestreo	Contenido relativo de clorofila	Diámetro (cm)	Altura (m)	Volumen (m ³)
Marzo				
1	51,29 (4,34) b	5,72 (1,09) a	3,54 (0,29) a	0,00 (0,12) a
2	55,14 (2,44) c	8,34 (1,36) b	4,61 (0,31) bc	0,01 (0,01) bc
3	55,00 (2,95) c	11,00 (0,59) c	7,01 (0,28) f	0,03 (0,03) e
4	55,88 (3,46) c	8,76 (1,31) b	5,48 (0,37) d	0,02 (0,01) cd
5	56,39 (2,13) cd	10,06 (0,66) bc	6,16 (0,06) e	0,02 (0,03) d
6	46,05 (2,01) a	5,86 (0,76) a	4,10 (0,24) ab	0,01 (0,30) ab
7	59,10 (3,68) d	8,04 (0,85) b	4,83 (0,09) c	0,01 (0,06) abc
8	57,29 (2,79) cd	9,68 (1,09) bc	6,08 (0,45) e	0,02 (0,01) d
Mayo				
1	48,82 (2,41) b	7,20 (1,19) ab	4,34 (0,43) a	0,01 (0,05) a
2	50,65 (2,36) b	9,86 (1,15) cd	5,17 (0,34) b	0,02 (0,01) b
3	55,89 (4,07) c	12,06 (0,64) e	7,76 (0,15) e	0,04 (0,01) c
4	58,81 (2,72) cd	9,94 (1,23) cd	6,44 (0,35) c	0,03 (0,01) b
5	58,13 (3,58) cd	12,18 (0,94) e	7,11 (0,09) de	0,04 (0,01) c
6	45,26 (3,69) a	6,86 (0,71) a	4,54 (0,33) ab	0,01 (0,30) a
7	60,76 (3,96) d	9,06 (0,76) bc	5,17 (0,10) b	0,02 (0,05) ab
8	59,87 (4,30) d	11,48 (1,05) de	6,80 (0,53) cd	0,04 (0,01) c

Cabe añadir que la elevación y el uso anterior del sitio varían entre los distintos puntos de muestreo. La zona que anteriormente fue de uso agrícola para el cultivo de piña corresponde a la parte más alta de la plantación (puntos 1 y 2). El área donde se ubican los demás puntos de muestreo anteriormente sirvió como potrero y presenta variaciones leves en pendiente. Los puntos 6 y 7 ocupan la segunda zona más alta, y el punto 3 corresponde al más bajo en altitud. Aunque la diferencia en altitud entre el punto más bajo y el punto más alto no es abrupta (es de aproximadamente 12 m), esto podría tener incidencia en la respuesta de crecimiento mostrada por los árboles, por aspectos como el flujo del agua y nutrientes.

Índices de vegetación

En el cuadro 4 se muestran los resultados de los índices de vegetación promedio por punto de muestreo.

Los valores del índice de vegetación GNDVI fueron mayores que los demás índices de vegetación calculados, mientras que el NGRDI presentó los valores menores para ambos meses de medición. Cabe resaltar que el rango de valores utilizado por el GNDVI (de 0 a 1) es diferente al del resto de índices de vegetación (de -1 a 1), esto pudo tener influencia en los resultados mostrados por este índice de vegetación. De forma general, los resultados de los índices que utilizan la banda de infrarrojo cercano fueron mayores que los índices basados en las bandas del espectro visible (GLI y NGRDI). Díaz (2015) y Esser et al. (2002) mencionan que la banda de infrarrojo cercano está estrechamente relacionada con el estado de salud de las plantas.

Cuadro 4. Índices de vegetación promedio por punto de muestreo, marzo y mayo, 2019.

Punto de muestreo	Marzo				Mayo	
	GNDVI	NDVI	GLI	NGRDI	GLI	NGRDI
1	ND	ND	0,19 (0,03) ab	0,11 (0,03) ab	0,19 (0,01) b	0,09 (0,01) b
2	0,48 (0,03) bc	0,26 (0,03) abc	0,24 (0,01) c	0,18 (0,01) bc	0,20 (0,01) b	0,10 (0,01) b
3	0,41 (0,01) ab	0,28 (0,01) c	0,21 (0,01) bc	0,15 (0,004) abc	0,22 (0,01) b	0,12 (0,01) bc
4	0,38 (0,01) a	0,26 (0,01) abc	0,21 (0,02) bc	0,16 (0,02) bc	0,21 (0,01) b	0,10 (0,02) b
5	0,39 (0,03) ab	0,24 (0,03) abc	0,20 (0,02) bc	0,15 (0,02) abc	0,22 (0,003) b	0,13 (0,02) bc
6	0,38 (0,04) a	0,23 (0,02) a	0,14 (0,02) a	0,06 (0,02) a	0,15 (0,02) a	0,04 (0,01) a
7	0,42 (0,03) ab	0,23 (0,01) ab	0,14 (0,04) a	0,14 (0,09) abc	0,16 (0,01) a	0,10 (0,02) b
8	0,44 (0,02) bc	0,27 (0,02) bc	0,23 (0,03) bc	0,21 (0,07) c	0,21 (0,02) b	0,11 (0,02) bc

Para los cuatro índices calculados en marzo las diferencias fueron sutiles entre los puntos de muestreo; sin embargo, para el NDVI y el GLI se muestran diferencias significativas entre el punto 3 (0,28 y 0,21; NDVI y GLI respectivamente) con respecto al punto 6 (0,23 y 0,14) y 7 (0,23 y 0,14), zonas que visualmente en campo tienen una marcada diferencia en su desarrollo.

En el caso de mayo, el GLI muestra diferencias significativas de los puntos 6 y 7 con respecto a los demás puntos de muestreo. En el NGRDI, el punto 6 es estadísticamente diferente al resto de puntos de muestreo. Cabe mencionar que toda la plantación recibió el mismo manejo silvicultural, sin embargo, el área correspondiente al punto de muestreo 6 presenta notables deficiencias en su crecimiento.

Vigor vegetal

El índice de vegetación GLI presentó valores de vigorosidad bajos (0,21-0,39) en la mayor parte del área plantada, tanto para el mes de marzo como para mayo (figura 2), esto de acuerdo con los rangos de vigorosidad descritos por Kharuf-Gutierrez (2018). No obstante, en las imágenes se aprecia que marzo presenta mayor cantidad de zonas con vigor vegetal medio que mayo; lo cual se podría asociar con la duración de la estación seca acumulada para cada mes de medición, para marzo este periodo era menor que para el mes de mayo, justificando la probabilidad de que en marzo las plantas tuvieran una condición mejor.

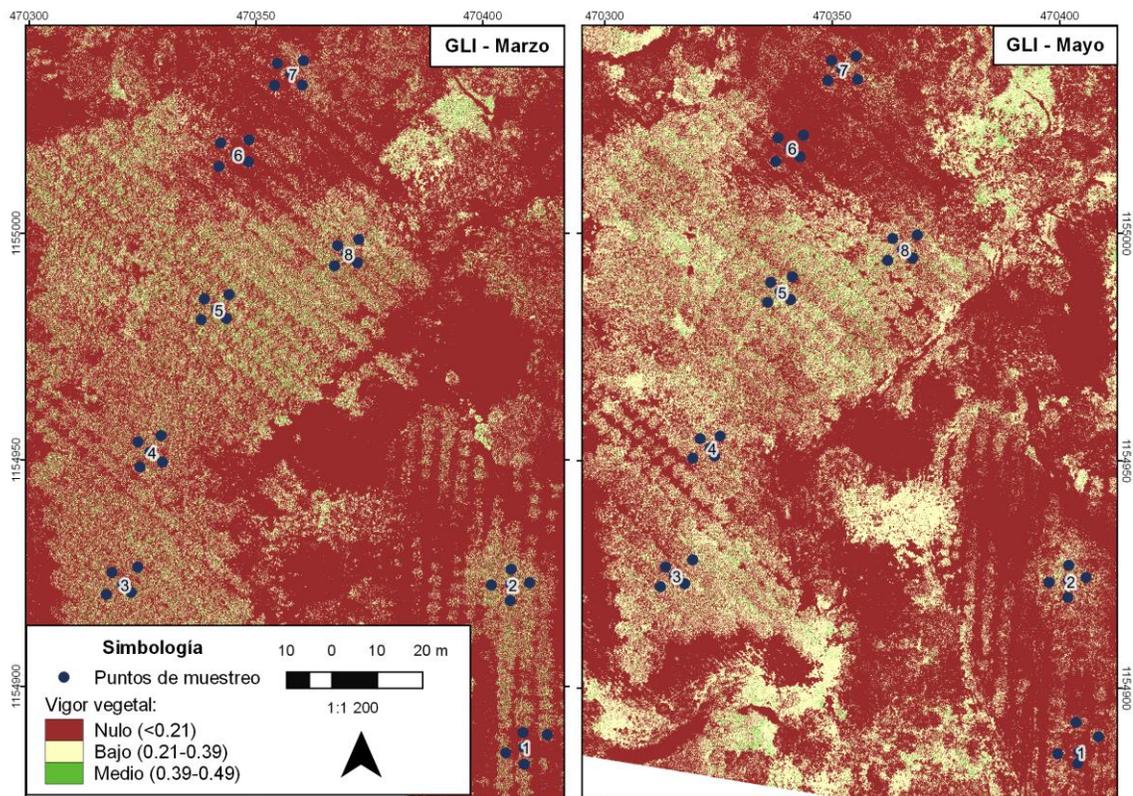


Figura 2. Mapa de vigor vegetal correspondiente al Green Leaf Index (GLI) de marzo y mayo, 2019.

El NGRDI (figura 3) muestra una marcada diferencia entre los meses de medición; para mayo solo se muestran dos clasificaciones de vigor vegetal: nulo y bajo. Sin embargo, en la imagen de marzo se muestran zonas puntuales con vigorosidad media,

lo cual coincide con las imágenes de vigor del índice GLI; indicando que en mayo la plantación presentaba condiciones más deficientes con respecto al estado de vigor presentado en marzo.

Karl et al. (2015) acotan que los efectos de la luz (como las sombras) pueden generar problemas de clasificaciones erróneas de los datos; para ello recomienda que se evite volar el VANT cuando las condiciones de luz son muy variables. Se presume que es un factor importante porque durante las misiones de vuelo se percibió cambios en las condiciones de luz debido a nubosidad variable característico de la zona, aspecto que pudo haber tenido influencia en los resultados de los índices de vegetación y, por ende, en las clasificaciones de vigorosidad.

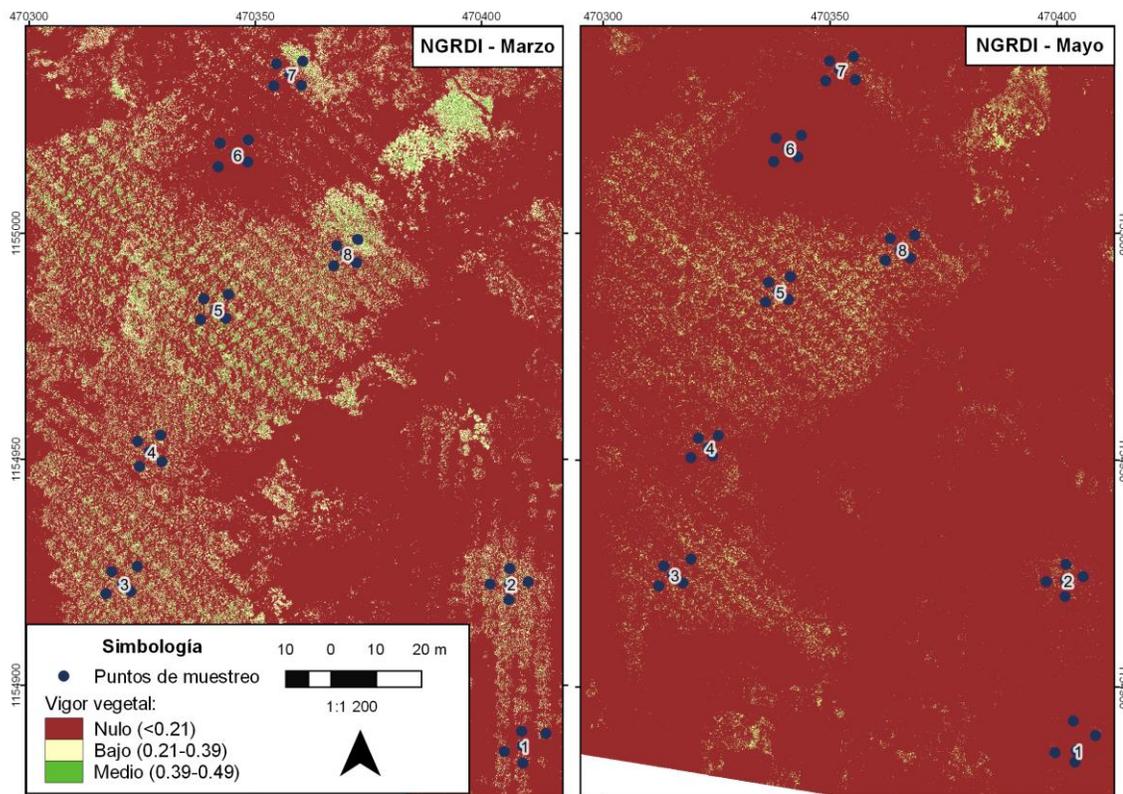


Figura 3. Mapa de vigor vegetal correspondiente al Normalized Green-Red Difference Index (NGRDI) de marzo y mayo, 2019.

En el caso de los índices NDVI y GNDVI (figura 4), se generaron resultados solamente para el mes de marzo. Cabe mencionar que la obtención de los ortomosaicos para las imágenes tomadas con la cámara Survey3W RGN no fue óptima. Como resultado de este proceso se obtuvo ortomosaicos con medidas desfasadas, sectores poco definidos y zonas vacías. Las razones sobre los resultados deficientes no son claras, podrían deberse tanto a problemas en el programa utilizado como a factores propios de la configuración de la cámara, como pueden ser el intervalo de tiempo entre la captura de cada imagen o el traslape entre estas.

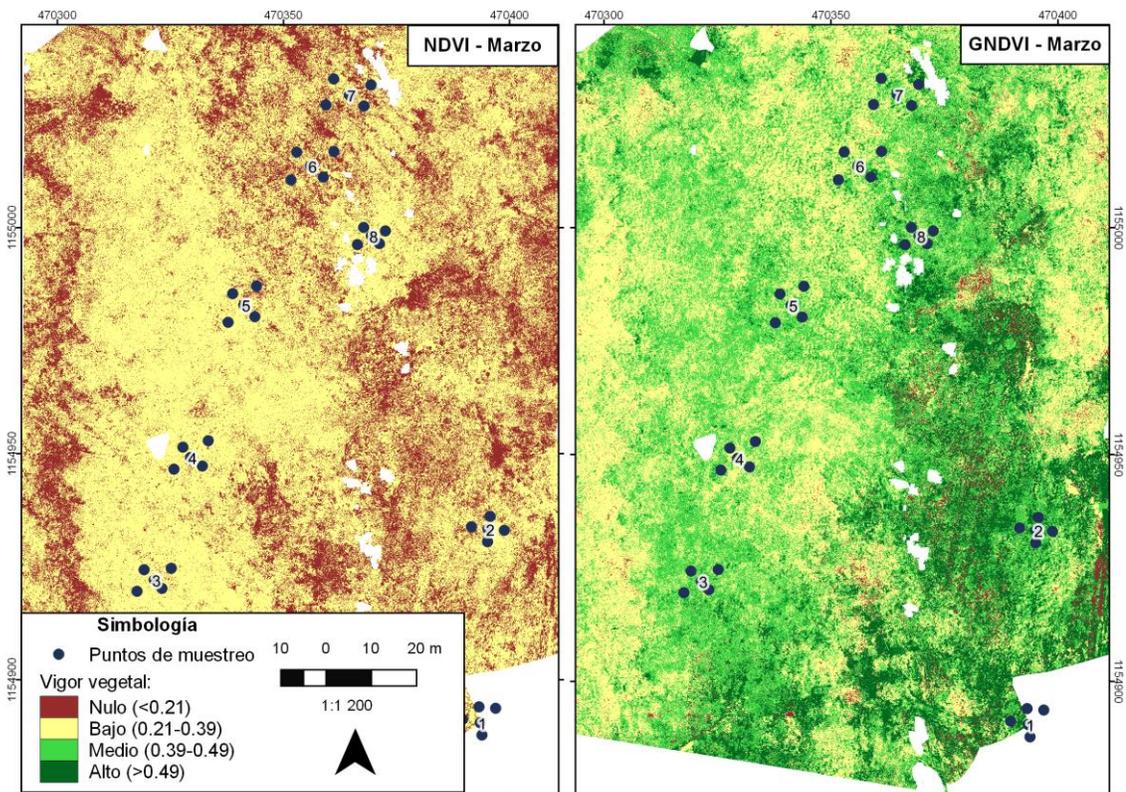


Figura 4. Mapa de vigor vegetal correspondiente al Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y al Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) de marzo, 2019.

En la figura 4 se observa la diferencia entre el vigor vegetal resultado del índice NDVI con respecto al mostrado por el índice GNDVI. Para el primer índice mencionado se obtuvo dos clases de vigorosidad: nula y baja. Por otro lado, el GNDVI presentó valores

para las cuatro clasificaciones de vigor vegetal; sin embargo, en el área plantada predominan las clasificaciones de vigor bajo y medio.

De acuerdo con Candiago et al. (2015), el GNDVI es más sensitivo a la concentración de clorofila que el índice NDVI. Por otro lado, en el caso de NDVI, Esser et al. (2002) describen que zonas con mayor índice foliar logran una reflectancia más alta en el infrarrojo cercano, y por ende valores altos de NDVI.

A nivel general, con las diferentes mediciones de campo realizadas se obtuvo que los puntos de muestreo con mejores condiciones son el 3, 4, 5 y 8; por otro lado, los sitios con condiciones más deficientes corresponden al 1, 2, 6 y 7. Esta tendencia se observa claramente en las imágenes de vigorosidad de los índices GLI y NGRDI; sin embargo, es menos evidente en las imágenes de vigor vegetal del NDVI y GNDVI.

Pese a los altos valores de crecimiento en algunas zonas de la plantación (puntos de muestreo 3, 4, 5 y 8), los valores de vigor se muestran considerablemente bajos para toda la plantación. Esto podría ser efecto de la época seca, en la cual comúnmente los árboles disminuyen su actividad fotosintética, influyendo directamente en la luz reflejada, y, por ende, en las imágenes capturadas y los análisis derivados de estas. Esser et al. (2002) mencionan que diferentes factores, como disponibilidad de agua para la planta o nutrición inadecuada, pueden generar estrés y alterar la respuesta espectral de las plantas.

Correlación de las variables

Índices de vegetación versus contenido relativo de clorofila

La relación entre los diferentes índices de vegetación y el contenido relativo de clorofila fue moderada en ambos meses de estudio (figura 5), esto a pesar de los bajos valores que muestran los índices de vegetación. No obstante, la excepción es el NGRDI, el cual mostró una relación alta, con valores significativos de R de 0,82 y 0,73 para marzo y mayo, respectivamente. Un estudio demostró que los índices que utilizan la banda infrarrojo cercano no tenían alta correlación con el contenido de clorofila, como sí lo

presentan índices de vegetación basados en las bandas del espectro visible (Hunt et al., 2013), tal es el caso del GLI y el NGRDI. Carranza (2014) obtuvo un $R= 0,53$ al relacionar NDVI con el contenido relativo de clorofila, además, menciona que para esta clase de correlaciones el tamaño de la muestra es determinante, por ende, sugiere que se utilice un número de muestras alto.

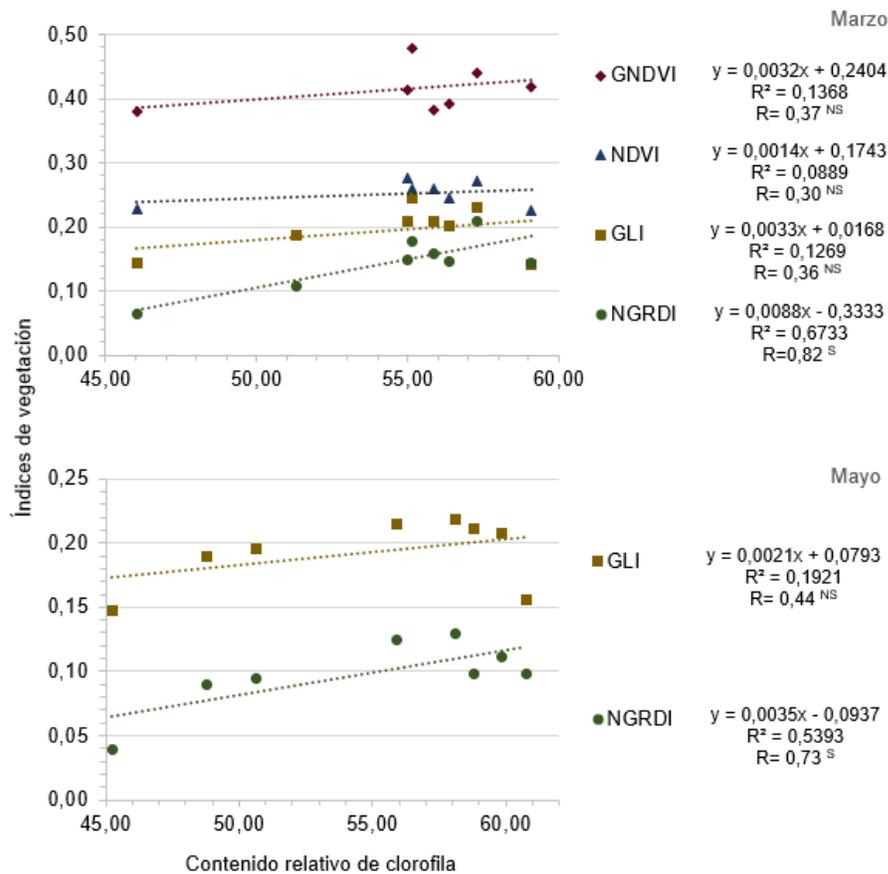


Figura 5. Relación de los índices de vegetación con respecto al contenido relativo de clorofila, marzo y mayo, 2019.

Índices de vegetación versus volumen total

Las relaciones entre índices de vegetación con los valores de volumen total son positivas (figura 6). Se observan relaciones moderadas para los índices GLI y NGRDI de marzo, y altas para el GLI y NGRDI de mayo, además del NDVI. El GNDVI no muestra conformidad con respecto al volumen total.

El comportamiento de estas correlaciones es el esperado, esto debido a que un buen porcentaje del crecimiento volumétrico es reflejo del estado de vigor de los árboles; parámetro que se puede estimar mediante índices de vegetación.

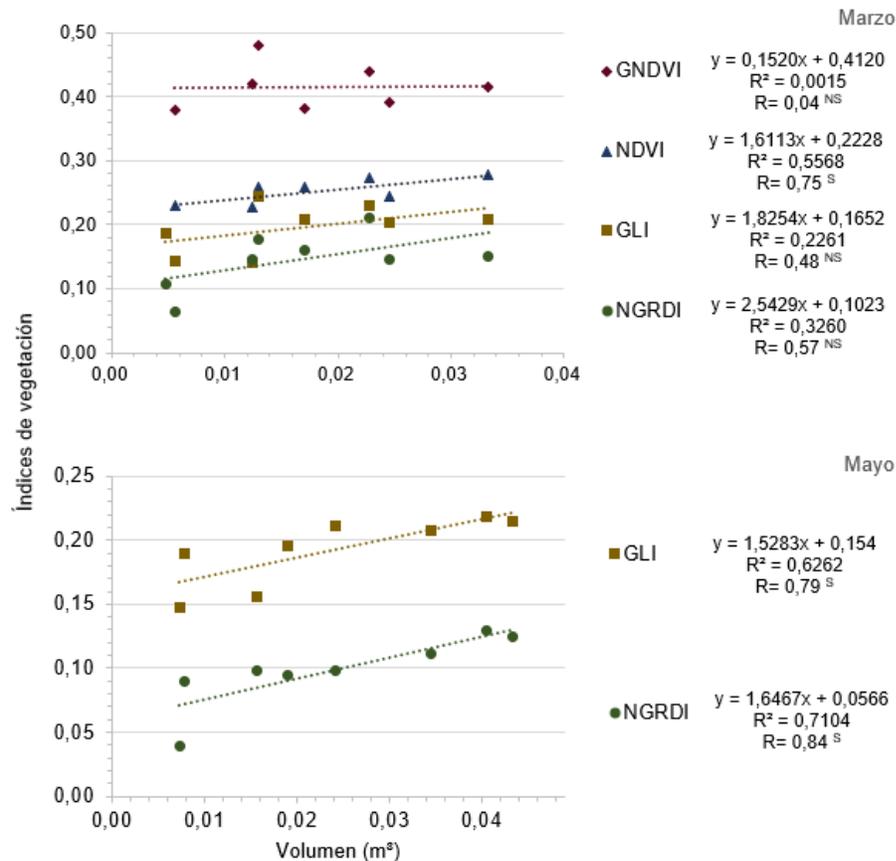


Figura 6. Relación de los índices de vegetación con respecto al volumen por árbol, marzo y mayo, 2019.

Índices de vegetación versus nitrógeno foliar

En este caso se tienen relaciones positivas moderadas para todos los índices de vegetación, salvo el caso del NGRDI, en el cual se observa un R alto para marzo, pero que baja considerablemente en el mes de mayo (figura 7). Se debe recordar que los valores de N aumentaron para los puntos 1 y 2 y disminuyeron para los puntos restantes, lo cual explica la inconsistencia entre las correlaciones de cada mes.

Estudios han obtenido una alta relación positiva entre N y diferentes índices, de los cuales se destaca el NDVI (Caturegli et al., 2016; Pölönen et al., 2013).

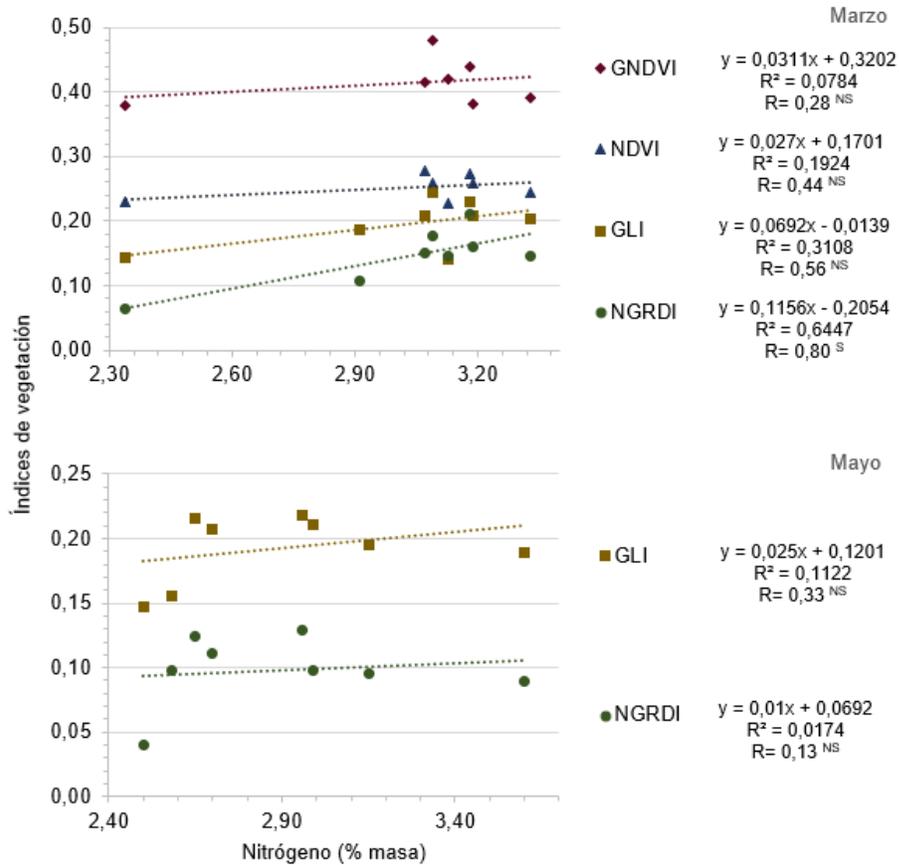


Figura 7. Relación de los índices de vegetación con respecto al nitrógeno foliar, marzo y mayo, 2019.

Índices de vegetación versus capacidad de intercambio de cationes efectiva

La relación es positiva moderada para los índices NDVI, GLI y NGRDI, caso contrario al GNDVI, donde la relación es negativa (figura 8). Lizcano et al. (2017) definen a la CICE como la capacidad de retención de cationes que realmente está sucediendo en el suelo tal como este se encuentra en el campo. Como se explicó en el apartado correspondiente a los análisis químicos, la CICE presentó valores muy bajos, indicando que la cantidad de cationes que puede intercambiar el suelo es deficiente, actividad que repercute en la fertilidad del suelo, y, como consecuencia, en el

crecimiento de los árboles. Jaramillo (2014) describe que la absorción de bases por parte de las plantas ayuda a desbalancear el equilibrio entre cationes básicos y ácidos, y, en consecuencia, contribuye con la acumulación de ácidos.

Las correlaciones positivas hacen referencia a que el estado de los árboles fue más propicio en los sitios con mayor capacidad de intercambio catiónico efectiva.

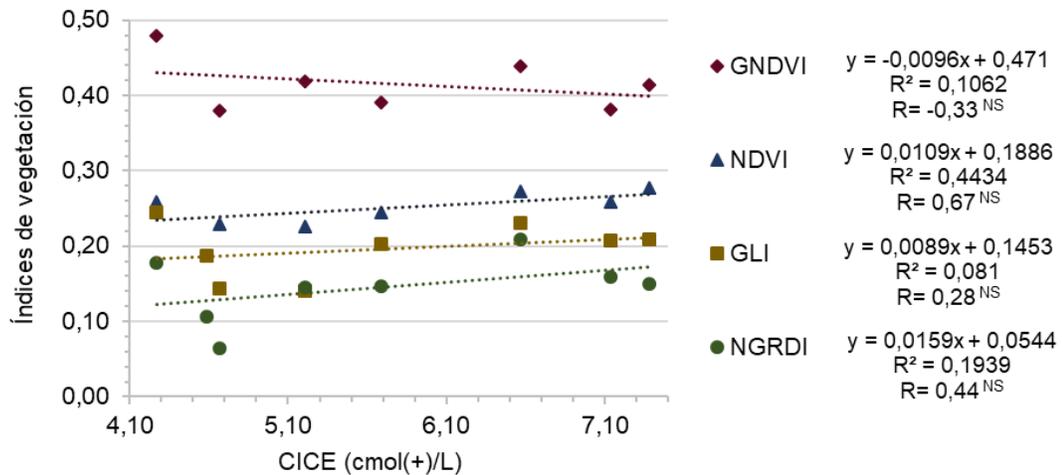


Figura 8. Relación de los índices de vegetación con respecto a la capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo, marzo, 2019.

Índices de vegetación versus porcentaje de saturación de acidez

Las relaciones de índices de vegetación con respecto al porcentaje de saturación de acidez son inconsistentes, no hay similitud entre las correlaciones. Martínez (2015) describe que la acidez del suelo genera diversas afecciones como la reducción del crecimiento, disminución de la disponibilidad de elementos como el Ca, Mg, K y P. De modo que, debido a la alta acidez del suelo, las líneas de relación deberían tender a un R negativo, donde a mayor acidez, las condiciones para las plantas sean más deficientes, y menor sea el valor de los índices de vegetación; tal como la línea de tendencia del NGRDI. No obstante, pese a la alta acidez en algunas zonas, los árboles reflejan condiciones moderadamente favorables para los índices GLI y GNDVI; lo cual podría ser por adaptación de las plantas a las condiciones presentes.

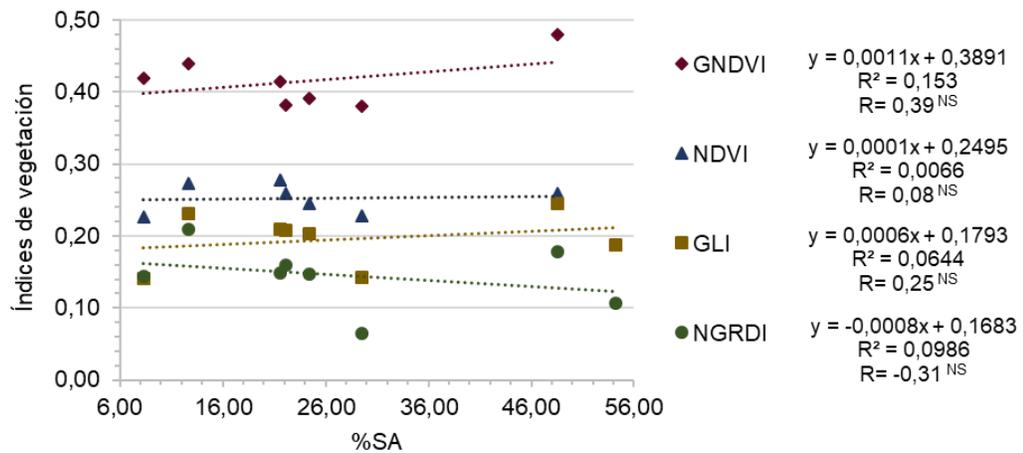


Figura 9. Relación de los índices de vegetación con respecto al porcentaje de saturación de acidez del suelo, marzo, 2019.

Volumen total versus contenido relativo de clorofila

Al correlacionar el volumen total con el contenido relativo de clorofila se presenta una tendencia positiva entre las variables, con valores de R moderados para ambos meses en cuestión. Nyi et al. (2012) hacen referencia a que a los valores altos de SPAD implican un contenido de clorofila alto. Carranza (2014) menciona que la absorción de la clorofila puede disminuir por senescencia o por estrés.

Esta tendencia creciente y positiva es congruente, debido a que, según Silla et al. (2010) el contenido de clorofila es uno de los parámetros más significativos relacionado con el estado fisiológico de las plantas. Los árboles en buenas condiciones se encuentran en la capacidad de desarrollarse adecuadamente; estado que se puede apreciar mediante datos de volumen y se ve reflejado en los valores relativos del contenido de clorofila.

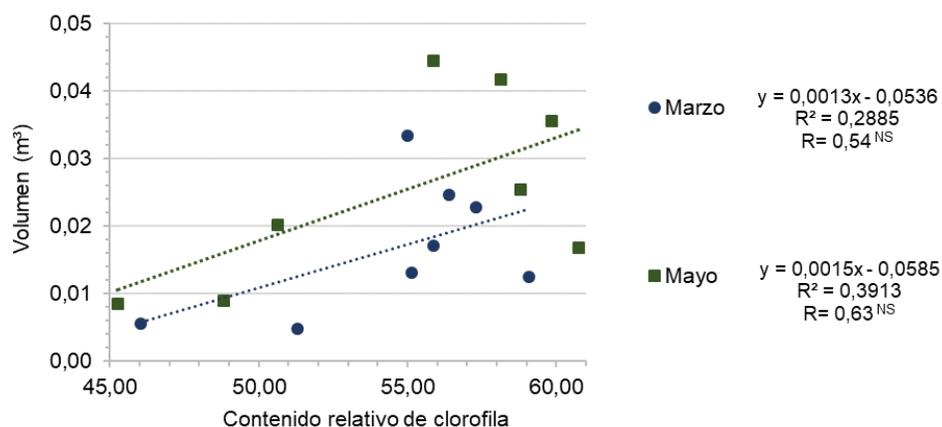


Figura 10. Relación del volumen por árbol con respecto al contenido relativo de clorofila, marzo y mayo, 2019.

Volumen total versus nitrógeno foliar

En este caso se mostró una relación positiva para marzo, pero negativa para mayo, esto debido a la variación en los contenidos de N. Según Segura et al. (2006) las concentraciones bajas de nitrógeno en época seca se pueden atribuir a que la absorción del N es menor por falta de agua.

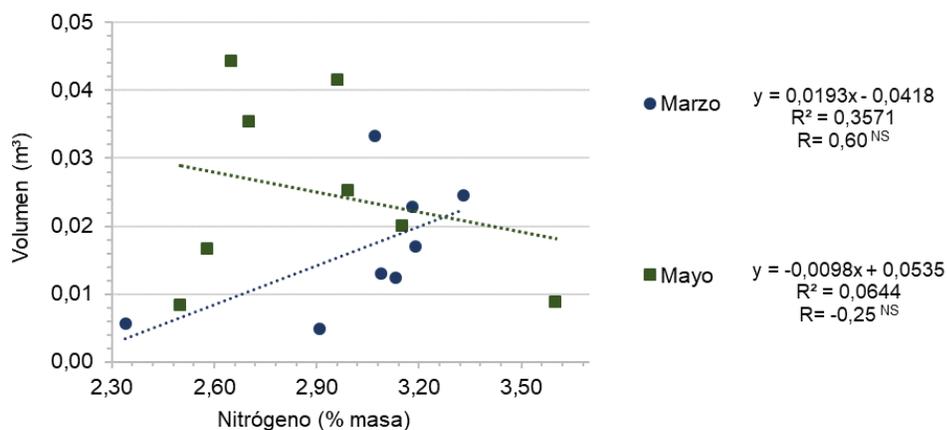


Figura 11. Relación del volumen por árbol con respecto al nitrógeno foliar, marzo y mayo, 2019.

Contenido relativo de clorofila versus nitrógeno foliar

La relación entre la cantidad relativa de clorofila y el nitrógeno fue alta para el mes de marzo, contrario al mes de mayo, donde la relación entre ambas variables fue baja y negativa (figura 12).

Diferentes estudios encontraron resultados positivos al correlacionar ambas variables (Carranza, 2014; Dunn et al., 2018; Nyi et al., 2012). Ribeiro da Cunha et al. (2015) muestran como resultado de un estudio que los valores de SPAD presentan una alta dependencia de la dosis de N, acotando que a mayor dosis de nitrógeno la planta tendrá mejor eficiencia fotosintética, por ende, mayores valores de contenido relativo de clorofila.

Sin embargo, Sibley (1996) encontró en su estudio realizado en árboles de maple una baja correlación ($R= 0,15$) entre N y valores de SPAD. Autores como Dunn y Goad (2015) describen que la inestabilidad en la correlación entre estas variables se puede dar por factores como la posición del sensor en la hoja y las diferencias en el procedimiento de muestreo foliar para determinar N, como lo son la cantidad de hojas a utilizar, la ubicación de estas y cuántas plantas conforman una muestra.

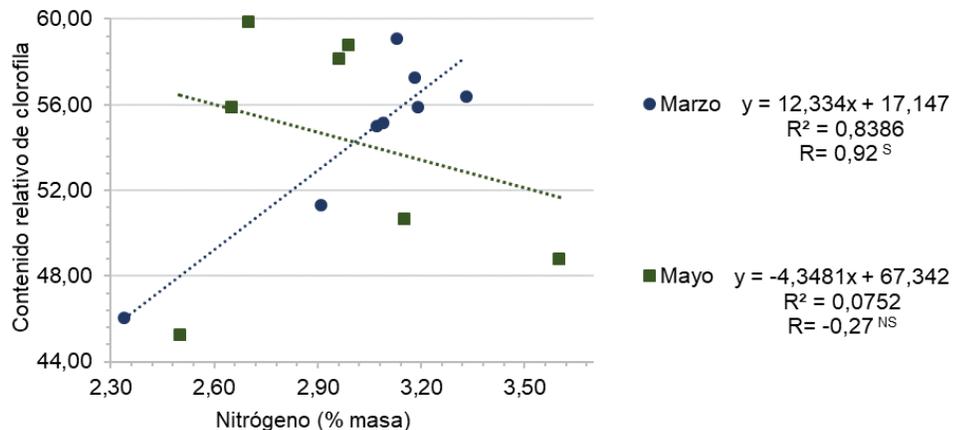


Figura 12. Relación del contenido relativo de clorofila con respecto al nitrógeno foliar, marzo y mayo, 2019.

CONCLUSIONES

Para el siguiente trabajo se obtuvo las siguientes conclusiones:

El método alternativo en estudio podría utilizarse como complemento a los métodos tradicionales, pese a que los índices de vegetación, y, por ende, el vigor vegetal, se muestran bajos en la mayor parte de la plantación, esta herramienta permite analizar el estado general del sitio y detectar zonas con problemas, pero no sustituye los métodos tradicionales como el análisis químico foliar y de suelo. Por otra parte, el cálculo de índices de vegetación se complementa bien con el uso del SPAD; existe una relación positiva entre estos.

Los índices de vegetación que utilizan la banda infrarroja alcanzaron valores más altos con respecto a los basados en bandas del espectro visible, no obstante, los ortomosaicos del NDVI y GNDVI presentaron problemas.

En términos generales, las zonas más bajas presentan las mejores condiciones y los valores de crecimiento más altos. Las áreas más elevadas presentan los mayores valores de acidez y los menores valores de crecimiento.

La relación entre los índices de vegetación versus volumen o nitrógeno es positiva. Por otro lado, se obtuvo correlaciones inconsistentes entre el N con respecto a las variables volumen y contenido relativo de clorofila, debido a las variaciones en la concentración de nitrógeno. Se encontró que es poco factible relacionar %SA con índices de vegetación; las relaciones no señalaron tendencias marcadas. Es viable correlacionar índices de vegetación con CICE, hubo tendencias favorables.

Conocer el uso anterior del suelo es importante para la interpretación de los diferentes análisis y para comprender la respuesta de las plantas. En la zona anteriormente dedicada al cultivo de piña (puntos 1 y 2) se encontraron los valores más altos de acidez y porcentaje de saturación de acidez.

RECOMENDACIONES

Debido a los inconvenientes presentados con las imágenes de la cámara Survey3W RGN, se recomienda hacer pruebas de esta con diferentes configuraciones en intervalos de tiempo entre imágenes, ajustes de color y formatos de imagen; además, combinar con variaciones en el vuelo del VANT, tal como la velocidad, altitud de vuelo y traslape entre imágenes.

Por otro lado, a causa de los bajos valores que presentaron los índices de vegetación, se aconseja hacer un estudio utilizando ambas cámaras (la Survey3W RGN y la del VANT) a nivel de vivero, donde se apliquen diferentes tratamientos de nutrición y de riego a las plantas, variando entre tratamientos con plantas deficientes nutricionalmente y plantas vigorosas, y tratamientos entre plantas con condiciones nutricionales adecuadas, pero bajo estrés hídrico y sin estrés hídrico. Esto para ver si las cámaras detectan las variaciones en el vigor de las plantas.

REFERENCIAS

- Alvarado, A. (2012). Diagnóstico de la nutrición en plantaciones forestales. En A. Alvarado y J. Raigosa (Eds.), *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales* (pp. 97-124). San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Álvarez, J., Beltrán, D. y Mesa, N. (2011). Evaluación de reguladores de crecimiento vegetal en la organogénesis de *Gmelina arborea* Roxb. *Revista Tumbaga*, 6, 107-124
- Atlas Digital CR. (2008). Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica. 1 DVD
- Avellán-Zumbado, M.J., Murillo-Cruz, R., Alvarado-Hernández, A. y Ávila-Arias, C. (2015). Variación del contenido foliar de nutrimentos de *Gmelina arborea* en los cantones de Osa, Golfito y Corredores, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 49(1), 1-15.
- Berni, J., Zarco-Tejada, P. J., Suarez, L., y Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722-738. doi:10.1109/TGRS.2008.2010457
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7, 4026-4047. doi:10.3390/rs70404026
- Carranza, M. (2014). *Utilización de la espectro radiometría para el estudio del estado nutricional y fisiológico en plántulas de Jatropha curcas L. (tempate) a nivel de vivero*. (Tesis para optar por el título de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

- Caturegli, L., Corniglia, M., Gaetani, M., Grossi, N., Magni, S., Migliazzi, M.,... Volterrani, M. (2016). Unmanned Aerial Vehicle to Estimate Nitrogen Status of Turfgrasses. *PLoS ONE* 11(6). Doi:10.1371/journal.pone.0158268
- Dash, J. P., Pearse, G. D., & Watt, M. S. (2018). UAV multispectral imagery can complement satellite data for monitoring forest health. *Remote Sensing*, 10, 1216. doi 10.3390/rs10081216
- Dash, J. P., Watt, M. S., Pearse, G. D., Heaphy, M., & Dungey, H. S. (2017). Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 1-14. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007
- Díaz, J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. (Tesis de maestría en Tecnologías de la Información Geográfica). Universidad Complutense de Madrid, España. Recuperado de https://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- DJI. (2019). Mavic Pro. Recuperado de <https://www.dji.com/mavic>
- Duan, T., Chapman, S.C., Guo, Y., & Zheng, B. (2017). Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*, 210, 71-80
- Dunn, B., Singh, H., & Goad, C. (2018). Relationship between chlorophyll meter readings and nitrogen in poinsettia leaves. *Journal of Plant Nutrition*, 41(12), 1566-1575. Doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1459697>
- Dunn, B., & Goad, C. (2015). Effect of foliar nitrogen and optical sensor sampling method and location for determining ornamental cabbage fertility status. *Horticulture Science*, 50(1), 74-77.
- Escobar, L. (2013). *Relación de parámetros de fertilidad del suelo con el índice de sitio determinado para plantaciones forestales de melina (Gmelina arborea) y ceiba*

(*Pachira quinata*) en Zambrano-Bolivar (Colombia). (Tesis de maestría en Ciencias Agrarias). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/44372/>

Esser, A., Ortega, R. y Santibáñez, O. (2002). Nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia productiva en viñas. *Revista Agronomía y Forestal UC*, 15, 4-9.

Fernández-Moya, J., Alvarado, A., San Miguel-Ayanz, A., & Marchamalo-Sacristán, M. (2014). Forest nutrition and fertilization in teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations in Central America. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 44(S1), 1-8. doi:10.1186/1179-5395-44-S1-S6

GADM (Global Administrative Areas). (2018). Recuperado de <https://gadm.org/data.html>

Gitelson, A., Kaufman, Y., & Merzlyak, M. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289-298.

González-Rojas, M., Murillo-Cruz, R., y Ávila-Arias, C. (2016). Crecimiento inicial de *Gmelina arborea* Roxb. aplicando diferentes tratamientos de fertilización en el pacífico sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(33), 29. doi:10.18845/rfmk.v13i33.2575

Hernández, A., Rojas, A., Hine, A. y Daquinta, M. (2013). Multiplicación in vitro de *Gmelina arborea* Roxb en sistemas de inmersión temporal. *Bioteología vegetal*, 13(3), 153-159

Hunt, R., Doraiswamy, P., McMurtrey, J., Daughtry, C., Perry, E., & Akhmedov, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 103-112.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2015). Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales. San José, Costa Rica: INEC.

- Jaramillo, D. (2014). *El suelo: origen, propiedades, espacialidad*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Karl, J., Nierberding, F., Prinz, T., & Knoth, C. (2015). Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry—A new perspective to monitor pest infestation levels. *Forests*, 6, 594-612. Doi: 10.3390/f6030594
- Kharuf-Gutierrez, S., Hernández-Santana, L., Orozco-Morales, R., Aday, O. y Delgado, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *RIELAC*, 39(2), 79-91.
- Landau, E., Brandão, Z. y De Faria, C. (2014). Creación de mapas de manejo con datos espaciales. En IICA y PROCISUR (Eds.), *Manual de agricultura de precisión* (pp. 74-83). Montevideo, Paraguay: IICA.
- Lizcano, R., Olivera, D., Saavedra, D., Machado, L., Rolando, E., Moreno, M. y Fidel, M. (2017). Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos. Colombia: Panamericana Formas e Impresos S.A.
- Louhaichi, M., Borman, M.M., & Johnson, D.E. (2001). Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International* 16(1), 65–70.
- InfoStat (2017.1.2) [Software] (2017). Recuperado de <http://www.infostat.com.ar>
- MAPIR CAMERA. (2019a). Survey3W Camera. Recuperado de <https://www.mapir.camera/products/survey3w-camera-red-green-nir-rgn-ndvi>
- MAPIR CAMERA. (2019b). MAPIR Camera Control. Recuperado de <https://www.mapir.camera/collections/software/products/mapir-camera-control>
- Maresma, A., Ariza, M., Martínez, E., Lloveras, J., & Martínez-Casasnovas, J. (2016). Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. *Remote Sensing*, 8(12), 973. doi:10.3390/rs8120973

- Martinez, H. (2015). Melina (*Gmelina arborea* Roxb.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”. Moravia, Costa Rica, FONAFIFO (Fondo Nacional de Fomento Forestal). 39 p.
- Murillo, R. y Alvarado, A. (2012). Nutrición y fertilización de *Gmelina arborea*. En A. Alvarado y J. Raigosa (Eds.), *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales* (pp. 285-298). San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Murillo, R., Alvarado, A. y Verjans, J.M. (2014). Concentración foliar de nutrimentos en plantaciones de teca en la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 11-28.
- Nyi, W., Wititch, C., & Peerasak, S. (2012). Nondestructive measurement of photosynthetic pigments and nitrogen status in jatropha (*Jatropha curcas* L.) by chlorophyll meter. *Philippine Agricultural Scientist*, 95(2), 83-89.
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2018). Usos y aportes de la madera en Costa Rica, estadísticas 2017. San José, Costa Rica.
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R. (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: A review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2349-2391. doi:10.1080/01431161.2017.1297548
- Pix4D SA. (2019). Pix4Dmapper. Recuperado de <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>
- Pölönen, I., Saari, H., Kaivosoja, J. Honkavaara, E., & Pesonen, L. (2013). Hyperspectral imaging based biomass and nitrogen content estimations from light-weight UAV. *Proceedings of SPIE 8887, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV*, 88870J.

- Precision Hawk. (2019). Precision Mapper. Recuperado de <https://www.precisionhawk.com/precisionmapper>
- QGIS Development Team (2.18.13) [Software] (2017). Recuperado de <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>
- Quemada, M., Gabriel, J., & Zarco-Tejada, P. (2014). Airborne hyperspectral images and ground-level optical sensors as assessment tools for maize nitrogen fertilization. *Remote Sensing*, 6(4), 2940-2962. doi:10.3390/rs6042940
- Quintana, R. (2014). Técnicas avanzadas de análisis para los cultivos en tiempo real. En IICA y PROCISUR (Eds.), *Manual de agricultura de precisión* (pp. 58-70). Montevideo, Paraguay: IICA
- Resende, A. y Coelho, A. (2014). Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo. En IICA y PROCISUR (Eds.), *Manual de agricultura de precisión* (pp. 47-57). Montevideo, Paraguay: IICA
- Ribeiro da Cunha, A., Katz, L., De Pádua, A. y Martínez, R. (2015). Índice SPAD en el crecimiento y desarrollo de plantas de *Lisianthus* en función de diferentes dosis de nitrógeno en ambiente protegido. *IDESIA*, 33(2), 97-105.
- Rouse, J., Hass, R., Deering, D., & Schell, J. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Recuperado de <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740004927.pdf>
- Sibley, J., Eakes, J., Gilliam, C., Keever, G., Dozier, W., & Himelrick, D. (1996). Foliar SPAD-502 meter values, nitrogen levels, and extractable chlorophyll for red maple selections, *Horticultural Science*, 31(3), 468-470.
- Silla, F., González-Gil, A., González-Molina, E., Mediavilla, S., & Escudero, A. (2010). Estimation of chlorophyll in *Quercus* leaves using a portable chlorophyll meter: effects of species and leaf age. *Annals of Forest Science*, 67(108), 1-7

- Segura, M., Castillo, A., Alvarado., A. y Blanco, F. (2006). Variación del contenido foliar de nutrimentos de *Alnus acuminata*. *Agronomía Costarricense*, 30(1), 53-63
- Tapia, A. (2014a). IMN Precipitación media CRTM05. En E. Ortiz-Malavasi (Ed.), *Atlas Digital de Costa Rica*. Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica. 1 DVD
- Tapia, A. (2014b). IMN Temp media CRTM05. En E. Ortiz-Malavasi (Ed.), *Atlas Digital de Costa Rica*. Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica. 1 DVD
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Universidad de Costa Rica. (2015). CR Suelos (versión V 1.0) [Aplicación móvil]. Descargado de <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.creatix.crsuelos>
- Vettorazzi, C. y Best, S. (2014). Adquisición remota y agricultura de precisión. En IICA y PROCISUR (Eds.), *Manual de agricultura de precisión* (pp. 36-46). Montevideo, Paraguay: IICA.
- Watt, M., Pearse, G., Dash, J., Melia, N., & Leonardo, E. (2019). Application of remote sensing technologies to identify impacts of nutritional deficiencies on forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 226-241.
- Wee, A., Li, C., Dvorak, W., & Hong, Y. (2012). Genetic diversity in natural populations of *Gmelina arborea*: Implications for breeding and conservation. *New Forests*, 43(4), 411-428. doi:10.1007/s11056-011-9288-2