



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**

**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

## **DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: “PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA GENERACIÓN DE  
LA LÍNEA BASE EN LA PRONTA DETECCIÓN DE PUDRICIÓN DE  
COGOLLO Y ANILLO ROJO EN PALMA ACEITERA MEDIANTE  
TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES”**

**AUTOR: VIERA TORRES, RONNY MAURICIO**

**DIRECTOR: ING. SINDE GONZÁLEZ, IZAR**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, ***“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA GENERACIÓN DE LA LÍNEA BASE EN LA PRONTA DETECCIÓN DE PUDRICIÓN DE COGOLLO Y ANILLO ROJO EN PALMA ACEITERA MEDIANTE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES”*** fue realizado por el señor ***Viera Torres, Ronny Mauricio*** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de diciembre del 2019

Ing. Izar Sinde González

C.C.: 1756491278

**DIRECTOR**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, *Viera Torres, Ronny Mauricio*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Propuesta metodológica para la generación de la línea base en la pronta detección de pudrición de cogollo y anillo rojo en palma aceitera mediante tecnologías geoespaciales* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 18 de diciembre del 2019

Ronny Mauricio Viera Torres

C.C.: 1717946311



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Viera Torres, Ronny Mauricio** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***Propuesta metodológica para la generación de la línea base en la pronta detección de pudrición de cogollo y anillo rojo en palma aceitera mediante tecnologías geoespaciales*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 18 de diciembre del 2019

Ronny Mauricio Viera Torres

C.C.: 1717946311



## **DEDICATORIA**

Todo el esfuerzo dedicado en este largo camino va dedicado en primer lugar a mi Madre Dolorosa, quien siempre ha estado acompañándome en cada uno de los retos que me he propuesto cumplir y ahora más que nunca en una meta tan importante como lo es la de ser ingeniero.

A mis padres, por su enorme esfuerzo y sacrificio para permitirme lograr cada uno de los anhelos planteados, pues son mi motivación de trabajo perseverante y honesto; por su compañía en los momentos más duros, por sus consejos que me han permitido aprender cada lección de vida presente en mi formación.

A mi abuela, quien es mi segunda madre, quien se ha encargado de inculcarme la educación, valores y grandes enseñanzas en cada una de las etapas de mi vida, quien me ha acompañado en momentos difíciles y en cada uno de los logros alcanzados.

A toda mi familia quienes siempre me han apoyado en cada una de mis decisiones y han brindado sus consejos y experiencias que me han servido como ejemplo para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y docentes del Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción. De manera principal al Ing. Izar Sinde, quien me dio la oportunidad de desarrollar este proyecto, brindándome su apoyo incondicional en cada una de las dificultades presentes, además de su amistad, consejos y enseñanzas.

Al Ing. Alberto Andrade, quien me brindó un gran apoyo en el desarrollo de la investigación a partir de sus enseñanzas y consejos que me han permitido crecer como persona y profesional, por toda la paciencia y oportunidades dadas a lo largo de este tiempo.

Al Ing. César Leiva, Ing. Oswaldo Padilla, Ing. Alexander Robayo, por cada una de las enseñanzas dadas a lo largo de mi formación académica y personal, además de su aporte con recomendaciones en el desarrollo de la investigación.

Un enorme agradecimiento a ANCUPA y al Ing. Vladimir Bravo, quienes me dieron la oportunidad de realizar la investigación en sus instalaciones, por cada uno de los conocimientos compartidos en el campo de la agricultura y consejos en el desarrollo del estudio.

A mis compañeros, quienes me han permitido encontrar una segunda familia, pues han estado en momentos difíciles, en logros importantes, a través de su apoyo y compañía. Quiero agradecer de manera principal a mis grandes amigos, Sebastian Bucheli, por su aporte y ayuda en el desarrollo de la investigación, además de ser un valioso amigo y colega. A María Belén Mora, por ser una excelente compañera y colega, a Karina Rosero por su gran amistad, a Emely Arguello por la amistad duradera y apoyo incondicional en cualquier tipo de situación; a Alejandra Torres, por su valiosa amistad, y a quienes no alcanzo a mencionar, eternamente agradecido.

Finalmente, a mis padres Freddy Viera y Francisca Torres, por ser un pilar fundamental en mi vida y brindarme todo su apoyo para lograr esta gran meta, les agradezco con todo mi corazón.

## ÍNDICE

<b>CERTIFICADO .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xviii</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>ASPECTOS GENERALES</b>	
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Estudios relacionados .....	3
1.3 Planteamiento del problema .....	4
1.4 Justificación e importancia .....	6
1.5 Descripción del área de estudio .....	8
1.6 Objetivos .....	11
1.6.1 Objetivo General .....	11
1.6.2 Objetivos Específicos .....	11
1.7 Metas del proyecto .....	12
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	
1. Sistema de detección remota .....	14
1.1 Resoluciones de datos obtenidos .....	16
1.2 Tipo de sensores .....	17
1.3 Espectroscopía .....	18
1.4 Espectro electromagnético .....	19
2. Aplicación de la teledetección remota a cultivos .....	19

3. Índices de vegetación .....	21
4. Agricultura de precisión .....	23
4. 1 Proceso fotogramétrico en la agricultura de precisión .....	25
5. Palma de aceite.....	27
5.1 Pudrición de Cogollo.....	30
5.2 Anillo Rojo.....	35
6. Prueba estadística ADEVA .....	38

### **CAPITULO III**

#### **METODOLOGÍA**

3.1 Materiales y Equipos .....	44
3.2 Metodología para la captura de imágenes digitales mediante tecnología UAV-Fase A.....	45
3.2.1 Diseño del plan de vuelo para la Fase A .....	45
3.2.2 Parámetros de vuelo para la fase A .....	46
3.3 Procesamiento de imágenes digitales para la fase A.....	46
3.4 Tratamiento de imágenes digitales .....	47
3.4.1 Corrección Atmosférica .....	47
3.4.2 Gain and Offset .....	49
3.4.3 Cálculo de índices de vegetación .....	50
3.4.4 Conteo de palmas por lote .....	52
3.4.4 Exportación de Índices de Vegetación .....	59
3.4.5 Aplicación de la herramienta estadística zonal .....	61
3.4.6 Análisis exploratorio de datos .....	62
3.4.7 Análisis estadístico para analizar las diferencias entre especies de palma aceitera .....	62
3.5 Metodología para la captura de imágenes digitales mediante tecnología UAV-Fase B .....	63
3.5.1 Diseño del plan de vuelo para la Fase B .....	63
3.5.2 Parámetros de vuelo para la fase B .....	64
3.6 Procesamiento de imágenes digitales para la fase B .....	65
3.7 Tratamiento de imágenes digitales .....	65
3.7.1 Cálculo de índices de vegetación .....	66
3.8 Georreferenciación de imágenes .....	67

3.8.1 VARI .....	69
3.8.2 GNDVI .....	69
3.8.3 GVI .....	70
3.9 Análisis multitemporal .....	70
3.9.1 Detección de cambios .....	70
3.9.2 Índices multitemporales .....	74

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1 Fase A .....	78
4.1.1 Generación de Ortomosaicos .....	78
4.1.2 Conteo automático de palmas .....	80
4.1.3 Generación de índices de vegetación .....	81
4.1.3.1 NDVI .....	81
4.1.3.2 GNDVI .....	84
4.1.3.3 GVI .....	92
4.1.3.4 VARI .....	98
4.1.4 Análisis estadístico para diferenciar especies de palma mediante tecnologías geoespaciales .....	101
4.1.4.1 Prueba ADEVA monitoreos sensor RGNIR .....	101
4.1.4.2 Prueba ADEVA monitoreos sensor BGNIR .....	113
4.2 Fase B .....	124
4.2.1 Generación de orto mosaicos .....	124
4.2.2 Generación de índices de vegetación .....	125
4.2.2.1 VARI .....	125
4.2.2.2 GNDVI .....	127
4.2.2.3 GVI .....	129
4.2.3 Detección de enfermedades .....	133
4.2.4 Validación de la detección .....	140
4.2.5 Análisis multitemporal .....	154
4.2.5.1 Detección de cambios .....	154

4.2.6 Índices multitemporales .....	160
4.2.7 Validación del análisis multitemporal.....	165
4.2.8 Propuesta metodológica para la pronta detección de PC y AR.....	171

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones .....	176
5.2 Recomendaciones.....	180

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	184
---------------------------	-----

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Proyectos relacionados</i> .....	4
<b>Tabla 2</b> <i>Diferentes Índices de vegetación</i> .....	22
<b>Tabla 3</b> <i>Grado de severidad de la afectación por PC</i> .....	32
<b>Tabla 4</b> <i>Componentes de la prueba estadística ADEVA</i> .....	41
<b>Tabla 5</b> <i>Materiales y equipos</i> .....	44
<b>Tabla 6</b> <i>Parámetros de vuelo para la fase A</i> .....	46
<b>Tabla 7</b> <i>Bandas del filtro MAPIR RGN</i> .....	51
<b>Tabla 8</b> <i>Bandas del filtro MATRICE Zenmuse 3X RGB y BGNIR</i> .....	51
<b>Tabla 9</b> <i>Rangos de longitud de onda utilizados para calcular Índices de Vegetación</i> .....	54
<b>Tabla 10</b> <i>Parámetros para la herramienta Count Crops</i> .....	57
<b>Tabla 11</b> <i>Rangos de los índices de vegetación</i> .....	60
<b>Tabla 12</b> <i>Parámetros de vuelo para la fase B</i> .....	64
<b>Tabla 13</b> <i>Interpretación visual de la combinación multitemporal</i> .....	76
<b>Tabla 14</b> <i>Resultados del conteo de palmas por especie</i> .....	81
<b>Tabla 15</b> <i>Resumen estadístico del índice NDVI calculado a partir del sensor RGNIR</i> .....	83
<b>Tabla 16</b> <i>Valores del NDVI para la línea base de palma de aceite sin afectación</i> .....	83
<b>Tabla 17</b> <i>Resumen estadístico del índice GNDVI calculado a partir del sensor RGNIR</i> .....	87
<b>Tabla 18</b> <i>Resumen estadístico del índice GNDVI calculado a partir del sensor BGNIR</i> .....	87
<b>Tabla 19</b> <i>Valores GNDVI para la línea base de palma de aceite sin afectación (RGNIR)</i> .....	89
<b>Tabla 20</b> <i>Valores GNDVI para la línea base de palma de aceite sin afectación (BGNIR)</i> .....	91
<b>Tabla 21</b> <i>Resumen estadístico del índice GVI calculado a partir del sensor RGNIR</i> .....	94
<b>Tabla 22</b> <i>Resumen estadístico del índice GVI calculado a partir del sensor BGNIR</i> .....	95
<b>Tabla 23</b> <i>Valores GVI para la línea base de palma de aceite sin afectación (RGNIR)</i> .....	96
<b>Tabla 24</b> <i>Valores GVI para la línea base de palma de aceite sin afectación (BGNIR)</i> .....	97
<b>Tabla 25</b> <i>Resumen estadístico del índice VARI calculado a partir del sensor BGNIR</i> .....	100
<b>Tabla 26</b> <i>Valores VARI para la línea base de palma de aceite sin afectación (BGNIR)</i> .....	100
<b>Tabla 27</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – NDVI – primer monitoreo</i> .....	102
<b>Tabla 28</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – GNDVI – primer monitoreo</i> .....	104
<b>Tabla 29</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – GVI – primer monitoreo</i> .....	105
<b>Tabla 30</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – NDVI – segundo monitoreo</i> .....	106
<b>Tabla 31</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – GNDVI – segundo monitoreo</i> .....	107



<b>Tabla 32</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – GVI – segundo monitoreo.</i>	109
<b>Tabla 33</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor RGNIR – NDVI – primer monitoreo.</i>	110
<b>Tabla 34</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor RGNIR – GNDVI – primer monitoreo.</i>	111
<b>Tabla 35</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor RGNIR – GVI – primer monitoreo.</i>	111
<b>Tabla 36</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – GNDVI – primer monitoreo.</i>	113
<b>Tabla 37</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – GVI – primer monitoreo.</i>	114
<b>Tabla 38</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – VARI – primer monitoreo.</i>	114
<b>Tabla 39</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – GNDVI – segundo monitoreo.</i>	116
<b>Tabla 40</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – GVI – segundo monitoreo.</i>	116
<b>Tabla 41</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – VARI – segundo monitoreo.</i>	117
<b>Tabla 42</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – GNDVI – primer monitoreo.</i>	119
<b>Tabla 43</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – GVI – primer monitoreo.</i>	119
<b>Tabla 44</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – VARI – primer monitoreo.</i>	120
<b>Tabla 45</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – GNDVI – segundo monitoreo.</i>	122
<b>Tabla 46</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – GVI – segundo monitoreo.</i>	122
<b>Tabla 47</b> <i>Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – VARI – segundo monitoreo.</i>	123
<b>Tabla 48</b> <i>Resumen de la estadística descriptiva de los índices de vegetación – Lote Arteaga...</i>	132
<b>Tabla 49</b> <i>Validación en campo de afectaciones a la palma</i>	141
<b>Tabla 50</b> <i>Estadística descriptiva de la validación de detección de enfermedades</i>	149
<b>Tabla 51</b> <i>Resumen estadístico de los puntos de validación</i>	167
<b>Tabla 52</b> <i>Valores base según índices de vegetación propuestos para la identificación de afectaciones</i>	171

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización geográfica de ANCUPA-CIPAL.....	8
<b>Figura 2.</b> Ubicación del estado fenológico 1 (305) en el Lote CIPAL.....	9
<b>Figura 3.</b> Ubicación del estado fenológico 2 (301) en el Lote CIPAL.....	10
<b>Figura 4.</b> Localización geográfica del Lote Arteaga .....	11
<b>Figura 5.</b> Componentes clave del sistema de detección remota .....	14
<b>Figura 6.</b> Proceso de la teledetección .....	16
<b>Figura 7.</b> Tipos de sensores (principios de medición para instrumentos de detección remota basados en tierra (A y B) y en el espacio (C y D). A y C son instrumentos pasivos que miden la radiación viene del sol, mientras que B y D son instrumentos activos que tienen sus propios fuente de señal, como por ejemplo el láser.) .....	18
<b>Figura 8.</b> Espectro electromagnético.....	19
<b>Figura 9.</b> Firma espectral típica de la vegetación.....	21
<b>Figura 10.</b> Adquisición, procedimientos y productos fotogramétricos .....	26
<b>Figura 11.</b> Pudrición del Cogollo .....	31
<b>Figura 12.</b> Grado de severidad de la Pudrición de Cogollo (a. Severidad 1. b. Severidad 1. c. Severidad 2. d. Severidad 3. e. Severidad 4. f. Severidad 5. g. Cráter.) .....	33
<b>Figura 13.</b> Síntomas externos (Acortamiento de hojas en las palmas afectados con Anillo Rojo) .....	37
<b>Figura 14.</b> Síntomas externos (Empaquetamiento de hojas del paquete central y coloración anaranjada de las bases pecoliales).....	38
<b>Figura 15.</b> Flujograma del análisis de varianza.....	40
<b>Figura 16.</b> Metodología.....	43
<b>Figura 17.</b> Diseño del plan de vuelo para la fase A: a) Vuelo 1, que abarca las especies: Comercial CIRAD, Balance ASD, Comercial Taisha, Amazon, Unipalma; b) Vuelo2, que abarca las especies: Comercial INIAP, Riego ASD, CIRAD, INIAP .....	45
<b>Figura 18.</b> Procesos fotogramétricos realizado en Agisoft PhotoScan .....	47
<b>Figura 19.</b> Ejemplo de la corrección atmosférica de orto mosaicos.....	49
<b>Figura 20.</b> Perfil espectral al aplicar corrección atmosférica .....	50
<b>Figura 21.</b> Perfil espectral al aplicar gain and offset.....	50
<b>Figura 22.</b> Índices de vegetación generados para cada uno de los lotes .....	52
<b>Figura 23.</b> Índice DVI calculado para cada lote del CIPAL .....	54
<b>Figura 24.</b> Índice MTVI calculado para cada lote del CIPAL .....	55
<b>Figura 25.</b> Índice NDVI aplicado al lote Taisha .....	56
<b>Figura 26.</b> Índice BAI aplicado a los lotes Amazon y UNIPALMA .....	56
<b>Figura 27.</b> Conteo de palmas por lote de CIPAL .....	59
<b>Figura 28.</b> Insumos raster y vector para la herramienta estadística zonal.....	61
<b>Figura 29.</b> Estadísticas generadas en el SIG .....	62

<b>Figura 30.</b> Diseño del plan de vuelo para la fase B realizada en el Lote Arteaga con la presencia de especies de tipo INIAP.....	64
<b>Figura 31.</b> Tratamiento de imágenes satelitales aplicado al Lote Arteaga: a) Corrección de bandas y establecimiento de metadatos, b) Corrección Atmosférica .....	66
<b>Figura 32.</b> Detección de cambios .....	73
<b>Figura 33.</b> Proceso de detección de cambios.....	73
<b>Figura 34.</b> Análisis del avance de afectaciones a través de análisis multitemporal .....	75
<b>Figura 35.</b> Análisis multitemporal correspondiente al primer y segundo monitoreo mediante el VARI.....	76
<b>Figura 36.</b> Interpretación visual de la combinación multitemporal .....	77
<b>Figura 37.</b> a) y b) Ortomosaicos RGB Y BGNIR respectivamente, obtenidos a partir del dron MATRICE el 18 de abril del 2019. c) y d) Ortomosaicos RGB Y RGNIR respectivamente, obtenidos a partir del dron MAVIC PRO el 18 de abril del 2019 ...	79
<b>Figura 38.</b> a) y b) Ortomosaicos RGB Y BGNIR respectivamente, obtenidos a partir del dron MATRICE el 30 de mayo del 2019. c) y d) Ortomosaicos RGB Y RGNIR respectivamente, obtenidos a partir del dron MAVIC PRO el 22 de agosto del 2019 .....	80
<b>Figura 39.</b> NDVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor RGNIR .....	81
<b>Figura 40.</b> NDVI monitoreo 22 de agosto del 2019 a partir del sensor RGNIR .....	82
<b>Figura 41.</b> Distribución de los valores del NDVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD, c) Material ASD, d) Material Taisha, e) Material UNIPALMA, f) Material Amazon.....	84
<b>Figura 42.</b> GNDVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor RGNIR .....	85
<b>Figura 43.</b> GNDVI monitoreo 22 de agosto del 2019 a partir del sensor RGNIR .....	85
<b>Figura 44.</b> GNDVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor BGNIR .....	86
<b>Figura 45.</b> GNDVI monitoreo 30 de mayo del 2019 a partir del sensor BGNIR.....	86
<b>Figura 46.</b> Distribución de los valores del GNDVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD condición 1, c) Material CIRAD condición 2, d) Material ASD condición 1, e) Material ASD condición 2, f) Material Taisha, g) Material UNIPALMA, h) Material Amazon [Sensor RGNIR] .....	89
<b>Figura 47.</b> Distribución de los valores del GNDVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD condición 1, c) Material CIRAD condición 2, d) Material ASD condición 1, e) Material ASD condición 2 [Sensor BGNIR] .....	90
<b>Figura 48.</b> Distribución de los valores del GNDVI para la línea base (a) Material Taisha condición 1, b) Material Taisha condición 2, c) Material UNIPALMA condición 1, d) Material UNIPALMA condición 2, e) Material Amazon [Sensor BGNIR].....	91
<b>Figura 49.</b> GVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor RGNIR .....	92
<b>Figura 50.</b> GVI monitoreo 22 de agosto del 2019 a partir del sensor RGNIR.....	93
<b>Figura 51.</b> GVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor BGNIR .....	93

<b>Figura 52.</b> GVI monitoreo 30 de mayo del 2019 a partir del sensor BGNIR .....	94
<b>Figura 53.</b> Distribución de los valores del GVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD condición 1, c) Material CIRAD condición 2, d) Material ASD condición 1, e) Material ASD condición 2, f) Material Taisha, g) Material UNIPALMA, H) Material Amazon [Sensor RGNIR] .....	96
<b>Figura 54.</b> Distribución de los valores del GVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD condición 1, c) Material CIRAD condición 2, d) Material ASD condición 1, e) Material ASD condición 2 [Sensor RGNIR] .....	97
<b>Figura 55.</b> Distribución de los valores del GVI para la línea base (a) Material Taisha condición 1, b) Material Taisha condición 2, c) Material UNIPALMA condición 1, d) Material UNIPALMA condición 2, e) Material Amazon [Sensor BGNIR] .....	98
<b>Figura 56.</b> VARI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor BGNIR .....	99
<b>Figura 57.</b> VARI monitoreo 30 de mayo del 2019 a partir del sensor BGNIR .....	99
<b>Figura 58.</b> Distribución de los valores del VARI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD, c) Material ASD, d) Material Taisha, e) Material UNIPALMA, f) Material Amazon .....	101
<b>Figura 59.</b> Diagrama de cajas del índice NDVI - Estado fenológico 1 .....	103
<b>Figura 60.</b> Diagrama de cajas del índice GNDVI - Estado fenológico 1 .....	105
<b>Figura 61.</b> Diagrama de cajas del índice GVI - Estado fenológico 1 .....	106
<b>Figura 62.</b> Diagrama de cajas del índice NDVI - Estado fenológico 1 .....	107
<b>Figura 63.</b> Diagrama de cajas del índice GNDVI - Estado fenológico 1 .....	108
<b>Figura 64.</b> Diagrama de cajas del índice GVI - Estado fenológico 1 .....	109
<b>Figura 65.</b> Diagrama de cajas de los índices a) NDVI, b) GNDVI y c) GVI - Estado fenológico 2 – Primer monitoreo .....	112
<b>Figura 66.</b> Diagrama de cajas de los índices a) GNDVI, b) GVI y c) VARI - Estado fenológico 1 – Primer monitoreo – MATRICE .....	115
<b>Figura 67.</b> Diagrama de cajas de los índices a) GNDVI, b) GVI y c) VARI - Estado fenológico 1 – Primer monitoreo – MATRICE .....	118
<b>Figura 68.</b> Diagrama de cajas de los índices a) GNDVI, b) GVI y c) VARI - Estado fenológico 2 – Primer monitoreo – MATRICE .....	121
<b>Figura 69.</b> Diagrama de cajas de los índices a) GNDVI, b) GVI y c) VARI - Estado fenológico 2 – Segundo monitoreo – MATRICE .....	123
<b>Figura 70.</b> Ortomosaicos obtenidos en el Lote Arteaga .....	125
<b>Figura 71.</b> Índice VARI - Lote Arteaga obtenido el 30 de mayo del 2019 .....	126
<b>Figura 72.</b> Índice VARI - Lote Arteaga obtenido el 13 de junio del 2019 .....	126
<b>Figura 73.</b> Índice VARI - Lote Arteaga obtenido el 26 de junio del 2019 .....	127
<b>Figura 74.</b> Índice GNDVI - Lote Arteaga obtenido el 30 de mayo del 2019 .....	128
<b>Figura 75.</b> Índice GNDVI - Lote Arteaga obtenido el 13 de junio del 2019 .....	128

<b>Figura 76.</b> Índice GNDVI - Lote Arteaga obtenido el 26 de junio del 2019 .....	129
<b>Figura 77.</b> Índice GVI - Lote Arteaga obtenido el 30 de mayo del 2019.....	130
<b>Figura 78.</b> Índice GVI - Lote Arteaga obtenido el 13 de junio del 2019 .....	130
<b>Figura 79.</b> Índice GVI - Lote Arteaga obtenido el 26 de junio del 2019 .....	131
<b>Figura 80.</b> Distribución de los índices de vegetación en cada monitoreo realizado .....	132
<b>Figura 81.</b> Zonas de afectación .....	134
<b>Figura 82.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 1 a partir del índice NDVI. ....	134
<b>Figura 83.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 1 a partir del índice GNDVI.....	135
<b>Figura 84.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 1 a partir del índice GVI. ....	135
<b>Figura 85.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 2 a partir del índice VARI.....	136
<b>Figura 86.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 2 a partir del índice GNDVI.....	136
<b>Figura 87.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 2 a partir del índice GVI. ....	137
<b>Figura 88.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 3 a partir del índice VARI.....	137
<b>Figura 89.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 3 a partir del índice GNDVI.....	138
<b>Figura 90.</b> Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 3 a partir del índice GVI. ....	138
<b>Figura 91.</b> Representación espacial y modelo temporal de incidencia .....	140
<b>Figura 92.</b> Modelo espaciotemporal de la PC. Detección de focos y tendencia de propagación, Agricultura de precisión Cenipalma 2009.....	140
<b>Figura 93.</b> Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones .....	142
<b>Figura 94.</b> Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 1 a partir del índice VARI. ....	142
<b>Figura 95.</b> Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 1 a partir del índice GNDVI. ....	143
<b>Figura 96.</b> Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 1 a partir del índice GNDVI. ....	143
<b>Figura 97.</b> Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 3 a partir del índice VARI. ....	144
<b>Figura 98.</b> Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 3 a partir del índice VARI. ....	144

<b>Figura 99.</b> Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 3 a partir del índice VARI. ....	145
<b>Figura 100.</b> Diagrama de cajas de puntos de validación de los distintos grados de severidad de las afectaciones a partir del índice GVI.....	146
<b>Figura 101.</b> Diagrama de cajas de puntos de validación de los distintos grados de severidad de las afectaciones a partir del índice GNDVI .....	147
<b>Figura 102.</b> Diagrama de cajas de puntos de validación de los distintos grados de severidad de las afectaciones a partir del índice VARI .....	148
<b>Figura 103.</b> Características de la afectación PC grado 1 .....	150
<b>Figura 104.</b> Características de la afectación PC grado 2.....	151
<b>Figura 105.</b> Características de la afectación PC grado 3.....	151
<b>Figura 106.</b> Características de la afectación PC grado cráter.....	152
<b>Figura 107.</b> Características de la afectación PC (muerta) .....	152
<b>Figura 108.</b> Características de la afectación AR .....	153
<b>Figura 109.</b> Detección de cambios VARI primer y segundo monitoreo .....	155
<b>Figura 110.</b> Detección de cambios VARI segundo y tercer monitoreo .....	156
<b>Figura 111.</b> Detección de cambios GNDVI primer y segundo monitoreo .....	157
<b>Figura 112.</b> Detección de cambios GNDVI segundo y tercer monitoreo .....	158
<b>Figura 113.</b> Detección de cambios GVI primer y segundo monitoreo .....	159
<b>Figura 114.</b> Detección de cambios GVI segundo y tercer monitoreo .....	160
<b>Figura 115.</b> Índices multitemporales VARI 1 y VARI 2 .....	161
<b>Figura 116.</b> Índices multitemporales VARI 2 y VARI 3 .....	162
<b>Figura 117.</b> Índices multitemporales GNDVI 1 y GNDVI 2 .....	163
<b>Figura 118.</b> Índices multitemporales GNDVI 2 y GNDVI 3 .....	163
<b>Figura 119.</b> Índices multitemporales GVI 1 y GVI 2.....	164
<b>Figura 120.</b> Índices multitemporales GVI 2 y GVI 3.....	165
<b>Figura 121.</b> Ubicación de los puntos de muestreo para la validación del análisis multitemporal .....	166
<b>Figura 122.</b> Diagrama de cajas: a) VARI primer monitoreo, b) VARI segundo monitoreo, c) VARI tercer monitoreo para los puntos de afectación establecidos.....	168
<b>Figura 123.</b> Diagrama de cajas: a) GNDVI primer monitoreo, b) GNDVI segundo monitoreo, c) GNDVI tercer monitoreo para los puntos de afectación establecidos.....	169
<b>Figura 124.</b> Diagrama de cajas: a) GVI primer monitoreo, b) GVI segundo monitoreo, c) GVI tercer monitoreo para los puntos de afectación establecidos .....	170
<b>Figura 125.</b> Propuesta metodológica para la generación de la línea base para la pronta detección de PC y AR.....	173
<b>Figura 126.</b> Proceso paralelo correspondiente al tratamiento de ortomosaicos .....	174
<b>Figura 127.</b> Mapa de clasificación de palma sana y enferma, por técnica.....	175

## RESUMEN

La finalidad del proyecto consistió en desarrollar una propuesta de metodología para la pronta detección de Pudrición de Cogollo y Anillo Rojo en Palma Aceitera mediante tecnologías geoespaciales, de manera que se realizó fotogrametría de corto alcance mediante los equipos MAVIC PRO con la cámara MAPIR Survey3W (RGNIR, NDVI) y MATRICE 100 de DJI con cámaras RGB y BGNIR, en zonas de estudio con y sin presencia de afecciones, por consecuencia se planteó realizar dos fases. En la fase A se procedió a realizar un vuelo de dron, para su posterior procesamiento y georreferenciación, con la finalidad de obtener un ortomosaico que sirva como insumo para la obtención del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI), Índice de Vegetación Verde (GVI), Índice de resistencia atmosférica visible (VARI) del cultivo sano, ya que son índices de vegetación que tienen cierta correlación y permitirán obtener índices característicos de una palma sin afectación. Los datos y productos obtenidos de esta fase sirvieron de línea base para hacer comparaciones con plantaciones con afectación por PC y AR y para diferenciar las variedades de palma que son empleadas por los palmicultores. En la fase B, se realizó el mismo proceso en tres ocasiones con un intervalo de 15 días, el procesamiento de las imágenes sirvió para la obtención de GNDVI, GVI y VARI en cada toma, para identificar los síntomas y el avance de estos, según cada índice. Se realizó una validación en campo, mediante la toma de puntos GPS de las palmas que presenten síntomas de PC y AR, a través de observación directa por parte de expertos de ANCUPA. Los insumos obtenidos en cada monitoreo permitieron analizar el comportamiento espacial de las enfermedades. Los valores de los índices de vegetación obtenidos de la Fase A y B, tuvieron como objetivo establecer las diferencias entre palmas sanas y enfermas, con la finalidad de desarrollar una metodología para la generación de la línea base de pronta respuesta de las afecciones de PC y AR.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **AGRICULTURA DE PRECISIÓN**
- **DETECCIÓN DE ENFERMEDADES**
- **PALMA ACEITERA**
- **ÍNDICES DE VEGETACIÓN**
- **PUDRICIÓN DEL COGOLLO**
- **ANILLO ROJO**



## **ABSTRACT**

The purpose of the project was to develop a proposal for a methodology for the early detection of “Pudricion de Cogollo (PC)” and “Anillo Rojo (AR)” in Oil Palm using geospatial technologies, so that short-range photogrammetry was performed using MAVIC PRO equipment with the MAPIR Survey3W camera (RGNIR , NDVI) and MATRICE 100 of DJI with RGB and BGNIR cameras, in study areas with and without the presence of conditions, therefore, two phases were proposed. In phase A, a drone flight was carried out, for further processing and georeferencing, in order to obtain an orthomosaic that serves as input for obtaining the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Difference Vegetation Index Normalized Green (GNDVI), Green Vegetation Index (GVI), Index of visible atmospheric resistance (VARI) of the healthy crop, since they are vegetation indices that have some correlation and will allow to obtain characteristic indexes of a palm without affectation. The data and products obtained from this phase served as a baseline to make comparisons with plantations affected by PC and AR and to differentiate the palm varieties that are used by palm growers. In phase B, the same process was carried out three times with an interval of 15 days, the processing of the images served to obtain GNDVI, GVI and VARI in each shot, to identify the symptoms and the progress of these, according to each index Validation was carried out in the field, by taking GPS points of the palms that show symptoms of PC and AR, through direct observation by ANCUPA experts. The inputs obtained in each monitoring allowed to analyze the spatial behavior of the diseases. The values of the vegetation indices obtained from Phase A and B, aimed to establish the differences between healthy and diseased palms, with the purpose of developing a methodology for the generation of the baseline of early response of PC conditions and AR.

### **KEYWORDS:**

- **PRECISION AGRICULTURE**
- **DETECTION OF DISEASES**
- **OIL PALM**
- **VEGETATION INDICES**
- **PUDRICION DE COGOLLO**
- **ANILLO ROJO**

## **CAPÍTULO I**

### **ASPECTOS GENERALES**

#### **1.1 Antecedentes**

La agricultura de precisión consiste en la aplicación de técnicas y sensores geoespaciales (sistemas de información geográfica, sensores remotos, GPS, entre otros) que permiten identificar variaciones del cultivo en el campo (crecimiento de los cultivos y malezas, infestaciones de insectos, deficiencias de nutrientes, condiciones de los cultivos y el suelo) con la finalidad de tratarlas mediante estrategias alternativa (Zhang & Kovacs, 2012). Las imágenes satelitales de alta resolución se usan más comúnmente para estudiar las variaciones mencionadas para las condiciones de los cultivos y el suelo. Sin embargo, la disponibilidad y los costos de las imágenes satelitales sugieren el uso alternativo de tecnologías para suplir dichas desventajas, por esta razón se propone la aplicación de imágenes tomadas en plataformas de detección remotas de baja altitud o pequeños sistemas aéreos no tripulados (UAV) que refiere a la fotogrametría de corto alcance, ya que se muestran como una alternativa potencial por su bajo costo de operación en el monitoreo ambiental, alta resolución espacial y temporal, así como facilidad para la adquisición de imágenes. Como resultado se tiene un producto final confiable para los agricultores, el cual depende de los avances en los diseños de la plataforma de detección remota o de los sistemas aéreos no tripulados (UAV), la producción, estandarización de la georreferenciación de imágenes y creación de mosaicos. Además, se sugiere que dichos avances, deben involucrar al agricultor particularmente en el proceso de diseño de campo, adquisición, interpretación y análisis de imágenes (Zhang & Kovacs, 2012).

Las enfermedades y plagas que afectan a las plantas pueden perjudicar a una amplia gama de cultivos comerciales, lo que da como resultado a una pérdida de rendimiento significativa.

Como solución ante dicha situación, se han desarrollado pesticidas para proteger a los cultivos de enfermedades y plagas, que aumentan el costo de producción y el peligro por presencia de residuos tóxicos en los productos agrícolas. Como solución se plantea la identificación oportuna de parches de enfermedades y plagas dentro de los campos, para tratamientos locales (Huang et al., 2012).

La detección de plagas y enfermedades es de gran interés en la perspectiva del manejo de cultivos, debido a que, la detección temprana de plagas y enfermedades podría ayudar a planificar estrategias de intervención para prevenir un brote. En la palma africana (aceitera) se han desarrollado estudios de detección de la enfermedad Pudrición Basal causada por *Ganoderma boninensis*, un problema fitosanitario significativo en la industria de la palma aceitera, que pudre las palmas de aceite desde la base del estípite, lo que hace que sea estructuralmente vulnerable, cabe recalcar que es una enfermedad altamente contagiosa (Chong et al., 2017).

El uso de sensores remotos permite evaluar el estado de las palmas para obtener un diagnóstico temprano de las enfermedades o infestación de plagas según los síntomas que se muestran en determinados lugares (Chong et al., 2017). En el mismo estudio, Chong et al. (2017), parte de la hipótesis de que la palma aceitera infectada con *Ganoderma boninensis* muestra síntomas observables en una etapa temprana. Se realizaron varios estudios para discriminar las palmas aceiteras afectadas por *Ganoderma boninensis*. En la investigación realizada por Shafri et al. (2011), se utilizó un instrumento hiperspectral de campo portátil para diferenciar la palma de aceite sana e infectada. Se aplicó un enfoque estadístico, análisis de varianza de una vía, para clasificar las plantas enfermas según los datos de reflectancia hiperspectral (rango de 460 a 959 nm).

También se han realizado investigaciones con el objetivo de establecer modelos predictivos del comportamiento espaciotemporal de fenómenos asociados al manejo de la sanidad vegetal, como el daño causado por defoliadores o la incidencia del Complejo Pudrición del Cogollo (PC), mediante el uso del procesamiento digital de imágenes adquiridas por sensores remotos satelitales (Araque & Jiménez, 2009).

El Centro de Investigación de Palma Aceitera, propiedad de la Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Aceitera (ANCUPA), enfoca sus objetivos a la innovación, generación, validación y desarrollo de tecnologías que impulsen la mejora de la producción sostenible y responsable del cultivo de palma en el país, con ello también afrontar las afectaciones que presenta el cultivo, como el Anillo Rojo (AR) y la Pudrición de Cogollo (PC), que son las de mayor importancia económica actualmente.

De acuerdo con el Censo Nacional Palmero 2017, en el Ecuador existe la presencia de la enfermedad PC que afecta al 57.7% de todos los predios cultivados con palma aceitera con un total de 148433.8 hectáreas. Como antecedente, también se conoce que la PC, en los años 1992 y 1993, terminó con 10000 ha en las provincias de Francisco de Orellana y Shushufindi, y para el 2004 y 2005 acabó con 15000 ha en San Lorenzo, Esmeraldas (ANCUPA, 2017).

## **1.2 Estudios relacionados**

Existen varios estudios realizados para determinar el comportamiento espacial de ciertas afectaciones en los cultivos, de manera concreta en el estudio de la palma aceitera, se han realizado investigaciones con aplicación de sensores remotos con la finalidad de realizar monitoreos y detección de enfermedades. En la *Tabla 1* se mencionan algunos trabajos relacionados:

**Tabla 1**  
*Proyectos relacionados*

<b>Autores</b>	<b>Tema</b>	<b>Lugar/Año de Publicación</b>
Chong et al., 2017	“A review of remote sensing applications for oil palm studies”	Malasia, 2017
Araque, L., & Jiménez, A.	Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite.	Revista Palmas, 2009
Samseemoung et al., 2011	Oil palm pest infestation monitoring and evaluation by helicopter-mounted, low altitude remote sensing platform	Journal of Applied Remote Sensing, 2011
Hurtado & Rincón, 2009a	La agricultura de precisión al servicio del manejo agronómico de la palma de aceite,	Revista Palmas, 2009
Hurtado & Rincón, 2009b	La geomática como instrumento para modelar y hacer seguimiento a la Pudrición del Cogollo (PC) y al insecto plaga: <i>Rhynchophorus palmarum</i> . Zona Occidental - Tumaco (Colombia)	Revista Palmas, 2009

### 1.3 Planteamiento del problema

Las enfermedades y plagas de las plantas pueden afectar a una amplia gama de cultivos comerciales y dar como resultado una pérdida de rendimiento significativa (Huang et al., 2012). La palma de aceite es considerada como un cultivo de importancia en varios países de América Latina, pero todos los nuevos desarrollos se enfrentan a un amplio grupo de enfermedades, que están amenazando con su sostenibilidad. La más seria y devastadora de estas enfermedades es la Pudrición del Cogollo (PC), esta se caracteriza por la destrucción de los nuevos tejidos (inicia en la zona del cogollo hasta el meristemo apical) en las plantas infectadas, dichos tejidos son posteriormente colonizados por hongos y bacterias que continúan el proceso de pudrición y eventualmente destruyen todos los nuevos tejidos, lo que conduce finalmente a la pudrición del cogollo (Martínez, 2010). Otra enfermedad que afecta a este tipo de cultivos es el Anillo Rojo (AR), considerada polimórfica, ya que presenta varios síntomas según la edad del cultivo,

severidad o tiempo de infección que posea la planta enferma, también posee variaciones y expresiones de síntomas según las condiciones ambientales y de manejo de cultivo, lo que complica una correcta identificación, pero se consideran algunos síntomas característicos, que pueden ser utilizados como diagnóstico de la enfermedad (Aldana et al., 2010). En la parte externa del cultivo, se ha observado que la alteración más frecuente en el Ecuador es el acortamiento de las hojas del paquete central, que, en casos avanzados, forman un conjunto de hojas raquílicas, deformes y cortas que están acompañadas de folíolos cortos y deformados, que da lugar a una apariencia de plumero. La tasa de crecimiento del tronco se reduce con los años, lo que ocasiona que las plantas enfermas sean de menor tamaño y además de que las mismas pueden vivir por años (Chinchilla., 2010).

Los palmicultores detectan a simple vista la sintomatología de las enfermedades, lo que consiste en una metodología de larga duración (el rendimiento de un censo fitosanitario puede variar de 12 a 20 minutos por hectárea y depende de la topografía y experticia del evaluador) para analizar cada una de las palmas de un lote, además de que requiere un número considerable de personal para realizar censos sanitarios, por lo que se plantea implementar las tecnologías geoespaciales para disminuir tiempo y costos para la pronta detección de enfermedades de la palma aceitera mediante la fotogrametría de corto alcance proporcionada por drones, con cámaras que captan distintas regiones de longitud de onda del espectro electromagnético para calcular índices de vegetación, los cuales demuestran distintas características de las plantas que reflejan su estado, así como, permiten discriminar afectaciones en las mismas (Samseemoung et al., 2011).

Para colaborar con la toma de decisiones, que tengan como objetivo solucionar dicha problemática, es de utilidad tener un monitoreo de los cultivos de la palma aceitera que permita

una pronta detección de las plantas enfermas, con el fin de tomar medidas preventivas y evitar su propagación a las plantas sanas restantes, mediante el empleo de tecnologías geoespaciales como los UAV's (Drones) con cámaras que capten distintas regiones de longitud de onda del espectro electromagnético para calcular índices de vegetación como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el cual se emplea los valores del rojo e infrarrojo cercano, los cuales demuestran distintas características de las plantas que reflejan su estado, así como, permiten identificar afectaciones en las mismas (Samseemoung et al., 2011).

#### **1.4 Justificación e importancia**

La detección temprana de las enfermedades PC y AR, permite disminuir los impactos económicos, en el caso de la PC, consiste en un problema fitosanitario de gran importancia económica para el cultivo de palma, ya que está asociada con la disminución en la productividad de racimos, calidad, tasa de extracción del aceite y, por último, aumenta los costos de producción (Munévar et al., 2000). El AR es una enfermedad que ha sido responsable de pérdidas muy severas en la palma aceitera en todos los países donde se ha detectado, debido al alto número de insectos portadores de nematodos, el manejo óptimo de esta enfermedad consiste en la detección temprana y la eliminación de todas las palmas afectadas, así como la implementación de programas para el control del vector (Martínez, 2010).

ANCUPA ha realizado un informe sobre el Censo Nacional Palmero 2017 en el cual se evidencia la problemática que enfrenta el país con respecto a la afectación de los cultivos por la Pudrición del Cogollo (PC). La provincia de Esmeraldas es la que se encuentra afectada principalmente y alcanza un 58% de superficie nacional de plantas afectadas por esta



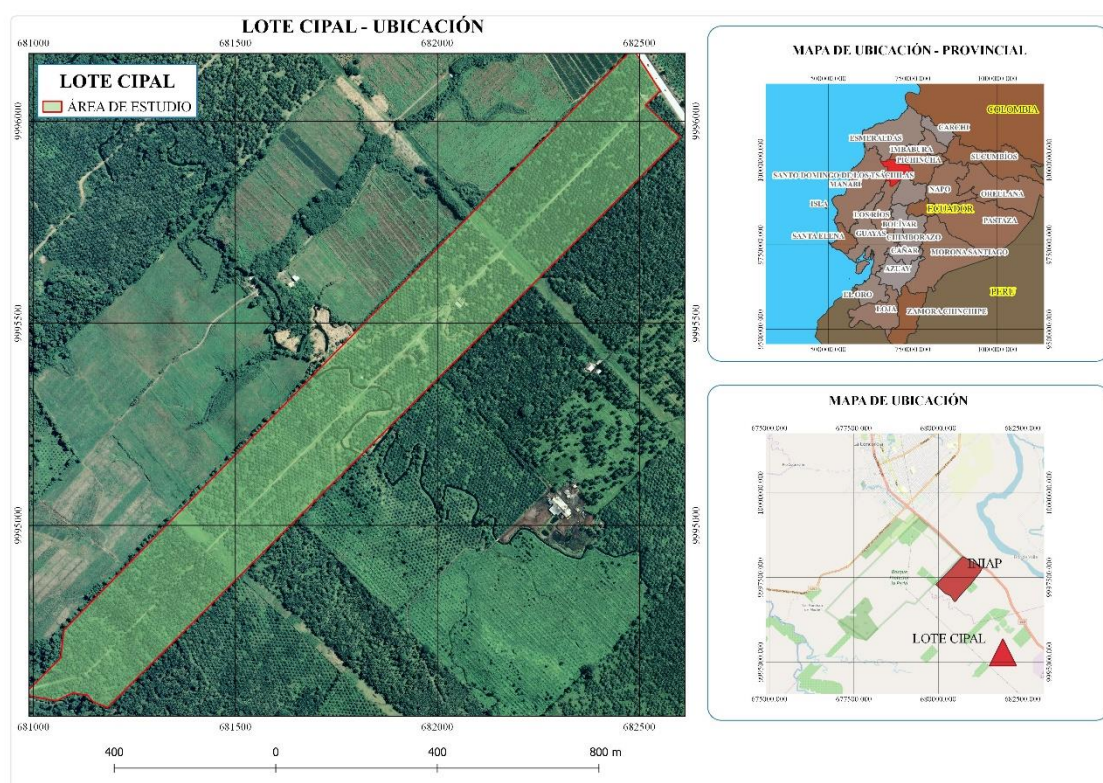
enfermedad. Así mismo, el informe revela que el cantón con mayor presencia de plantas afectadas por PC es Quinindé. Esto demuestra que las acciones se deben enfocar en las zonas con mayor presencia de afectación, para lograr mantener la enfermedad bajo el umbral de importancia económica, pues la enfermedad no se puede eliminar completamente a pesar de las prácticas que se empleen (ANCUPA, 2017).

La agricultura de precisión es una de las herramientas que actualmente han presentado resultados eficaces en cuanto al monitoreo de la producción y mejoría de los cultivos, ya que se puede tener información oportuna de las diferentes deficiencias que puedan afectar a los mismos. Una de las tecnologías más efectivas, es el empleo de los UAV's (Drones) ya que estos presentan una serie de beneficios como la disponibilidad de uso en la mayor parte de circunstancias, el costo de adquisición en función de la extensión que puede abarcar, la facilidad de manejo de la información obtenida, identificación de las plagas y control de producción. En conclusión, esta tecnología representa un ahorro de costes significativo cuando se requiere un monitoreo de grandes extensiones de cultivos (Zhang & Kovacs, 2012).

Para colaborar con la toma de decisiones, que tengan como objetivo solucionar dicha problemática, es de utilidad tener un monitoreo de los cultivos de la palma aceitera que permita una pronta detección de las plantas enfermas, con el fin de tomar medidas preventivas y evitar su propagación a las plantas sanas restantes, mediante el empleo de tecnologías geoespaciales como los UAV's (Drones), lo que reflejará en la mejoría de la producción y calidad de los frutos.

## 1.5 Descripción del área de estudio

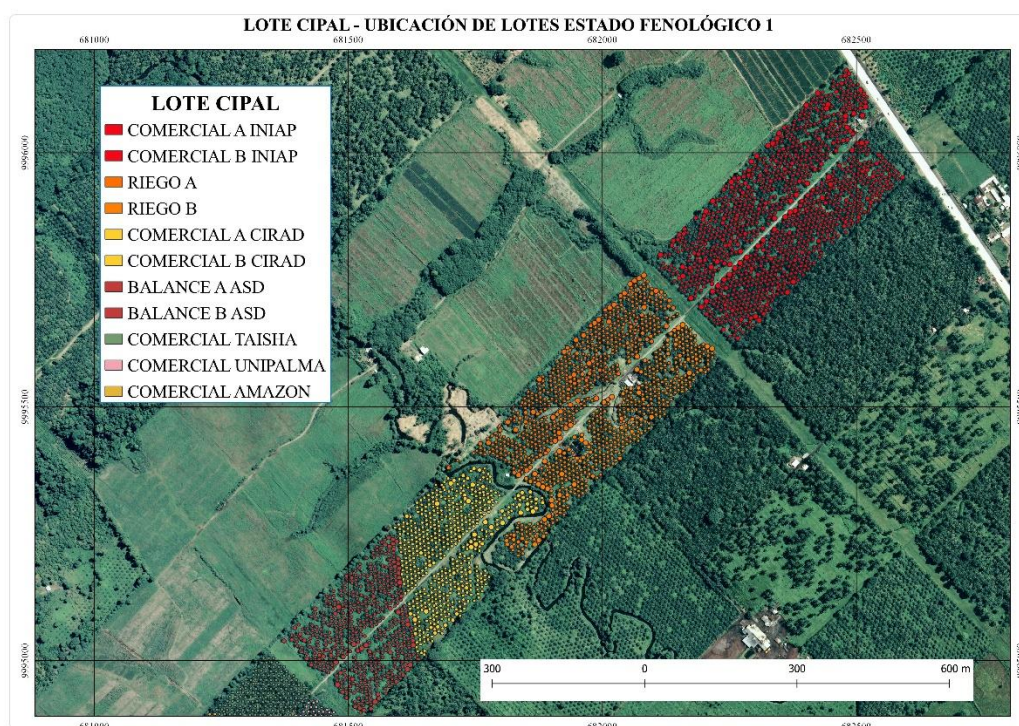
El área de estudio para desarrollar la primera fase comprende los lotes de cultivos de palma aceitera del Centro de Investigaciones de Palma (CIPAL) pertenecientes a la Asociación Nacional de Palmicultores (ANCUPA), ubicada en el kilómetro 37 vía Santo Domingo-Quinindé, cantón La Concordia de la provincia de Santo Domingo, cuya área es de 52 hectáreas, ver **Figura 1**.



**Figura 1.** Localización geográfica de ANCUPA-CIPAL

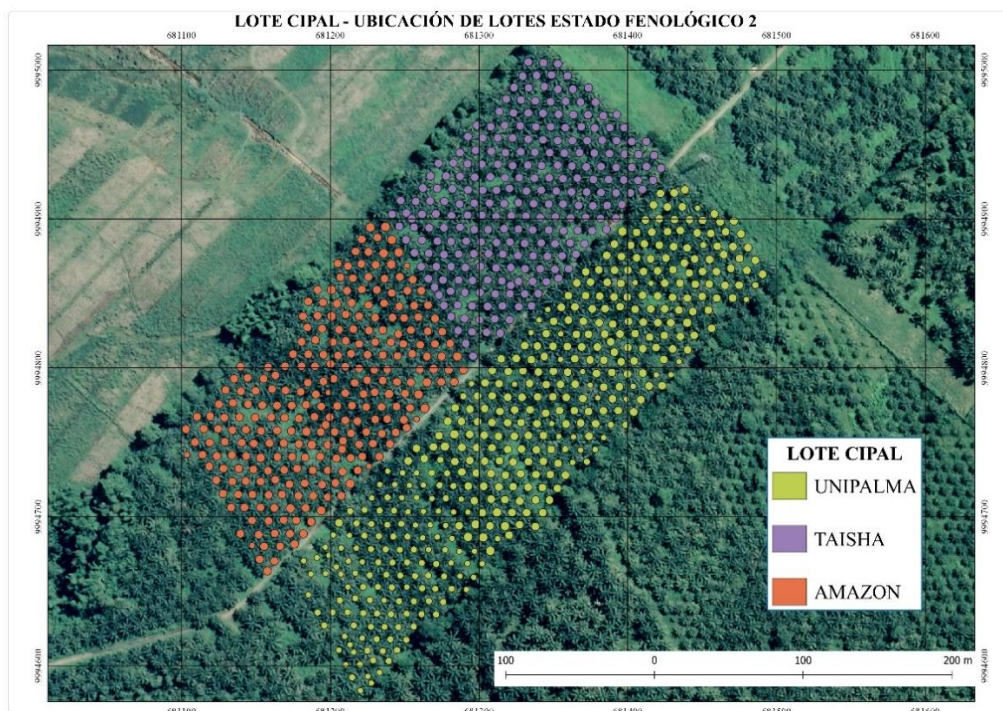
En esta área de estudio se encuentran distribuidas las especies pertenecientes al estado fenológico 305 según la escala BBCH, que se ha denominado como 1 en este estudio de aproximadamente 15 años (INIAP, CIRAD, ASD) en los lotes detallados en la **Figura 2**, cabe

resaltar que el lote RIEGO A y B contiene a las tres especies mencionadas; el estado fenológico 301 con palmas de 2 años (Taisha, UNIPALMA, Amazon), denominado como 2, que consisten en híbridos de palmas, se puede apreciar en la **Figura 3**.



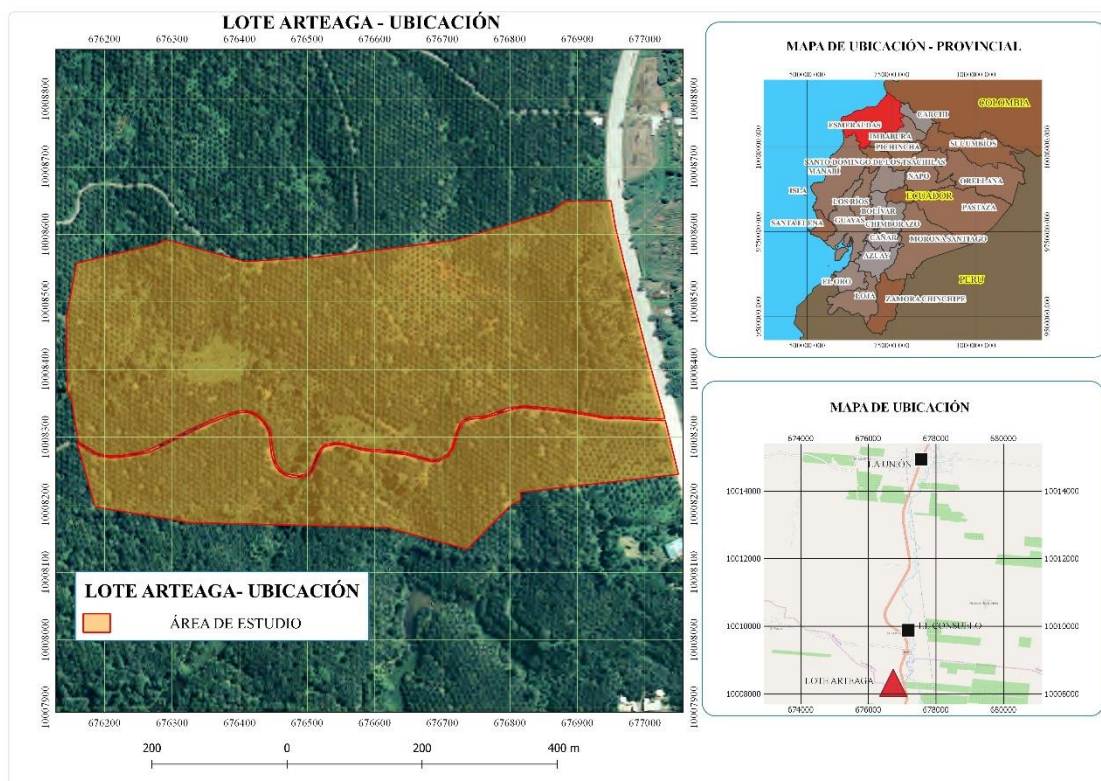
**Figura 2.** Ubicación del estado fenológico 1 (305) en el Lote CIPAL





**Figura 3.** Ubicación del estado fenológico 2 (301) en el Lote CIPAL

Para el desarrollo de la segunda fase del estudio, se analizó la palmicultora “Lote Arteaga”, ubicada en el kilómetro 124 vía Esmeraldas, cantón Quinindé de la provincia de Esmeraldas, posee 40 hectáreas, con aproximadamente 28 hectáreas de cultivos sin afectación, ver **Figura 4**.



**Figura 4.** Localización geográfica del Lote Arteaga

## 1.6 Objetivos

### 1.6.1 Objetivo General

Desarrollar una propuesta metodológica mediante índices de vegetación para la generación de la línea base para la pronta detección de las enfermedades PC y AR en cultivos de palma aceitera.

### 1.6.2 Objetivos Específicos

- Obtener y procesar imágenes digitales de las zonas de estudio donde se encuentran cultivos de palmas aceiteras sanas y afectadas por PC y AR obtenidas mediante un UAV que capte

valores de rojo e infrarrojo del espectro electromagnético para identificar las diferentes variedades de palmas y afectaciones de la planta.

- Estimar la respuesta del índice NDVI, GNDVI, GVI, VARI de los cultivos mediante el procesamiento de las imágenes para analizar estadísticamente sus diferencias en cuanto a variedades de palma y afectaciones, que presenta la palma aceitera en la zona de estudio perteneciente al CIPAL.
- Analizar la afectación de PC y AR en las palmas ubicadas en el lote Arteaga a partir de las imágenes e índices calculados por medio de métodos estadísticos.
- Realizar una evaluación multitemporal del comportamiento de PC y AR en las palmas de estudio con la finalidad de detectar cambios en el crecimiento de las enfermedades existentes, contrastado con los índices calculados.

### **1.7 Metas del proyecto**

- Imágenes digitales y ortomosaico de la zona de estudio perteneciente al CIPAL.
- Imágenes digitales y ortomosaico de las tres distintas fases con distinto grado de afectación de las enfermedades en la zona de estudio perteneciente el lote Arteaga.
- Reporte de NDVI, GNDVI, GVI, VARI de variedades de palma presentes en el lote CIPAL.
- Reporte estadístico de las posibles diferencias entre variedades de palma según los índices de vegetación calculados.

- Reporte de NDVI, GNDVI, GVI, VARI de las diferentes tomas en las zonas de cultivos con afectación.
- Reporte de la detección de los síntomas de las enfermedades.
- Reporte estadístico de la posible diferencia entre cultivos sanos y con afectaciones según los índices de vegetación calculados.
- Mapa del índice NDVI, GNDVI, GVI, VARI para cultivos sin afectación.
- Mapas del índice NDVI, GNDVI, GVI, VARI correspondientes a los tres monitoreos de cultivos afectados.
- Análisis multitemporal del avance de los síntomas de las enfermedades.
- Propuesta de metodología para la pronta detección de PC y AR en la palma aceitera.

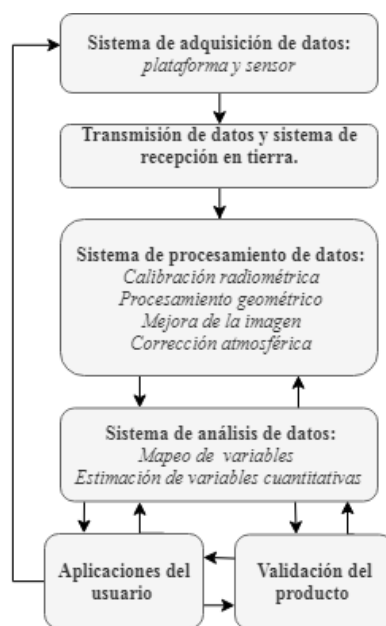


## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 1. Sistema de detección remota

Un sistema de detección remota consiste en la instrumentación, procesamiento y análisis diseñados para medir, monitorear y predecir los aspectos físicos, químicos y biológicos presentes en el sistema del planeta Tierra, ver **Figura 5**. Se han desarrollado nuevas tecnologías sofisticadas para recopilar vastas cantidades de datos, y la complejidad matemática y física de las técnicas utilizadas para procesar y analizar los datos observados ha aumentado considerablemente (Liang et al., 2012).



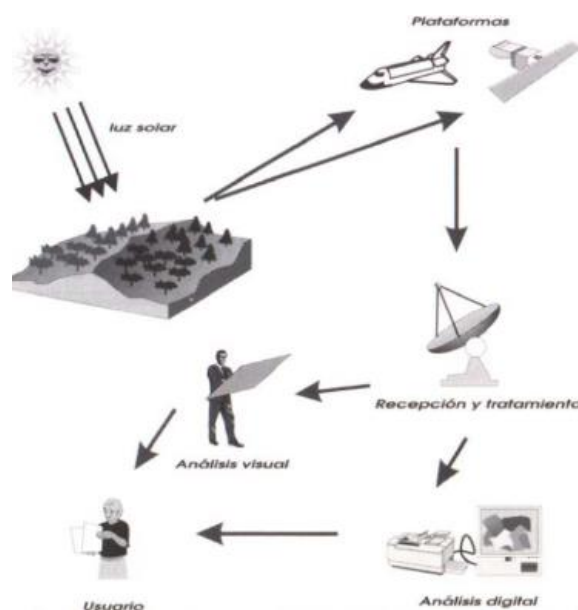
**Figura 5.** Componentes clave del sistema de detección remota

Fuente: (Liang et al., 2012).

La teledetección utiliza los sensores remotos, que consisten en instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (radiación reflejada o emitida) que llega desde la Tierra y

atmosfera, de manera que es convertida en una magnitud física que puede ser tratada y grabada y que da lugar a la fotografía digital. Dichos sensores se ubican en plataformas, que pueden fijas o móviles (mástiles, grúas, globos, aviones, satélites). Las características de las imágenes registradas dependen de las propiedades del sensor que se ha utilizado y de la distancia al suelo desde la cual se realizó la adquisición de datos (Sobrino et al., 2000).

Según Okamoto (2001) la teledetección se define como una técnica para identificar, clasificar y determinar objetos, así como para obtener información sobre sus propiedades físicas a través del análisis de los datos sobre los objetos recopilados mediante el uso de sensores remotos, por lo general, los datos analizados son los de las ondas electromagnéticas emitidas o reflejadas por los objetos. También Okamoto (2001) menciona que la teledetección, en sentido estricto, puede definirse como un método para recuperar las propiedades físicas de objetos tales como la superficie del suelo y la atmósfera, y los fenómenos observados alrededor de la tierra mediante la medición remota de la emisión electromagnética y las características de dispersión, ver **Figura 6**. Las especificaciones de la plataforma y el sensor determinan las resoluciones de los datos obtenidos por técnicas de teledetección, las cuales consisten en: espacial, espectral, temporal y radiométrica (Liang et al., 2012).



**Figura 6.** Proceso de la teledetección  
Fuente: (Perez Gutierrez & Muñoz Nieto, 2006)

### 1.1 Resoluciones de datos obtenidos

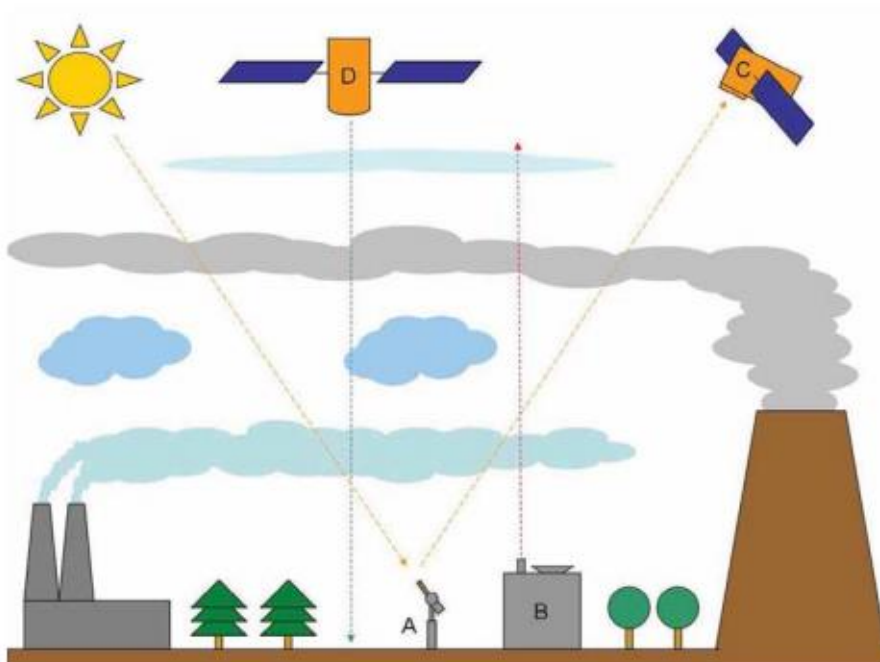
La resolución espacial consiste en una medida del objeto más pequeño que puede ser captada por el sensor, o la imagen del área del terreno para el campo de visión instantáneo (IFOV) del sensor, o la dimensión lineal en el suelo representada por cada píxel. Por otro lado, la resolución espectral describe el número y el ancho de las bandas espectrales en un sistema de sensores. Muchos sistemas de sensores tienen una banda pancromática, que es una única banda ancha en el espectro visible-Infrarrojo o Infrarrojo-térmico. Los sistemas hiperspectrales suelen tener cientos de bandas espectrales estrechas, por ejemplo, Hyperion en el satélite EO-1 tiene 220 bandas con anchos de 30 m de resolución espacial (Liang et al., 2012).

La resolución temporal es una medida del ciclo de repetición o la frecuencia con la que un sensor vuelve a visitar la misma parte de la superficie de la Tierra. Las características de frecuencia están determinadas por el diseño del sensor de satélite y su patrón de órbita. Por

último, la resolución radiométrica se refiere al rango dinámico, o la cantidad de números de salida diferentes en cada banda de datos, y se determina por el número de bits en que se divide la radiación registrada. Es así como, en 8 bits de datos, los números digitales pueden variar de 0 a 255 para cada píxel ( $2^8 = 256$  números totales posibles). Obviamente, más bits dan como resultado una mayor precisión radiométrica del sensor (Liang et al., 2012).

## **1.2 Tipo de sensores**

Se distinguen dos tipos de sensores utilizados en el sistema de teledetección, en primer lugar, se tiene a los sensores remotos pasivos, que consisten en métodos que utilizan la detección de las características radiactivas o reflectantes del sistema observado, es decir, el sensor pasivo registra la radiación emitida por el sistema observado o la radiación solar reflejada, como, por ejemplo, las cámaras de fotos, radiómetros y sistemas de video (Sobrino et al., 2000). Por último, Sobrino et al. (2000) menciona que los sensores remotos activos, que consisten en aquellos en los que el sensor cumple una doble función, debido a que actúa de manera activa al producir una señal (onda electromagnética) de características conocidas que posteriormente se registraran después de interaccionar con el sistema observado, la información que se obtiene procede de la comparación entre la señal emitida y la reflejada, entre los sensores remotos activos, se tiene el Radar y el Lidar, ver *Figura 7*.



**Figura 7.** Tipos de sensores (principios de medición para instrumentos de detección remota basados en tierra (A y B) y en el espacio (C y D). A y C son instrumentos pasivos que miden la radiación viene del sol, mientras que B y D son instrumentos activos que tienen sus propios fuente de señal, como por ejemplo el láser.)

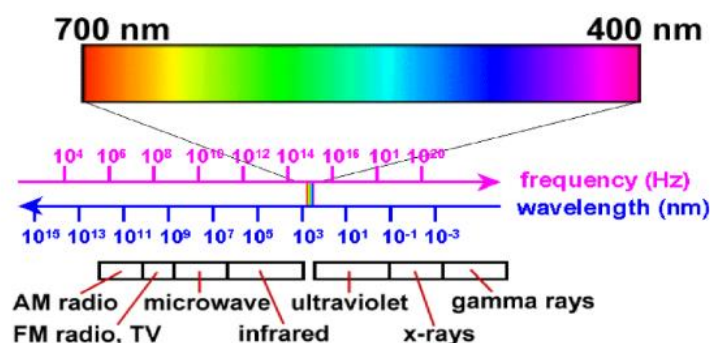
Fuente: (Mielonen, 2010)

### 1.3 Espectroscopía

Según Warner et al. (2009), la teledetección tiene como base a la espectroscopía, que se define como el estudio de la luz como una función de la longitud de onda que se ha emitido, reflejado o dispersado de un sólido, líquido o gas. En la detección remota, la cantidad más utilizada es la reflectancia (superficial expresada como porcentaje). También mencionan que es importante tener en cuenta a la espectroradiometría, que consiste en la tecnología para medir la potencia de la radiación óptica en intervalos de longitud de onda estrechos y contiguos. Las cantidades medidas se expresan generalmente como irradiancia espectral (medida comúnmente en  $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ) y radiación espectral (medida comúnmente en  $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ).

## 1.4 Espectro electromagnético

Es importante analizar al espectro electromagnético, que se extiende sobre una amplia región espectral y se divide aproximadamente en ondas de radio y luz, ver **Figura 8**. Según las definiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones en la constitución de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, las ondas electromagnéticas cuyas frecuencias son inferiores a 3.000 GHz se definen como ondas de radio. Las ondas electromagnéticas en un amplio rango de frecuencias entre 3 THz y aproximadamente 400 THz (entre 0,1 mm y aproximadamente 0,75  $\mu\text{m}$  en longitud de onda) se denominan genéricamente radiación infrarroja. Aquellos entre 0,4  $\mu\text{m}$  y aproximadamente 0,75  $\mu\text{m}$  en longitud de onda se denominan luz visible, y entre 10 nm y 400 nm (0,4  $\mu\text{m}$ ) se denominan radiación ultravioleta. Las ondas electromagnéticas con una onda más corta incluyen rayos X y rayos gamma (Okamoto, 2001).



**Figura 8.** Espectro electromagnético.

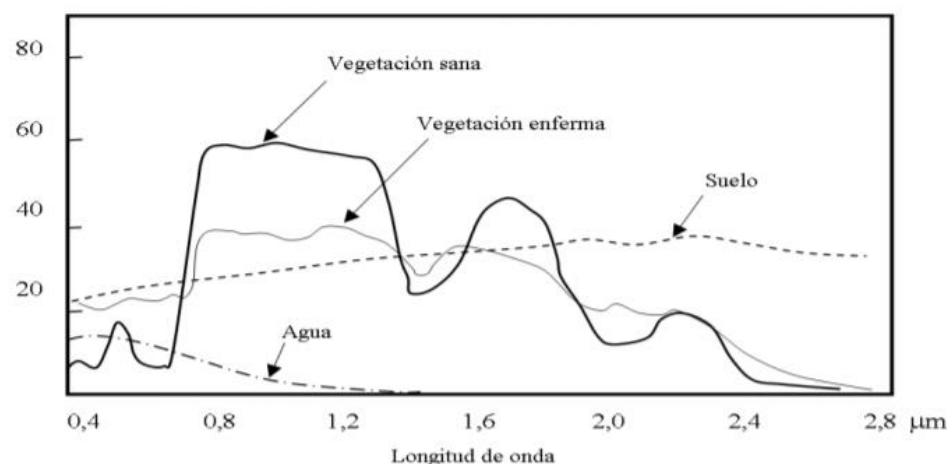
Fuente: (Perez Gutierrez & Muñoz Nieto, 2006)

## 2. Aplicación de la teledetección remota a cultivos

La teledetección aplicada a cultivos se realiza principalmente mediante la obtención de la información de reflectancia de la onda electromagnética de los doseles con sensores pasivos. Se conoce que la reflectancia de los espectros de luz de las plantas cambia según el tipo, el

contenido de agua en los tejidos y otros factores intrínsecos. La reflectancia de la vegetación al espectro electromagnético (reflectancia espectral o características de emisión de la vegetación) está determinada por las características químicas y morfológicas de la superficie de los órganos u hojas, ver **Figura 9**. Las aplicaciones principales para la detección remota de vegetación se basan en los siguientes espectros de luz: en primer lugar, la región ultravioleta (UV), que va de 10 nm a 380 nm; seguido de los espectros visibles, que están compuestos por las regiones de longitud de onda azul (450–495 nm), verde (495–570 nm) y roja (620–750 nm), y, por último, la banda infrarroja cercana y media (850–1700 nm). Con el uso de instrumentación espectral de alta resolución, el número de bandas obtenidas mediante la teledetección aumenta y el ancho de banda se reduce. Una de las aplicaciones de la teledetección es la generación de índices de vegetación, que consisten en combinaciones algebraicas de varias bandas espectrales, diseñadas para resaltar el vigor y las propiedades de la vegetación (biomasa del dosel, radiación absorbida, contenido de clorofila, etc.) (Candiago et al., 2015). Uno de los índices más utilizados, implementados y calculados a partir de la información multiespectral como proporción normalizada entre las bandas roja e infrarroja cercana es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Un uso directo de NDVI es para caracterizar el crecimiento o el vigor del dosel; por lo tanto, muchos estudios lo han comparado con el Índice de Área de la Hoja (LAI), donde la LAI se define como el área de hojas de un solo lado por área de suelo. La información sobre la vegetación a partir de imágenes de sensores remotos se interpreta principalmente por las diferencias y los cambios de las hojas verdes de las plantas y las características espectrales del dosel. El proceso de validación más común es a través de correlaciones directas o indirectas entre los índices de vegetación obtenidos y las características de interés de la vegetación medidas in

situ, como la cobertura de vegetación, el LAI, la biomasa, el crecimiento y la evaluación del vigor (Xue & Su, 2017).



**Figura 9.** Firma espectral típica de la vegetación.

Fuente: (Hernandez & Montaner, 2009)

### 3. Índices de vegetación

El NDVI es una relación que muestra la normalización de la absorción de pigmento en el canal rojo y la dispersión de la cubierta en el canal NIR (Espinoza et al., 2017). Este índice varía de  $-1.0$  a  $1.0$ , los valores positivos indican un aumento del verdor y los negativos indican características sin vegetación como agua, áreas áridas, hielo, nieve o nubes. El rango común para la vegetación verde es  $0.2-0.9$ . Los valores moderados representan arbustos y pastizales ( $0.2-0.3$ ), mientras que los valores más altos indican bosques y cultivos ( $0.4-0.9$ ). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) se calcula de manera similar al NDVI, pero la banda verde se usa en lugar de la banda roja. Se relaciona con la proporción de radiación fotosintéticamente absorbida y se correlaciona linealmente con el Índice de Área de la Hoja (LAI) y la biomasa. Por lo tanto, GNDVI es más sensible a la concentración de clorofila que el



NDVI y varía de 0 a 1.0 (Candiago et al., 2015). El Índice de Vegetación Verde (GVI) es una transformación se utiliza para distinguir las diferencias en la vegetación, en las condiciones de turgencia entre los diferentes tipos de vegetación y en el reconocimiento de las diversas etapas del desarrollo de los cultivos en relación con otros elementos (Dalposso et al., 2013). Últimamente, se han sugerido índices que se rigen completamente en la parte visible del espectro, como el índice de vegetación verde (VIg) y el Índice de Resistencia Atmosférica Visible (VARI) (Gitelson et al., 2002). El VARI es mínimamente sensible a los efectos atmosféricos y ha sido desarrollado para poder estimar la fracción de vegetación verde, las bandas utilizadas han sido seleccionadas específicamente por su sensibilidad a la fracción de vegetación (Gitelson et al., 2002). A diferencia del NDVI, que es sensible a los cambios en las fracciones de vegetación pequeñas e insensible a los cambios en las fracciones de vegetación moderadas y altas, el VARI muestra una respuesta lineal a la fracción de vegetación en todo el rango (Schneider et al., 2008). El estudio realizado por Kaufman y Tanré (1992), afirma que este índice de vegetación reduce los efectos atmosféricos restando el canal azul en el denominador. Gitelson et al. (2002) mostraron la viabilidad de la estimación de la fracción de vegetación verde con un error de menos del 10%. Dichos índices serán considerados dentro de la investigación y se puede apreciar su ecuación en la **Tabla 2**.

**Tabla 2**  
*Diferentes Índices de vegetación.*

Índice de Vegetación	Acrónimo	Ecuación	Referencia
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	NDVI	$\frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)}$	(1) (Rouse et al., 1974)
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde	GNDVI	$\frac{(\rho_{NIR} - \rho_G)}{(\rho_{NIR} + \rho_G)}$	(2) (Louhaichi et al., 2001)

CONTINÚA



Índice de Vegetación Verde	GVI	$\frac{\rho_{NIR}}{\rho_G}$	(3)	(Sripada et al., 2006)
Índice de Resistencia Atmosférica Visible	VARI	$VARI = \frac{Green - Red}{Green + Red - Blue}$	(4)	(Gitelson et al., 2002)

#### 4. Agricultura de precisión

En cuanto al estudio de recursos naturales y vegetación, Krishna (2018) menciona que los aviones y satélites fueron algunas de las primeras plataformas de sensores remotos en ofrecer imágenes aéreas de los recursos naturales de la Tierra. Las imágenes satelitales cubren vastos tramos de la superficie de la tierra, pero cabe recalcar, que la resolución y la claridad de las imágenes dependen de los sensores y de las condiciones climáticas naturales. Dichos productos han mejorado con el tiempo en términos de resolución, precisión y nitidez; sin embargo, se quedan cortos de grandes detalles, primeros planos y retransmisión rápida de imágenes. Esto es posible con imágenes asistidas por drones de la superficie de la tierra. Los drones pueden volar a bajas altitudes por encima de los recursos naturales que necesitan ser fotografiados y estudiados. Se ha utilizado este tipo de tecnología geoespacial para estudiar la vegetación natural, los bosques, las plantaciones forestales, las tierras de cultivo, los ríos, los riachuelos, los canales de irrigación, etc. Las cámaras de alta resolución instaladas en drones generalmente transmiten excelentes detalles de la superficie del suelo. Por ejemplo, cada arbusto en un terreno baldío o plántula en un campo de cultivo podría ser fotografiado. Luego, las coordenadas del GPS podrían ser utilizadas para identificarlas (Krishna, 2018).

La agricultura de precisión está considerada dentro del campo de la “automatización agrícola” que se encuentra entre los temas más populares de discusión. La automatización

agrícola reduce principalmente la participación humana o, a veces, la elimina por completo (Zhang & Pierce, 2013). La maquinaria agrícola y su automatización se suman a la precisión, pues se reducen los errores asociados a la fatiga humana. También se suma a la eficiencia energética y económica de las operaciones agrícolas. Según Krishna (2018), con los drones se podrían realizar operaciones agronómicas, evaluar el potencial de riego, realizar un estudio de enfermedades / plagas, un estudio de malezas, fumigación, entre otras. Los drones son cada vez más comunes para la vigilancia general y la exploración de cultivos. La ventaja más clara es que el uso de aviones no tripulados aumenta la eficiencia de la producción de cultivo, además de reducir el tiempo de exploración y fumigación, también este tipo de tecnología es fácil de usar en campos agrícolas y agrega datos que son útiles al tomar decisiones basadas en computadora.

La agricultura de precisión enfocada en la detección de enfermedades utiliza los sensores en los drones para mostrar los síntomas de manera efectiva y con buena resolución. Con el objetivo de obtener un banco de datos para todas las enfermedades que se pueden detectar y mapear de manera efectiva. En general, la detección temprana de cualquier enfermedad ayuda a un control eficiente. Los agricultores que adoptan la tecnología de aviones no tripulados para detectar y mapear diversas enfermedades y plagas podrían beneficiarse de tales transferencias de datos espectrales (West et al, 2009).

La agricultura de precisión tiene como objetivo optimizar la gestión de un lote a través de ciertos puntos de vista, como lo es el agronómico, que consiste en el ajuste de prácticas que se aplican al cultivo acorde a las necesidades de la planta (satisfacción de nutrientes); el medioambiental, que contempla la disminución del impacto producido por la actividad agrícola (dispersión de nutrientes que se convierten en contaminación); por último, el punto de vista económico, con la finalidad del incremento de la competitividad a través de la mayor eficacia de

las prácticas ( mejora de la gestión referente al coste de estiércol nitrogenado) (Hurtado & Rincón, 2009a). Es válido también resaltar la Agricultura específica, que consiste en el arte de llevar a cabo prácticas agronómicas requeridas por una especie vegetal, en concordancia con las condiciones espaciales y temporales de la zona de estudio, con el objetivo de obtener un rendimiento potencial; la variabilidad espacial, abarca los cambios sufridos por el terreno de cultivo, que se pueden apreciar en un mapa de rendimiento, que tiene como insumos posiciones precisas, de manera que mediante un sistema GPS se adquiera dichas posiciones, al tiempo que se recopilan variables de intereses que mantengan relación espacial (calidad de suelo, cantidad de agua, densidad del cultivo, entre otros). La variabilidad temporal consiste en la comparación de un determinado número de mapas de la misma zona de estudio (diario, semanal, mensual, anual), de manera que se realice una interpretación para la obtención de deducciones, además de alcanzar mapas de tendencias que muestren características esenciales a tomar en cuenta (Hurtado & Rincón, 2009a).

#### **4. 1 Proceso fotogramétrico en la agricultura de precisión**

La fotogrametría es la ciencia de obtener información confiable sobre las propiedades de superficies y objetos sin contacto físico con ellos y de medir e interpretar esta información, proporciona métodos para obtener información. Si se desean determinar distancias, áreas, el objetivo básico es obtener las coordenadas del objeto (terreno) de cualquier punto en la foto que luego permitirá calcular datos geométricos. Es importante tener en cuenta el principio de la estereoscópica, que se utiliza para obtener información tridimensional en fotogrametría. De forma básica se establece que si se tienen dos (o más) fotos del mismo objeto tomadas desde diferentes posiciones, se pueden calcular fácilmente las tres coordenadas dimensionales de cualquier punto

que esté representado en ambas fotos (Linder, 2013). En la **Figura 10** se puede apreciar la adquisición de datos, procedimientos y productos de la fotogrametría.



**Figura 10.** Adquisición, procedimientos y productos fotogramétricos  
Fuente: (Schenk, 2005)

Según Gogarty & Robinson (2012) se define como “vehículo no tripulado” a cualquier vehículo que se guíe de forma remota sin ser conducido o pilotado por seres humanos. Incluye varios tipos de vehículos terrestres, robots y máquinas voladoras, de esta manera *UAV* (*Unmanned Aerial Vehicle*) se refiere a robots aéreos o drones que vuelan en la ruta predeterminada o usando comandos de una computadora o sistema de control de comandos. Los controles remotos de mano son los más comúnmente utilizados para controlar la ruta de vuelo de dichos UAV. La palabra "drones" es el término más utilizado y ampliamente reconocido dentro de los ámbitos del uso militar, agrícola y público. Sobre la base del grado de autonomía de los drones, podrían identificarse como drones semiautónomos o drones totalmente autónomos.

El mundo agrícola parece apoyar el uso más prolífico de los drones para inspeccionar la tierra, el suelo y monitorear el cultivo periódicamente, pues se ofrecen excelentes datos digitales para prácticas agrícolas de precisión, para que los agricultores puedan aplicar fertilizantes y productos químicos a tasas variables. La agricultura envuelve vastas regiones con una amplia

variación en el terreno, los recursos hídricos, el sistema de cultivo, la aparición de enfermedades o plagas y los beneficios económicos. Se podría esperar que los drones que son aptos para cada situación aparezcan en diferentes regiones agrícolas del mundo. Una mirada a la gama de compañías de aviones no tripulados en América del Norte, Europa y el Lejano Oriente sugiere claramente que los aviones no tripulados van a abarrotar casi todos los rincones de las regiones agrarias del mundo. Se espera que ayuden a los agricultores a reducir el trabajo pesado en los campos y obtener información precisa sobre los cultivos en poco tiempo (Krishna, 2018).

Varios tipos de drones son producidos por empresas de todo el mundo, algunos son muy versátiles y adecuados para su uso en diferentes situaciones, por ejemplo, ciertas unidades son específicas para una función en particular, como la obtención de imágenes de recursos naturales, vegetación y cultivos. Otro tipo de drones son utilizados para la aplicación de pesticidas a tasas variables, detección de enfermedades, etc. Estos son drones de vuelo bajo capaces de realizar tomas de primeros planos de cultivos, incluso hojas, dosel, de modo que la aparición de la enfermedad se pueda juzgar con precisión (Krishna, 2018; Zhao & Yang, 2011). En la actualidad es común desarrollar y utilizar drones con material y experiencia locales, por ejemplo, para superar problemas específicos relacionados con la producción de cultivos, de esta manera, se pretende utilizar la agricultura de precisión para la pronta detección de enfermedades de la palma aceitera en el medio ecuatoriano.

## **5. Palma de aceite**

La palma de aceite (*Elaeis guineensis*) es una planta de palmera tropical que es nativa de África. En menos de 100 años, el cultivo de árboles de palma aceitera ha pasado de ser un cultivo

a escala relativamente pequeña en África a uno de los productos agrícolas más rentables del mundo (Awalludin et al., 2015). Los cultivos de palma aceitera del Ecuador que se encuentran en mayor parte ubicados en la costa noroccidente y estribaciones del país, junto con la Amazonía. Los cantones Santo Domingo, Quinindé y La Concordia, fueron los lugares donde se realizaron las primeras plantaciones de la palma aceitera. El cantón Santo Domingo, que se encuentra a una altura de 900 m.s.n.m, es considerado como una zona demasiado nublada y fresca para una alta producción, de manera especial, cuando las temperaturas mínimas pueden bajar hasta los 18 grados centígrados. La mejor zona de producción está ubicada entre los cantones Quinindé y La Concordia, esta zona costera es conocida como el “Bloque Occidental”, ya que en el 2005 representaba el 83% de la superficie total de palma de aceite en el Ecuador (Potter, 2011).

En el presente estudio se plantea el análisis de las distintas especies de palma presentes en las zonas de estudio, en primer lugar, se tiene la variedad *CIRAD*, plantas que brotan de semillas que son resultado de las investigaciones realizadas en red, con socios como el *CNRA* de La Mé en Costa de Marfil, el *INRAB* de Pobe en Benín, el *CIRAD* en Camerún, la *SOCFINDO* en Indonesia y el *EMBRAPA* en Río Urubú en Brasil. Las semillas distribuidas por el *CIRAD* están todas bajo el nombre de categoría híbrida. Sus potenciales de producción son excelentes y el crecimiento en altura moderado, de manera que se obtenga material productivo y resistente a todos los estreses bióticos o abióticos de importancia (Amblard et al., 2000). También se considera la variedad *ASD*, que consiste en un intercambio de materiales de palma de aceite con la finalidad de obtener un mejoramiento genético. El mejoramiento que posee *ASD* se ha concentrado principalmente en la mejora de las líneas *Deli Dura* y *AVROS*, *Ekona* y *Calabar*, las semillas de *ASD* tienen una garantía de 99,9% de pureza genética como material *tenera*, que es la mayor parte del material de

palma de aceite disponible para siembra. También se considera la variedad híbrida *INIAP-Tenera* desarrollada por la Estación Experimental Santo Domingo del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), este material genético es producto de investigaciones enfocadas en la selección y cruzamientos de genotipos con las mejores características vegetativas y de producción (Carrillo et al., 2015).

La creación de los híbridos *OxG* se caracterizan por el uso de dos fuentes de germoplasma: la población materna oleífera y la población *E. guineensis* como fuente de polen, de esta manera se han desarrollado algunos tipos de híbridos que se encuentran dentro de la zona de estudio, tal es el caso del material *Taisha*, que es proveniente de híbridos interespecíficos procedentes de *E. oleíferas* brasileñas y uno de *Taisha* (Ecuador), estos materiales se caracterizan por presentar un fenotipo similar al *E. guineensis* africano (Barba & Baquero, 2013). El material *Amazon*, posee su origen genético en las palmas madres de Manaus (Brasil), cruzadas con *Pisíferas* de la población compacta de ASD, la cual también posee genes *oleífera* (6-12%), dentro de su composición genética (Alvarado et al., 2013). Por último, el material *UNIPALMA*, que proviene de colectas realizadas en la década de los años 50 en Brasil, que fue enviada al África y sembrada en la estación Experimental de Yaligimba ubicada en el Congo donde se realizaron tanto cruzamientos intraespecíficos dentro de la especie *E. oleífera* como cruzamientos interespecíficos con palmas *Pisíferas* de la especie africana *E. guineensis* utilizadas en el programa de mejoramiento de la Unilever en Yaligimba (Romero et al., 2017).

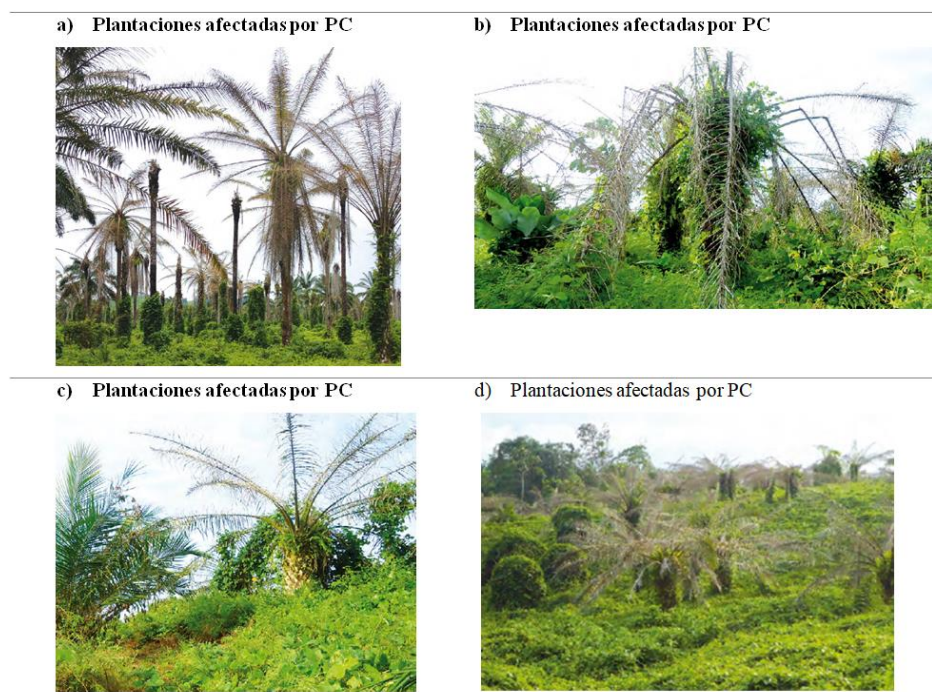
Cabe recalcar que actualmente la palma aceitera es considerada como uno de los principales rubros agroindustriales del Ecuador que ha ido creciendo de manera sostenible debido a factores de rentabilidad y demanda en el mercado. Por ejemplo, en el año de 1993 la producción



nacional de la palma aceitera alcanzó las 152.537 (t), de manera que se cubrieron las necesidades de aceite en el mercado local, acto siguiente, en el año de 1994 se exportó el 6% de la producción nacional, debido a que se consideró como excedente del consumo a nivel local. La producción de la palma ha crecido, de manera que, en el 2012 la producción de racimos de fruta fue de 2'697.490 (t) que representó un valor bruto de producción de \$ 431'598.400, cuya expresión en producción estimada de aceite crudo fue de 593.498 (t), que a partir de un precio promedio de \$ 941/ (t), representa un valor bruto de \$ 507'489.584. Para el 2017 se generó un valor de 252 millones de USD por exportaciones y la palma participó en el 4.53% del PIB agrícola y contribuyó con el 0.89% al PIB nacional (Carrillo et al., 2015).

### 5.1 Pudrición de Cogollo

En cuanto a las enfermedades a estudiar, se considera a la Pudrición del cogollo como la enfermedad más grave que puede presentar el cultivo en los países americanos, cabe recalcar que dicha afectación también se desarrolla en África y Asia, pero no tiene mayor afectación en comparación con en el continente americano. La PC es una enfermedad de tipo biótico que afecta a la región del cogollo, de ahí su nombre (ver **Figura 11.**), es decir, la zona que se extiende desde la base externa de las flechas y la próxima a la región del punto de crecimiento de la palma (meristemo). El daño es producido inicialmente por *Phytpthora palmivora*, seguido de otros microorganismos que aumentan la afectación, debido al daño directo provocado por ellos o por la atracción que dicho daño hace a otros insectos como el *Rynchophorus plamarum*, que se alimentan y reproducen en los tejidos jóvenes de la palma, que están expuestos debido al daño causado por la PC (Torres et al., 2010).



**Figura 11.** Pudrición del Cogollo  
 Fuente: (ANCUPA & Agrocalidad, 2016)

Uno de los síntomas producidos por el microorganismo mencionado, es la necrosis y colapso de las flechas más jóvenes, además de que algunas hojas jóvenes en ciertas ocasiones adquieren una coloración amarilla. Como se describió anteriormente, esta enfermedad es causada por *Phytpthora palmivora*, un Oomycete (en la actualidad reconocido como Cromista o Straminipila) que posee una gran capacidad destructiva con un número considerable de especies hospederas y alta velocidad de reproducción. Cabe mencionar, que este microorganismo se encuentra distribuido en las regiones tropicales cálidas en su totalidad (Torres et al., 2010).

Para analizar la factibilidad del uso de la tecnología geoespacial para la detección de esta afectación es importante conocer cómo los palmicultores detectan y registran palmas enfermas. El primer paso consiste en conocer las lesiones iniciales. Se tiene que las flechas más jóvenes

presentan manchas de color café, que acarrea consigo una destrucción muy severa de los tejidos de la hoja. Esta afectación se puede constatar si al abrir la flecha se puede ver que los tejidos externos que poseen mayor afectación se desprenden y quedan solo algunas nervaduras secundarias (Torres et al., 2010).

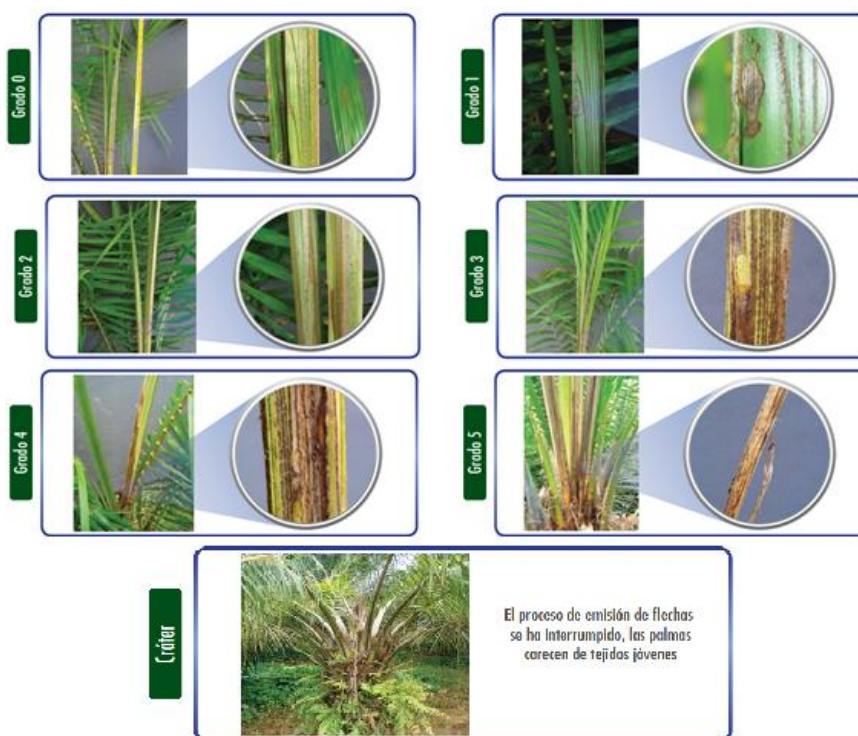
Es necesario tener en cuenta el desarrollo de la enfermedad para contrastar con la detección mediante sensores remotos, por ello Cenipalma desarrolló una escala de evaluación, en la que se establecen siete estados de palma y cinco grados de evaluación, que tienen como base el daño externo de la cara más afectada y de la flecha más joven, que debe medir mínimo 30 centímetros de largo. Si la flecha que ha sido sometida a evaluación no presenta los parámetros anteriores, se establece como sana. En la **Tabla 3**, se describen los grados de severidad de la afectación de la PC a la palma y en la **Figura 12** se aprecia el avance de los grados de severidad (Torres et al., 2010).

**Tabla 3**

*Grado de severidad de la afectación por PC*

<b>Grado de severidad de PC en la palma aceitera</b>	
<b>Severidad 1</b>	Cuando el daño comprende entre el 0.1 y 20% del área externa afectada.
<b>Severidad 2</b>	Cuando el daño comprende entre el 20.1 y el 40% del área externa afectada.
<b>Severidad 3</b>	Cuando el daño comprende entre el 40.1 y el 60% del área externa afectada.
<b>Severidad 4</b>	Cuando el daño comprende entre el 60.1 y el 80% del área externa afectada.
<b>Severidad 5</b>	Cuando el daño comprende entre el 80.1 y el 100% del área externa afectada.
<b>Estado cráter</b>	Cuando la flecha más joven está destruida y la planta no realiza nueva emisión de flechas.

Fuente: (Torres et al., 2010)



**Figura 12.** Grado de severidad de la Pudrición de Cogollo (a. Severidad 1. b. Severidad 1. c. Severidad 2. d. Severidad 3. e. Severidad 4. f. Severidad 5. g. Cráter.)

Fuente: (Sanz, 2016)

Se debe considerar que los síntomas pueden o no estar precedidos de clorosis, es decir, el amarillamiento, en porciones dispersas de las hojas más jóvenes, pero particularmente en la base de algunos foliolos de la base. Se puede añadir como indicio al desarrollo radical, de manera particular al de raíces finas, ocurre de manera alterada, lo cual se manifiesta antes de que se inicien los síntomas aéreos. Ante este tipo de problemática cabe recalcar las siguientes aseveraciones según Torres et al. (2010) en las que se establece que:

- No se ha identificado un único agente causal de todos los síntomas que se pueden presentar por la PC.

- La incidencia, severidad de los síntomas y la habilidad de la palma para recuperarse se asocian con condiciones de estrés, de manera principal, aquellas que afectan la formación de raíces, salud y longevidad.
- Este trastorno está asociada a una nutrición pobre y desequilibrada.
- Un porcentaje de las plantas se recupera de los síntomas en forma, aun en lugares donde la mayoría de las plantas sucumbe ante los síntomas.
- El mejoramiento de las prácticas agronómicas, además de la inclusión de nuevas tecnologías, se vincula a con una reducción en la incidencia, severidad de los síntomas y la habilidad de las plantas para recuperarse.
- La aparición “súbita” de la problemática con gran intensidad en pocos años, aun después de décadas en las que se ha presentado con baja incidencia o había sido desconocida. Luego de dicho periodo de gran intensidad, la incidencia puede reducirse drásticamente o desaparecer. Este caso se ha evidenciado en la costa Atlántica de Nicaragua, lugar donde varios lotes que fueron afectados por una fuerte pérdida en un principio fueron hallados libres de casos después de más de una década de abandono. Esta situación se evidenció también en San Lorenzo en Ecuador, donde se observó una recuperación espontánea de plantas luego de 3 años de desatención.

La afectación por pudrición del cogollo no necesariamente puede ser letal, una proporción variable de las plantas, posiblemente cerca del 100%, pueden recuperarse de los síntomas. La severidad de los síntomas. La velocidad de la recuperación y la proporción de las plantas depende

del sitio escogido para hacer la plantación, junto con el historial de manejo agronómico, incluyendo la preparación del terreno y prácticas de siembra (Torres et al., 2010).

En cuanto a la distribución espacial de la enfermedad, como menciona Torres et al. (2010) la severidad de la sintomatología puede variar de manera considerable, aun entre palmas que crecen en proximidad. Por ejemplo, una planta con un ataque ligero de PC puede mostrar uno o dos círculos de hojas con amarillamiento parcial, pero sin que esto degenere en pudrición de otros tejidos o solamente una pudrición/secamiento de los peciolo. Normalmente, las plantas se recuperan con facilidad y en algunos casos puede incluso desaparecer el amarillamiento de algunas porciones de las hojas afectadas, este tipo de síntomas aparece con más frecuencia en lotes que han sido mejorados en la parte agronómica. En Ecuador se estima que se pierden 125000 hectáreas de palma (67% en Esmeraldas, 13% Pichincha, 10% Santo Domingo). Las buenas prácticas agrícolas ayudan a mitigar el avance, pero las plantas mueren de todas formas, debido a que *E. guineensis* es genéticamente susceptible.

## **5.2 Anillo Rojo**

El Anillo Rojo es causado como un daño indirecto por parte *Rhynchophorus palmarum*, que es el vector del nematodo *Bursaphelenchus cocophilus* que causa dicha problemática, pues es considerado como un patógeno que no sobrevive más de unas pocas semanas en tejido en descomposición, se aloja en las células parenquimáticas del tallo, por lo que compromete el desarrollo normal de las actividades, como el traslado de agua, lo que acarrea el colapso y la muerte de la planta (Vega, 2016). Según Vega (2016) la sintomatología de esta enfermedad es de tipo polifórmica, de manera que son distintos indicios que se evidencian según la edad del cultivo, la severidad o tiempo de infección, variaciones y expresiones de síntomas relacionados

con las condiciones ambientales y manejo del cultivo, que provoca una difícil identificación , pero cabe resaltar que existen síntomas característicos tanto en la parte externa como en la interna, que permiten ser usados como base para diagnosticar la enfermedad en el campo (Aldana et al., 2010).

Los síntomas externos como se aprecia en Vega (2016) de esta afectación en el Ecuador consisten en el acortamiento de las hojas del paquete central, que en los casos más avanzados forman conjuntos de hoja raquílicas, deformes, que con el avance del tiempo se acortan, acompañadas de folíolos reducidos y deformados, lo que da una apariencia arrepollada, ver **Figura 13**. Según Chinchilla (2010), dicha sintomatología es causada por la actividad del nematodo que se concentra en la región del cogollo, con mayor énfasis en las hojas primordiales en la fase de rápido crecimiento. También cabe recalcar, que la tasa de crecimiento del tronco se reduce con los años, por lo tanto, las plantas son de menor tamaño que las plantas vecinas del mismo estado fenológico. Las plantas que tienen esta problemática pueden permanecer vivas por varios años o a su vez, tardan en morir, razón por la cual se le denomina Anillo Rojo Crónico, por lo que se constituyen como foco de diseminación de la enfermedad (Vega, 2016).



**Figura 13.** Síntomas externos (Acortamiento de hojas en las palmas afectadas con Anillo Rojo)  
Fuente: (Vega, 2016)

Otro de los síntomas que vale resaltar, es el empaquetamiento de las hojas del paquete central, además de una coloración anaranjada de las bases peciolares y la muerte de racimos, parcial o totalmente. También aparecen amarillamientos, secamientos y pudriciones de las hojas más jóvenes, que pueden o no cortarse; las hojas más viejas se mantienen verdes en los estados iniciales de la afectación para posteriormente secarse, acto seguido, la muerte de la planta en pocos meses, ver **Figura 14**. Estas sintomatologías similares son frecuentes en la costa del Pacífico de Costa Rica y en los últimos años, en la costa del Atlántico de Honduras, pero se denomina anillo rojo agudo o clásico (Vega, 2016).





**Figura 14.** Síntomas externos (Empaquetamiento de hojas del paquete central y coloración anaranjada de las bases pecoliales)  
Fuente: (Vega, 2016)

En cuanto al contagio del Anillo Rojo entre palmas según Chinchilla (2010) puede ocurrir en cuestión de días, por lo tanto, la prevención es vital a partir de diagnósticos sanitarios oportunos, que faculden mantener la incidencia de la enfermedad a un bajo nivel, al seguir una estrategia de sistema de manejo integrado propuesta por Chinchilla (2010) en el que se toma en cuenta la detección temprana de plantas enfermas, eliminación oportuna inmediata tras la detección, destrucción de los sitios de reproducción del vector y la reducción de la población adulta a través del establecimiento de redes de trampeo masiva.

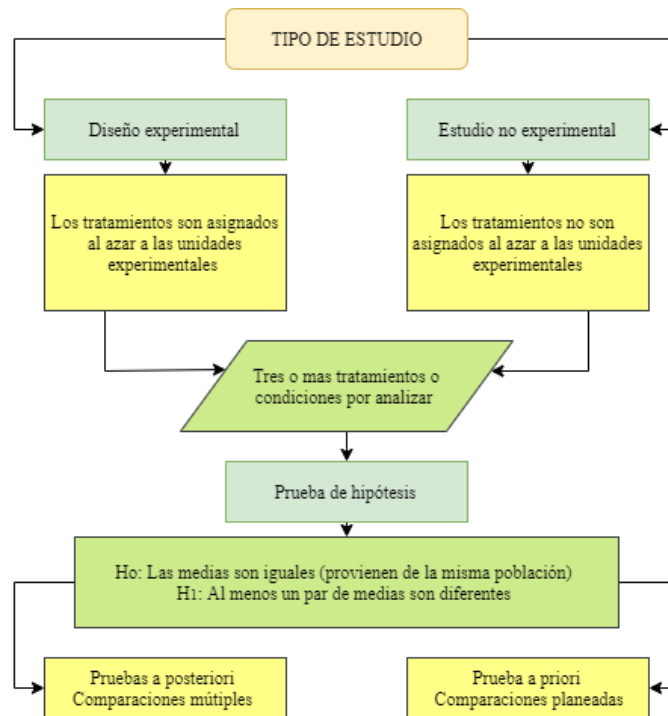
## **6. Prueba estadística ADEVA**

El análisis de varianza ADEVA o ANOVA por sus siglas en inglés, permite examinar el efecto que posee una o más variables de un conjunto de datos. Dentro del análisis mencionado es importante tomar en cuenta los siguientes términos. *Los tratamientos o variables* consisten en procesos o acciones que serán medidos a partir del material experimental diseñado para posteriormente ser comparados entre sí, con la finalidad de determinar si existen diferencias

consideradas estadísticamente significativas. Este tipo de variables pueden ser de tipo cualitativo y cuantitativo (Fallas, 2012).

*La repetición* se define como la réplica considerada estadísticamente independiente de un tratamiento, la misma puede ser aplicada dos o más veces a las distintas unidades experimentales consideradas. Cada una de las aplicaciones permiten realizar una estimación independiente de la respuesta del sujeto de análisis al tratamiento. Cabe recalcar que a medida que se tenga mayor número de réplicas, la estimación del error experimental será adecuada. Como recomendación se tiene que en la mayoría de los casos se debe obtener un mínimo de tres observaciones independientes por cada tratamiento planteado (Fallas, 2012).

*La significancia estadística* es una regla cuya finalidad permite enunciar que la diferencia observada entre cada uno de los tratamientos planteados o grupos es el resultado del efecto de la variable y no por causa del azar. *La consistencia* se considera cuando un método de análisis estadístico depende únicamente de la diferencia entre las medias, el error estándar de las diferencias, el número de grados de libertad que posee el error y el nivel de significancia considerado para realizar la prueba. Por último, se tiene al error experimental, que radica en la variación natural del material experimental que no está sujeto al control de quien lleve a cabo la investigación, cabe recalcar que no consiste en un error intencional o derivado de la desacertada aplicación de las técnicas de medición, en si es resultado de un componente propio del material experimental (Fallas, 2012). Una vez establecidos los componentes citados, es importante tener en cuenta el proceso del análisis de la varianza para su correcto planteamiento, ver **Figura 15**.



**Figura 15.** Flujograma del análisis de varianza

Fuente: (Fallas, 2012).

Para probar las pruebas de hipótesis descritas en la **Figura 15**, según *Gutiérrez & De la Vara (2012)* el primer paso a realizar es la descomposición de la variabilidad total de los datos a utilizar en los dos elementos que la integran, la variabilidad de los tratamientos y la correspondiente al error aleatorio. Se tiene una medida de la variabilidad total que consiste en la suma total de cuadrados que se describe en la ecuación (5)

$$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (5)$$

En la que  $Y_{..}$  representa la suma de los  $N = \sum_{i=1}^k n_i$  datos en el experimento, de manera que al sumar y restar dentro del paréntesis la media del tratamiento  $i$ ,  $(\bar{Y}_i)$ , y desarrollando el


cuadrado, la  $SC_T$  se puede substraer en dos componentes que se pueden apreciar en la ecuación (6).

$$SC_T = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 \quad (6)$$

Donde el primer componente es la suma de cuadrados de los tratamientos ( $SC_{TRAT}$ ) y el segundo consiste en la suma de cuadrados del error ( $SC_E$ ). La información necesaria para obtener el estadístico  $F_0$  hasta llegar al valor -p se describe en la denominada *Tabla de análisis de varianza (ANOVA)* que se puede apreciar en la **Tabla 4**. Las abreviaturas de la tabla son las siguientes: *FV* representa la fuente de variabilidad, *SC* la suma de cuadrados, *GL* a los grados de libertad, *CM* el cuadrado medio,  $F_0$  es el estadístico de prueba y el *valor-p* que es la significancia observada (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

**Tabla 4**  
*Componentes de la prueba estadística ADEVA.*

Fuentes de Variación (FV)	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (gl)	Cuadrados Medios (CM)	Factor de corrección ( $F_0$ )	$\rho$ -valor
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2$ (7)	$k - 1$	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{gl_{TRAT}}$ (10)	$F_c = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$ (12)	$F > F_c$
Error	$SC_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2$ (8)	$N - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{gl_E}$ (11)		
Total	$SC_{TOTAL} = SC_{TRAT} + SC_E$ (9)	$N - 1$			

CONTINÚA 

\*  $\bar{Y}_i$ : Media de las observaciones del  $i$ -ésimo tratamiento;  $\bar{Y}..$ : Media global o promedio de todas las observaciones;  $N = \sum_{i=1}^k n_i$  observaciones.

Tras realizar el análisis de la varianza ADEVA, es necesario examinar a detalle qué tratamientos son diferentes, una de las estrategias a aplicar es la *Diferencia mínima significativa* (LSD), que consiste en la diferencia mínima entre dos medias muestrales para estimar que dos tratamientos son diferentes. La hipótesis que se plantea a los pares de media es la siguiente:

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

El estadístico de prueba para cada una de las hipótesis dadas es la correspondiente diferencia en valor absoluto entre las medias muestrales  $|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j|$ , por lo tanto, se rechaza la  $H_0$  si se comprueba que dicho estadístico da a lugar a lo siguiente:

$$|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} = LSD \quad (13)$$

En donde el valor de  $t_{\alpha/2, N-k}$  se lee en las tablas de la distribución T de Student con  $N - k$  grados de libertad correspondientes al error, el  $CM_E$  representa el error medio cuadrado obtenido del análisis ADEVA,  $n_i$  y  $n_j$  son el número de observaciones para los tratamientos  $i$  y  $j$ , respectivamente. De manera que la cantidad LSD se denomina diferencia mínima significativa (*least significant difference*).

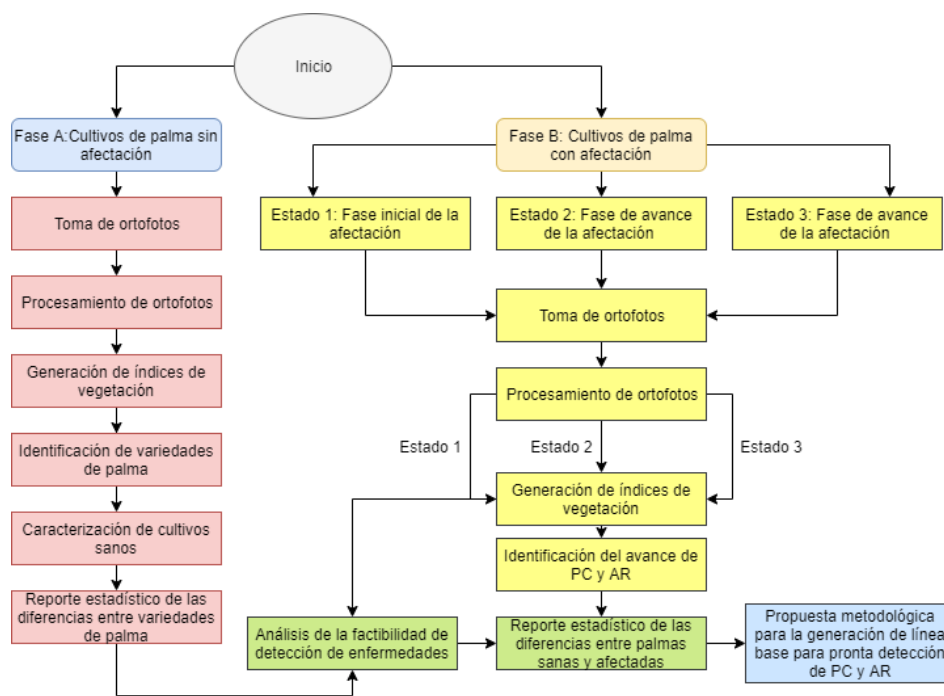
## CAPITULO III

### METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología propuesta para el tratamiento de la información obtenida a partir de las tecnologías geoespaciales. El proyecto presenta dos fases:

- **FASE A:** En esta fase se estudiará a la palma en cultivos sin afectación relevante por PC y AR, en un lote de 52 hectáreas.
- **FASE B:** Los cultivos que se monitorearán en esta fase presentan afectación por PC y AR por lo cual se hará un seguimiento de la evolución de los síntomas durante aproximadamente 2 meses con vuelos de dron, en un lote que posee 40 hectáreas, con aproximadamente 28 hectáreas de cultivos sin afectación.

En la **Figura 16** se puede apreciar la metodología del proyecto.



**Figura 16.** Metodología

El proyecto contempla las dos fases descritas anteriormente. En la fase A se procederá a realizar un vuelo de dron con los equipos MAVIC PRO con la cámara MAPIR Survey3W (RGN, NDVI) y el dron DJI MATRICE 100 con la cámara Zenmmuse X3 (BGNIR), para su posterior procesamiento, con la finalidad de obtener un ortomosaico que sirva como insumo para la obtención de NDVI, GNDVI, GVI y VARI del cultivo sano, ya que son índices de vegetación que poseen cierta correlación y permitirán obtener índices característicos de una palma sin afectación. Los datos y productos obtenidos de esta fase servirán de línea base para hacer comparaciones con plantaciones con afectación por PC y AR, para plantear la hipótesis de la factibilidad del uso de sensores remotos para la detección de dichas afectaciones y para la diferenciación de las variedades de palma que son empleados por los palmicultores, de manera que se obtendrán como resultados la caracterización de una zona de cultivos sin afectación y un reporte estadístico de las diferencias entre las variedades encontradas.

### 3.1 Materiales y Equipos

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos para el levantamiento de información y su posterior procesamiento, dentro de los dos ensayos (*Tabla 5*):

**Tabla 5**  
*Materiales y equipos.*

No.	Equipo	Descripción
<b>Levantamiento de información</b>		
1	UAV	MAVIC PRO, MATRICE 100
2	Cámara	MAPIR Survey 3 RGNIR, Precission Hawk BGNIR
3	Tarjeta de calibración	MAPIR Calibration Ground Target Package (V1)
4	Celular móvil	Iphone 7

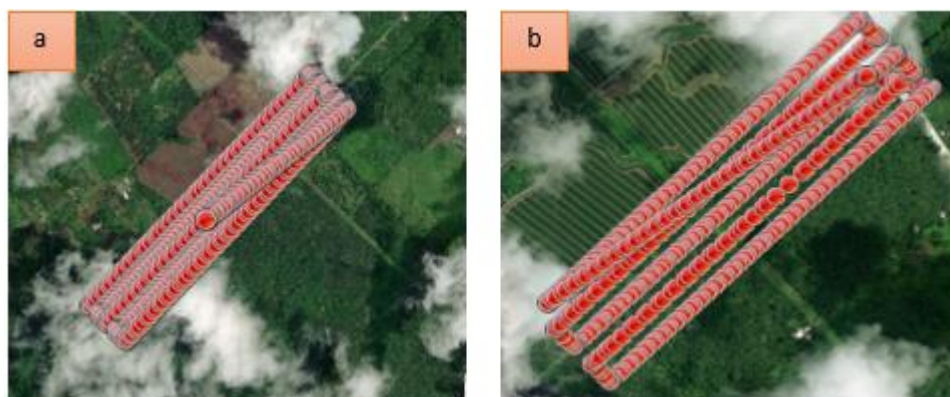
CONTINÚA 

Procesamiento de información		
5	PrecisionMapper	Aplicación IOS para la planificación y captura de imágenes
6	Pix4D – Capture	Aplicación IOS para la planificación y captura de imágenes
7	Agisoft PhotoScan, Photomod	Software independiente para procesamiento fotogramétrico
8	QGIS	Software de código libre de un SIG
9	ArcGIS	Software comercial de SIG
10	ENVI	Software para análisis y visualización de datos científicos e imágenes.
11	Mapir Camera Control	Aplicación para la calibración de imágenes RGNIR de UAV
12	InfoStat	Software para análisis estadístico

### 3.2 Metodología para la captura de imágenes digitales mediante tecnología UAV-Fase A

#### 3.2.1 Diseño del plan de vuelo para la Fase A

Para la primera fase se procedió a realizar los planes de vuelo en los lotes del CIPAL correspondientes al dron MAVIC y MATRICE 100, con la finalidad de cubrir la extensión del terreno de 52 (ha) y de obtener las fotografías digitales de los lotes por especie que posee esta zona de estudio, como se puede apreciar en la **Figura 2**, **Figura 3** y **Anexo 1**. Los planes de vuelo contemplan los parámetros descritos en la **Tabla 6** y su geometría en planta en la **Figura 17**.



**Figura 17.** Diseño del plan de vuelo para la fase A: a) Vuelo 1, que abarca las especies: Comercial CIRAD, Balance ASD, Comercial Taisha, Amazon, Unipalma; b) Vuelo2, que abarca las especies: Comercial INIAP, Riego ASD, CIRAD, INIAP



### 3.2.2 Parámetros de vuelo para la fase A

Los parámetros de vuelo son establecidos para realizar la ejecución del vuelo, es así como se considera el tiempo de vuelo, los traslapes longitudinales y transversales, la altura de vuelo, a través de un previo análisis del terreno. Se utilizó la aplicación Pix4D Capture, para determinar los dichos parámetros.

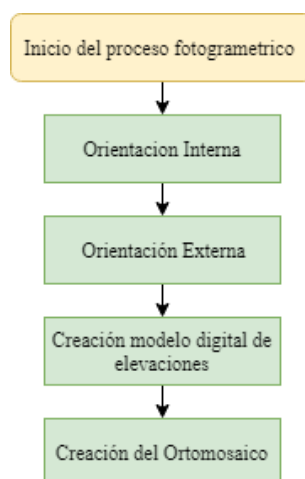
**Tabla 6**

*Parámetros de vuelo para la fase A*

<b>Parámetros de vuelo sensor RGNIR</b>	<b>Unidad</b>
Tiempo de vuelo	15 min
Traslapo Longitudinal	70 %
Traslapo Transversal	70 %
Altura de vuelo	120 m
Área total del terreno	52 ha
<b>Parámetros de vuelo sensor BGNIR</b>	<b>Unidad</b>
Tiempo de vuelo	13 min
Traslapo Longitudinal	70 %
Traslapo Transversal	60 %
Altura de vuelo	120 m
Área total del terreno	52 ha

### 3.3 Procesamiento de imágenes digitales para la fase A

Para el procesamiento de las fotografías digitales se utilizaron los software *Agisoft Photoscan* y *Photomod*, que permitieron realizar el proceso fotogramétrico descrito en la **Figura 18**, de manera que se obtuvieron varios ortomosaicos (RGB, BGNIR Y RGNIR) con el objetivo de servir como insumos para calcular y analizar índices de vegetación de los diferentes lotes presentes en el CIPAL.



**Figura 18.** Procesos fotogramétricos realizado en Agisoft PhotoScan

### 3.4 Tratamiento de imágenes digitales

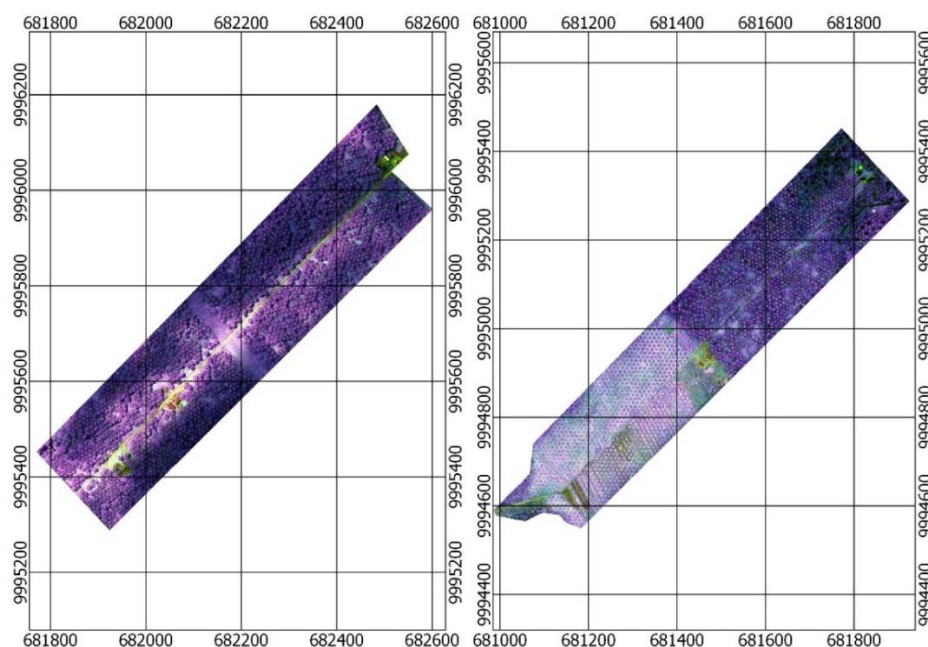
Para comenzar a analizar la información captada a través de las imágenes digitales procesadas es necesario realizar ciertos procesos que permiten eliminar errores que poseen dichos productos, como por ejemplo en la radiancia. Por esta razón se procedió a realizar una calibración atmosférica, para el posterior análisis de las imágenes con índices de vegetación.

#### 3.4.1 Corrección Atmosférica

Se realizó una corrección atmosférica de los ortomosaicos obtenidos a través del módulo de corrección atmosférica de ENVI (**Figura 19**), específicamente con la herramienta QUAC®, que consiste en un método de corrección atmosférica que funciona con el rango de longitud de onda visible e infrarrojo cercano a través de infrarrojos de onda corta (VNIR-SWIR). Se determina los parámetros de corrección atmosférica directamente a partir de los espectros de píxeles observados en una escena, sin información auxiliar, por ello no es necesario metadatos, a

diferencia del procedimiento normal de corrección de una imagen satelital (Bernstein et al., 2012).

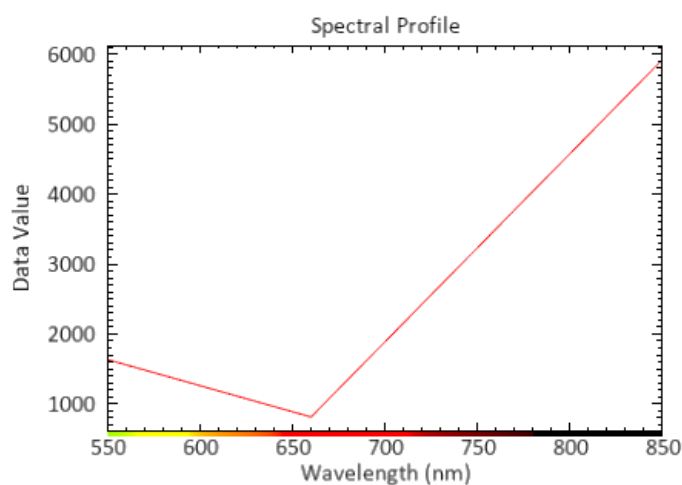
La corrección atmosférica desarrollada por dicha herramienta se basa en el hallazgo empírico de que la reflectancia promedio de diversos espectros materiales (excluyendo materiales altamente estructurados como vegetación, aguas poco profundas y lodo) no depende de cada escena, por lo tanto, se obtiene un procesamiento más rápido en comparación de correcciones que aplican otros principios. Cabe recalcar que también se permite cualquier ángulo de visión o ángulo de elevación solar. Si un sensor no tiene la calibración radiométrica o de longitud de onda adecuada, o si se desconoce la intensidad de la iluminación solar (por ejemplo, con cubiertas de nubes), QUAC aún puede recuperar espectros de reflectancia razonablemente precisos siempre que se cumplan ciertas condiciones como por ejemplo que existan al menos 10 materiales diversos en una escena y que los píxeles sean lo suficientemente oscuros en una escena para permitir una buena estimación del espectro de línea de base (Bernstein et al., 2012). En este caso de estudio se distinguen palmas, maleza, suelo, infraestructura, asfalto, cuerpos de agua, entre otros.



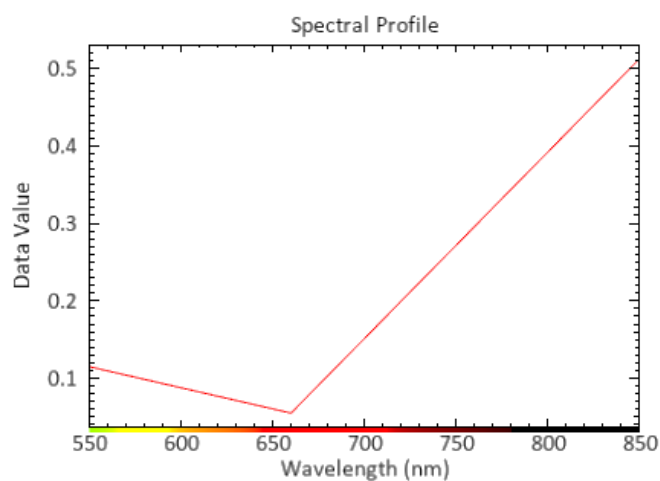
**Figura 19.** Ejemplo de la corrección atmosférica de orto mosaicos

### 3.4.2 Gain and Offset

Tras realizar la corrección atmosférica de los ortomosaicos, los valores de la reflectancia por defecto de utilizar los módulos de ENVI superan los miles, ver **Figura 20**. Por dicha razón es necesario realizar una compensación, de manera que se pueda trabajar con valores decimales, por lo tanto, se multiplica las bandas seleccionadas por un valor de ganancia de entrada y se agrega un valor de compensación, como se puede observar en la **Figura 21**.



**Figura 20.** Perfil espectral al aplicar corrección atmosférica



**Figura 21.** Perfil espectral al aplicar gain and offset

### 3.4.3 Cálculo de índices de vegetación

Los índices espectrales son combinaciones de reflectancia espectral de dos o más longitudes de onda que indican la abundancia relativa de características de interés. En este caso de estudio se ha propuesto calcular los índices NDVI, GNDVI, GVI y VARI que permitirán afianzar la detección de las afectaciones de la palma aceitera.

Para la obtención de los índices de vegetación propuestos se utilizarán las ecuaciones definidas en la **Tabla 2**, a partir de los valores de las bandas del sensor *MAPIR Survey 3 RGNIR* correspondientes al dron MAVIC (**Tabla 7**) se calcularon los índices NDVI, GNDVI, GVI. A partir de los sensores *RGB* y *BGNIR* (**Tabla 8**) del dron MATRICE se procedió a calcular los índices GDNVI, GVI y VARI.

**Tabla 7***Bandas del filtro MAPIR RGN*

<b>Bandas</b>	<b>GSD (cm/píxel)</b>	<b>Centro de banda (nm)</b>
<b>Verde</b>	5.5	550
<b>Rojo</b>	5.5	660
<b>Infrarrojo cercano</b>	5.5	790

Fuente: (Mapir, 2018)

**Tabla 8***Bandas del filtro MATRICE Zenmuse 3X RGB y BGNIR*

<b>RGB</b>		
<b>Bandas</b>	<b>GSCD (cm/píxel)</b>	<b>Centro de banda (nm)</b>
<b>Azul</b>	5	475
<b>Verde</b>	5	520
<b>Rojo</b>	5	590
<b>BGNIR (Continúa)</b>		
<b>Bandas</b>	<b>GSD (cm/píxel)</b>	<b>Centro de banda (nm)</b>
<b>Azul</b>	5	460
<b>Rojo</b>	5	510
<b>Infrarrojo cercano</b>	5	740

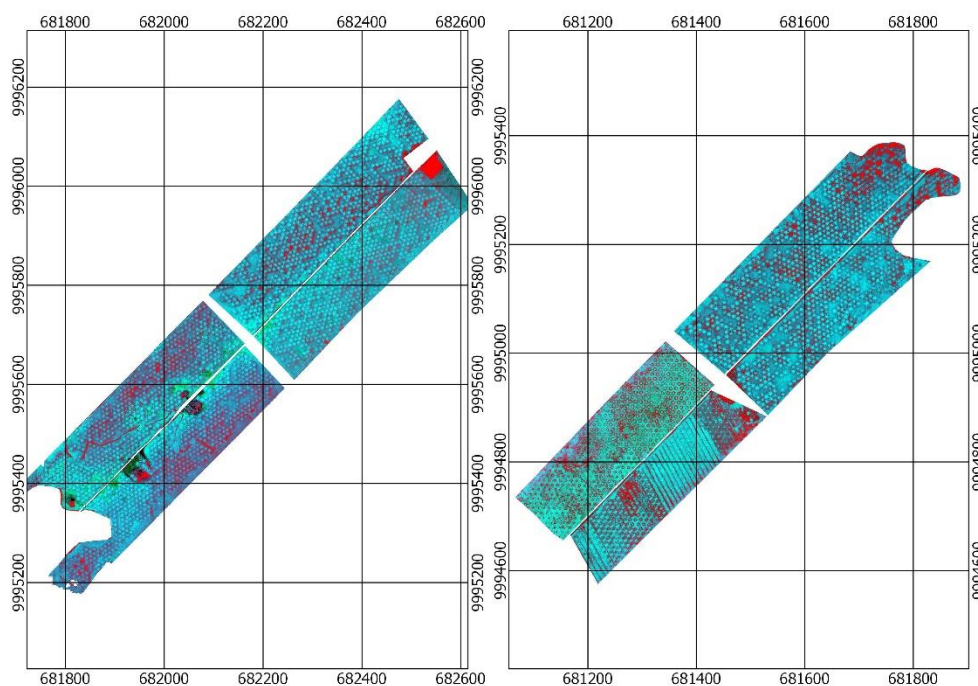
Fuente: (Precisionhawk, 2019)

Los valores de los índices obtenidos se analizaron para observar estadísticamente diferencias entre las distintas especies que se encuentran dentro de la zona de estudio del CIPAL.

Se han desarrollado ciertas hipótesis de que existe mayor resistencia a las afectaciones según el tipo de especie, por lo tanto, se plantea corroborar dichas suposiciones a través del uso de tecnologías geoespaciales.

### 3.4.4 Conteo de palmas por lote

Para realizar el conteo de palmas según cada lote se generaron distintos índices de vegetación que permitieron obtener un contraste del cultivo respecto a demás componentes en la imagen, como por ejemplo el suelo, pasto, agua, entre otros elementos, ver **Figura 22**. Este proceso se generó con la finalidad de obtener polígonos por cada una de las palmas identificadas, para luego heredar valores de los índices planteados anteriormente, que sirvan como insumo para realizar pruebas de hipótesis.



**Figura 22.** Índices de vegetación generados para cada uno de los lotes

Los índices que permitieron obtener mayor contraste en los cultivos de las especies de INIAP, CIRAD y ASD fueron el Índice de Vegetación de Diferencia (DVI), que permite distinguir entre suelo y vegetación, pero no tiene en cuenta la diferencia entre la reflectancia y la luminosidad causada por los efectos atmosféricos o las sombras (Tucker, 1979). Este índice se calculó mediante la ecuación (14).

$$DVI = NIR - Red \quad (14)$$

El Índice de Vegetación Triangular Modificada (MTVI), debido a que según Haboudane et al. (2004) este índice hace que el Índice de Vegetación Triangular (TVI) sea adecuado para las estimaciones de LAI al reemplazar la longitud de onda de 750 nm por 800 nm, cuya reflectancia está influenciada por los cambios en las estructuras de las hojas y el dosel, se calcula mediante la ecuación (15). El TAI se calcula como el área de un triángulo hipotético en el espacio espectral que conecta la reflectancia del pico verde, la absorción mínima de clorofila y el hombro NIR. Cuando la absorción de clorofila causa una disminución de la reflectancia roja, y la abundancia de tejido de la hoja provoca un aumento en la reflectancia NIR, el área total del triángulo aumenta (Broge & Leblanc, 2000).

$$MTVI = 1.2[1.2(\rho_{800} - \rho_{550}) - 2.5(\rho_{670} - \rho_{550})] \quad (15)$$

En la **Tabla 9** se enumera los rangos que ENVI permite para las longitudes de onda específicas utilizadas en las ecuaciones, dichos valores están en nanómetros (nm).



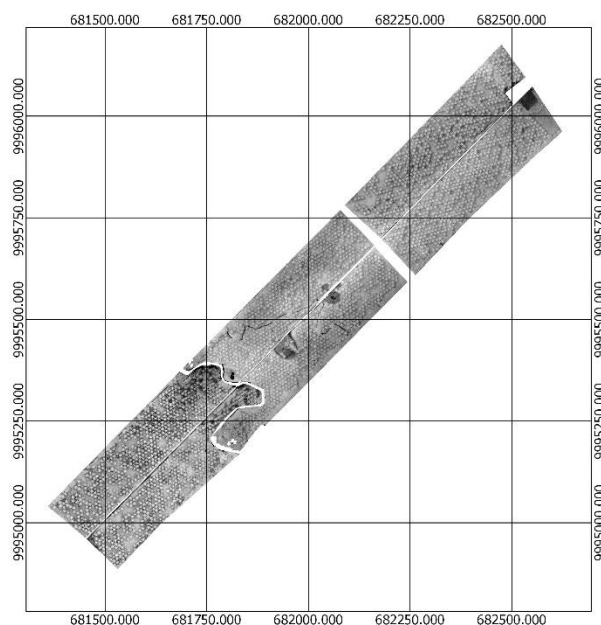
**Tabla 9**

*Rangos de longitud de onda utilizados para calcular Índices de Vegetación*

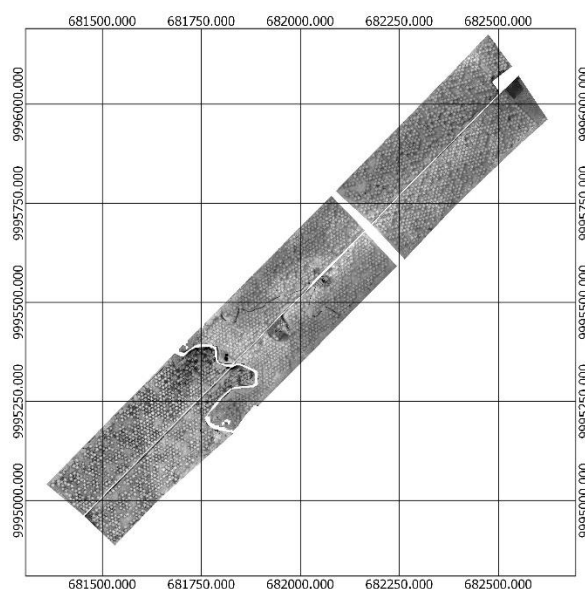
Denominación del rango	Mínimo	Máximo
$\rho_{550}$	540	560
$\rho_{670}$	650	690
$\rho_{800}$	780	865

Fuente: (Gu et al., 2011); (Hadjimitsis et al., 2010); (Steven et al.; 2003)

Los índices calculados se pueden apreciar en la **Figura 23** y **Figura 24** para el análisis de los lotes que contienen las especies INIAP, CIRAD y ASD.



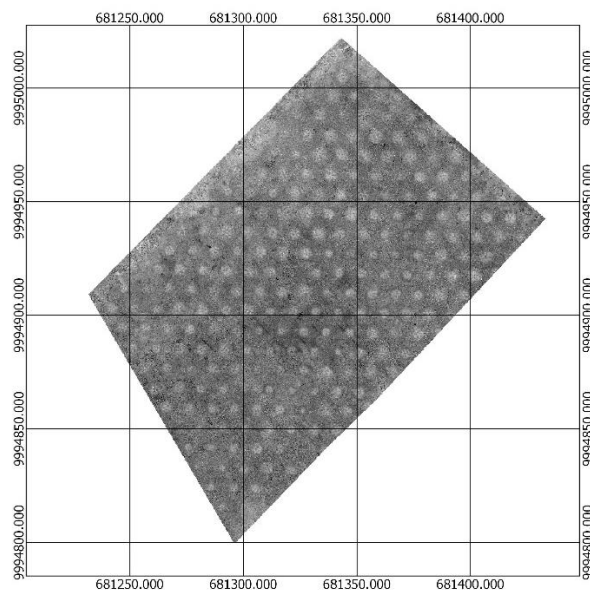
**Figura 23.** Índice DVI calculado para cada lote del CIPAL



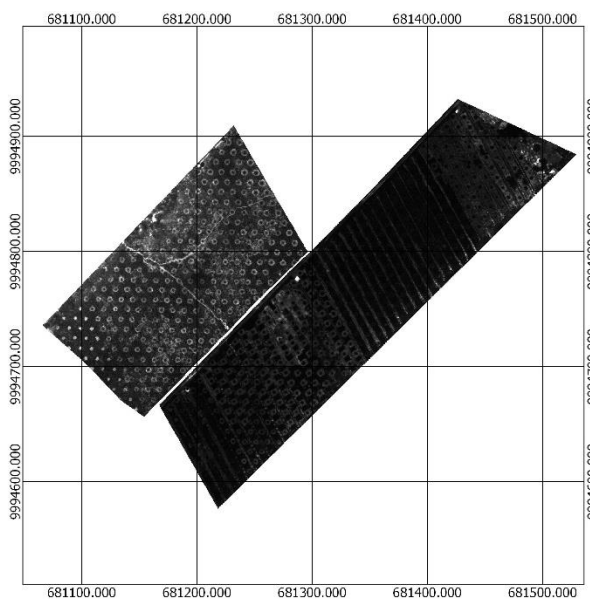
**Figura 24.** Índice MTVI calculado para cada lote del CIPAL

Para obtener un contraste de los cultivos pertenecientes a las especies Taisha, Amazon y UNIPALMA, se utilizaron otros índices, ya que se encuentran en un estado fenológico distinto a las anteriores especies. El Índice que permitió diferenciar la vegetación de los cultivos de palma Taisha fue el NDVI, ver **Figura 25**, que es calculado mediante la ecuación descrita en la **Tabla 2**. Para la diferenciación de cultivos de tipo Amazon y UNIPALMA se utilizó el Índice de área de combustión (BAI), que resalta la tierra quemada en el espectro rojo al infrarrojo cercano, al enfatizar la señal de carbón en las imágenes posteriores al incendio. El índice se calcula a partir de la distancia espectral de cada píxel a un punto espectral de referencia, donde convergen las áreas quemadas recientemente (Chuvieco et al., 2002; Martín, 1998). Los píxeles más brillantes indican áreas quemadas. Se utiliza la ecuación (16) para su cálculo. Cabe recalcar que no se trata de zonas quemadas en el área de estudio, sino que la combinación de bandas de este índice permitió contrastar vegetación, suelo y cultivos de palma en los lotes mencionados, ver **Figura 26**.

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - Red)^2 + (0.06 - NIR)^2} \quad (16)$$



**Figura 25.** Índice NDVI aplicado al lote Taisha



**Figura 26.** Índice BAI aplicado a los lotes Amazon y UNIPALMA

Los índices obtenidos sirven como insumo para la herramienta *Count Crops* perteneciente al módulo *Crop Science* de ENVI, que ubica y cuenta los cultivos en imágenes de alta resolución

de una sola banda, de manera que se crea una imagen de clasificación con círculos que representan cultivos. Es importante mencionar que los diámetros de las palmas se obtuvieron a partir de medición en los ortomosaicos obtenidos (promedio de 5 mediciones) y por experticia en campo. Este módulo de ENVI posee una serie de parámetros (Ver **Tabla 10**) que deben ser analizados para obtener los mejores resultados.

**Tabla 10***Parámetros para la herramienta Count Crops*

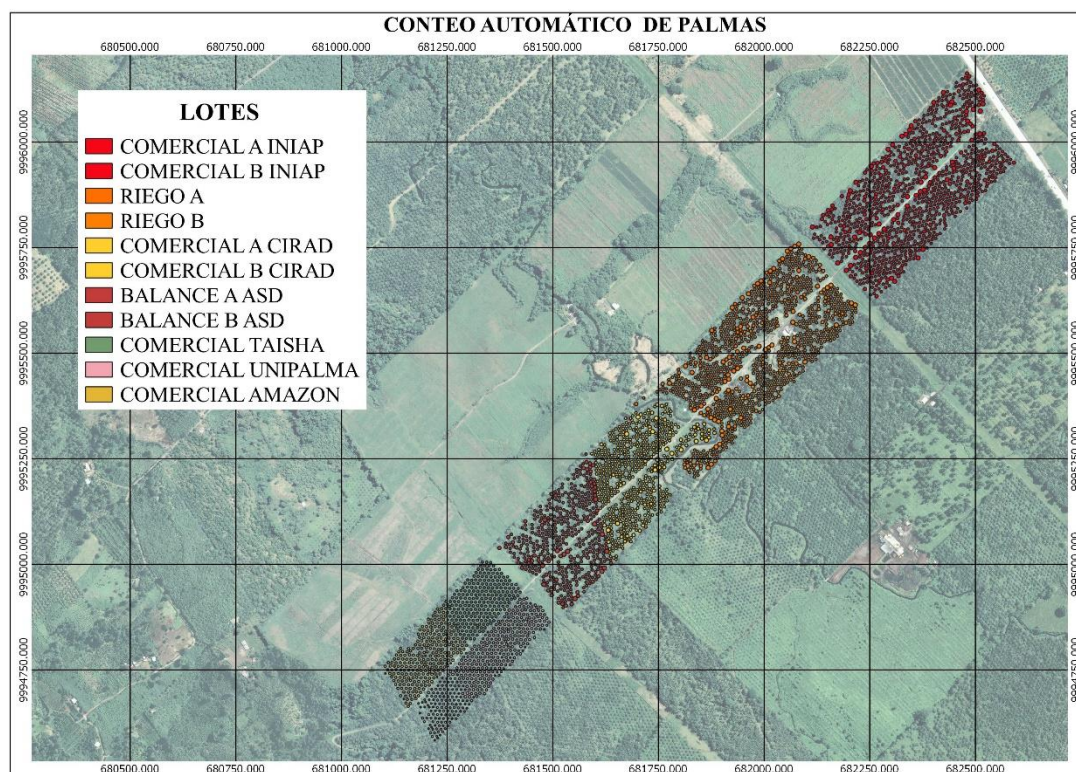
Parámetro	Descripción del parámetro	Aplicación al caso de estudio (INIAP, CIRAD, ASD)	Aplicación al caso de estudio (Taisha, Amazon, UNIPALMA)
	Para este parámetro se puede utilizar la herramienta de medición de manera que se trabaja directamente con las medidas del cultivo en la imagen.		
Diámetro mínimo y máximo del cultivo	Cabe recalcar que la herramienta funciona mejor cuando los diámetros mínimo y máximo de cultivo no difieren mucho en tamaño. Por ejemplo, un rango de 1 a 4 metros producirá mejores resultados que un rango de 1 a 16 metros. De esta manera si el área de interés tiene un amplio rango de diámetros de cultivo, se debe considerar dividir el área en imágenes separadas para procesar, cada una con un rango similar de diámetros de cultivo.	Diámetro mínimo: 6 m Diámetro máximo: 10 m	Diámetro mínimo: 4 m Diámetro máximo: 6 m
Número de incrementos	Este parámetro se utiliza cuando se busca cultivos. Se ingresa un número que incluye los diámetros mínimo y máximo. El valor predeterminado es 5. Por ejemplo, si el diámetro mínimo de cultivo es de 1 metro y el diámetro máximo de cultivo es de 5 metros, al	5	5

	establecer el número de incrementos en 5 se buscarán cultivos de aproximadamente 1, 2, 3, 4 y 5 metros		
Factor de suavizado gaussiano	Esta es la fracción del diámetro máximo de búsqueda en el que se produce un alisamiento gaussiano adicional. Ayuda a reducir el ruido en el resultado final. El valor predeterminado de 0.5 es adecuado para muchas aplicaciones, pero otros conjuntos de datos producen mejores resultados con un valor de 0.	0.5	0.5
Incluir bordes	Si se desea contar recortes parciales tocando los bordes de la imagen o cualquier área enmascarada que rodea el área que se va a contar, se debe habilitar esta opción al aplicar una máscara dentro del área que se cuenta, por ejemplo, al enmascarar píxeles sin vegetación. El valor predeterminado es No.	Se incluyeron bordes	Se incluyeron bordes
Superposición de cultivos permitida	Consiste en el porcentaje de superposición permitida entre dos cultivos adyacentes antes de que uno de ellos se retire de la consideración. El valor predeterminado es 50%. Se recomienda introducir valores más pequeños si los cultivos están claramente separados entre sí.	20 %	50 %
Umbral de intensidad	Esta es la fracción de la intensidad máxima del cultivo, por debajo de la cual se eliminarán las detecciones del cultivo. Si el resultado del recuento de cultivos incluye falsos positivos, se debe experimentar con diferentes valores de umbral de intensidad para eliminar los falsos positivos.	0.6	0

Fuente: (Harris Geospatial Solutions, 2019)

Tras aplicar la herramienta se pudo obtener polígonos circulares de cada una de las palmas presentes en cada uno de los lotes por especie que posee el CIPAL, ver **Figura 27**, de

manera que se utilizaron de insumos para heredar un valor promedio del índice de vegetación (NDVI, GNDVI, GVI, VARI) dentro de dicho elemento vector.



*Figura 27.* Conteo de palmas por lote de CIPAL

### 3.4.4 Exportación de Índices de Vegetación

Para heredar los valores medios de cada uno de los índices propuestos con la finalidad de analizar una posible diferencia entre las distintas especies de palma, se realizó una operación matemática en los índices obtenidos, con el objetivo de tener valores dentro de los rangos con los que está familiarizado cada índice propuesto, ver **Tabla II**, esto es debido a que por el cálculo realizado en ENVI se obtuvieron valores que no pueden ser soportados por otro software. Ya que en este caso para obtener valores estadísticos de cada planta se planteó utilizar un SIG.

**Tabla 11***Rangos de los índices de vegetación*

<b>Índice de Vegetación</b>	<b>Rango</b>	<b>Fuente</b>
<b><i>NDVI</i></b>	El valor de este índice varía de -1 a 1. El rango común para la vegetación verde es de 0.2 a 0.8.	(Rouse et al.; 1973)
<b><i>GNDVI</i></b>	El valor de este índice varia de varía de 0 a 1.0.	(Candiago et al.; 2015)
<b><i>GVI</i></b>	Al ser un cociente entre porciones del espectro electromagnético, este índice se comporta de manera similar al Índice de relación simple (SR) El rango de valores es de 0 a más de 30, donde la vegetación saludable generalmente cae entre valores de 2 a 8.	(Sripada et al., 2013) (Dalposso et al., 2013)
<b><i>VARI</i></b>	El rango de este índice es de -1 a 1, donde la vegetación verde generalmente cae entre valores de 0,20 a 0,80.	(Gitelson et al., 2002)

Para exportar los índices se procedió a realizar la operación de banda descrita por la ecuación (17).

$$(b1 \text{ le } 0) * 0 + (b1 \text{ ge } 1) * 1 + (b1 \text{ gt } 0 \text{ and } b1 \text{ lt } 1) * \text{float}(b1) * 1 \quad (17)$$

Dónde:

- *b1*: es la banda que posee la imagen del índice de vegetación.
- *le*: menor o igual.
- *ge*: mayor o igual.
- *gt*: más grande que.



### 3.4.5 Aplicación de la herramienta estadística zonal

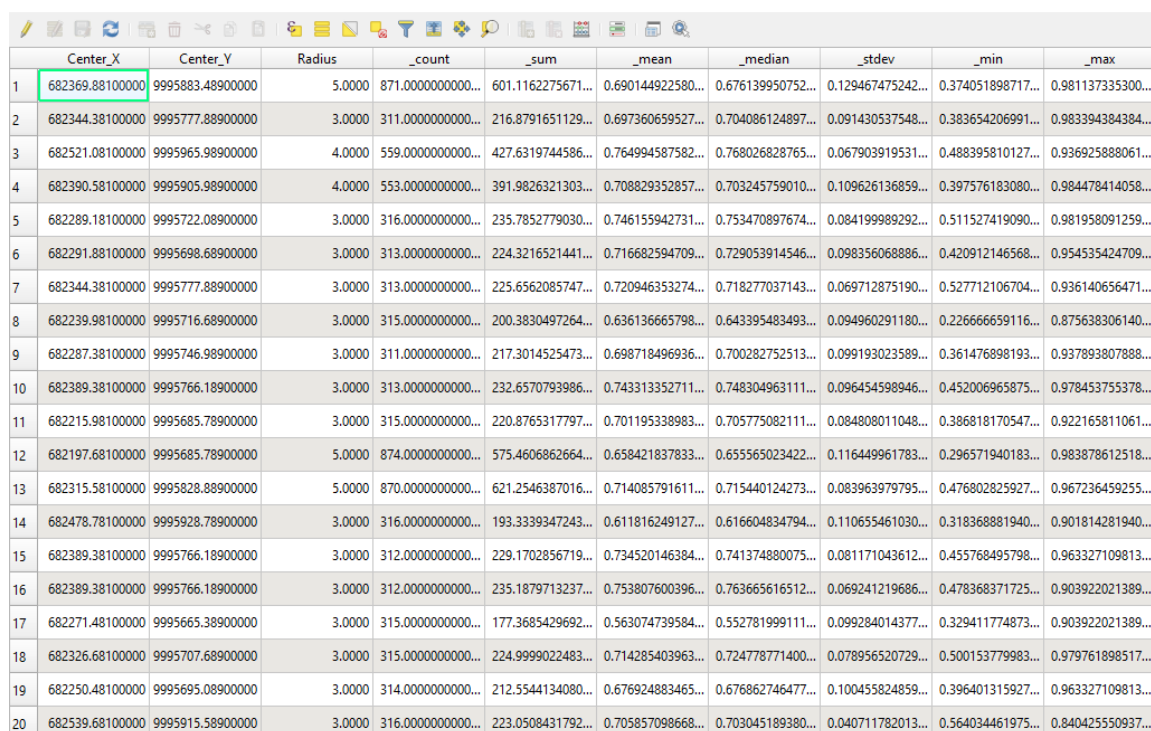
La herramienta *zonal statistics* permite analizar los resultados de una clasificación temática, a través del cálculo de varios valores de los píxeles de una capa ráster con la ayuda de una capa vectorial poligonal. Al elegir una banda de color, en este caso de estudio, los índices de vegetación generados, la herramienta genera columnas de salida en la capa vectorial con un prefijo definido y calcula para cada polígono, estadísticas sobre los píxeles que están dentro, ver **Figura 28**.



**Figura 28.** Insumos raster y vector para la herramienta estadística zonal

De manera que se procedió a generar como estadísticas a número, suma, media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y varianza, ver **Figura 29**.





	Center_X	Center_Y	Radius	_count	_sum	_mean	_median	_stdev	_min	_max
1	682369.88100000	9995883.48900000	5.0000	871.0000000000...	601.1162275671...	0.690144922580...	0.676139950752...	0.129467475242...	0.374051898717...	0.981137335300...
2	682344.38100000	9995777.88900000	3.0000	311.0000000000...	216.8791651129...	0.697360659527...	0.704086124897...	0.091430537548...	0.383654206991...	0.983394384384...
3	682521.08100000	9995965.98900000	4.0000	559.0000000000...	427.6319744586...	0.764994587582...	0.768026828765...	0.067903919531...	0.488395810127...	0.936925888061...
4	682390.58100000	9995905.98900000	4.0000	553.0000000000...	391.9826321303...	0.708829352857...	0.703245759010...	0.109626136859...	0.397576183080...	0.984478414058...
5	682289.18100000	9995722.08900000	3.0000	316.0000000000...	235.7852779030...	0.746155942731...	0.753470897674...	0.084199989292...	0.511527419090...	0.981958091259...
6	682291.88100000	9995698.68900000	3.0000	313.0000000000...	224.3216521441...	0.716682594709...	0.729053914546...	0.098356068886...	0.420912146568...	0.954535424709...
7	682344.38100000	9995777.88900000	3.0000	313.0000000000...	225.6562085747...	0.720946353274...	0.718277037143...	0.069712875190...	0.527712106704...	0.936140656471...
8	682239.98100000	9995716.68900000	3.0000	315.0000000000...	200.3830497264...	0.636136665798...	0.643395483493...	0.094960291180...	0.226666659116...	0.875638306140...
9	682287.38100000	9995746.98900000	3.0000	311.0000000000...	217.3014525473...	0.698718496936...	0.700282752513...	0.099193023589...	0.361476898193...	0.937893807888...
10	682389.38100000	9995766.18900000	3.0000	313.0000000000...	232.6570793986...	0.743313352711...	0.748304963111...	0.096454598946...	0.452006965875...	0.978453755378...
11	682215.98100000	9995685.78900000	3.0000	315.0000000000...	220.8765317797...	0.701195338983...	0.705775082111...	0.084808011048...	0.386818170547...	0.922165811061...
12	682197.68100000	9995685.78900000	5.0000	874.0000000000...	575.4606862664...	0.658421837833...	0.655565023422...	0.116449961783...	0.296571940183...	0.983878612518...
13	682315.58100000	9995928.88900000	5.0000	870.0000000000...	621.2546387016...	0.714085791611...	0.715440124273...	0.083963979795...	0.476802825927...	0.967236459255...
14	682478.78100000	9995928.78900000	3.0000	316.0000000000...	193.3339347243...	0.611816249127...	0.616604834794...	0.110655461030...	0.318368881940...	0.901814281940...
15	682389.38100000	9995766.18900000	3.0000	312.0000000000...	229.1702856719...	0.734520146384...	0.741374880075...	0.081171043612...	0.455768495798...	0.963327109813...
16	682389.38100000	9995766.18900000	3.0000	312.0000000000...	235.1879713237...	0.753807600396...	0.763665616512...	0.069241219686...	0.478368371725...	0.903922021389...
17	682271.48100000	9995665.38900000	3.0000	315.0000000000...	177.3685429692...	0.563074739584...	0.552781999111...	0.099284014377...	0.329411774873...	0.903922021389...
18	682326.68100000	9995707.68900000	3.0000	315.0000000000...	224.9999022483...	0.714285403963...	0.724778771400...	0.078956520729...	0.500153779983...	0.979761898517...
19	682250.48100000	9995695.08900000	3.0000	314.0000000000...	212.5544134080...	0.676924883465...	0.676862746477...	0.100455824859...	0.396401315927...	0.963327109813...
20	682539.68100000	9995915.58900000	3.0000	316.0000000000...	223.0508431792...	0.705857098668...	0.703045189380...	0.040711782013...	0.564034461975...	0.840425550937...

**Figura 29.** Estadísticas generadas en el SIG

### 3.4.6 Análisis exploratorio de datos

Se procedió a realizar el análisis exploratorio de datos obtenidos de las estadísticas zonales con la finalidad de obtener media, desviación estándar, máximos y mínimos, diagramas de cajas y bigotes y gráficas de dispersión por cada lote perteneciente al CIPAL, también se desarrollaron correlaciones entre los índices calculados con la finalidad de establecer concordancia en los resultados obtenidos. Dicha estadística fue desarrollada a partir de programación en *Phyton*. Los resultados se detallan en los Anexos.

### 3.4.7 Análisis estadístico para analizar las diferencias entre especies de palma aceitera

Se procedió a plantear pruebas de hipótesis entre las distintas especies de palma según el estado fenológico, para conocer si existe una diferencia considerable entre los índices presentados

por cada especie, de manera que, se pueda corroborar si existe una diferencia significativa en los índices propuestos en diferentes especies. Para ello, se realizó un análisis de varianza a través del software estadístico *InfoStat*.

Se plantearon pruebas de hipótesis, en las que se toman en cuenta el estadístico  $p$ -valor, de manera que, si el valor  $p$  es menor o igual a 0.05, es decir, a un nivel de significancia del 95%, se procede a aceptar la hipótesis alternativa y si dicho valor es mayor a 0,05 se llega a la conclusión de que la prueba establecida no posee significancia estadística, por ende, se acepta la hipótesis nula.

$$\begin{cases} H_0 = \rho > 0,05 \\ H_1 = \rho \leq 0,05 \end{cases}$$

Una vez aceptada la hipótesis alternativa, se utilizó una prueba de Fisher LSD al 5%, para comparar las medias y encontrar diferencias significativas entre las distintas especies de palma aceitera pertenecientes al estado fenológico que abarca plantas de aproximadamente 20 años y el estado de palmas híbridas que se encuentran en un estado de 4 años en desarrollo. Para el ADEVA se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

$H_0$ : *Los índices de vegetación no son eficientes para diferenciar especies de palma aceitera*

$H_1$ : *Los índices de vegetación son eficientes para diferenciar especies de palma aceitera*

### **3.5 Metodología para la captura de imágenes digitales mediante tecnología UA V-Fase B**

#### **3.5.1 Diseño del plan de vuelo para la Fase B**

Para la segunda fase se procedió a realizar el plan del vuelo para el lote Arteaga correspondientes al dron MATRICE 100, con las cámaras RGB y BGNIR. Se cubrieron un total

de 22 (ha) del lote con presencia de afectaciones y se realizaron tres monitoreos para analizar el esparcimiento de las enfermedades presentes. Cabe recalcar que se utilizaron los parámetros descritos en la **Tabla 12** y que pueden verse de forma gráfica en la **Figura 30**. También se realizaron monitoreos con el dron Mavic Pro, que sirvieron para corroborar los datos, aunque debido a problemas técnicos no se pudieron realizar los mismos vuelos en las fechas planeadas con el dron MATRICE.



**Figura 30.** Diseño del plan de vuelo para la fase B realizada en el Lote Arteaga con la presencia de especies de tipo INIAP

### 3.5.2 Parámetros de vuelo para la fase B

Los parámetros de vuelo son establecidos para ejecutar el vuelo de forma segura y pertinente. Es así que se considera al tiempo de vuelo, los traslapes longitudinales y transversales y la altura de vuelo, a través de un previo análisis del terreno. Se utilizó la aplicación *PrecisionMapper*, para determinar dichos parámetros (**Tabla 12**).

**Tabla 12**

*Parámetros de vuelo para la fase B*

Parámetros de vuelo	Unidad
Tiempo de vuelo	8 min
Traslapo Longitudinal	70 %

CONTINÚA



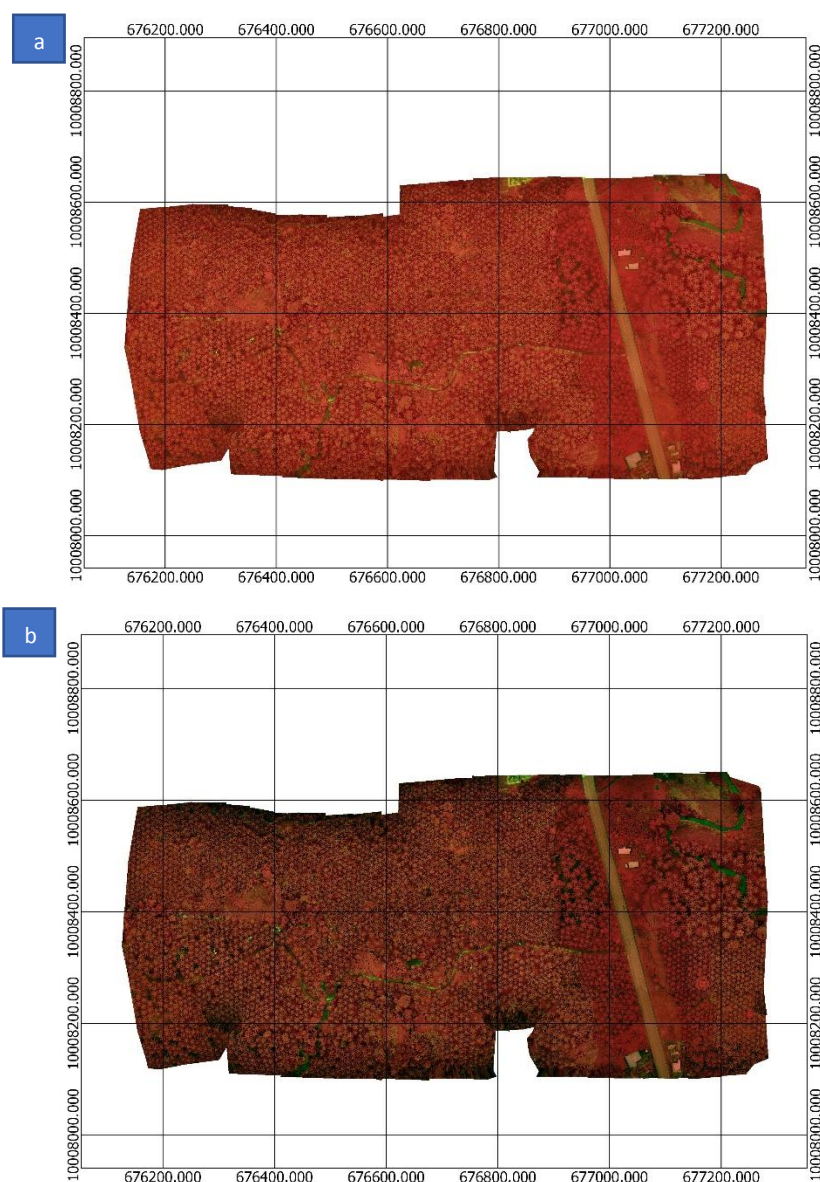
Traslapo Transversal	60 %
Altura de vuelo	120 m
Área total del terreno	22.7 ha

### 3.6 Procesamiento de imágenes digitales para la fase B

Para el procesamiento de imágenes satelitales se utilizó el software *Photomod*, el cual permitió realizar el proceso fotogramétrico descrito en la **Figura 10**, de manera que se obtuvieron dos ortomosaicos, un RGB y un BGNIR, que sirvieron como insumos para analizar índices de vegetación de las palmas afectadas del Lote Arteaga.

### 3.7 Tratamiento de imágenes digitales

Para el tratamiento de las imágenes obtenidas se siguió la misma metodología desarrollada en el apartado 3.4 Tratamiento de imágenes *digitales*, a excepción de los análisis estadísticos, ya que se realizarán distintos procedimientos que se describen a continuación. Como muestra la **Figura 31** se pueden apreciar todos los tratamientos realizados a las imágenes digitales obtenidas.



**Figura 31.** Tratamiento de imágenes satelitales aplicado al Lote Arteaga: a) Corrección de bandas y establecimiento de metadatos, b) Corrección Atmosférica

### 3.7.1 Cálculo de índices de vegetación

El cálculo de los índices de vegetación para la fase B se realizó en base a los insumos obtenidos a través del dron MATRICE 100, es decir, imágenes RGB y BGNIR. Mediante el primer producto fotogramétrico se procedió a estimar una alternativa al NDVI y los índices

GNDVI y GVI a través del producto BGNIR. Para el cálculo de un falso NDVI se utilizó el VARI. Para el cálculo de los índices mencionados se utilizaron las ecuaciones (2-4) descritas en la **Tabla 2**.

### **3.8 Georreferenciación de imágenes**

Para realizar un análisis multitemporal entre los monitoreos realizados, es necesario que los ortomosaicos mantengan la misma georreferenciación, ya que pueden existir ciertas diferencias de visualización o distorsiones entre ellos al momento de procesar las ortofotos obtenidas en cada monitoreo. Con dicho antecedente se procedió a ejecutar un flujo de trabajo de registro de imágenes para alinear geométricamente dos imágenes con diferentes geometrías de visualización, o que posean diferentes distorsiones del terreno en el mismo sistema de coordenadas, con el objetivo de que los píxeles correspondientes representan los mismos objetos. El proceso abarca la ubicación y la coincidencia de una serie de puntos de características (llamados puntos de enlace) en dos imágenes (una imagen de deformación y una imagen base) seleccionadas para el registro. Los puntos de enlace correspondientes se utilizan para calcular los parámetros de una transformación geométrica entre las dos imágenes. Para realizar el proceso descrito se ha utilizado el software ENVI que utiliza un motor de registro híbrido que permite generar puntos de enlace de forma automática y precisa, y luego utiliza esos puntos de enlace para alinear y remuestrear la imagen de deformación para que coincida con la imagen base.

El componente híbrido de referencia espacial combina toda la información de referencia espacial disponible para lograr la mejor precisión de ubicación geográfica durante el registro. La

información de referencia espacial sugerida por Harris Geospatial Solutions (2019) puede provenir de los siguientes insumos:

1. Mapa estándar o información RPC (Coeficientes polinomiales racionales por sus siglas en inglés) de las imágenes de entrada. La información de mapa estándar o RPC establece la relación geométrica aproximada entre una imagen de deformación y una imagen base. Reduce el espacio de búsqueda y mejora la fiabilidad de la generación automática de puntos de enlace.
2. La información del punto de enlace que se define manualmente o que se genera automáticamente a partir de técnicas de comparación de imágenes. Para la mayoría de las aplicaciones, el motor de registro puede generar automáticamente puntos de enlace sin ningún número de valores atípicos o un número mínimo.
3. Restricciones geométricas de ubicación geográfica para buscar y filtrar puntos de enlace. Las imágenes deben alinearse bien en el espacio de coordenadas del terreno común en las imágenes ortorrectificadas o en las imágenes de vista nadir; por lo tanto, todos los puntos de enlace están limitados por una transformación global entre las coordenadas en la imagen base y la imagen de deformación.
4. Modelos de sensor RPC y elevación utilizados para una rápida ortorectificación durante el registro de la imagen. Esto corrige geoméricamente los datos a un espacio de coordenadas de terreno común, y logra una mejor precisión en la comparación radiométrica y el filtrado geométrico.

En este caso de estudio se ha utilizado la primera opción como insumo para realizar la georreferenciación de los dos últimos monitoreos del lote afectado respecto al primero, con la finalidad de realizar un análisis multitemporal que permita analizar un patrón de distribución de las enfermedades. Para la georreferenciación se acepta un error medio cuadrático de alrededor de 1. La georreferenciación de los monitoreos realizados es un insumo necesario para realizar el análisis multitemporal y determinar los patrones de distribución espacial de las afectaciones presentes en el lote.

### **3.8.1 VARI**

Para el par de ortomosaicos referentes al primer y segundo monitoreo se realizó la georreferenciación con 5 puntos de enlace que dieron lugar a un Error Medio Cuadrático (RMS por sus siglas en inglés) de 0.99 y entre el primer y tercer monitoreo se realizó la georreferenciación con 5 puntos de enlace que dieron lugar a un Error Medio Cuadrático (RMS por sus siglas en inglés) de 0.12

### **3.8.2 GNDVI**

Para el par de ortomosaicos referentes al primer y segundo monitoreo se realizó la georreferenciación con 6 puntos de enlace que dieron lugar a un Error Medio Cuadrático (RMS por sus siglas en inglés) de 1.09 y entre el primer y tercer monitoreo se realizó la georreferenciación con 4 puntos de enlace que dieron lugar a un Error Medio Cuadrático (RMS por sus siglas en inglés) de 0.0.



### **3.8.3 GVI**

Para el par de ortomosaicos referentes al primer y segundo monitoreo se realizó la georreferenciación con 5 puntos de enlace que dieron lugar a un Error Medio Cuadrático (RMS por sus siglas en inglés) de 1.24. Para el par de ortomosaicos referentes al primer y tercer monitoreo se realizó la georreferenciación con 4 puntos de enlace que dieron lugar a un Error Medio Cuadrático (RMS por sus siglas en inglés) de 0.0.

## **3.9 Análisis multitemporal**

### **3.9.1 Detección de cambios**

Para el proceso de detección de cambios se compara dos imágenes, que posean la misma extensión geográfica, tomadas en diferentes momentos, e identifica las diferencias entre ellas. La diferencia se puede calcular en una banda de entrada especificada o en un índice de características, en este caso de estudio se utilizan los índices de vegetación generados.

Para realizar este proceso, en primer lugar, se toma en cuenta el registro de imágenes que alinea geométricamente dos imágenes con diferente geometría de visualización y / o diferentes distorsiones del terreno en el mismo sistema de coordenadas. El registro se logra identificando las características correspondientes en las dos imágenes y estableciendo puntos de enlace comunes, luego se deforma una imagen basada en estos puntos de enlace para que coincida con la imagen base. Acto seguido, se procede a realizar un análisis de diferencia en una banda específica en la imagen, para este proceso se tiene que considerar las condiciones atmosféricas que pueden intervenir en el procesamiento del ortomosaico y por ende puede afectar a los niveles digitales de

la imagen. De esta manera se puede realizar una “Normalización radiométrica”, que minimiza las diferencias radiométricas entre dos imágenes causadas por inconsistencias de las condiciones de adquisición, como los cambios causados por diferentes condiciones atmosféricas y de iluminación mencionadas anteriormente (Harris Geospatial Solutions, 2019). El proceso de normalización radiométrica aplica una ganancia y un desplazamiento a la imagen del segundo tiempo de adquisición de la imagen para que tenga la misma media y desviación estándar que la imagen del primer tiempo de adquisición.

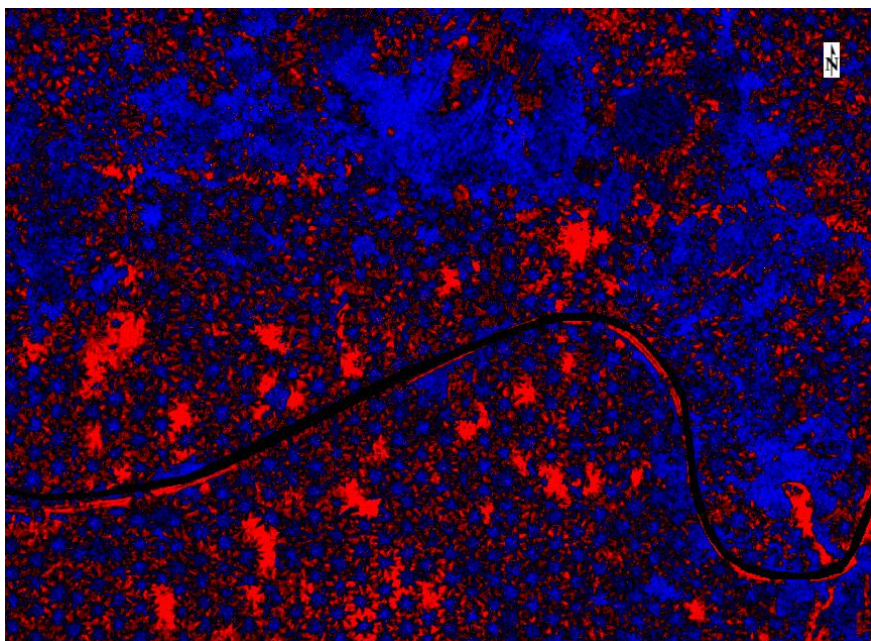
El cambio que se desea detectar consiste en la diferencia entre los índices de vegetación en cuanto a disminución de los valores de dichos índices, ya que se supone que éstos representan zonas donde existe la afectación en la palma, de manera que, se ha establecido el color rojo como la representación de esta variación en el tiempo. Las zonas que se representan en azul consisten en valores que han incrementado su índice, en este caso de estudio, esta variación se evidencia en pastos o palmas que no presentan afectación, como se puede evidenciar en la **Figura 32**.

Para finalizar con el procedimiento de la detección de cambios (**Figura 33**), se aplica un “Umbral” o “Thresholding” que permite establecer parámetros que ayudan al proceso a determinar las áreas que tienen grandes cambios. Existen varios métodos, que se pueden aplicar, entre ellos se destaca a:

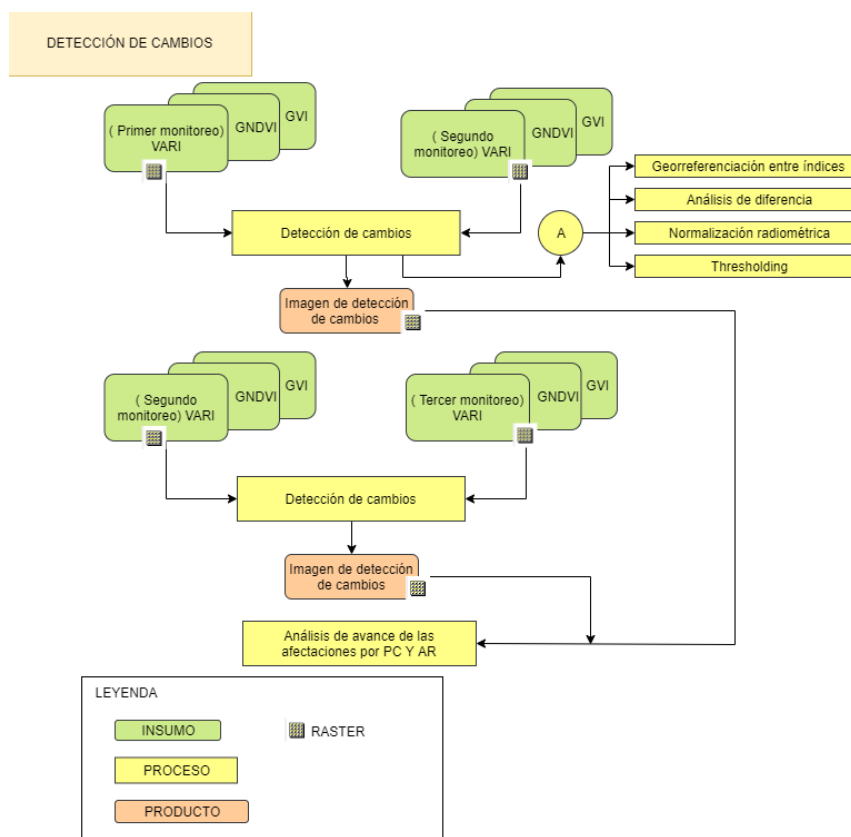
- Otsu: consiste en un método basado en la forma del histograma. Se basa en un análisis discriminatorio y utiliza los momentos acumulativos de cero y primer orden del histograma para calcular el valor del nivel de umbral (Otsu, 1979).

- Tsai: un método basado en el momento. Determina el umbral para que los primeros tres momentos de la imagen de entrada se conserven en la imagen de salida (Tsai, 1985).
- Kapur's: un método basado en entropía. Considera la imagen de umbral como dos clases de eventos, y cada clase se caracteriza por la “función de densidad de probabilidad” (PDF). Luego, el método maximiza la suma de la entropía de los dos archivos PDF para converger en un único valor de umbral (Kapur, 1985).
- Kittler: un método basado en la forma del histograma. Se aproxima al histograma como una distribución gaussiana bimodal y encuentra un punto de corte. La función de costo se basa en la regla de clasificación de Bayes (Kittler, 1986).

En este caso de estudio se ha aplicado el método Otsu, ya que es importante en el procesamiento de imágenes seleccionar un umbral adecuado de nivel de gris para extraer objetos de su fondo. En un caso ideal, el histograma tiene un valle profundo y agudo entre dos picos que representan los objetos y el fondo, respectivamente, de modo que el umbral se puede elegir en el fondo de este valle. Desde el punto de vista del análisis discriminante, se ha derivado un método para seleccionar un umbral automáticamente desde un histograma de nivel de gris. Este método propuesto se caracteriza por su naturaleza no paramétrica y no supervisada de selección de umbral, que da como resultado un procedimiento muy simple, debido a que solo se utilizan los momentos acumulativos cero y de primer orden del histograma de nivel gris. También se pueden analizar otros aspectos importantes (por ejemplo, estimación de niveles medios de clase, evaluación de separabilidad de clase, etc.). Cabe recalcar que el método es bastante general: cubre una amplia gama de procedimientos de decisión no supervisados (Otsu, 1979).



**Figura 32.** Detección de cambios



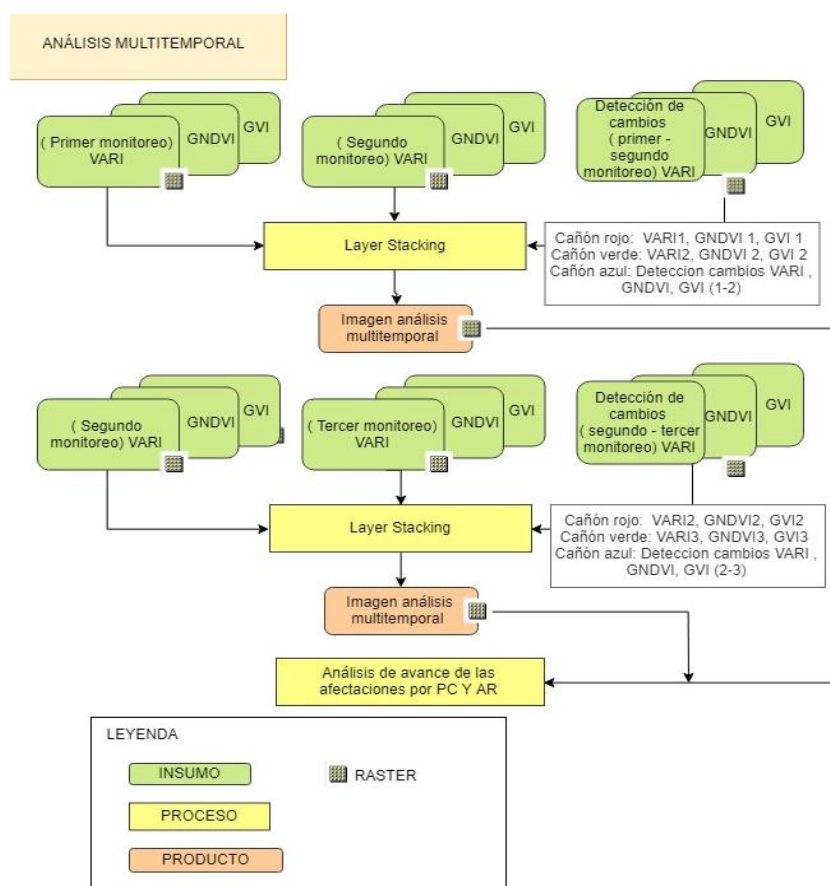
**Figura 33.** Proceso de detección de cambios

### 3.9.2 Índices multitemporales

Una vez generada la detección de cambios y los índices de vegetación, se pueden realizar combinaciones que permiten generar nuevas pseudo-bandas basadas en una secuencia y en operaciones de las bandas originales de los sensores siempre con un tratamiento previo. La finalidad de esto es lograr una mejor discriminación temática de la información que se encuentra en las imágenes obtenidas por diferentes satélites o sensores remotos, de manera que se pueda resaltar la información que se posee y no crear nuevos datos (Reyes et al., 2019). Estas nuevas pseudo-bandas surgen de operaciones como la suma, la multiplicación en las bandas originales, dichos procedimientos realizados con las bandas se catalogan como transformaciones lineales para ilustrar fenómenos interesantes (Pereira, 1999; Myneni et al., 1995). Para el análisis multitemporal, en este caso de estudio se procederá a utilizar los distintos índices generados y la localización de zonas con disminución de índices a partir de la detección de cambios.

Debido a que el cálculo del índice y la detección de cambios son cálculos independientes, en el presente estudio se procedió a integrar ambas características mediante una combinación de índices multitemporales que permiten discriminar el avance de las afectaciones a partir de la disminución de los valores de los índices de vegetación calculados. En el cañón rojo de la imagen digital a formar se ha colocado el índice calculado (VARI, GNDVI, GVI) perteneciente al primer monitoreo. Para el cañón verde, se utiliza el índice calculado correspondiente al segundo monitoreo. De manera que, las áreas donde los valores espectrales no hayan presentado variaciones considerables se mantendrán uniformes respecto a la escena anterior. Finalmente, en el cañón azul, se ha ingresado la detección de cambio, donde las palmas afectadas y las zonas que han presentado una disminución del índice de vegetación, lo cual indica una posible alteración,

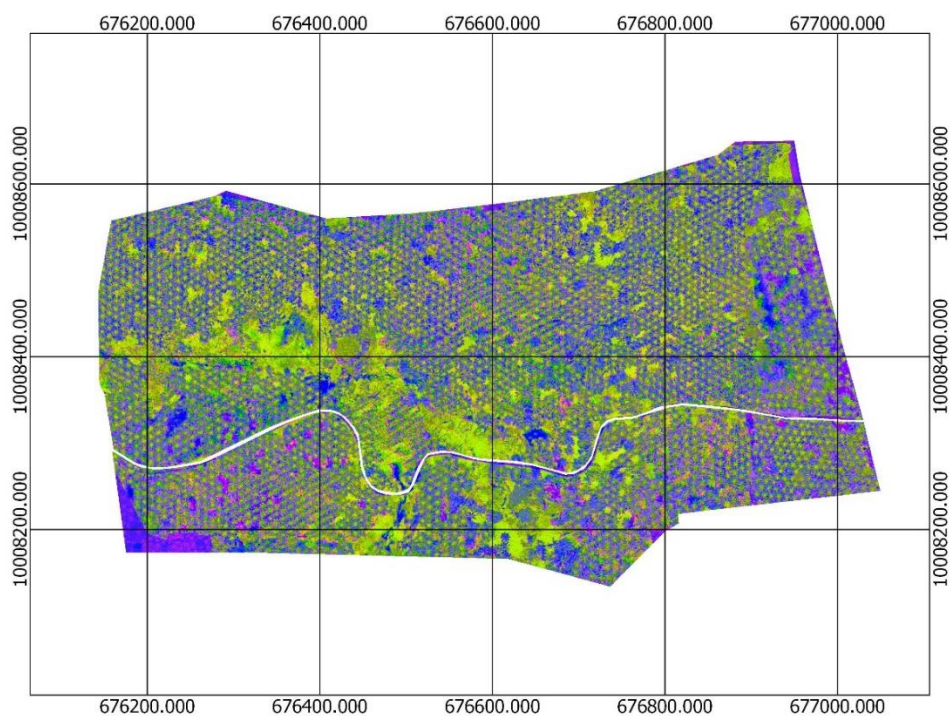
sobresaldrán en comparación con las plantas que no presentan afectación alguna. La metodología descrita se aprecia en la **Figura 34**.



**Figura 34.** Análisis del avance de afectaciones a través de análisis multitemporal

La metodología descrita anteriormente da como resultado una imagen que se puede apreciar en la **Figura 35**., de manera que con ella se puede proceder a la interpretación visual. Se puede constatar cómo se menciona en (Reyes et al., 2019), que las zonas que presentan una coloración magenta a azul indican áreas que han sufrido alteración, en este caso se considera la disminución de los índices de vegetación, que permite suponer la posible afectación de las plantas. Esta interpretación de resultados es descrita por Padilla (2005) cómo se presenta en la

**Tabla 13** y de manera complementaria mediante el análisis datos de Reyes et al. (2019) en la **Figura 36**.



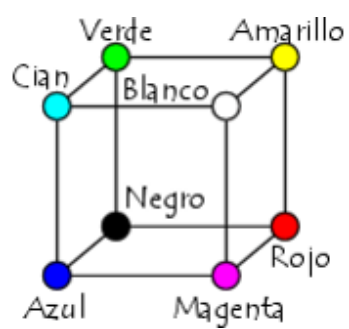
**Figura 35.** Análisis multitemporal correspondiente al primer y segundo monitoreo mediante el VARI

**Tabla 13**

*Interpretación visual de la combinación multitemporal*

Tiempo	Banda	Cañón	Reflectancia	Reflectancia	Reflectancia	Reflectancia
<b>Antes</b>	Infrarrojo	R	Alta	Baja	Alta	Bajo
<b>Después</b>	Infrarrojo	G	Baja	Alta	Alta	Bajo
<b>Después</b>	Rojo	B	Baja	Alta	Alta	Bajo
<b>Resultado de Falso Color, interpretación</b>			Rojo (Cambio)	Cian (Cambio)	Blanco (Sin Cambio)	Negro (Sin cambio)

Fuente: (Padilla, 2005)



**Figura 36.** Interpretación visual de la combinación multitemporal  
Fuente: (Reyes et al., 2019)



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto de investigación. De forma general se obtuvieron los ortomosaicos generados para cada lote de estudio, que consisten en imágenes RGB, BGNIR y GBNIR, que permitieron la generación de índices de vegetación (NDVI, GNDVI, GVI y VARI), de manera que, se analizó el estado de palmas sin afectación con la finalidad de crear una línea base a partir de los índices mencionados, se estableció estadísticamente la posibilidad de una diferencia entre especies de palma. Finalmente, en el lote de afectación a través de los índices de vegetación se demostró la factibilidad de la aplicación de tecnologías geoespaciales para la pronta detección de enfermedades según la sintomatología que presentan, y el análisis de distribución espacial de las enfermedades mediante un estudio multitemporal.

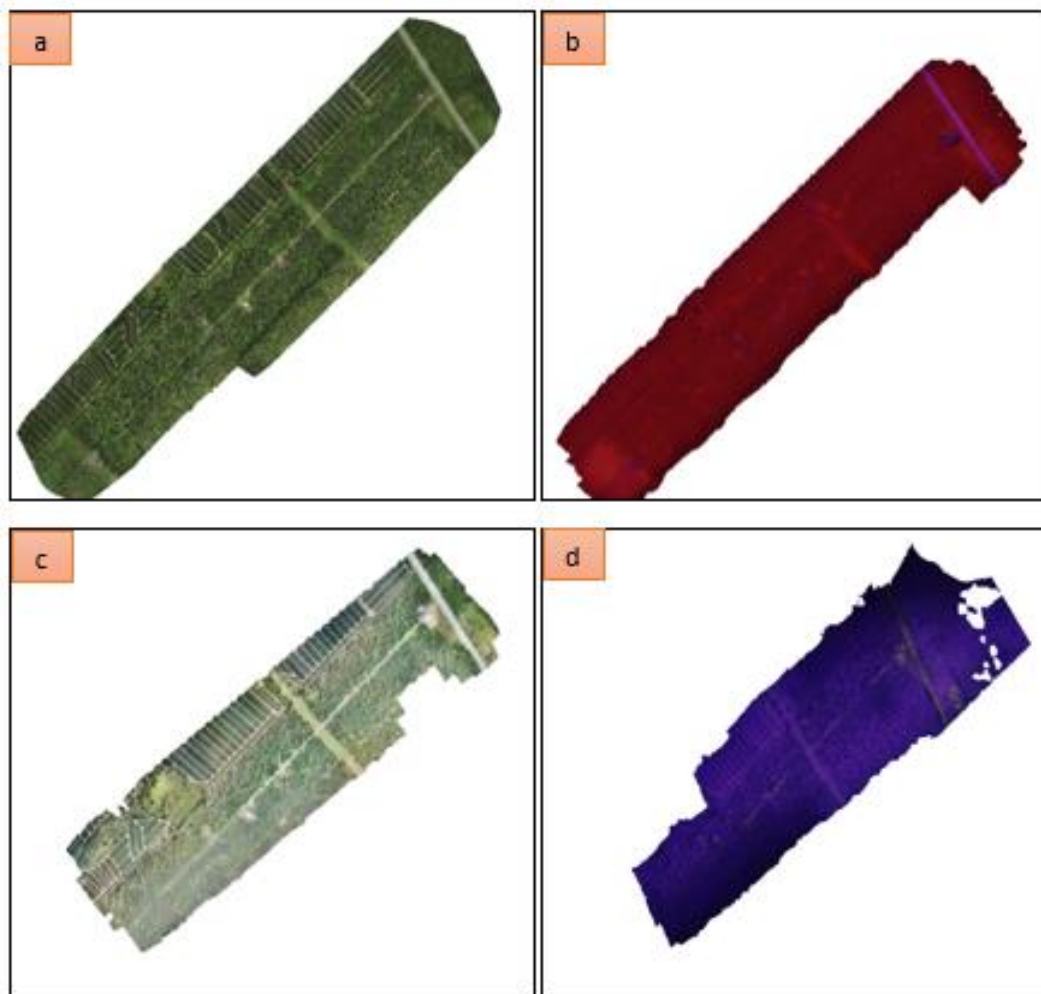
#### 4.1 Fase A

##### 4.1.1 Generación de Ortomosaicos

Para la primera fase se han generado cuatro ortomosaicos monitoreados en tres distintas fechas (Ver *Figura 37* y *Figura 38*) con la finalidad de obtener la línea base de cultivos de palma sin afectaciones, pero cabe recalcar que se desarrollaron casos de infección con PC y AR conforme avanzó el tiempo, por lo que se procedió a analizar a partir de la metodología propuesta.



**Figura 37.** a) y b) Ortomosaicos RGB Y BGNIR respectivamente, obtenidos a partir del dron MATRICE el 18 de abril del 2019. c) y d) Ortomosaicos RGB Y RGNIR respectivamente, obtenidos a partir del dron MAVIC PRO el 18 de abril del 2019



**Figura 38.** a) y b) Ortomosaicos RGB Y BGNIR respectivamente, obtenidos a partir del dron MATRICE el 30 de mayo del 2019. c) y d) Ortomosaicos RGB Y RGNIR respectivamente, obtenidos a partir del dron MAVIC PRO el 22 de agosto del 2019

#### 4.1.2 Conteo automático de palmas

El conteo automático de palmas permitió analizar cada palma en referencia a los índices de vegetación que se plantearon, de manera que en el lote del CIPAL se obtuvieron polígonos que engloban las plantas pertenecientes a cada lote por especie, con la finalidad de generar estadísticas zonales para la obtención de la línea base de palmas sin afectación, ver **Figura 27** y **Tabla 14**.

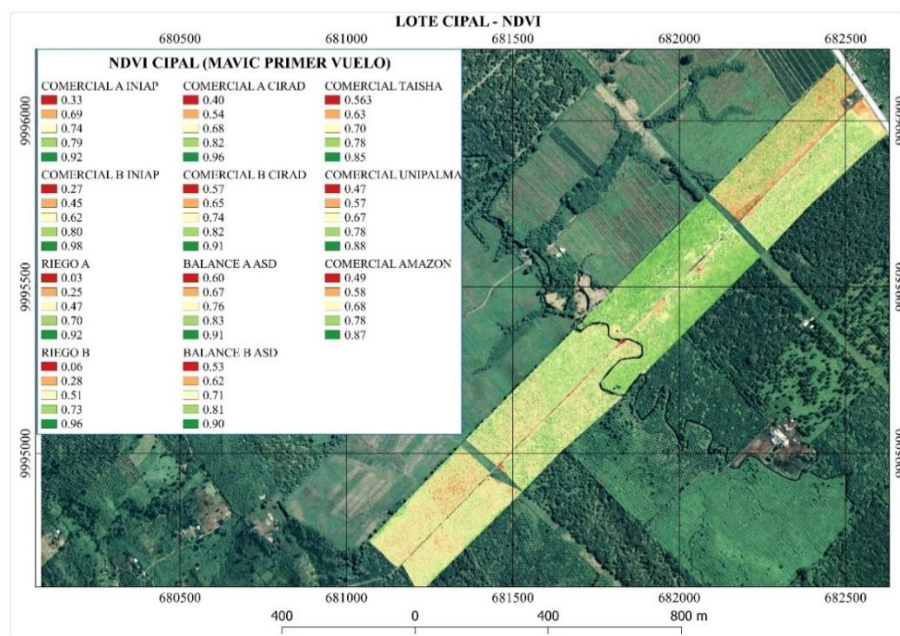
**Tabla 14***Resultados del conteo de palmas por especie*

Número de palmas	
INIAP	1081
CIRAD	541
ASD	468
TAISHA	238
UNIPALMA	421
AMAZON	256

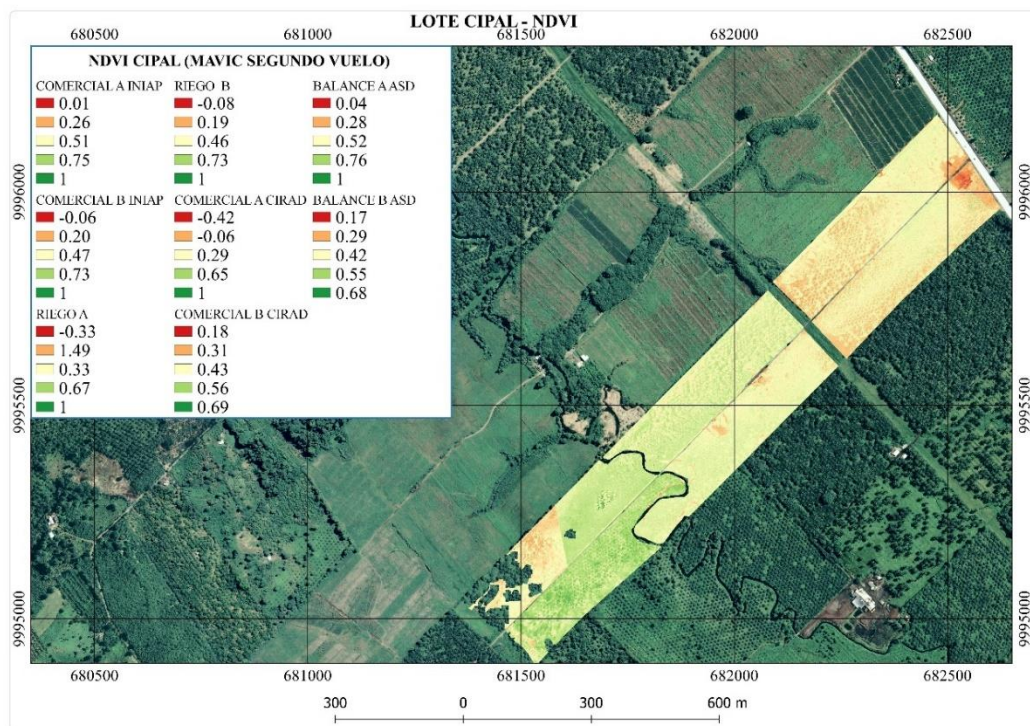
### 4.1.3 Generación de índices de vegetación

#### 4.1.3.1 NDVI

Para el cálculo del NDVI se procedió a aplicar la ecuación (1) descrita en la *Tabla 2*, de manera que se obtuvo dicho índice de vegetación por cada lote y su respectivo material de palma, ver *Figura 39* y *Figura 40*.



**Figura 39.** NDVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor RGNIR



**Figura 40.** NDVI monitoreo 22 de agosto del 2019 a partir del sensor RGNIR

#### 4.1.3.1.1 Estadísticas zonales a partir del NDVI

Para la obtención del índice que posee cada palma de los distintos materiales presentes en los lotes del CIPAL se utilizó la ecuación (1) descrita en la **Tabla 2** se procedió a utilizar como insumo el conteo de palmas con la metodología descrita en la sección 3.4.5 del capítulo “Metodología”. En la **Tabla 15** un resumen de resultados estadísticos. Cabe mencionar que el monitoreo realizado con el dron MAVIC PRO el 22 de agosto no abarcó los lotes pertenecientes al estado fenológico que posee aproximadamente cuatro años.

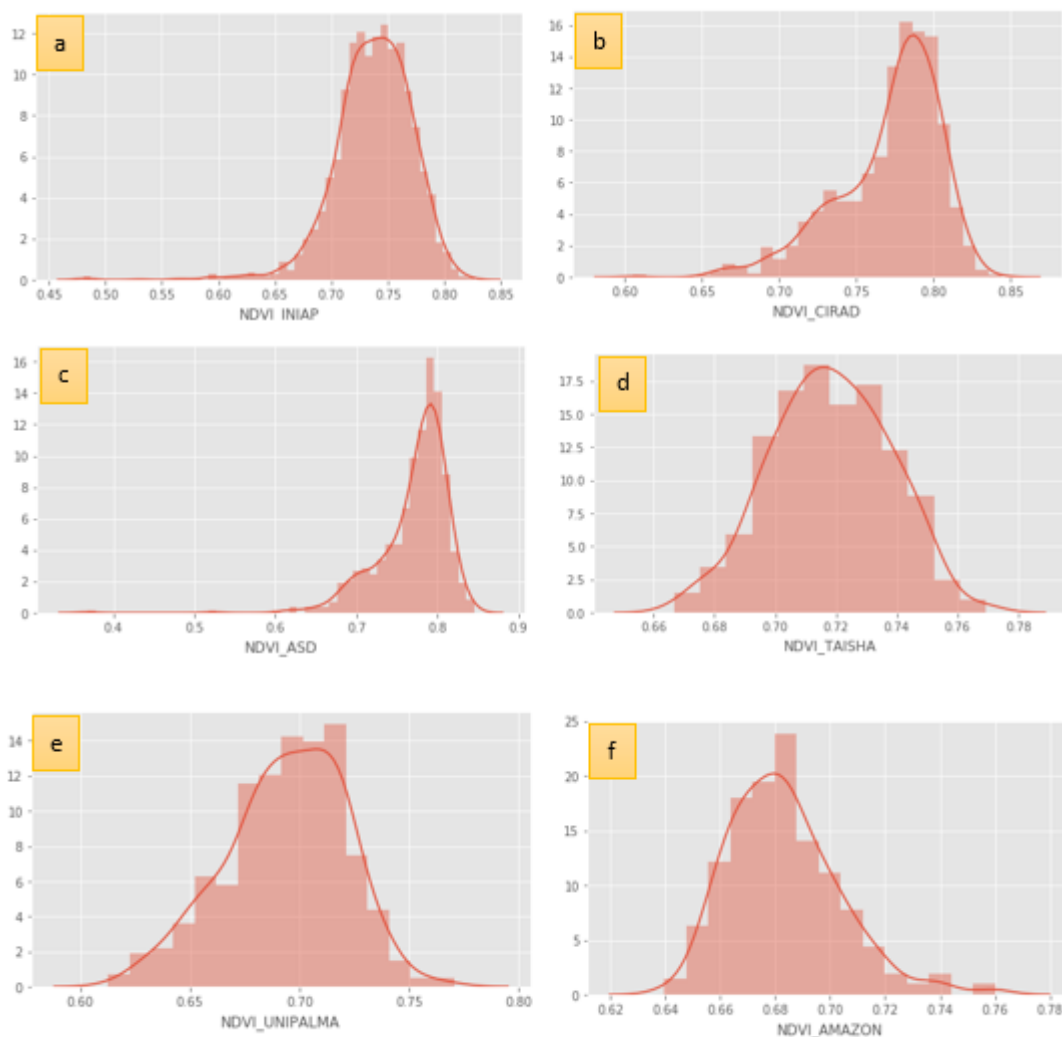
**Tabla 15***Resumen estadístico del índice NDVI calculado a partir del sensor RGNIR*

Estado fenológico	ESPECIE	LOTE	NDVI (18 de abril)		NDVI (22 de agosto)	
			Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
<b>Estado fenológico 305 (15 años)</b>	INIAP	A	0.755	0.029	0.750	0.031
	INIAP	B	0.726	0.031	0.718	0.033
	CIRAD	A	0.785	0.019	0.733	0.031
	CIRAD	B	0.785	0.018	0.783	0.029
	ASD	A	0.793	0.022	0.730	0.039
	ASD	B	0.786	0.020	0.773	0.028
<b>Estado fenológico 301 (2 años)</b>	UNIPALMA		0.694	0.028	–	–
	TAISHA		0.718	0.019	–	–
	AMAZON		0.683	0.020	–	–

Como se puede apreciar no existe una gran variación entre los índices determinados para cada lote, por lo que se estableció la línea base como una media entre los valores obtenidos en cada monitoreo. Como se aprecia en la **Figura 41** los valores tienden a una distribución normal y se ha determinado un intervalo de confianza al 95% para establecer los índices característicos de una palma sana según cada tipo de especie, ver **Tabla 16**.

**Tabla 16***Valores del NDVI para la línea base de palma de aceite sin afectación*

NDVI - Línea Base			
<b>INIAP</b>	0.737	±	0.001
<b>CIRAD</b>	0.771	±	0.002
<b>ASD</b>	0.771	±	0.003
<b>TAISHA</b>	0.718	±	0.002
<b>UNIPALMA</b>	0.694	±	0.003
<b>AMAZON</b>	0.683	±	0.002

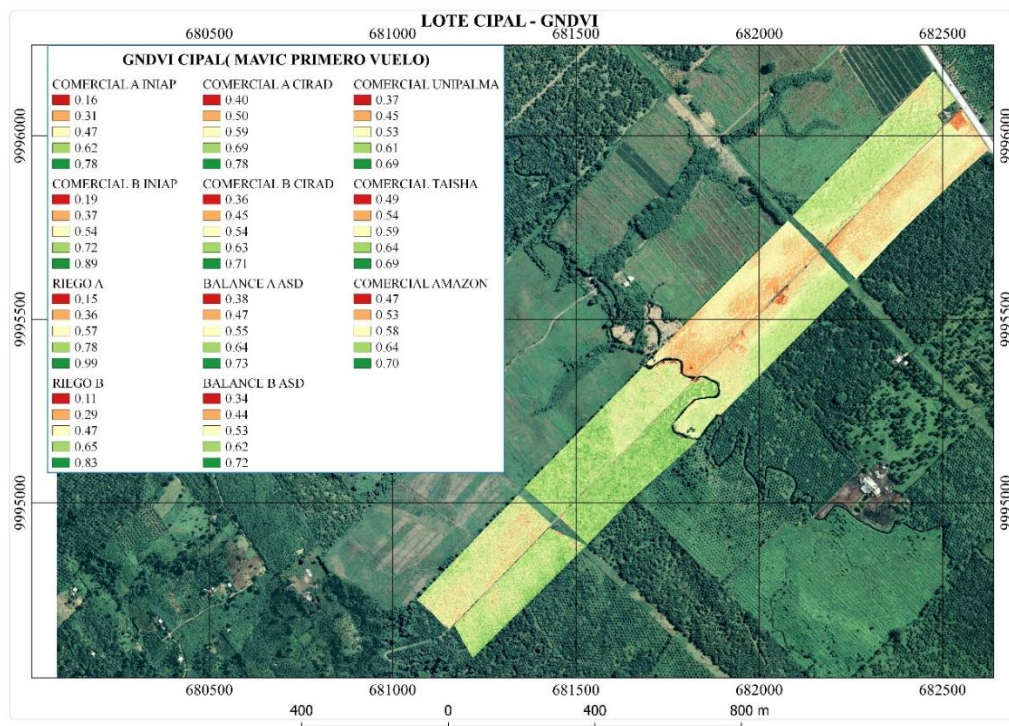


**Figura 41.** Distribución de los valores del NDVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD, c) Material ASD, d) Material Taisha, e) Material UNIPALMA, f) Material Amazon

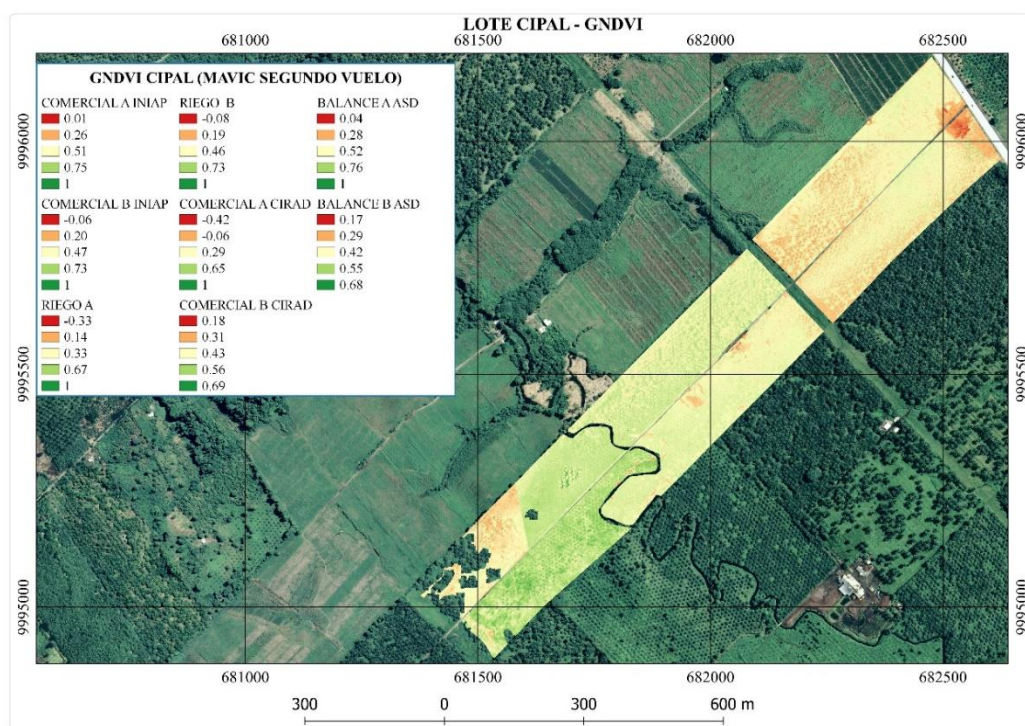
#### 4.1.3.2 GNDVI

Para el cálculo del GNDVI se procedió a aplicar la ecuación (2) descrita en la **Tabla 2**, de manera que se obtuvo dicho índice de vegetación por cada lote y su respectivo material de palma, ver **Figura 42**, **Figura 43**, **Figura 44** y **Figura 45**.



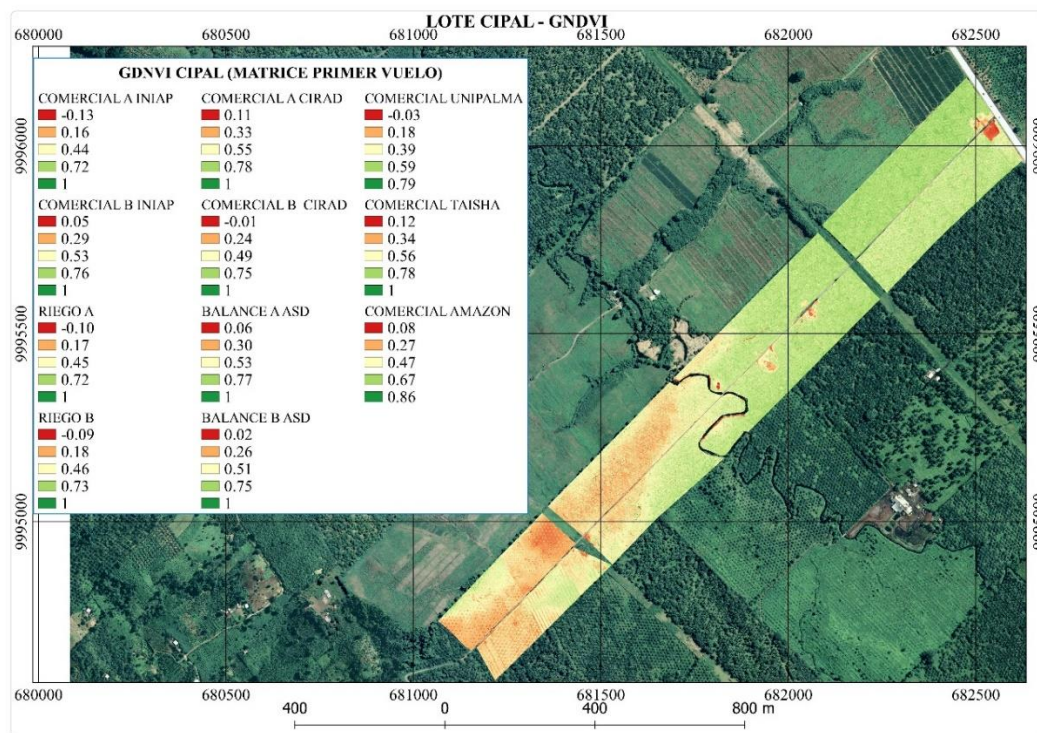


**Figura 42.** GNDVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor RGNIR

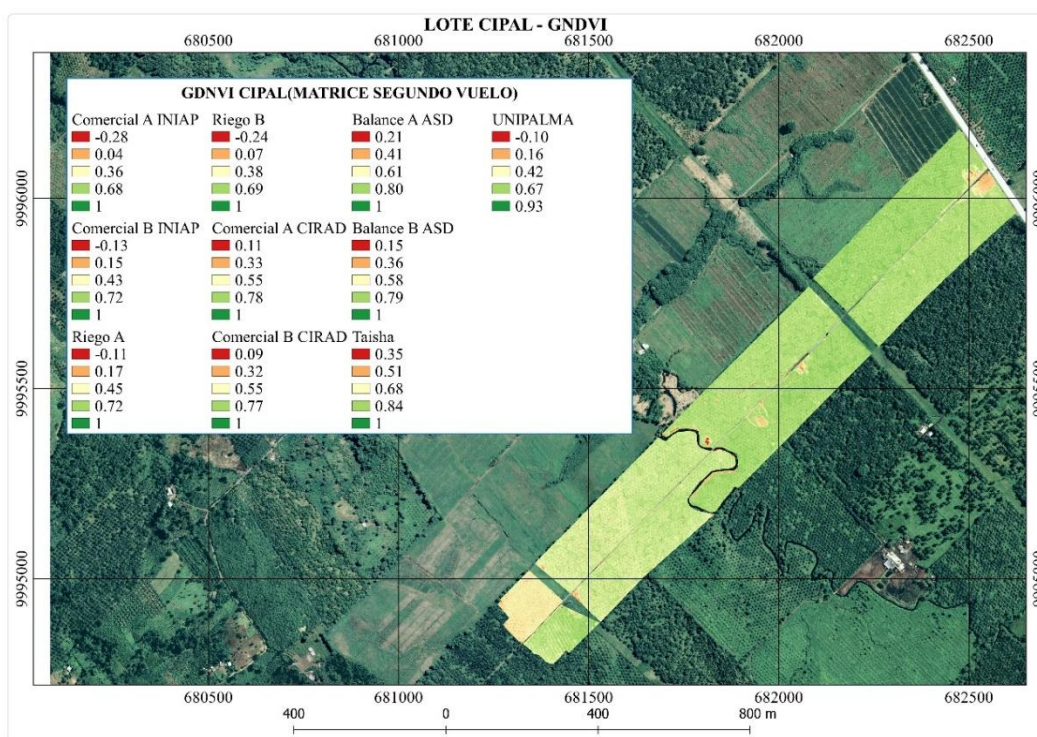


**Figura 43.** GNDVI monitoreo 22 de agosto del 2019 a partir del sensor RGNIR





**Figura 44.** GNDVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor BGNIR



**Figura 45.** GNDVI monitoreo 30 de mayo del 2019 a partir del sensor BGNIR

#### 4.1.3.2.1 Estadísticas zonales a partir del GNDVI

Para la obtención del índice GNDVI que posee cada palma de los distintos materiales presentes en los lotes del CIPAL se procedió a utilizar como insumo el conteo de palmas con la metodología descrita en la sección 3.4.5 (página 61) del capítulo “Metodología”, por lo que se detalla en la **Tabla 17** y **Tabla 18** un resumen de resultados estadísticos según el sensor utilizado.

**Tabla 17**

*Resumen estadístico del índice GNDVI calculado a partir del sensor RGNIR*

Estado fenológico	ESPECIE	LOTE	GNDVI (18 de abril)		GNDVI (22 de agosto)	
			Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
<b>Estado fenológico 305 (15 años)</b>	INIAP	A	0.523	0.038	0.463	0.058
	INIAP	B	0.473	0.042	0.439	0.049
	CIRAD	A	0.633	0.013	0.492	0.038
	CIRAD	B	0.626	0.012	0.527	0.024
	ASD	A	0.623	0.012	0.461	0.055
	ASD	B	0.615	0.012	0.536	0.031
<b>Estado fenológico 301 (2 años)</b>	UNIPALMA		0.587	0.019	–	–
	TAISHA		0.608	0.009	–	–
	AMAZON		0.600	0.013	–	–

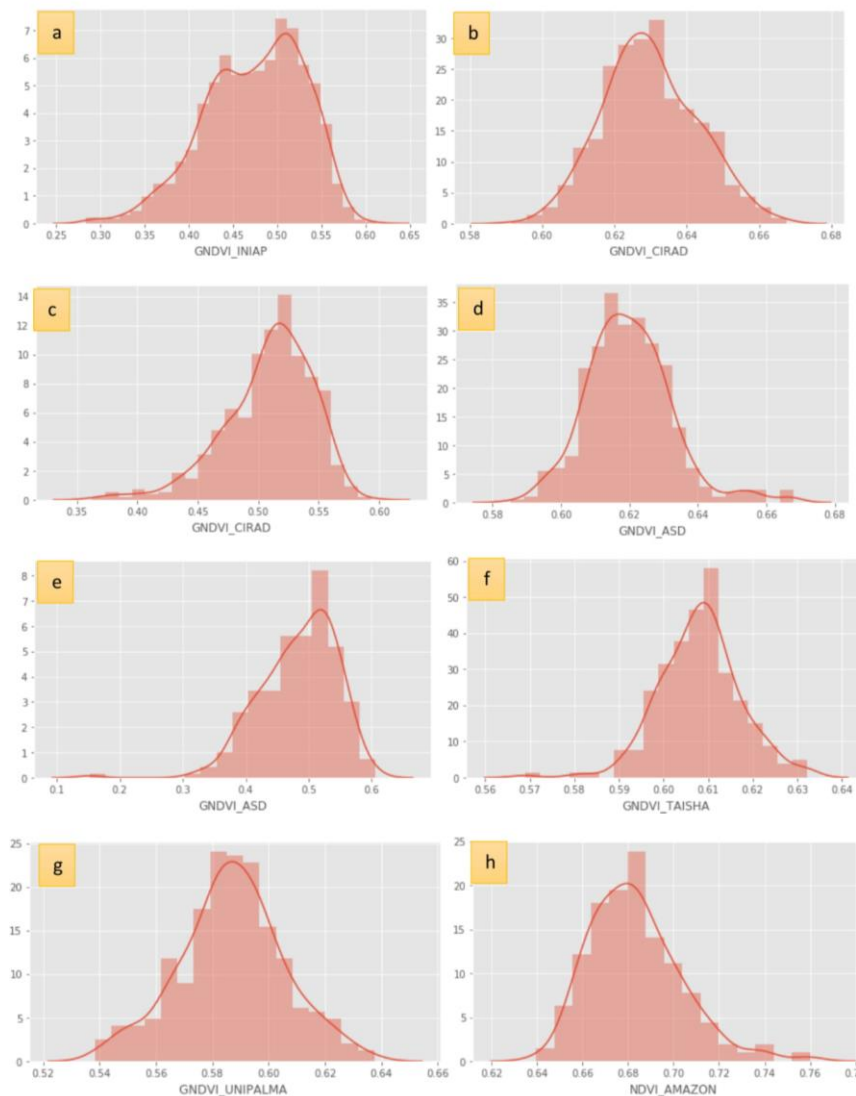
**Tabla 18**

*Resumen estadístico del índice GNDVI calculado a partir del sensor BGNIR*

Estado fenológico	ESPECIE	LOTE	GNDVI (18 de abril)		GNDVI (30 de mayo)	
			Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
<b>Estado fenológico 1</b>	INIAP	A	0.678	0.019	0.663	0.021
	INIAP	B	0.664	0.026	0.664	0.028
	CIRAD	A	0.493	0.076	0.677	0.017
	CIRAD	B	0.596	0.041	0.675	0.026
	ASD	A	0.417	0.050	0.682	0.021
	ASD	B	0.483	0.054	0.668	0.027

<b>Estado fenológico 2</b>	UNIPALMA	0.333	0.079	0.627	0.035
	TAISHA	0.389	0.067	0.652	0.014
	AMAZON	0.385	0.092	–	–

En este caso se observa una diferencia entre los índices obtenidos en cada monitoreo de manera más notable en las especies de CIRAD y ASD, que puede ser consecuencia de las condiciones climáticas variadas entre ambos vuelos, se muestra en la **Figura 46**, **Figura 47** y **Figura 48**, la distribución de los datos al considerar realizar una media entre ambos monitoreos solo en la especie INIAP, para las demás especies se ha considerado analizar ambos resultados según la condición y sensor utilizado, dichos resultados se pueden apreciar en la **Tabla 19** y **Tabla 20**.



**Figura 46.** Distribución de los valores del GNDVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD condición 1, c) Material CIRAD condición 2, d) Material ASD condición 1, e) Material ASD condición 2, f) Material Taisha, g) Material UNIPALMA, H) Material Amazon [Sensor RGNIR]

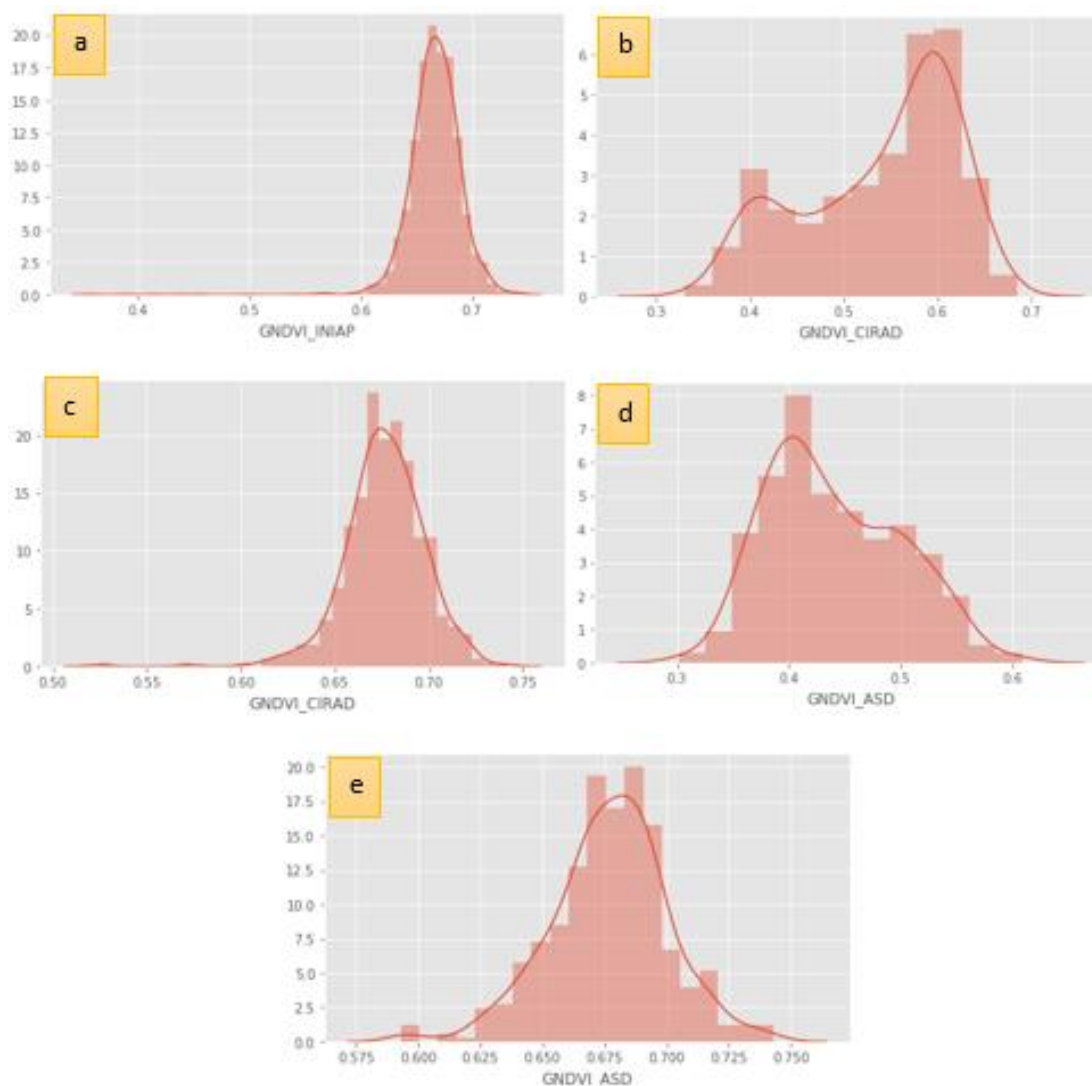
**Tabla 19**

*Valores GNDVI para la línea base de palma de aceite sin afectación (RGNIR)*

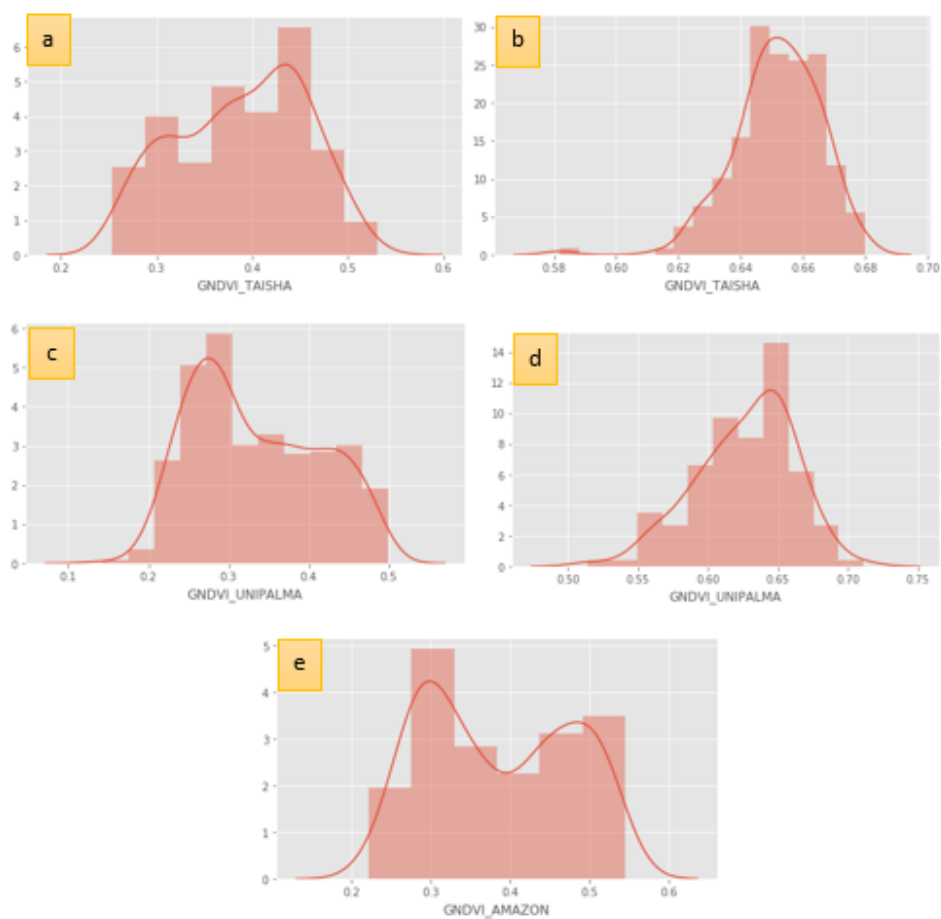
GNDVI - Línea Base			
INIAP	0.475	±	0.002
CIRAD (Condición 1)	0.630	±	0.001
CIRAD (Condición 2)	0.509	±	0.003
ASD (Condición 1)	0.620	±	0.001
ASD (Condición 2)	0.484	±	0.007

CONTINÚA 

<b>TAISHA</b>	0.608	±	0.001
<b>UNIPALMA</b>	0.587	±	0.002
<b>AMAZON</b>	0.600	±	0.002



**Figura 47.** Distribución de los valores del GNDVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD condición 1, c) Material CIRAD condición 2, d) Material ASD condición 1, e) Material ASD condición 2 [Sensor BGNIR]



**Figura 48.** Distribución de los valores del GNDVI para la línea base (a) Material Taisha condición 1, b) Material Taisha condición 2, c) Material UNIPALMA condición 1, d) Material UNIPALMA condición 2, e) Material Amazon [Sensor BGNIR]

**Tabla 20**

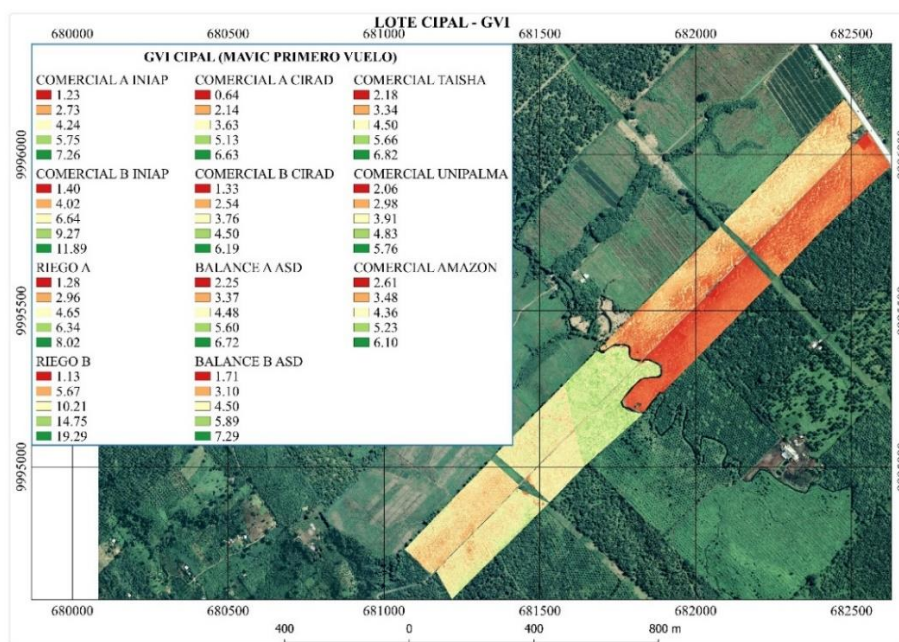
*Valores GNDVI para la línea base de palma de aceite sin afectación (BGNIR)*

GNVI - Línea Base			
INIAP	0.667	±	0.001
CIRAD (Condición 1)	0.539	±	0.007
CIRAD (Condición 2)	0.676	±	0.002
ASD (Condición 1)	0.440	±	0.006
ASD (Condición 2)	0.677	±	0.002
TAISHA (Condición 1)	0.389	±	0.009
TAISHA (Condición 2)	0.652	±	0.002
UNIPALMA (Condición 1)	0.333	±	0.008
UNIPALMA (Condición 2)	0.627	±	0.006
AMAZON	0.385	±	0.011

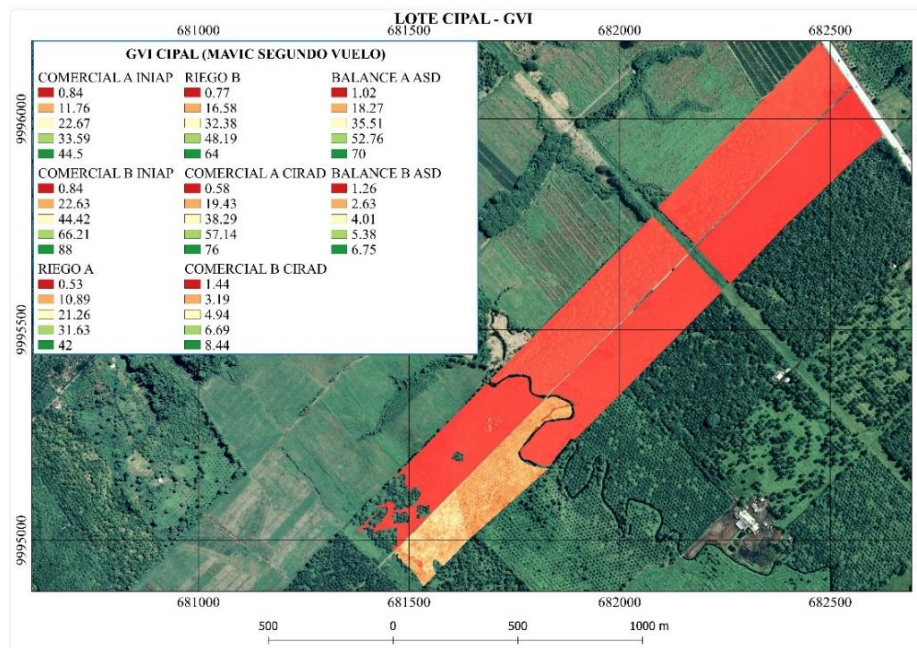


### 4.1.3.3 GVI

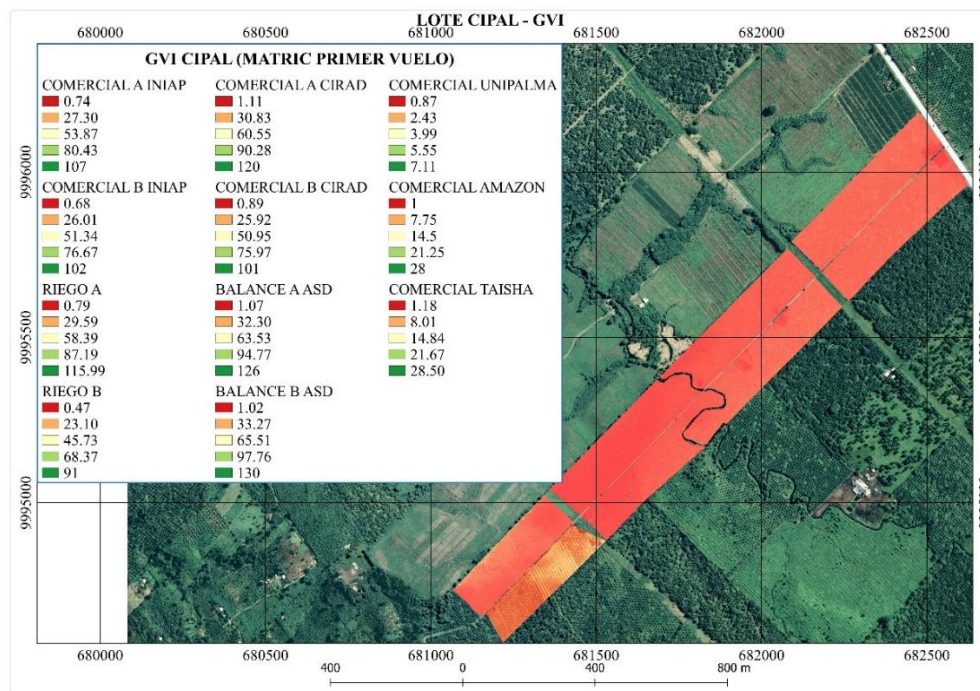
Para el cálculo del GVI se procedió a aplicar la ecuación (3) descrita en la *Tabla 2*, de manera que se obtuvo dicho índice de vegetación por cada lote y su respectivo material de palma, ver *Figura 49*, *Figura 50*, *Figura 51* y *Figura 52*.



**Figura 49.** GVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor RGNIR

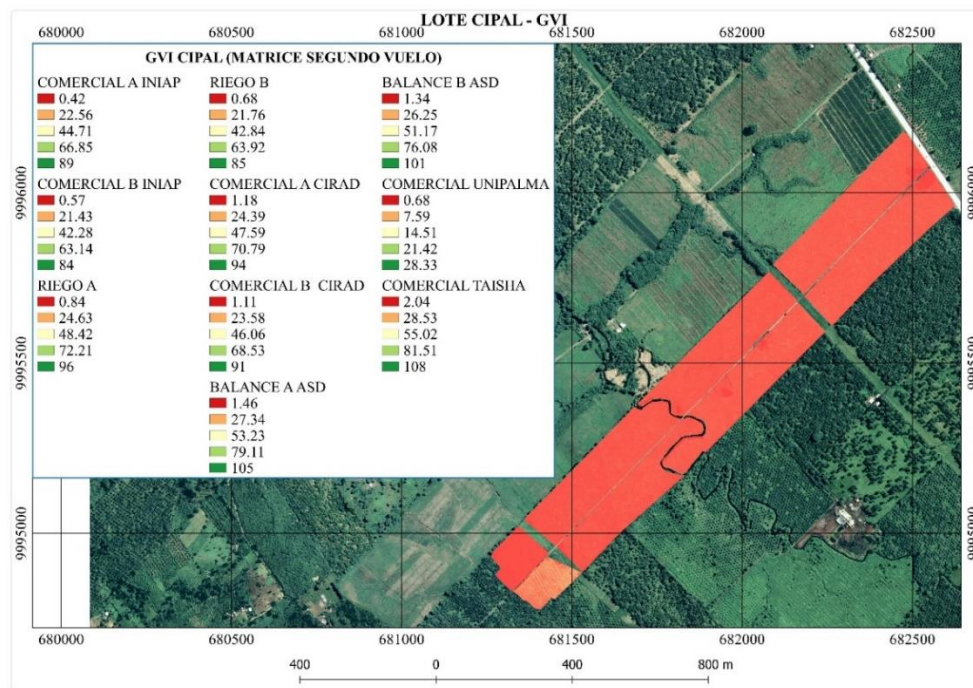


**Figura 50.** GVI monitoreo 22 de agosto del 2019 a partir del sensor RGNIR



**Figura 51.** GVI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor BGNIR





**Figura 52.** GVI monitoreo 30 de mayo del 2019 a partir del sensor BGNIR

#### 4.1.3.3.1 Estadísticas zonales a partir del GVI

Para la obtención del índice que posee cada palma de los distintos materiales presentes en los lotes del CIPAL se procedió a utilizar como insumo el conteo de palmas con la metodología descrita en la sección 3.4.5 del capítulo “Metodología” (página 61), por lo que se detalla en la **Tabla 21** y **Tabla 22** se establece un resumen de resultados estadísticos según el tipo de sensor utilizado.

**Tabla 21**

*Resumen estadístico del índice GVI calculado a partir del sensor RGNIR*

Estado fenológico	ESPECIE	LOTE	GVI (18 de abril)		GVI (22 de agosto)	
			Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
<b>Estado fenológico 305 (15 años)</b>	INIAP	A	3.262	0.316	2.831	0.376
	INIAP	B	2.861	0.335	2.652	0.293
	CIRAD	A	4.486	0.196	2.999	0.282
	CIRAD	B	4.378	0.171	3.267	0.203

CONTINÚA



	ASD	A	4.334	0.175	2.795	0.386
	ASD	B	4.229	0.160	3.355	0.287
<b>Estado fenológico</b>	UNIPALMA		3.878	0.217	–	–
<b>301 (2 años)</b>	TAISHA		4.128	0.119	–	–
	AMAZON		4.023	0.164	–	–

**Tabla 22**

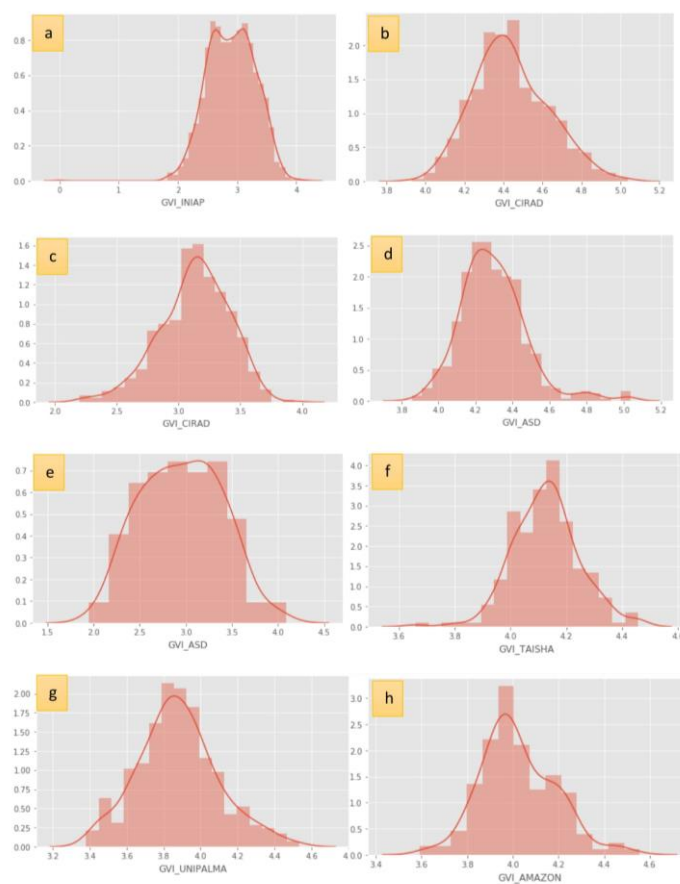
*Resumen estadístico del índice GVI calculado a partir del sensor BGNIR*

<b>Estado fenológico</b>	<b>ESPECIE</b>	<b>LOTE</b>	<b>GVI (18 de abril)</b>		<b>GVI (30 de mayo)</b>	
			Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
<b>Estado fenológico</b>	INIAP	A	5.421	0.380	5.123	0.402
<b>305 (15 años)</b>	INIAP	B	5.186	0.432	5.138	0.426
	CIRAD	A	3.179	0.649	5.404	0.370
	CIRAD	B	4.181	0.506	5.402	0.481
	ASD	A	2.577	0.354	5.545	0.425
	ASD	B	3.043	3.043	4.687	1.752
<b>Estado fenológico</b>	UNIPALMA		2.069	0.386	4.531	0.167
<b>301 (2 años)</b>	TAISHA		2.332	0.367	4.859	0.183
	AMAZON		2.350	0.515	–	–

En este caso se observa una diferencia entre los índices obtenidos en cada monitoreo de manera más notable en las especies de CIRAD y ASD, que pueden ser consecuencia de las condiciones mencionadas en los resultados del índice GNDVI, dicha situación se puede apreciar en la aplicación de ambos sensores, ver *Figura 53*, *Figura 54* y *Figura 55*. La línea base para este índice se establece en la *Tabla 23* y *Tabla 24* según cada sensor y condición.

**Tabla 23***Valores GVI para la línea base de palma de aceite sin afectación (RGNIR)*

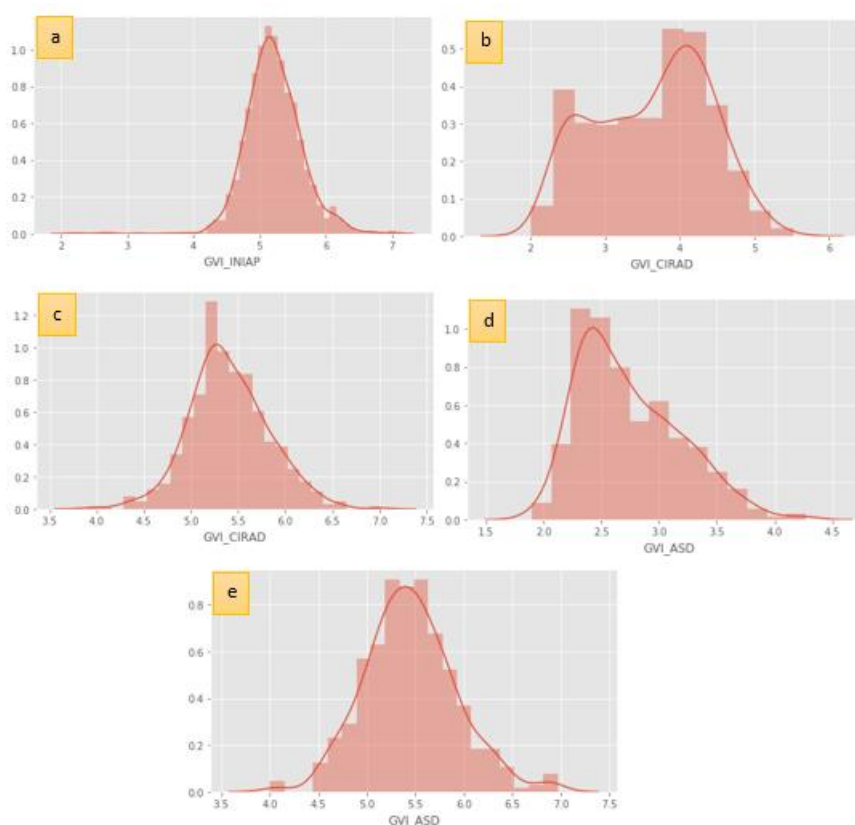
<b>GNDVI - Línea Base</b>			
<b>INIAP</b>	2.903	±	0.017
<b>CIRAD (Condición 1)</b>	4.438	±	0.016
<b>CIRAD (Condición 2)</b>	3.128	±	0.025
<b>ASD (Condición 1)</b>	4.295	±	0.016
<b>ASD (Condición 2)</b>	2.955	±	0.062
<b>TAISHA</b>	4.128	±	0.015
<b>UNIPALMA</b>	3.878	±	0.021
<b>AMAZON</b>	4.023	±	0.020



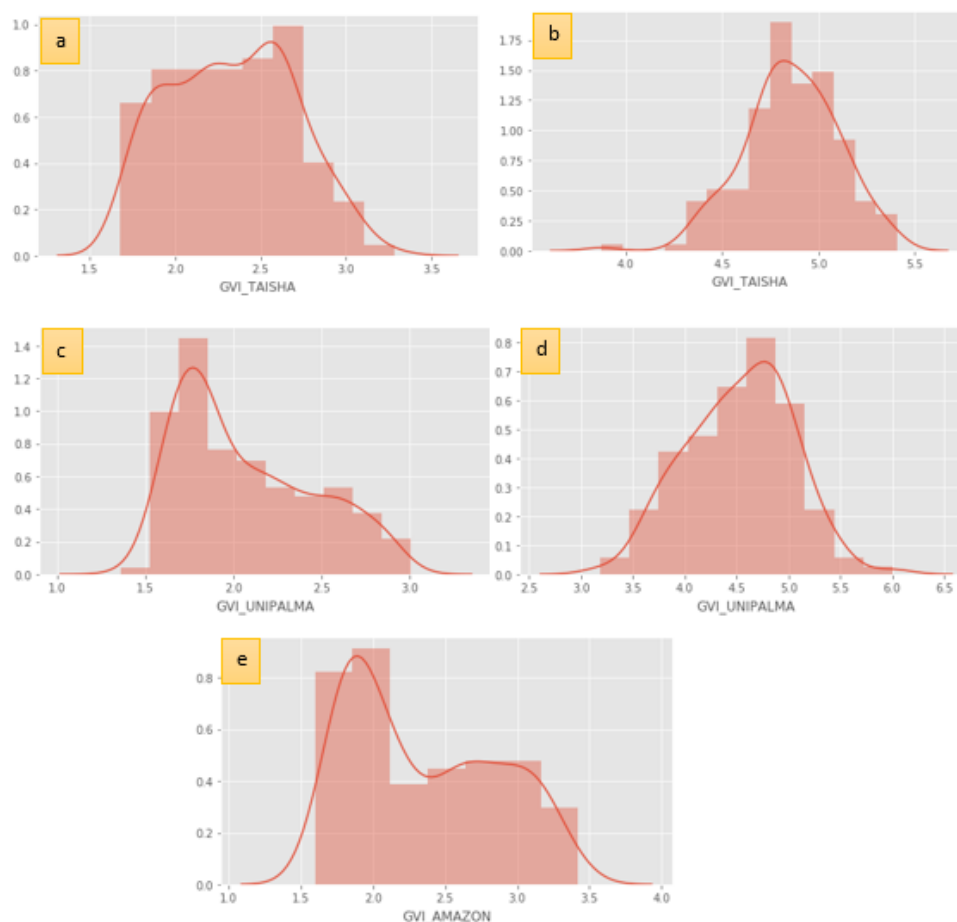
**Figura 53.** Distribución de los valores del GVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD condición 1, c) Material CIRAD condición 2, d) Material ASD condición 1, e) Material ASD condición 2, f) Material Taisha, g) Material UNIPALMA, H) Material Amazon [Sensor RGNIR]

**Tabla 24***Valores GVI para la línea base de palma de aceite sin afectación (BGNIR)*

<b>GVI - Línea Base</b>			
<b>INIAP</b>	5.214	±	0.019
<b>CIRAD (Condición 1)</b>	3.625	±	0.068
<b>CIRAD (Condición 2)</b>	5.403	±	0.036
<b>ASD (Condición 1)</b>	2.739	±	0.043
<b>ASD (Condición 2)</b>	5.453	±	0.045
<b>TAISHA (Condición 1)</b>	2.332	±	0.047
<b>TAISHA (Condición 2)</b>	4.859	±	0.037
<b>UNIPALMA (Condición 1)</b>	2.069	±	0.037
<b>UNIPALMA (Condición 2)</b>	4.531	±	0.089
<b>AMAZON</b>	2.350	±	0.063



**Figura 54.** Distribución de los valores del GVI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD condición 1, c) Material CIRAD condición 2, d) Material ASD condición 1, e) Material ASD condición 2 [Sensor RGNIR]

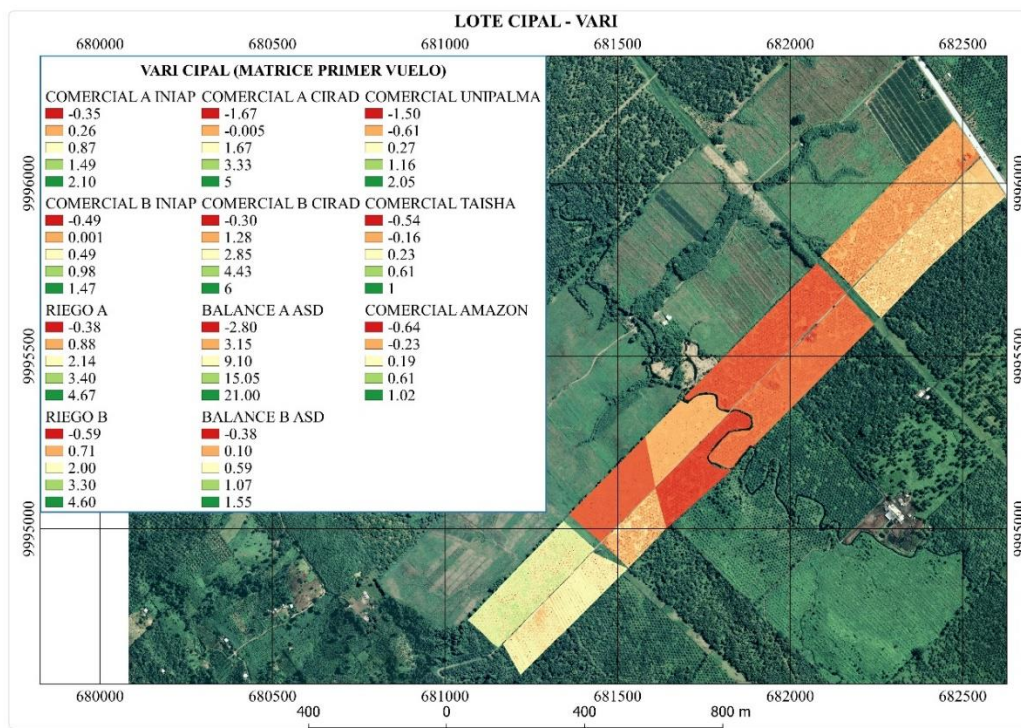


**Figura 55.** Distribución de los valores del GVI para la línea base (a) Material Taisha condición 1, b) Material Taisha condición 2, c) Material UNIPALMA condición 1, d) Material UNIPALMA condición 2, e) Material Amazon [Sensor BGNIR]

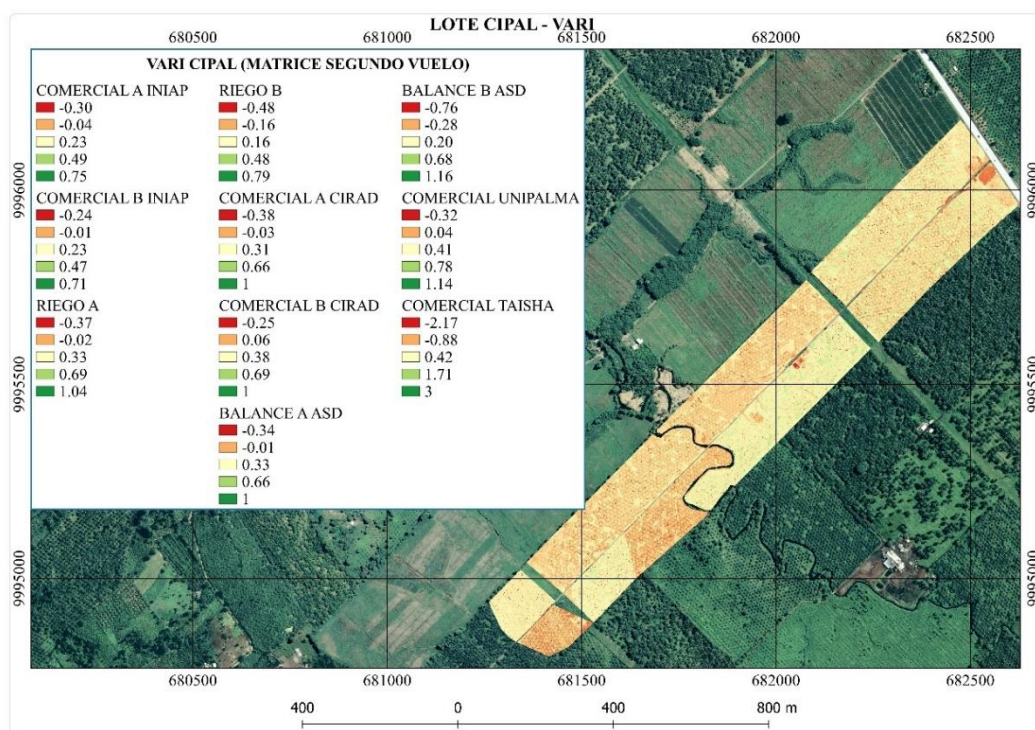
#### 4.1.3.4 VARI

Para el cálculo del VARI se procedió a aplicar la ecuación (4) descrita en la **Tabla 2**, de manera que se obtuvo dicho índice de vegetación por cada lote y su respectivo material de palma, cabe recalcar que sólo se utilizó este índice como alternativa al NDVI generado con el sensor RGNIR, por lo tanto solo se desarrolló con el sensor BGNIR, ver **Figura 56** y **Figura 57**.





**Figura 56.** VARI monitoreo 18 de abril del 2019 a partir del sensor BGNIR



**Figura 57.** VARI monitoreo 30 de mayo del 2019 a partir del sensor BGNIR

#### 4.1.3.4.1 Estadísticas zonales a partir del VARI

Para la obtención del índice que posee cada palma de los distintos materiales presentes en los lotes del CIPAL se procedió a utilizar como insumo el conteo de palmas con la metodología descrita en la sección 3.4.5 del capítulo “Metodología”, por lo que se detalla en la y se establece un resumen de resultados estadísticos según el tipo de sensor utilizado.

**Tabla 25**

*Resumen estadístico del índice VARI calculado a partir del sensor BGNIR*

ESPECIE	LOTE	VARI (18 de abril)		VARI (30 de mayo)	
		Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
INIAP	A	0.232	0.050	0.152	0.041
INIAP	B	0.205	0.056	0.147	0.043
CIRAD	A	0.212	0.045	0.155	0.047
CIRAD	B	0.185	0.047	0.136	0.048
ASD	A	0.209	0.057	0.145	0.049
ASD	B	0.197	0.051	0.131	0.044
UNIPALMA		0.184	0.118	0.167	0.060
TAISHA		0.172	0.064	0.182	0.066
AMAZON		0.161	0.075	–	–

Este índice como se puede constatar no tuvo gran variación en cuanto a la distribución de los datos si se toma en cuenta la media entre monitoreos como se puede apreciar en la **Figura 58**, de tal manera que se han establecido los valores de la línea base y sus respectivos intervalos de confianza en la **Tabla 26**.

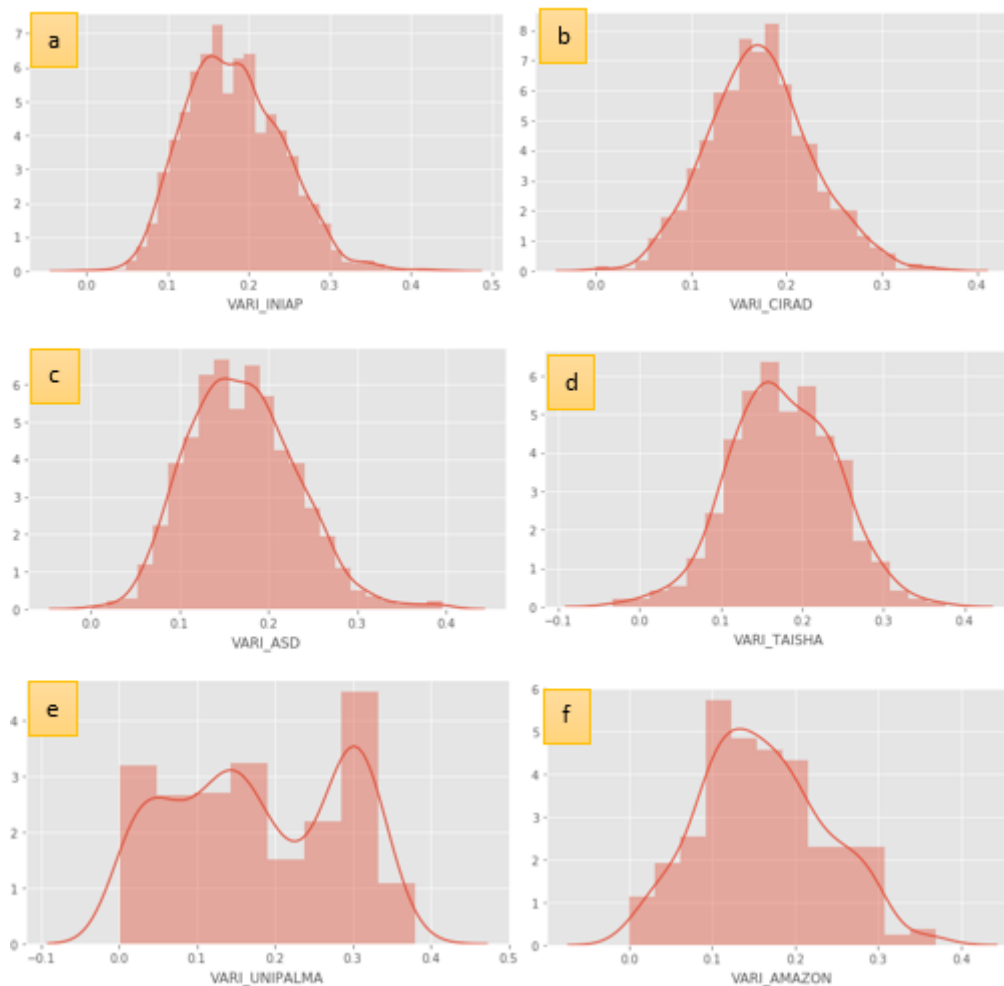
**Tabla 26**

*Valores VARI para la línea base de palma de aceite sin afectación (BGNIR)*

VARI - Línea Base			
INIAP	0.183	±	0.003
CIRAD	0.173	±	0.003
ASD	0.171	±	0.004
TAISHA	0.177	±	0.006

CONTINÚA 

<b>UNIPALMA</b>	0.180	±	0.009
<b>AMAZON</b>	0.161	±	0.009



**Figura 58.** Distribución de los valores del VARI para la línea base (a) Material INIAP, b) Material CIRAD, c) Material ASD, d) Material Taisha, e) Material UNIPALMA, f) Material Amazon.

#### 4.1.4 Análisis estadístico para diferenciar especies de palma mediante tecnologías geoespaciales

##### 4.1.4.1 Prueba ADEVA monitoreos sensor RGNIR

Se planteó el análisis de varianza correspondiente al estado fenológico de las palmas de aproximadamente 20 años, de manera que se tomaron en cuenta como *tratamiento* a cada uno de



los lotes según cada especie (INIAP, CIRAD, ASD) y *repetición* al número de lotes que se tienen por cada tipo de materiales (Ver consideraciones para la prueba estadística ADEVA, *página 38*), ver *Tabla 27*.

**Tabla 27**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – NDVI – primer monitoreo.*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R²	R² Aj	CV	
NDVI	2089	0.42	0.42	3.63	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.17	2	0.58	759.07	<0.0001
TRATAMIENTO	1.17	2	0.58	759.07	<0.0001
Error	1.6	2086	7.70E-04		
Total	2.77	2088			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00311					
Error:	0.0008	gl:	2086		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T1 (INIAP)	0.74	1081	8.40E-04	A	
T2 (CIRAD)	0.79	541	1.20E-03	B	
T3 (ASD)	0.79	467	1.30E-03		C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( p > 0.05)					

Las pruebas de hipótesis que se establecieron para el análisis ADEVA son las siguientes:

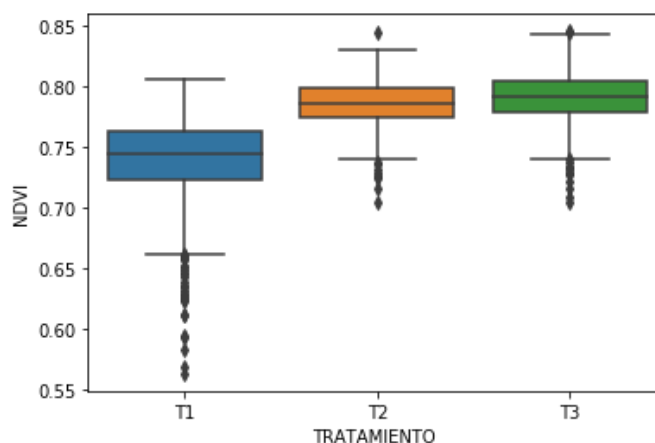
*H<sub>0</sub>: Los índices de vegetación no son eficientes para diferenciar especies de palma aceitera*

*H<sub>1</sub>: Los índices de vegetación son eficientes para diferenciar especies de palma aceitera*

Como resultado del análisis de varianza se tiene que todos los estados fenológicos a n un nivel de confianza del 95% tienen significancia estadística al utilizar el índice NDVI ( $\rho \leq 0,05$ ),

por lo tanto, se acepta la prueba de hipótesis alternativa. Luego se tiene el análisis de diferencias significativas mediante las medias de los lotes presentes en el área de estudio, por lo tanto, como resultado se obtuvo que las especies INIAP, CIRAD y ASD presentan diferencias al momento de ser empleado el índice de vegetación propuesto.

El análisis de medias se puede contrastar a partir del diagrama de cajas (**Figura 59**), en el caso del índice NDVI, se tiene que para el tratamiento uno (T1) perteneciente a la especie INIAP tiene el 50% de los datos distribuidos entre 0.73 y 0.76 aproximadamente, con varios valores atípicos que se deben tomar en cuenta para analizar posibles afectaciones en las palmas con valores bajo la media; de igual manera los tratamiento (T2) y (T3) correspondientes a los materiales CIRAD Y ASD respectivamente, poseen el 50% de sus datos entre 0.78 y 0.80, pero cabe destacar que a partir del análisis realizado, son significativamente diferentes, en este caso los valores atípicos se encuentran dentro de un rango aceptable de índices que relacionan vigorosidad en una planta (ver **Tabla II**).



**Figura 59.** Diagrama de cajas del índice NDVI - Estado fenológico 1

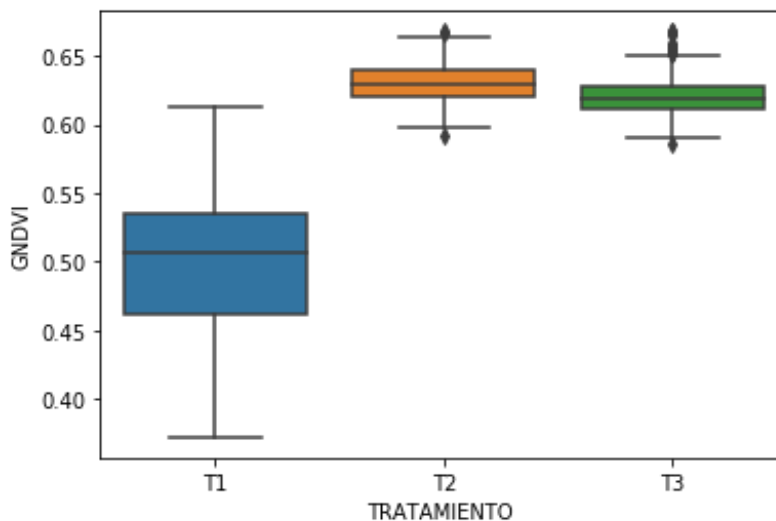
Se procedió a realizar el mismo proceso a partir de la aplicación de los datos generados mediante los índices GNDVI y GVI con la finalidad de obtener una validación de la aceptación de la prueba de hipótesis planteada, ver **Tabla 28**.

**Tabla 28**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – GNDVI – primer monitoreo.*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R²	R² Aj	CV	
GNDVI	2089	0.77	0.77	6.28	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8.46	2	4.23	3430.39	<0.0001
TRATAMIENTO	8.46	2	4.23	3430.39	<0.0001
Error	2.57	2086	1.20E-03		
Total	11.04	2088			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00394					
Error:	0.0012	gl:	2086		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T1 (INIAP)	0.5	1081	1.10E-03	A	
T3 (ASD)	0.62	467	1.60E-03	B	
T2 (CIRAD)	0.63	541	1.50E-03	C	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

A partir del índice GNDVI se llega a la misma conclusión, se acepta la hipótesis alternativa al tener significancia estadística ( $p \leq 0,05$ ) y se corrobora que la diferencia entre especies en el estado fenológico 1. Mediante el diagrama de cajas tras aplicar este índice se puede constatar una marcada diferencia entre índices (**Figura 60**), para el T1 la media se encuentra en 0.5, T2 en 0.62 y T3 en 0.63, en este caso no hay valores atípicos que se encuentren en valores bajos del índice por cada especie.



**Figura 60.** Diagrama de cajas del índice GNDVI - Estado fenológico 1

**Tabla 29**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – GVI – primer monitoreo.*

**Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
GVI	2089	0.82	0.82	8.23

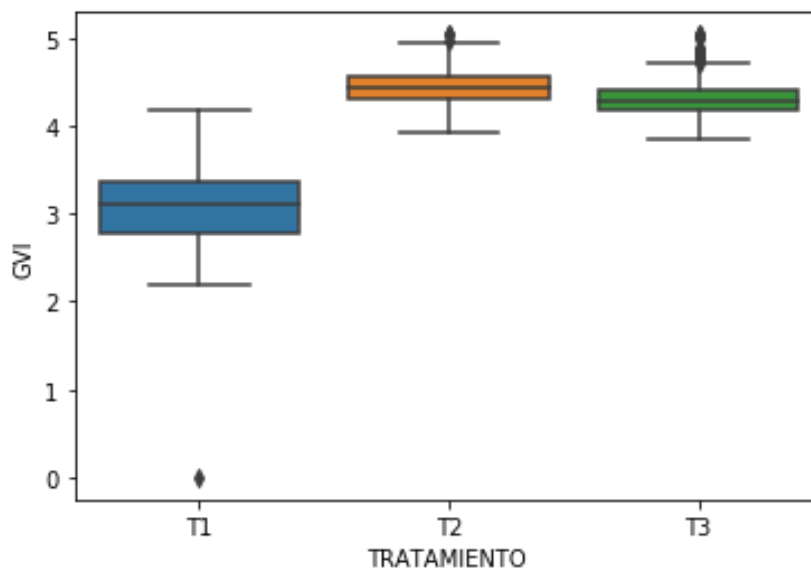
**Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	900.56	2	450.28	4877.41	<0.0001
TRATAMIENTO	900.56	2	450.28	4877.41	<0.0001
Error	192.58	2086	0.09		
Total	1093.14	2088			

**Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.03411**

Error:	0.0923	gl:	2086	
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T1 (INIAP)	3.06	1081	0.01	A
T3 (ASD)	4.29	467	0.01	B
T2 (CIRAD)	4.44	541	0.01	C

**Medias con una letra común no son significativamente diferentes (  $p > 0.05$  )**



**Figura 61.** Diagrama de cajas del índice GVI - Estado fenológico 1

Con el índice GVI de igual manera se aprecia el mismo resultado (*Tabla 29* y *Figura 61*), para el T1 se tiene un índice medio de 3 aproximadamente, para el T2 y T3 medias de 4.3 y 4.4 respectivamente. Se puede comparar los resultados entre los dos últimos índices aplicados, pues se mantiene la misma tendencia. Con la misma intención se utilizaron los datos generados en el segundo monitoreo con el mismo sensor con la finalidad de afirmar los resultados del primer monitoreo, ver *Tabla 30*, *Tabla 31* y *Tabla 32*.

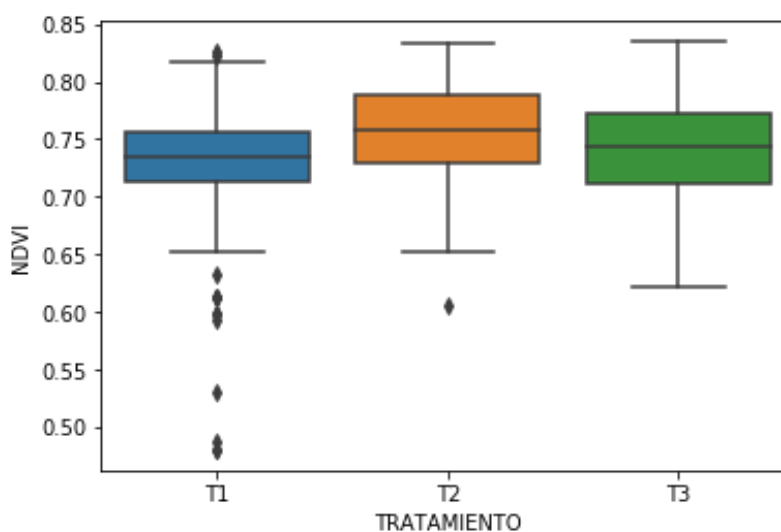
**Tabla 30**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – NDVI – segundo monitoreo.*

**Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
NDVI	1749	0.07	0.07	5.02	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.18	2	0.09	63.45	<0.0001
TRATAMIENTO	0.18	2	0.09	63.45	<0.0001
Error	2.42	1746	1.40E-03		
Total	2.59	1748			

<b>Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00535</b>				
<b>Error:</b>	0.0014	gl:	1746	
<b>TRATAMIENTO</b>	Medias	n	E.E.	
<b>T1 (INIAP)</b>	0.73	1057	1.10E-03	A
<b>T3 (ASD)</b>	0.74	196	2.70E-03	B
<b>T2 (CIRAD)</b>	0.76	496	1.70E-03	C
<b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0.05</math>)</b>				




**Figura 62.** Diagrama de cajas del índice NDVI - Estado fenológico 1

En el segundo monitoreo se tiene como resultado que las medias del T1 entre ambos monitoreos son similares (aproximadamente 0.74) y mantienen la misma tendencia (**Figura 62**). En el caso del T2 y T3 cambia la tendencia de los índices obtenidos y difieren las medias en comparación al primer monitoreo (NDVI de 0.76 a 0.79 y de 0.74 a 0.79 respectivamente).

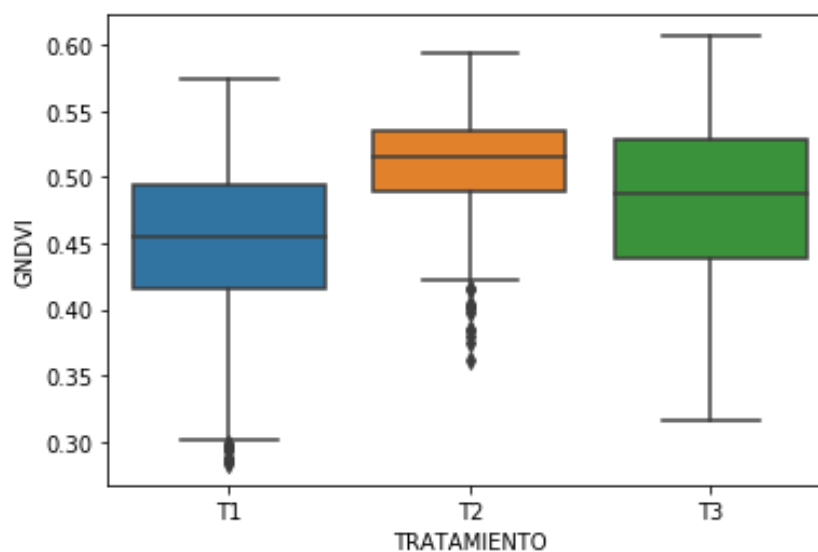
**Tabla 31**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – GNDVI – segundo monitoreo.*

<b>Análisis de la varianza</b>					
<b>Variable</b>	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
<b>GNDVI</b>	1749	0.2	0.2	10.82	
<b>Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)</b>					
<b>F.V.</b>	SC	gl	CM	F	p-valor

CONTINÚA 

<b>Modelo</b>	1.16	2	0.58	222.91	<0.0001
<b>TRATAMIENTO</b>	1.16	2	0.58	222.91	<0.0001
<b>Error</b>	4.54	1746	2.60E-03		
<b>Total</b>	5.69	1748			
<b>Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00733</b>					
<b>Error:</b>	0.0026	gl:	1746		
<b>TRATAMIENTO</b>	Medias	n	E.E.		
<b>T1 (INIAP)</b>	0.45	1057	1.60E-03	A	
<b>T3 (ASD)</b>	0.48	196	3.60E-03	B	
<b>T2 (CIRAD)</b>	0.51	496	2.30E-03	C	
<b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( <math>p &gt; 0.05</math> )</b>					



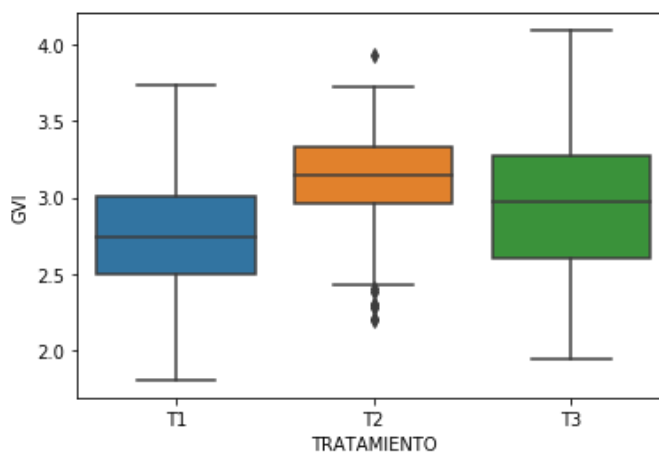
**Figura 63.** Diagrama de cajas del índice GNDVI - Estado fenológico 1

Al igual que el anterior análisis de resultados, con el índice GNDVI también se constata el cambio de tendencia en los tratamientos T2 y T3 (**Figura 63**) (de 0.62 a 0.51 y de 0.63 a 0.48 en la media de los índices calculados), para el T1 se mantiene dentro del rango de 0.45 a 0.5.

**Tabla 32**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor RGNIR – GVI – segundo monitoreo.*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R²	R² Aj	CV	
GVI	1749	0.2	0.2	11.93	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	51.89	2	25.94	220.33	<0.0001
TRATAMIENTO	51.89	2	25.94	220.33	<0.0001
Error	205.59	1746	0.12		
Total	257.47	1748			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.04935					
Error:	0.1177	gl:	1746		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T1 (INIAP)	2.74	1057	0.01	A	
T3 (ASD)	2.95	196	0.02	B	
T2 (CIRAD)	3.13	496	0.02		C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					



**Figura 64.** Diagrama de cajas del índice GVI - Estado fenológico 1

Se mantiene la tendencia en todos los resultados obtenidos en el segundo monitoreo se tiene que el T1, T2 y T3 tienen valores medios de 2.74, 3.12 y 2.95 respectivamente (**Figura 64**). Efectivamente en el análisis de varianza se posee significancia estadística, por lo que se



corroboró la factibilidad del uso de los índices de vegetación planteados para diferenciar especies de palma en el primer estado fenológico a partir del sensor RGNIR. Acto seguido se realizó el análisis de varianza para el estado fenológico correspondiente a la edad de aproximadamente cuatro años de las especies (Taisha, UNIPALMA y Amazon), (ver **Tabla 33**, **Tabla 34** y **Tabla 35**). Se obtuvo como resultado que al aplicar los índices de vegetación para diferenciar especies de híbridos es viable el uso de la tecnología geoespacial, pues se aprecia significancia estadística. En cuanto a la diferencia de especies a partir de la comparación de medias, se puede verificar que los tres índices empleados indican diferencia entre los tres tipos de materiales híbridos.

**Tabla 33**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor RGNIR – NDVI – primer monitoreo.*

**Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
NDVI	915	0.24	0.24	3.4

**Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.16	2	0.08	142.68	<0.0001
TRATAMIENTO	0.16	2	0.08	142.68	<0.0001
Error	0.51	912	5.60E-04		
Total	0.67	914			

**Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS= 0.00389**

Error:	0.0006	gl:	912	
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T3 (Amazon)	0.68	256	1.50E-03	A
T2 (UNIPALMA)	0.69	421	1.20E-03	B
T1 (Taisha)	0.72	238	1.50E-03	C

**Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)**

**Tabla 34**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor RGNIR – GNDVI – primer monitoreo.*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R²	R² Aj	CV	
GNDVI	915	0.26	0.26	2.54	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.07	2	0.04	158.61	<0.0001
TRATAMIENTO	0.07	2	0.04	158.61	<0.0001
Error	0.21	912	2.30E-04		
Total	0.28	914			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS= 0.00249					
Error:	0.0002	gl:	912		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T2 (UNIPALMA)	0.59	421	7.40E-04	A	
T3 (Amazon)	0.6	256	9.50E-04		B
T1 (Taisha)	0.61	238	9.80E-04		C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

**Tabla 35**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor RGNIR – GVI – primer monitoreo.*

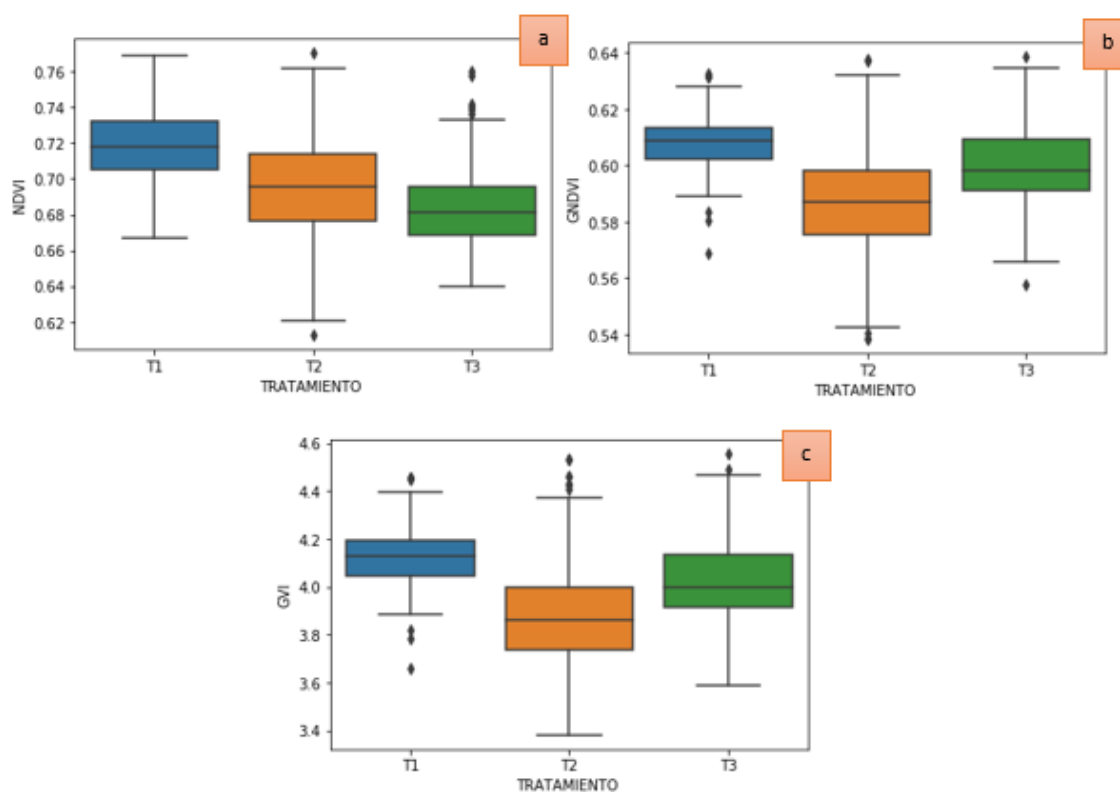
Análisis de la varianza					
Variable	N	R²	R² Aj	CV	
GVI	915	0.25	0.25	4.55	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10.08	2	5.04	153.64	<0.0001
TRATAMIENTO	10.08	2	5.04	153.64	<0.0001
Error	29.92	912	0.03		
Total	40.01	914			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS= 0.02972					
Error:	0.0328	gl:	912		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T2 (UNIPALMA)	3.88	421	0.01	A	
T3 (Amazon)	4.02	256	0.01		B

CONTINÚA



<b>T1 (Taisha)</b>	4.13	238	0.01	C
<b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0.05</math>)</b>				

En la **Figura 65** se comprueba la diferencia significativa entre especies según cada índice utilizado, para el índice NDVI (T1- 0.72, T2-0.69 y T3-0.68), los índices GNDVI (T1-0.61, T2 0.59 y T3-0.6) y GVI (T1-4.13, T2-3.88 y T3-4.02) tienen la misma propensión de distribución de los datos, pues se debe a que poseen un fuerte correlación al ser generados con la banda verde e infrarroja.



**Figura 65.** Diagrama de cajas de los índices a) NDVI, b) GNDVI y c) GVI - Estado fenológico 2 – Primer monitoreo

#### 4.1.4.2 Prueba ADEVA monitoreos sensor BGNIR

Al igual que el procedimiento detallado en el anterior apartado, se realizaron las pruebas estadísticas para determinar diferencias entre las especies según su estado fenológico con la finalidad de dar mayor robustez a los resultados obtenidos con el sensor RGNIR, cabe recalcar que con el sensor BGNIR se efectuó el cálculo de un índice NDVI falso (VARI). A continuación se detalla el análisis obtenido para el primer estado fenológico a partir del primer monitoreo realizado (**Tabla 36**, **Tabla 37** y **Tabla 38**).

**Tabla 36**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – GNDVI – primer monitoreo.*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
GNDVI	1860	0.76	0.76	9.11	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16.5	2	8.25	2897.88	<0.0001
TRATAMIENTO	16.5	2	8.25	2897.88	<0.0001
Error	5.29	1857	2.80E-03		
Total	21.78	1859			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00635					
Error:	0.0028	gl:	1857		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T1 (INIAP)	0.44	401	2.70E-03	A	
T2 (CIRAD)	0.54	503	2.40E-03	B	
T3 (ASD)	0.67	956	1.70E-03	C	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

**Tabla 37***Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – GVI – primer monitoreo.*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
GVI	1860	8.00E-01	0.8	12.63	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2163.93	2	1081.96	3667.36	<0.0001
TRATAMIENTO	2163.93	2	1081.96	3667.36	<0.0001
Error	547.86	1857	0.3		
Total	2711.79	1859			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.06467					
Error:	0.295	gl:	1857		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T1 (INIAP)	2.74	401	0.03	A	
T3 (ASD)	3.63	503	0.02	B	
T2 (CIRAD)	5.3	956	0.02		C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

**Tabla 38***Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – VARI – primer monitoreo.*

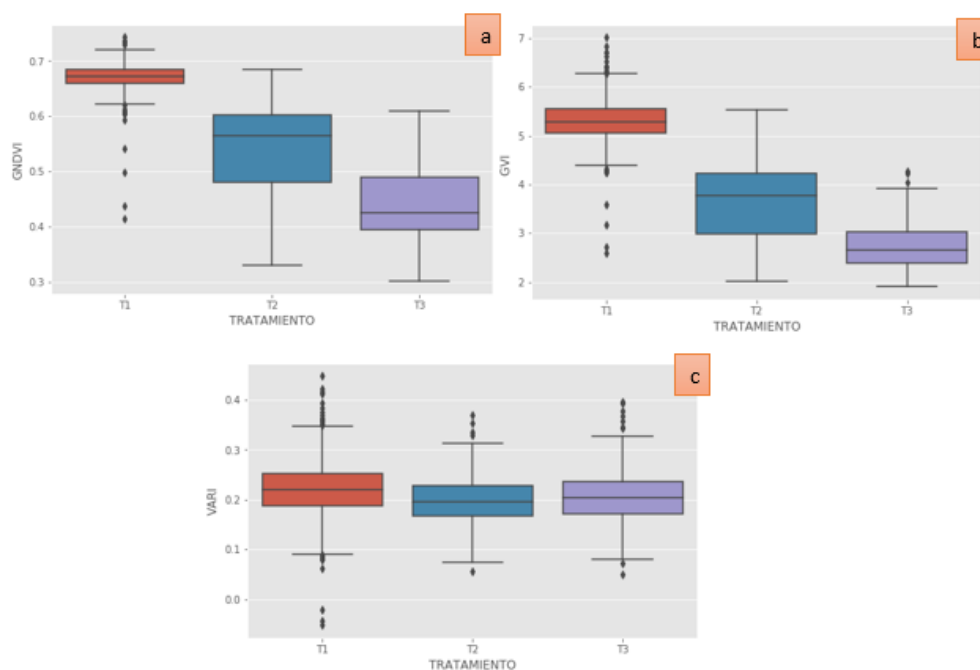
Análisis de la varianza					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
VARI	1860	0.03	0.02	25.2	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.14	2	0.07	24.47	<0.0001
TRATAMIENTO	0.14	2	0.07	24.47	<0.0001
Error	5.23	1857	2.80E-03		
Total	5.36	1859			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00632					
Error:	5.23	1857	2.80E-03		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T2 (CIRAD)	0.2	503	2.40E-03	A	
T3 (ASD)	0.2	401	2.60E-03	A	

CONTINÚA



<b>T1 (INIAP)</b>	0.22	956	1.70E-03	B
<b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (<math>p &gt; 0.05</math>)</b>				

La prueba ADEVA da como resultado significancia estadística al aplicar todos los índices considerados, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa, de manera que se corrobora la posibilidad de emplear la tecnología geoespacial para diferenciar especies, resultado que se obtuvo también con el sensor RGNIR. En la **Tabla 38** se tiene como resultado la diferenciación únicamente entre la especie INIAP de las demás, ya que estas entre sí, no mantienen diferencias al utilizar el índice VARI, dicha consecuencia se puede asociar a la generación de un falso NDVI a partir de un sensor de tipo RGB que posee el dron MATRICE (**Figura 66**), se tiene que el GNDVI que tiene los valores para T1- 0.44, T2-0.54 y T3-0.67; en GVI se tiene T1-2.74, T2-5.3, T3-2.74; en VARI T1-0.22, T2-0.2 y T3-0.2 .



**Figura 66.** Diagrama de cajas de los índices a) GNDVI, b) GVI y c) VARI - Estado fenológico 1 – Primer monitoreo – MATRICE

A continuación, se detalla el análisis realizado a partir del segundo vuelo ( **Tabla 39**, **Tabla 40** y **Tabla 41**).

**Tabla 39**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – GNDVI – segundo monitoreo.*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
GNDVI	2001	0.07	0.07	3.58	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.09	2	0.05	80.2	<0.0001
TRATAMIENTO	0.09	2	0.05	80.2	<0.0001
Error	1.15	1998	5.70E-04		
Total	1.24	2000			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00276					
Error:	0.0006	gl:	1998		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T1 (INIAP)	0.66	1043	7.40E-04	A	
T3 (ASD)	0.68	519	1.10E-03	B	
T2 (CIRAD)	0.68	439	1.10E-03	B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

En este caso se posee significancia estadística, pero en la comparación de medias se tiene que únicamente la especie INIAP difiere de las demás, ya que estas son prácticamente iguales al aplicar el índice GNDVI.

**Tabla 40**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – GVI – segundo monitoreo*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
GVI	2001	0.11	0.11	8.15	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	44.17	2	22.09	119.61	<0.0001
TRATAMIENTO	44.17	2	22.09	119.61	<0.0001

<b>Error</b>	368.94	1998	0.18	
<b>Total</b>	413.11	2000		
<b>Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.04944</b>				
<b>Error:</b>	0.1847	gl:	1998	
<b>TRATAMIENTO</b>	Medias	n	E.E.	
<b>T1 (INIAP)</b>	5.13	1043	0.01	A
<b>T3 (ASD)</b>	5.4	519	0.02	B
<b>T2 (CIRAD)</b>	5.45	439	0.02	B
<b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p &gt; 0.05)</b>				

En este caso también se corrobora el resultado anterior, la especie INIAP se diferencia de las demás. La **Tabla 41** da a conocer la prueba estadística ADEVA para los datos obtenidos mediante el índice VARI, se constata significancia estadística y se diferencian especies.

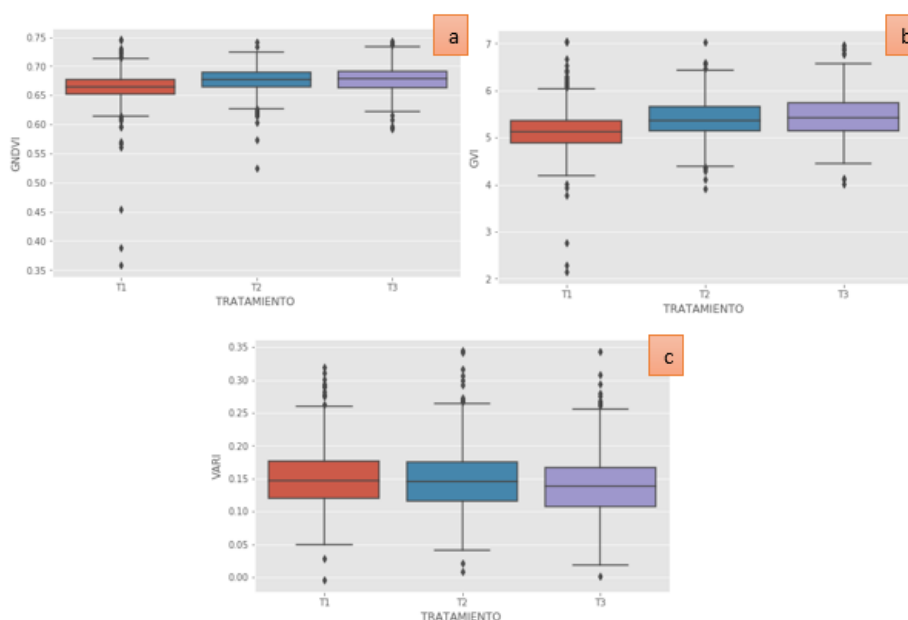
**Tabla 41**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 1 sensor BGNIR – VARI – segundo monitoreo*

<b>Análisis de la varianza</b>					
<b>Variable</b>	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
<b>VARI</b>	2001	0.01	0.01	30.8	
<b>Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)</b>					
<b>F.V.</b>	SC	gl	CM	F	p-valor
<b>--Modelo</b>	0.03	2	0.01	6.19	0.0021
<b>TRATAMIENTO</b>	0.03	2	0.01	6.19	0.0021
<b>Error</b>	4.08	1998	2.00E-03		
<b>Total</b>	4.1	2000			
<b>Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00520</b>					
<b>Error:</b>	0.002	gl:	1998		
<b>TRATAMIENTO</b>	Medias	n	E.E.		
<b>T3 (ASD)</b>	0.14	439	2.20E-03	A	
<b>T2 (CIRAD)</b>	0.15	519	2.00E-03		B
<b>T1 (INIAP)</b>	0.15	1043	1.40E-03		B
<b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p &gt; 0.05)</b>					



El resultado que se da a conocer es la diferenciación de la especie ASD frente a las demás especies. La **Figura 67** se puede estimar que en el índice GNDVI tiene diferencias significativas entre la especie INIAP y las demás, efecto que también se puede distinguir en el análisis mencionado anteriormente mediante la prueba *LSD de Fisher* según el análisis de varianza (T1-0.66, T2-0.68, T3-0.68). A través del índice GVI, se tiene el mismo producto, solo se diferencia la especie INIAP (T1-5.13, T2-5.45, T3-5.4). por último, mediante el índice VARI, se tiene una respuesta diferente a lo obtenido anteriormente, pues la especie que se diferencia de las demás es la ASD, estas condiciones deben ser asociadas a la condición climática y bruma presente en el monitoreo.



**Figura 67.** Diagrama de cajas de los índices a) GNDVI, b) GVI y c) VARI - Estado fenológico 1 – Primer monitoreo – MATRICE

Acto seguido se realizó el mismo análisis para el estado fenológico correspondiente al estado fenológico 301 de 2 años aproximadamente (**Tabla 42**, **Tabla 43** y **Tabla 44**) para el

primer monitoreo y (Tabla 45, Tabla 46 y Tabla 47) para el último. Para este análisis se denomina T1 a la especie Taisha, T2 a la especie UNIPALMA y T3 a la Amazon.

**Tabla 42**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – GNDVI – primer monitoreo*

<b>Análisis de la varianza</b>					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
<b>GNDVI</b>	914	0.1	0.1	22.1	
<b>Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)</b>					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
<b>Modelo</b>	0.66	2	0.33	51.14	<0.0001
<b>TRATAMIENTO</b>	0.66	2	0.33	51.14	<0.0001
<b>Error</b>	5.84	911	0.01		
<b>Total</b>	6.5	913			
<b>Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.01315</b>					
<b>Error:</b>	0.0064	gl:	911		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
<b>T2 (UNIPALMA)</b>	0.33	421	3.90E-03	A	
<b>T3 (Amazon)</b>	0.39	256	0.01	B	
<b>T1 (Taisha)</b>	0.39	237	0.01	B	
<b>Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p &gt; 0.05)</b>					

**Tabla 43**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – GVI – primer monitoreo*

<b>Análisis de la varianza</b>					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
<b>GVI</b>	914	0.09	0.09	19.04	
<b>Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)</b>					
F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
<b>Modelo</b>	16.89	2	8.44	47.43	<0.0001
<b>TRATAMIENTO</b>	16.89	2	8.44	47.43	<0.0001
<b>Error</b>	162.19	911	0.18		
<b>Total</b>	179.08	913			
<b>Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.06929</b>					
<b>Error:</b>	0.178	gl:	911		

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T2 (UNIPALMA)	2.07	421	0.02	A
T1 (Taisha)	2.33	237	0.03	B
T3 (Amazon)	2.35	256	0.03	B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )				

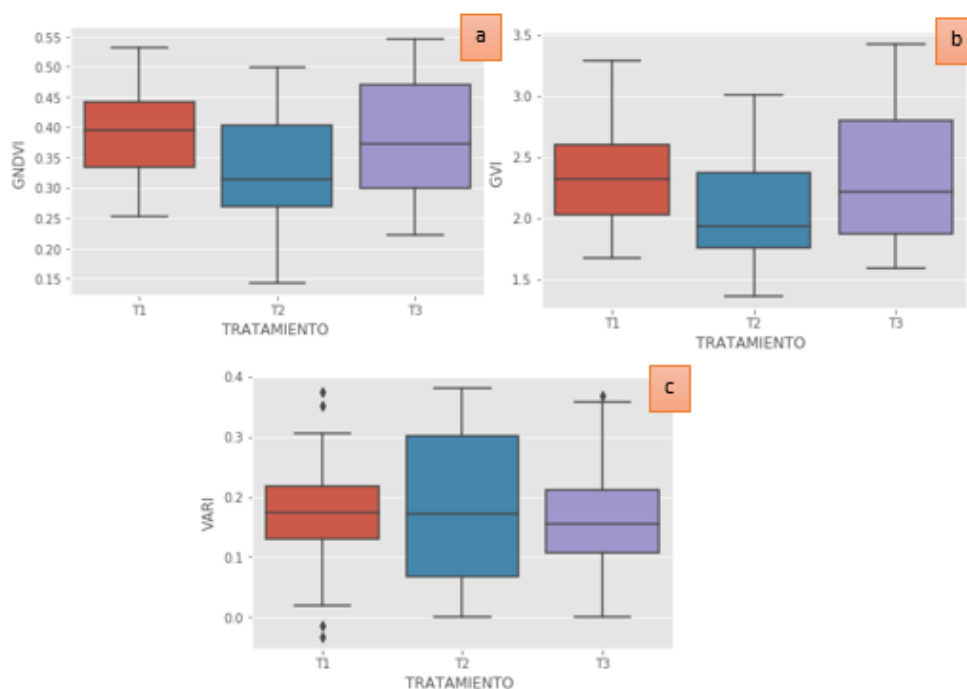
**Tabla 44**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – VARI – primer monitoreo*  
**Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
VARI	914	0.01	0.01	54.61	
<b>Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)</b>					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.08	2	0.04	4.53	0.0111
TRATAMIENTO	0.08	2	0.04	4.53	0.0111
Error	8.26	911	0.01		
Total	8.34	913			
<b>Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.01564</b>					
Error:	0.0091	gl:	911		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T3 (Amazon)	0.16	256	0.01	A	
T1 (Taisha)	0.17	237	0.01	A	B
T2 (UNIPALMA)	0.18	421	4.60E-03		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )					

En el primer monitoreo se tiene una vez más significancia estadística. Cabe resaltar que al aplicar el índice GNDVI, se diferencia UNIPALMA de las demás; mediante el índice GVI se llega al mismo efecto, por último, con el índice VARI, se puede apreciar una diferencia marcada entre la especie UNIPALMA y Amazon. En el diagrama de cajas se observa que para el índice GNDVI, el 50% de los valores para el T1 se encuentren aproximadamente en 0.4, para el T2, 0.33 y para T3 0.33; para GVI el T1 tiene un valor de 2.33, T2 de 2.07, T3 de 2.35; para VARI el

T1 de 0.17, T2 de 0.18 y T3 de 0.16 (**Figura 68**). En el segundo monitoreo, únicamente se pudo abarcar el área de estudio correspondiente a los híbridos Taisha y UNIPALMA, se tiene que evidentemente existe significancia estadística, y se diferencian sin problema alguno dichas especies a partir de todos los índices puestos a disposición. En la **Figura 69** se puede conocer que el valor del T1 y T2 es de 0.63 y 0.65 respectivamente al aplicar el índice GNDVI, al utilizar el índice GDVI para T1 se tiene 4.86 y T2 4.53, por ultimo al utilizar el índice VARI se tiene para T1 0.18 y T2 0.17.



**Figura 68.** Diagrama de cajas de los índices a) GNDVI, b) GVI y c) VARI - Estado fenológico 2 – Primer monitoreo – MATRICE

**Tabla 45***Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – GNDVI – segundo monitoreo*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R²	R² Aj	CV	
GNDVI	305	0.2	0.19	3.89	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.05	1	0.05	73.75	<0.0001
TRATAMIENTO	0.05	1	0.05	73.75	<0.0001
Error	0.19	303	6.20E-04		
Total	0.23	304			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.00571					
Error:	0.0006	gl:	303		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T2 (UNIPALMA)	0.63	126	2.20E-03	A	
T1 (Taisha)	0.65	179	1.90E-03	B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

**Tabla 46***Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – GVI – segundo monitoreo*

Análisis de la varianza					
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
GVI	305	0.16	0.15	7.97	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	7.96	1	7.96	56.18	<0.0001
TRATAMIENTO	7.96	1	7.96	56.18	<0.0001
Error	42.93	303	0.14		
Total	50.89	304			
Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.08613					
Error:	0.1417	gl:	303		
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T2 (UNIPALMA)	4.53	126	0.03	A	
T1 (Taisha)	4.86	179	0.03	B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

**Tabla 47**

*Prueba ADEVA para el estado fenológico 2 sensor BGNIR – VARI – segundo monitoreo.*

**Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
VARI	305	0.01	0.01	36.06

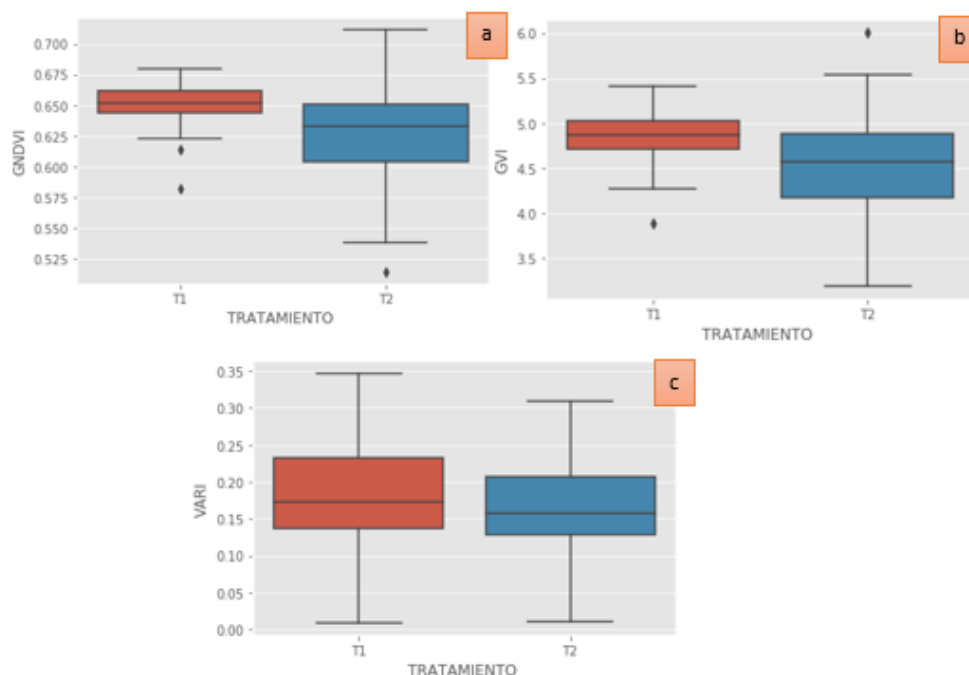
**Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.02	1	0.02	4.25	0.0402
TRATAMIENTO	0.02	1	0.02	4.25	0.0402
Error	1.22	303	4.00E-03		
Total	1.24	304			

**Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.01452**

Error:	0.004	gl:	303
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T2 (UNIPALMA)	0.17	126	0.01
T1 (Taisha)	0.18	179	4.70E-03

**Medias con una letra común no son significativamente diferentes (  $p > 0.05$  )**



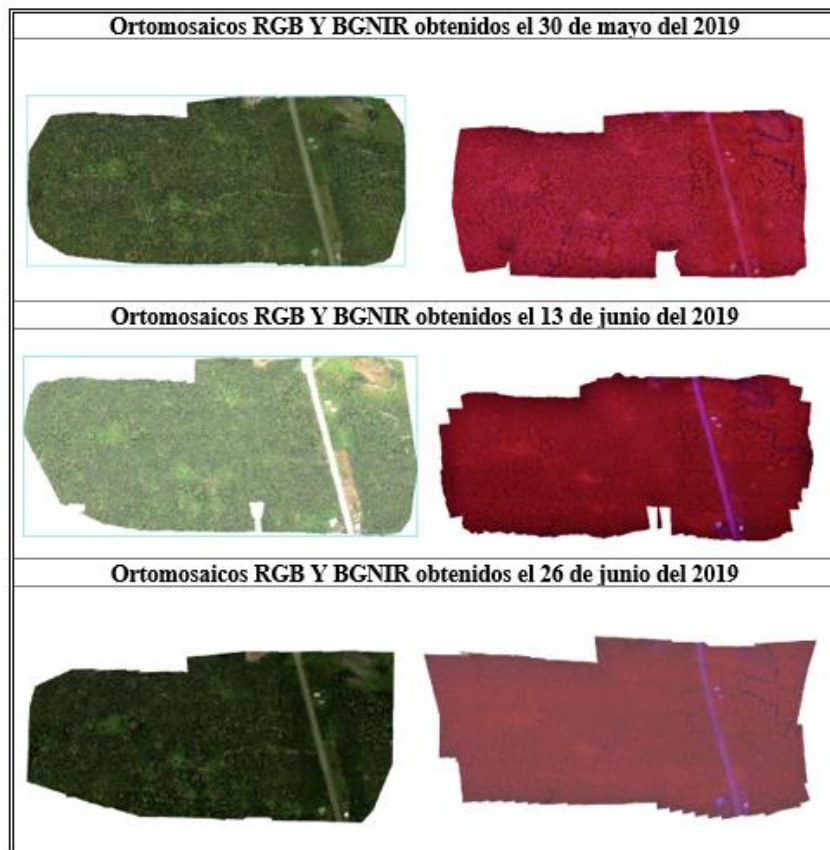
**Figura 69.** Diagrama de cajas de los índices a) GNDVI, b) GVI y c) VARI - Estado fenológico 2 – Segundo monitoreo – MATRICE

La finalidad de identificar diferencias entre especies de palma aceitera viene dada por la problemática de estafas en la venta de semillas de ciertos materiales de dicha planta. El INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias) realiza estudios de adaptabilidad de híbridos interespecíficos *OxG*, además del material INIAP (Carrillo et al., 2015), Dicho material es ligeramente más tolerante a la problemática de la PC que las especies ASD y CIRAD, pues posee una ventaja por su adaptabilidad, ya que ha sido desarrollado en los últimos años en la zona de estudio y por ello posee mayor resistencia. Es así como se expende materiales más baratos que no son del material mencionado, de manera que al momento de una infección no poseen la resistencia que presenta normalmente el material ecuatoriano, lo que acarrea difamación sobre la calidad del estudio desarrollado y compromete futuras ventas y confianza por parte del sector palmicultor del Ecuador.

## **4.2 Fase B**

### **4.2.1 Generación de orto mosaicos**

Para la segunda fase se realizaron tres monitoreos en el lote afectado, lo que dio como resultado dos ortomosaicos (RGB y BGNIR) por fecha, que sirvieron como insumo para el análisis de las afectaciones de PC y AR en los lotes, ver *Figura 70*.



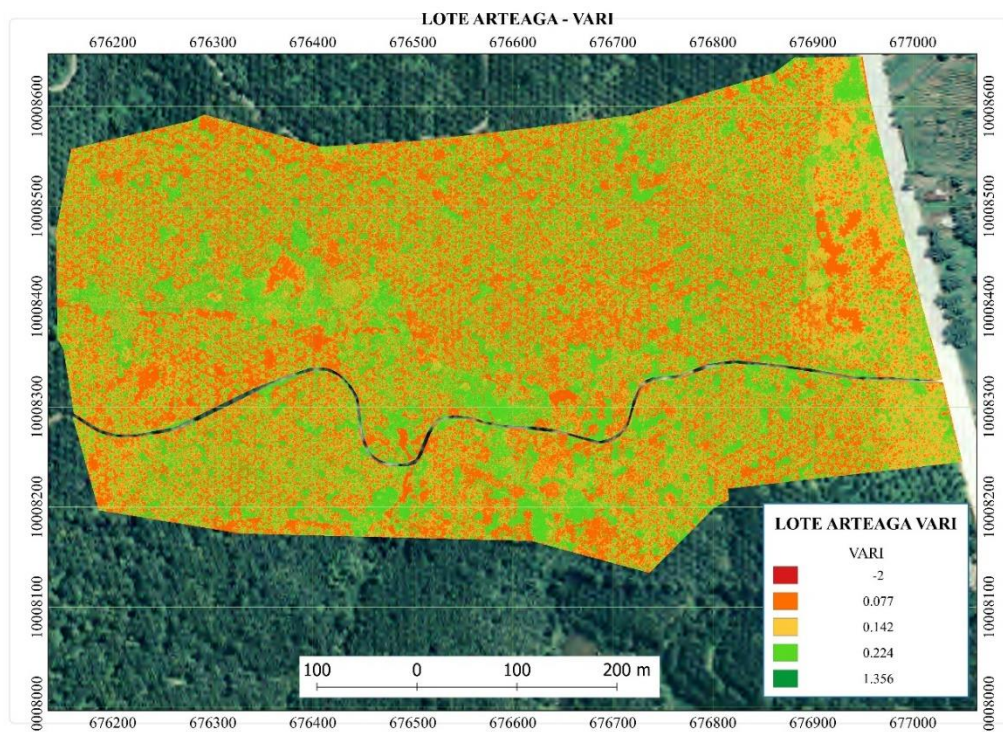
**Figura 70.** Ortomosaicos obtenidos en el Lote Arteaga

## 4.2.2 Generación de índices de vegetación

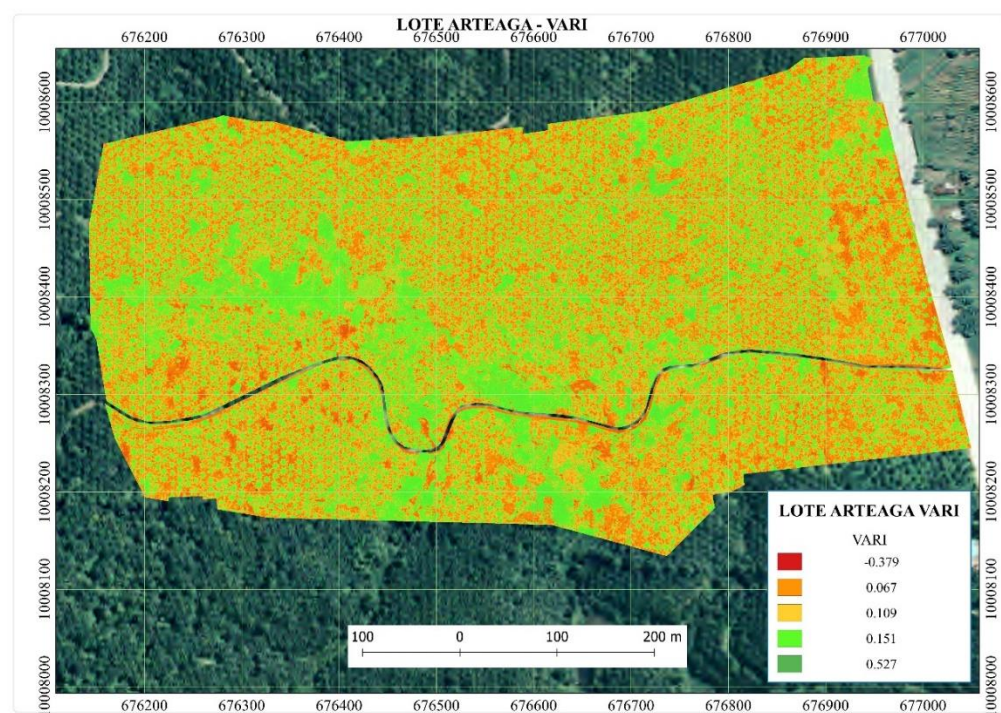
### 4.2.2.1 VARI

Para el cálculo del VARI se procedió a aplicar la ecuación (8) descrita en la sección 3.7.1 de la Metodología (página 66) de manera que se obtuvo dicho índice de vegetación por cada monitoreo realizado, ver *Figura 71*, *Figura 72* y *Figura 73*.

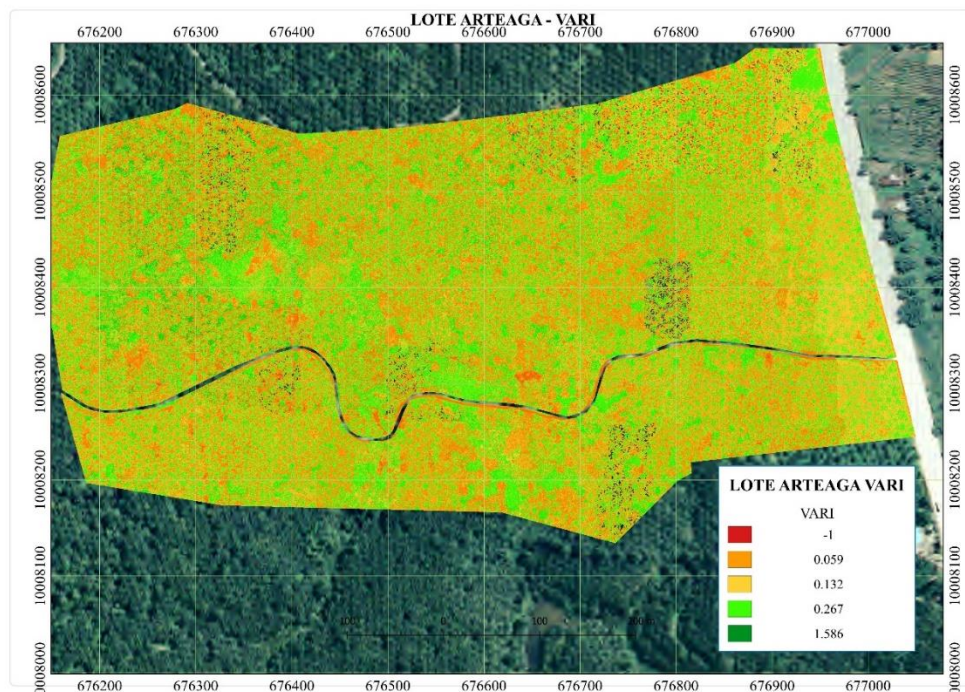




**Figura 71.** Índice VARI - Lote Arteaga obtenido el 30 de mayo del 2019



**Figura 72.** Índice VARI - Lote Arteaga obtenido el 13 de junio del 2019



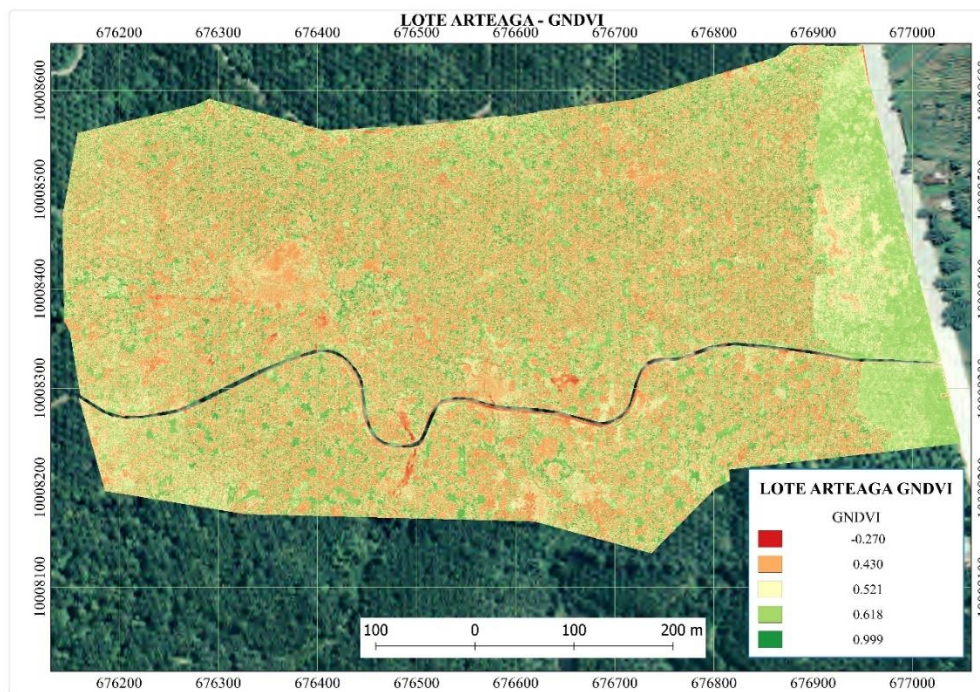
**Figura 73.** Índice VARI - Lote Arteaga obtenido el 26 de junio del 2019

En los tres monitoreos se pudo apreciar que no siempre se mantiene el mismo rango de valores del índice principalmente por la condición climática en la que se realizó cada vuelo, pues influyó la presencia de nubes, mayor luz solar, nubosidad, humedad, entre otros factores que no permanecieron constantes, pero se aprecia que la tendencia de los índices mínimos que representan palmas con afectaciones mantuvo la tendencia, principalmente en los focos de palmas afectada.

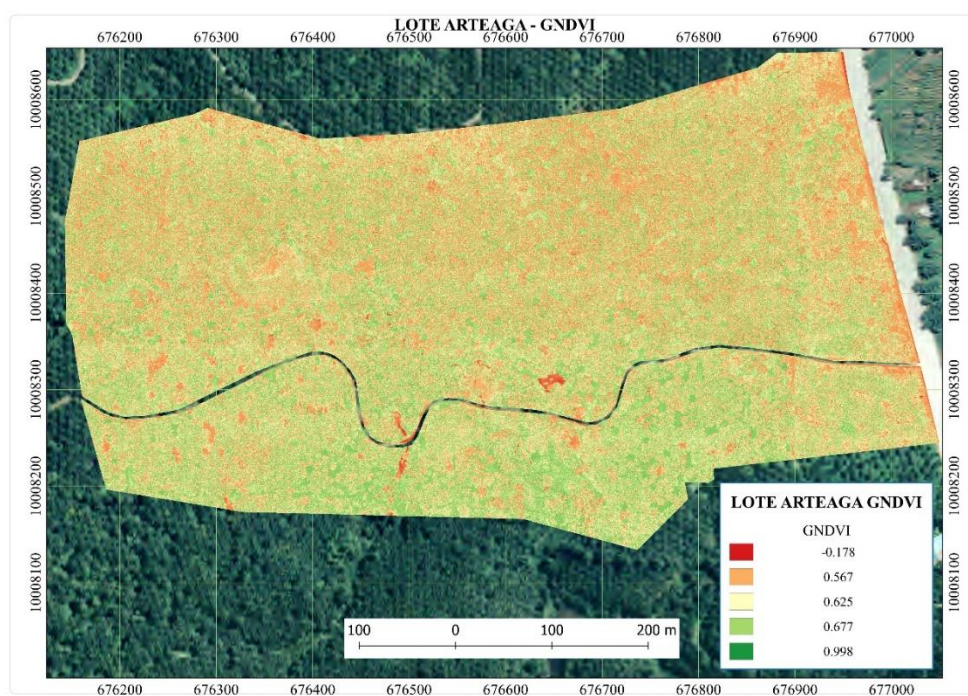
#### 4.2.2.2 GNDVI

Para el cálculo del GNDVI se procedió a aplicar la ecuación (2) descrita en la *Tabla 2*, de manera que se obtuvo dicho índice de vegetación por cada monitoreo realizado, ver *Figura 74*, *Figura 75* y *Figura 76*.

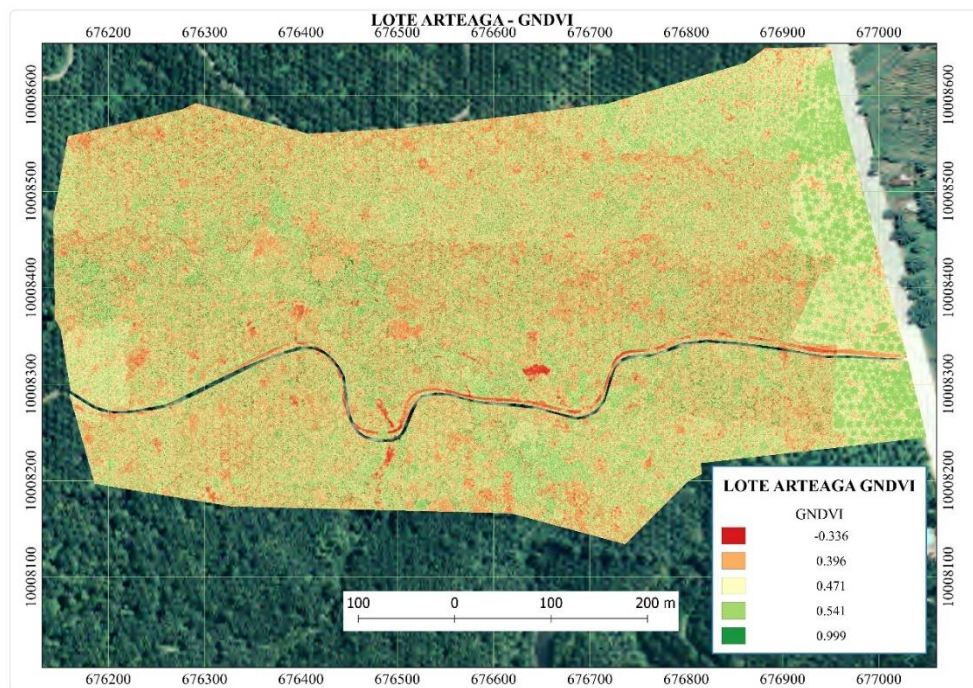




**Figura 74.** Índice GNDVI - Lote Arteaga obtenido el 30 de mayo del 2019



**Figura 75.** Índice GNDVI - Lote Arteaga obtenido el 13 de junio del 2019



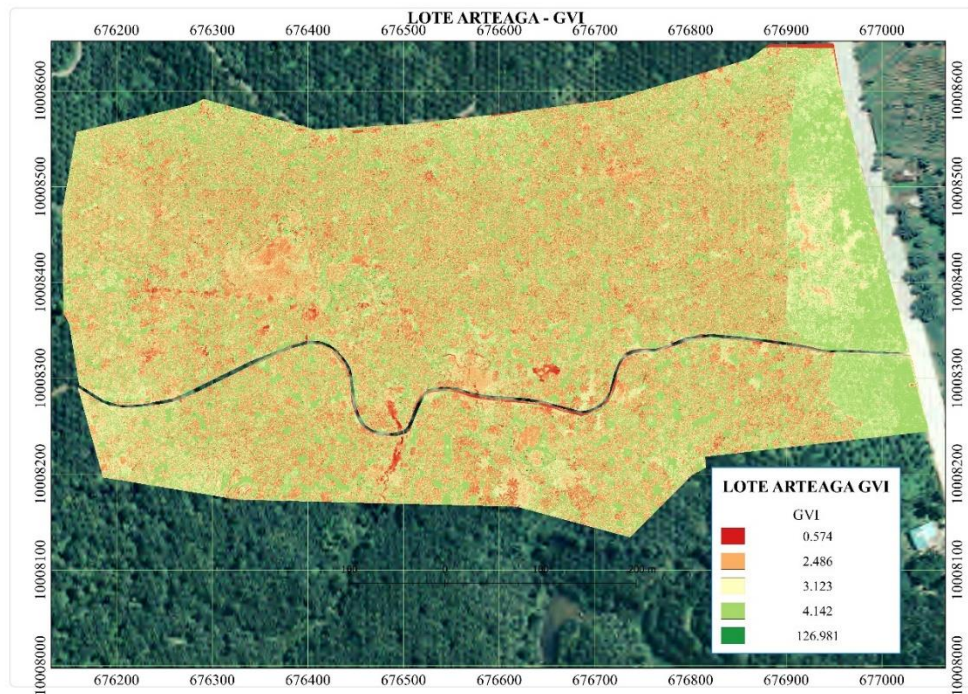
**Figura 76.** Índice GNDVI - Lote Arteaga obtenido el 26 de junio del 2019

Al igual que el VARI, en los tres monitoreos se pudo apreciar que no siempre se mantiene el mismo rango de valores del índice principalmente por las condiciones antes mencionadas, pero se sigue manteniendo la tendencia de focos de palmas con índices bajos.

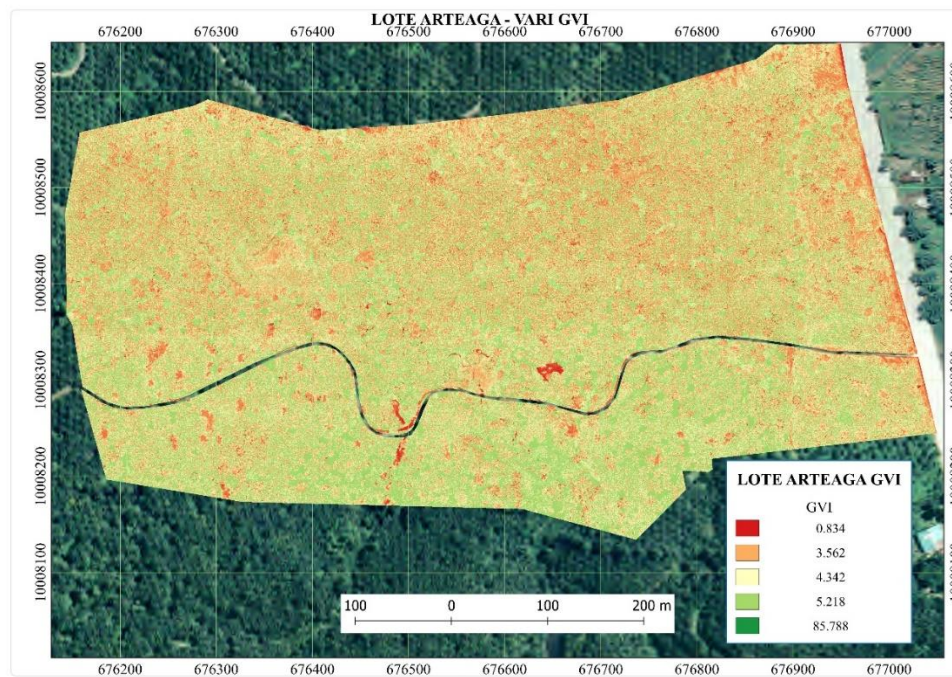
#### 4.2.2.3 GVI

Para el cálculo del GVI se procedió a aplicar la ecuación (3) descrita en la *Tabla 2*, de manera que se obtuvo dicho índice de vegetación por monitoreo realizado, ver *Figura 77*, *Figura 78* y *Figura 79*.

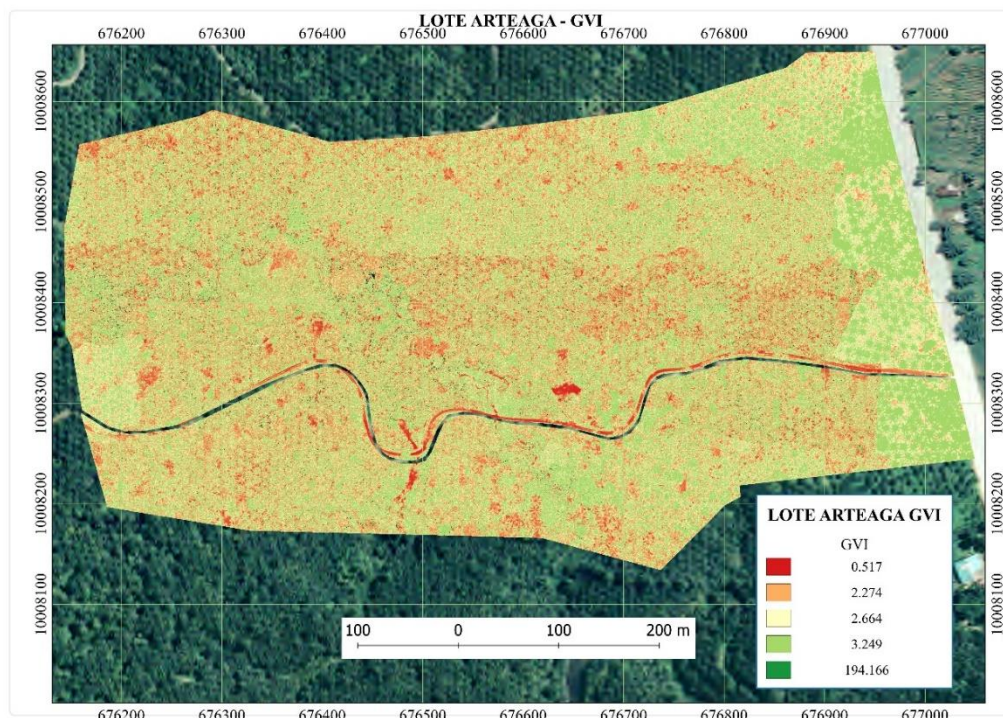




**Figura 77.** Índice GVI - Lote Arteaga obtenido el 30 de mayo del 2019



**Figura 78.** Índice GVI - Lote Arteaga obtenido el 13 de junio del 2019

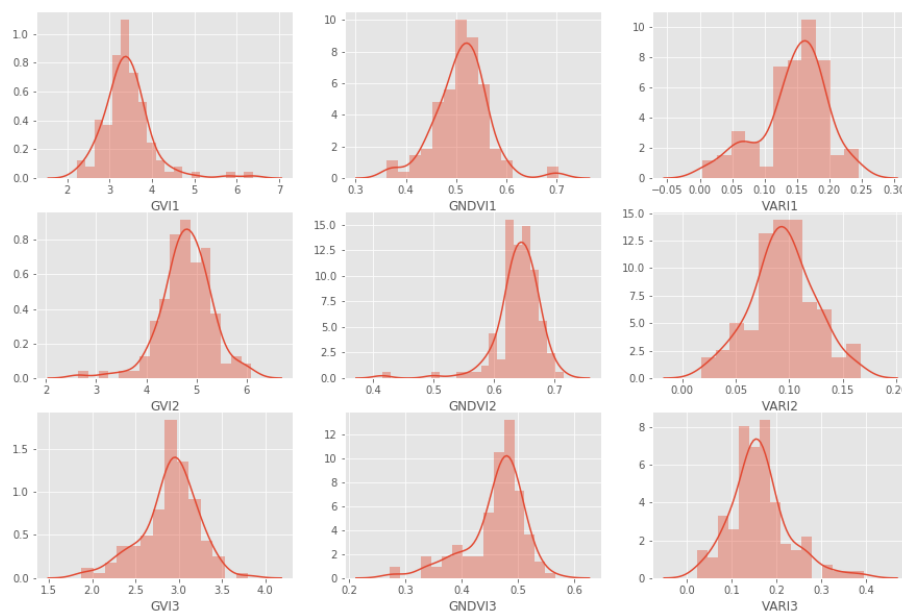


**Figura 79.** Índice GVI - Lote Arteaga obtenido el 26 de junio del 2019

A continuación, en la

**Tabla 48** se detalla la estadística descriptiva de los monitoreos realizados en el Lote Arteaga. En el segundo vuelo se tienen índices más altos a comparación del primer monitoreo, se puede deducir que la causa es la condición climática y de humedad que afectaron a los niveles digitales del ortomosaico obtenido, pero cabe resaltar que la tendencia en cuanto a zonas con índices de menor valor, que indican afectaciones en la vigorosidad de la planta se mantiene, dicho resultado se puede comparar con el análisis estadístico realizado (**Figura 80**). En la segunda fila se aprecia el aumento de la media del índice GVI y GNDVI respecto al primer monitoreo, en el tercer monitoreo todos los índices obtenidos tienen un índice menor al segundo monitoreo. En cuanto a la factibilidad de la aplicación de los índices para monitorear las enfermedades, el índice VARI representa el mejor resultado acorde a la realidad, debido a que en el lote existen las

afectaciones que avanzan semanalmente y se contrasta con la columna del índice VARI, donde se aprecia que los valores disminuyen respecto al tiempo, acorde al avance de la enfermedad.



**Figura 80.** Distribución de los índices de vegetación en cada monitoreo realizado

**Tabla 48**

*Resumen de la estadística descriptiva de los índices de vegetación – Lote Arteaga*

	GV11	GNDVI1	VARI1	GV12	GNDVI2	VARI2	GV13	GNDVI3	VARI3
<b>Media</b>	3.423	0.511	0.144	4.797	0.640	0.094	2.896	0.460	0.162
<b>Desv. Estándar</b>	0.586	0.053	0.052	0.518	0.038	0.030	0.332	0.052	0.065
<b>Índice mínimo</b>	2.227	0.362	0.005	2.639	0.415	0.018	1.873	0.272	0.024
<b>0.250</b>	3.120	0.484	0.123	4.564	0.626	0.077	2.759	0.445	0.127
<b>0.500</b>	3.374	0.512	0.155	4.821	0.644	0.094	2.928	0.473	0.157
<b>0.750</b>	3.655	0.541	0.179	5.093	0.660	0.112	3.101	0.493	0.187
<b>Índice máximo</b>	6.382	0.704	0.245	6.096	0.715	0.166	3.806	0.567	0.395

Como se ha mencionado en los resultados de la fase A y B existen limitaciones técnicas que afectan a los resultados obtenidos en los monitoreos. En este caso los valores de los índices no presentan cierta uniformidad. Martínez & Miranda (2018) menciona que las limitaciones en

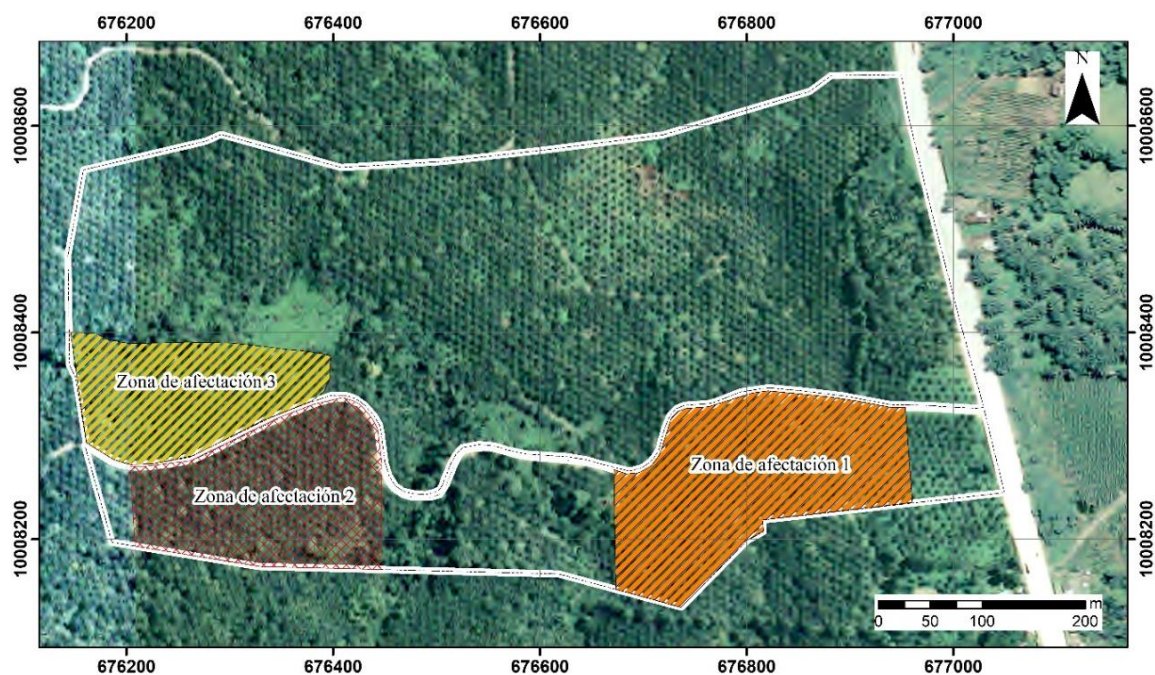


los proyectos de caracterización espectral para la detección de la problemática de *Flecha Seca* en la palma aceitera en Costa Rica, son de tipo técnico, logístico y ambiental, ya que en este caso los niveles digitales de los ortomosaicos obtenidos pueden poseer el ruido de las observaciones en campo, como lo son, los picos de absorción del agua, que se elevan por el aumento de la humedad atmosférica propia de la zona de estudio, para este proyecto, la zona de La Concordia, que es de tipo climática lluviosa tropical. También existe una dependencia del sensor de los drones aplicados, por último, las limitaciones ambientales se refieren a la condición atmosférica al momento de realizar los monitoreos, como la cobertura nubosa, lluvias, el estado fenológico de la vegetación, hora del día y las condiciones locales.

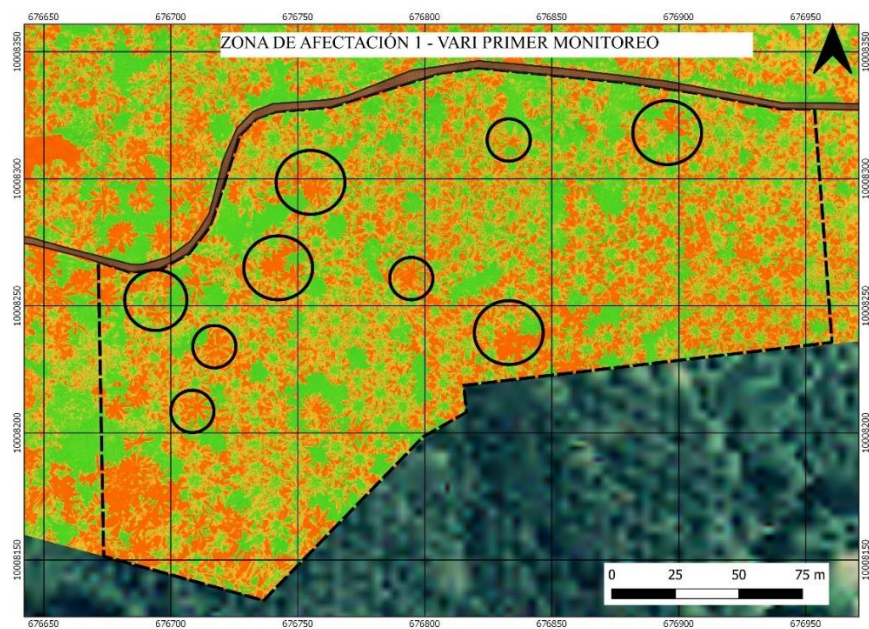
#### **4.2.3 Detección de enfermedades**

En la detección de enfermedades se pudo constatar la factibilidad de la aplicación de las tecnologías geoespaciales al poder determinar focos de palmas con afectación por PC y AR, debido a que dichas plantas presentaron índices de vegetación con niveles inferiores respecto a la línea base establecida. Se han determinado zonas de interés, ver **Figura 81**, a partir del primer monitoreo realizado, donde se encontraron plantas que presentaron anomalías en los valores de los índices de vegetación calculados, como se puede apreciar en las siguientes graficas ( ver **Figura 82 a Figura 90**). Se toma en cuenta la zona sur del lote Arteaga, debido a que la zona norte se tomó en cuenta para la validación del análisis multitemporal propuesto para el análisis de la propagación de las afectaciones.



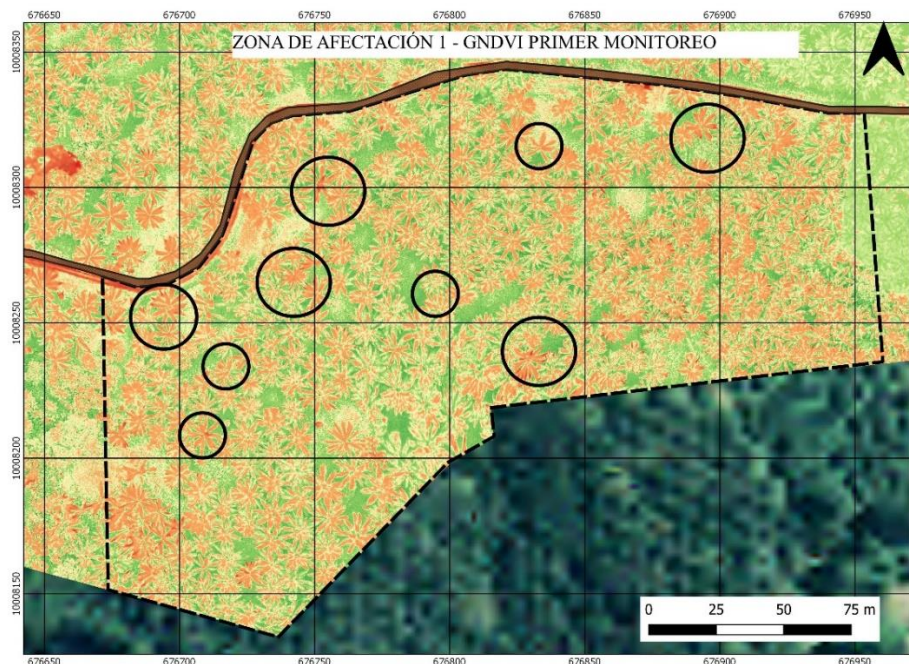


**Figura 81.** Zonas de afectación

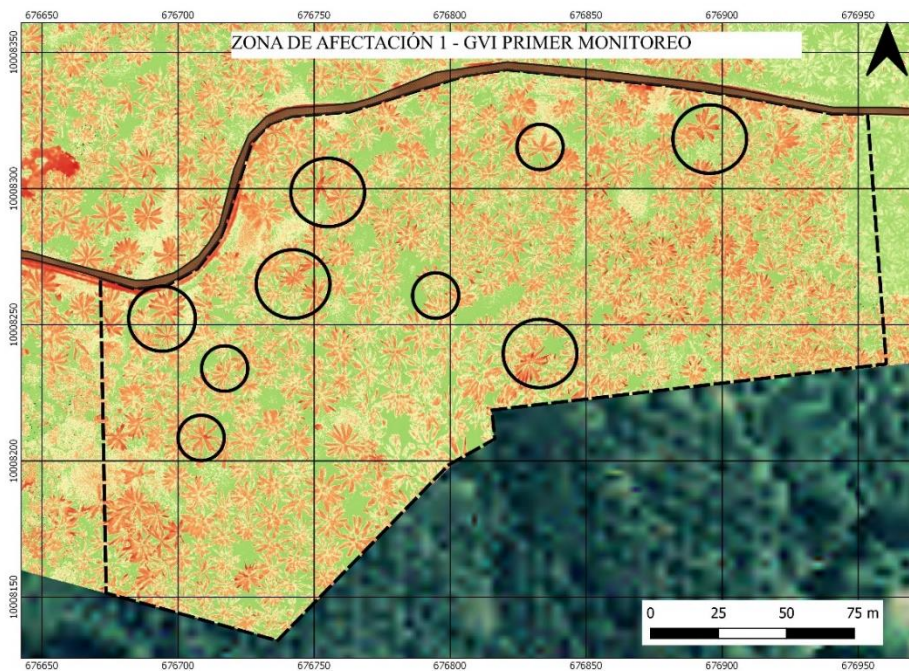


**Figura 82.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 1 a partir del índice NDVI.



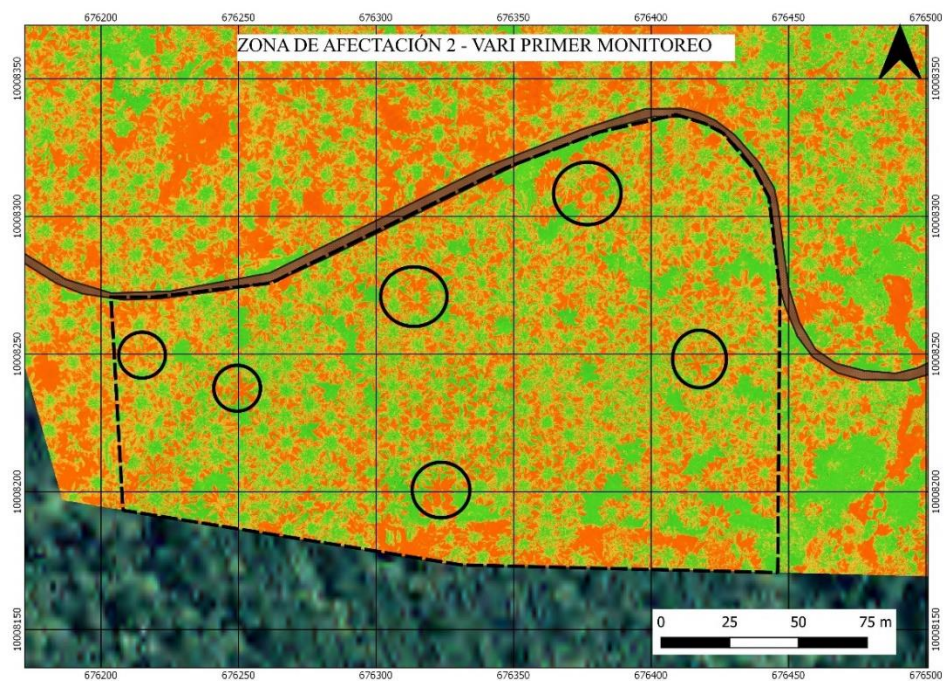


**Figura 83.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 1 a partir del índice GNDVI.

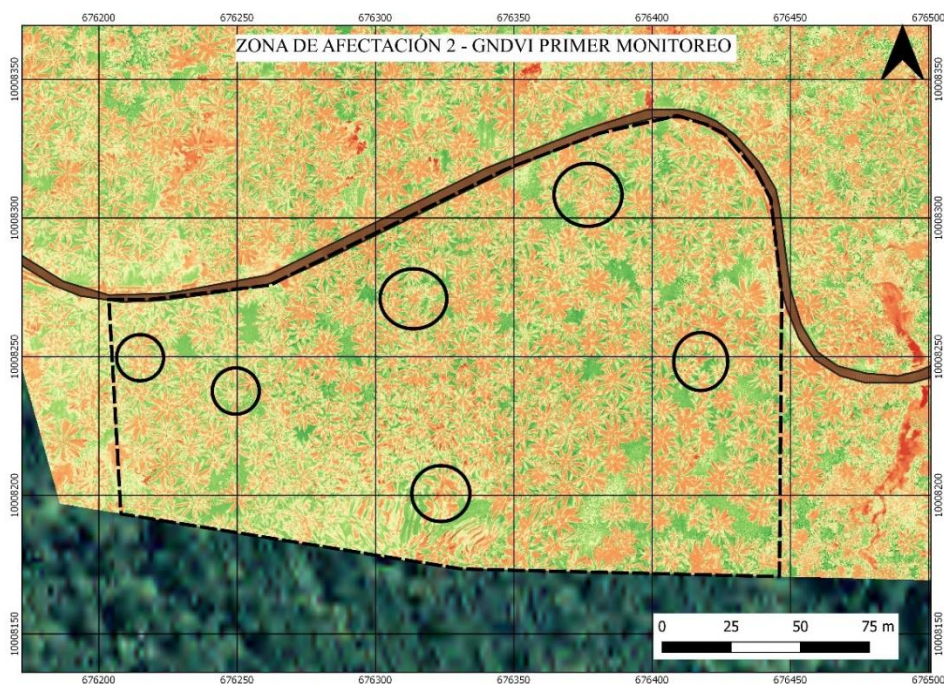


**Figura 84.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 1 a partir del índice GVI.



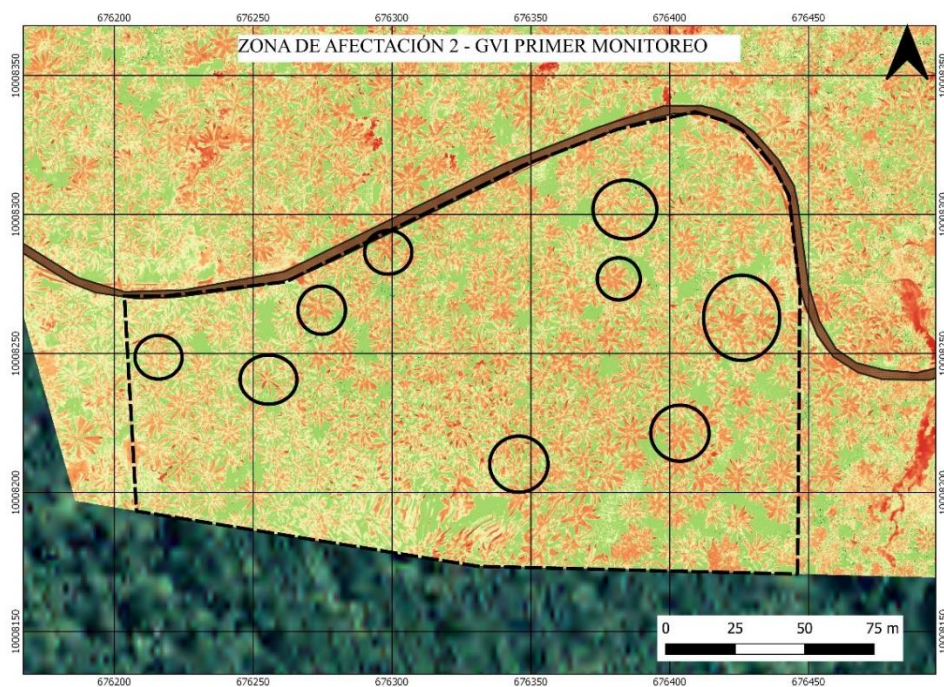


**Figura 85.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 2 a partir del índice VARI.

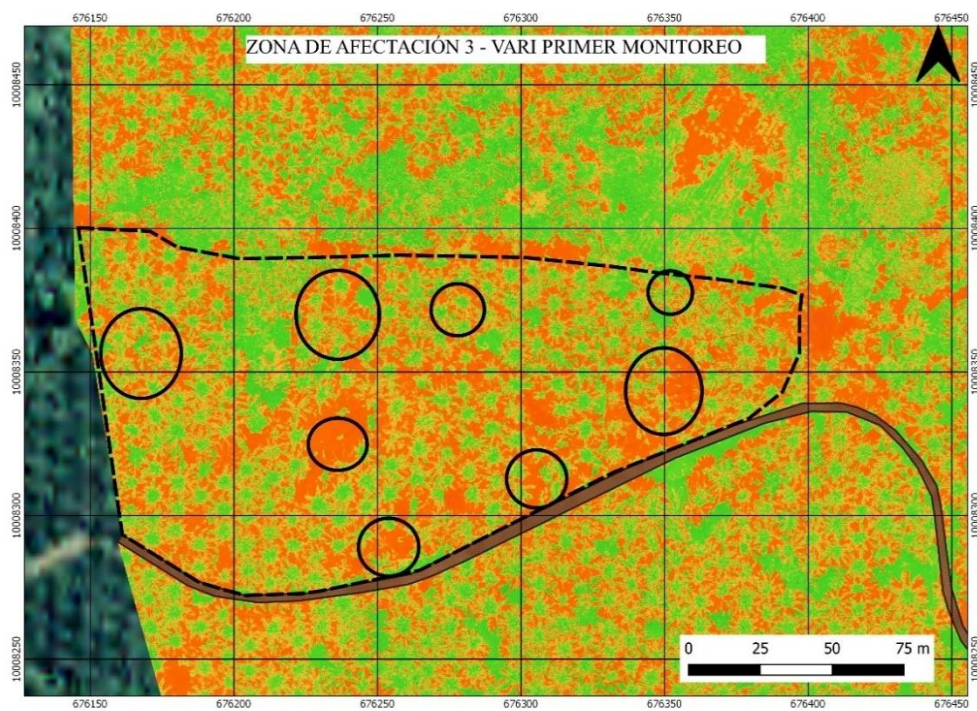


**Figura 86.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 2 a partir del índice GNDVI.



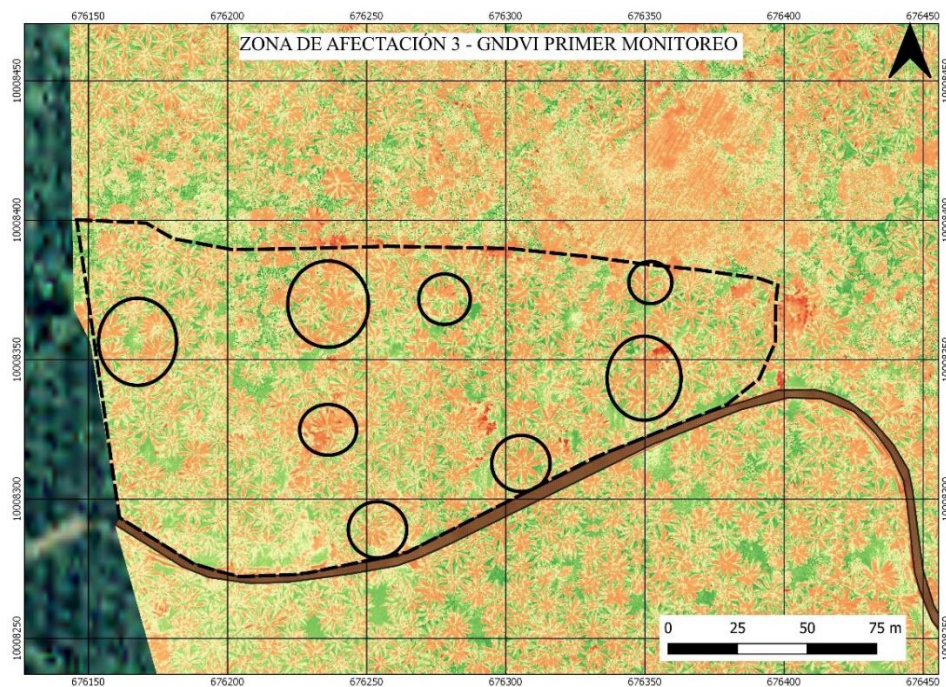


**Figura 87.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 2 a partir del índice GVI.

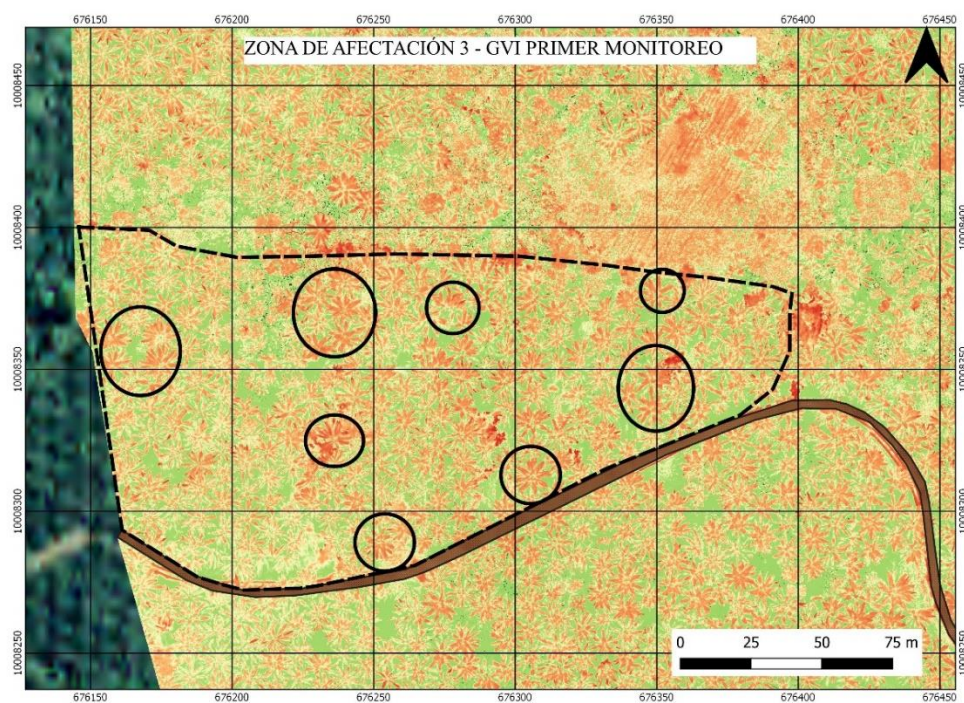


**Figura 88.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 3 a partir del índice VARI.



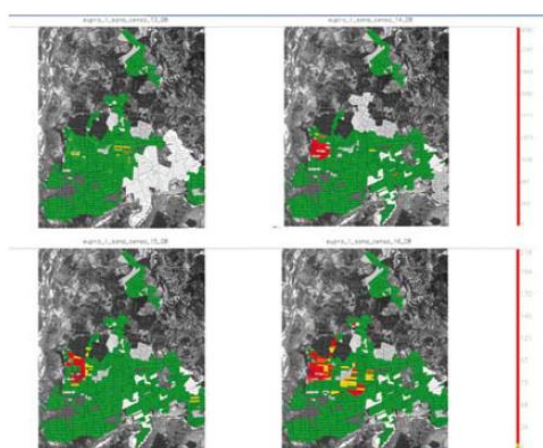


**Figura 89.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 3 a partir del índice GNDVI.



**Figura 90.** Detección de plantas con afectación en la zona de afectación 3 a partir del índice GVI.

Se han desarrollado distintas metodologías para implementar la agricultura de precisión en el manejo agronómico de la palma aceitera, en las que se busca estructurar una base de datos geográficos, que sea dirigida a palmicultores e instituciones públicas y privadas, para la planificación y ordenamiento agropecuario del país. En el caso de la PC, se tuvo problemas en contar con información de manera precisa, es decir, de palma a palma, por lo que se dedujeron resultados a partir de modelos matemáticos, que muestran la incidencia a partir de técnicas de interpolación, cuyos resultados es un panorama general de la situación, pero no permite establecer donde están las palmas afectadas para poder tratarlas (Hurtado & Rincón, 2009a) (ver **Figura 91**). Es así, que se ha innovado a través de la Agricultura de precisión, a partir de modelos geográficos de precisión, como el caso de estudio citado, en el que se asignaron coordenadas mediante un algoritmo basado en trigonometría básica, para poder integrar los censos tomados sobre PC y niveles de severidad de dicha afectación, de manera que se generó un modelo espacial y temporal de la enfermedad, ver **Figura 92**. Al contrastar con el estudio realizado por Hurtado & Rincón (2009a) se ha implementado una metodología para automatizar el conteo de palmas, además de la detección automática de focos con niveles de severidad avanzados, a partir de índices de vegetación, insumos que se obtienen mediante el uso de drones con monitoreos semanales, lo cual sustituye a los censos realizados por los palmicultores y se reduce tiempo y recursos empleados. Cabe recalcar que también se ha integrado la generación de una *geodatabase* que contiene los *shapes* de tipo vectorial, que pueden tener en sus atributos la vigorosidad de la planta a partir de la estadística zonal descrita en la metodología de la Fase A.



**Figura 91.** Representación espacial y modelo temporal de incidencia de *Stenoma cecropia*.

Fuente: (Hurtado & Rincón, 2009a)



**Figura 92.** Modelo espaciotemporal de la PC. Detección de focos y tendencia de propagación, Agricultura de precisión Cenipalma 2009

Fuente: (Hurtado & Rincón, 2009a)

#### 4.2.4 Validación de la detección

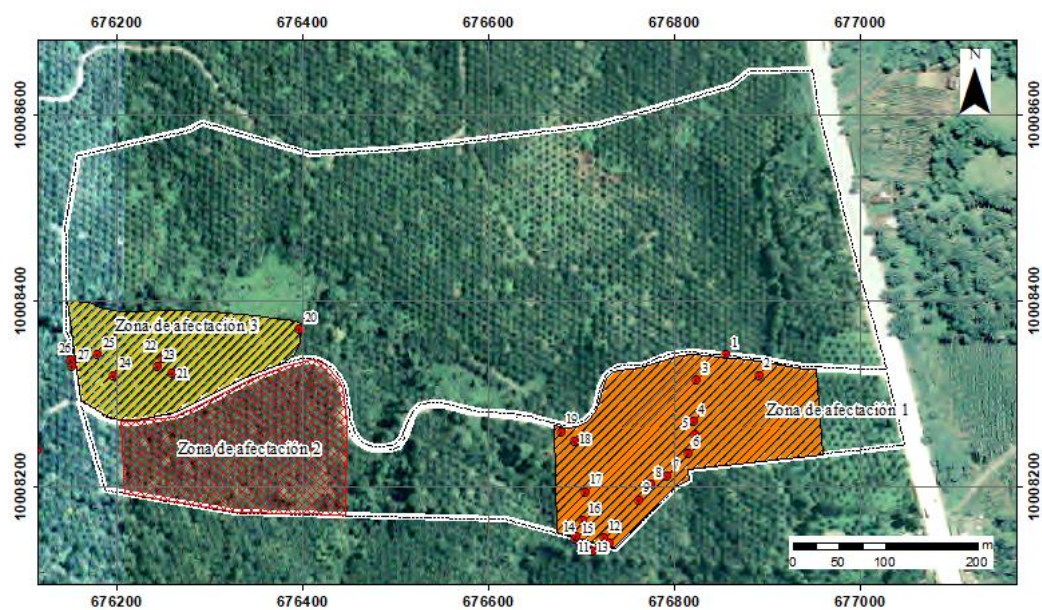
Se realizó la validación de la detección de focos de afectaciones a partir de las tecnologías geoespaciales, mediante la comprobación en campo de palmas con presencia de PC o AR, de manera simultánea al primer monitoreo realizado, para este fin, se procedió a reconocer a partir de la experiencia del palmicultor las enfermedades, además de su grado de severidad. Se recomienda analizar la información respectiva en el capítulo de Marco Teórico (**Tabla 3**). Una

vez realizada la identificación se tomaron puntos con un navegador GPS. Se detalla a continuación la validación en la **Tabla 49** y se puede constatar que los puntos de monitoreo en campo coincide con palmas que poseen índices de vegetación bajos como se puede apreciar en las figuras (**Figura 93- Figura 99**), en dichas gráficas se toma en cuenta las zonas de afectación uno y tres en el primer monitoreo.

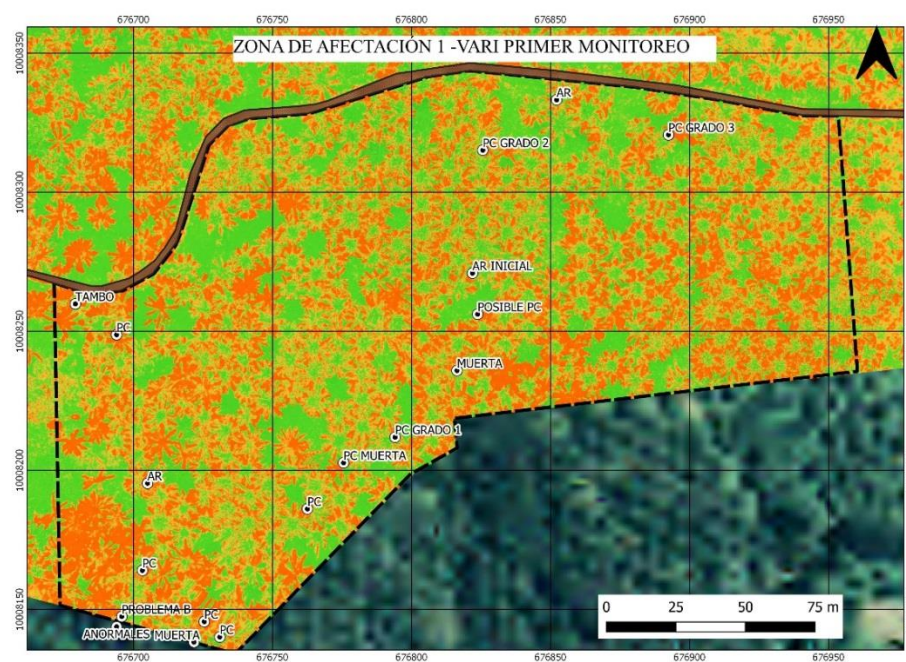
**Tabla 49***Validación en campo de afectaciones a la palma*

X	Y	PUNTO	CASO	X	Y	PUNTO	CASO
676857	10008343	1	AR	676705	10008195	17	AR
676892	10008321	2	PC GRADO	676694	10008249	18	PC
3							
676826	10008315	3	PC GRADO	676397	10008370	19	AR
2							
676822	10008271	4	AR INICIAL	676260	10008322	20	PC GRADO 3
676824	10008256	5	POSIBLE PC	676250	10008339	21	PC
676816	10008236	6	MUERTA	676245	10008330	22	PC GRADO
(PC)							
CRATER							
676794	10008212	7	PC GRADO	676197	10008321	23	PC GRADO 3
1							
676776	10008203	8	PC	676180	10008343	24	PC
MUERTA							
676763	10008186	9	PC	676150	10008337	25	PC
676731	10008140	10	PC	676152	10008330	26	PC
676722	10008138	11	PC	676109	10008256	27	PC
MUERTA							
676725	10008146	12	PC	676115	10008239	28	PC
676712	10008131	13	PC	676104	10008241	29	PC GRADO 3
676694	10008144	14	ANOMALÍA	676076	10008239	30	PC
676696	10008147	15	PROBLEMA	676020	10008291	31	PC
BORO							
676703	10008164	16	PC				



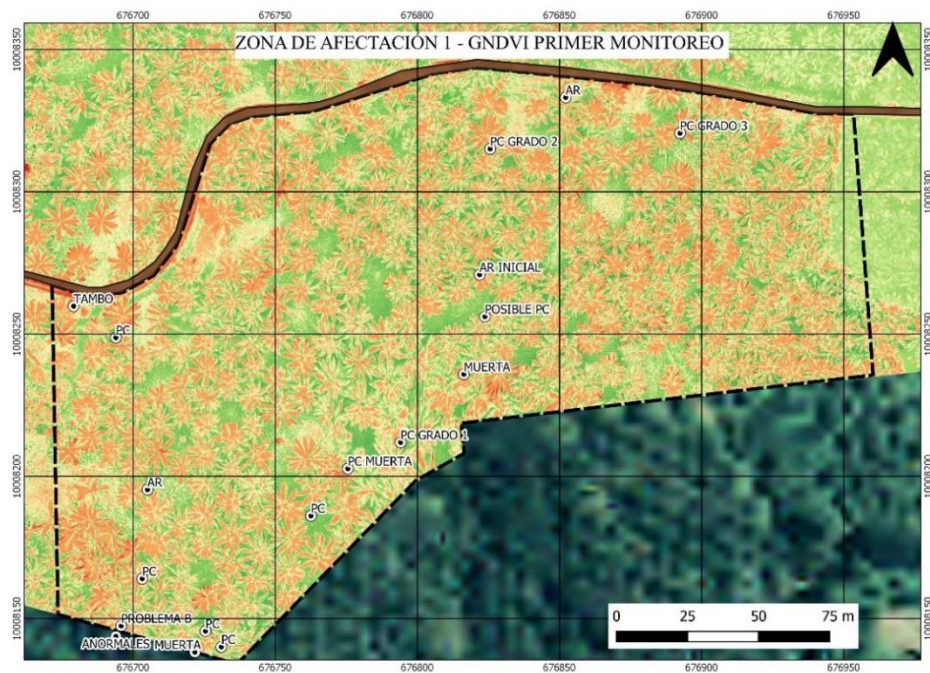


**Figura 93.** Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones

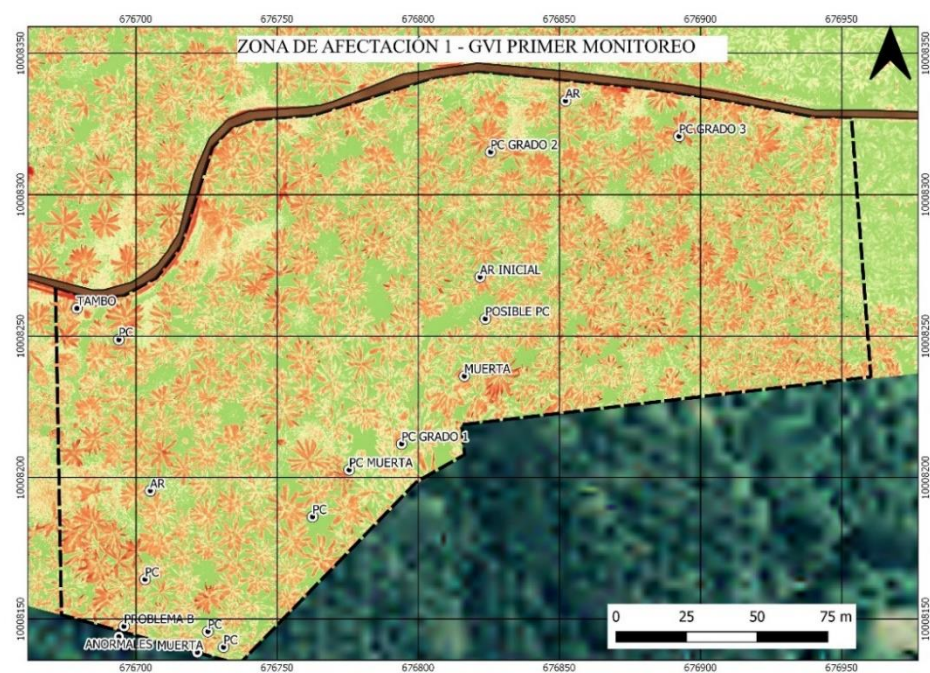


**Figura 94.** Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 1 a partir del índice VARI.



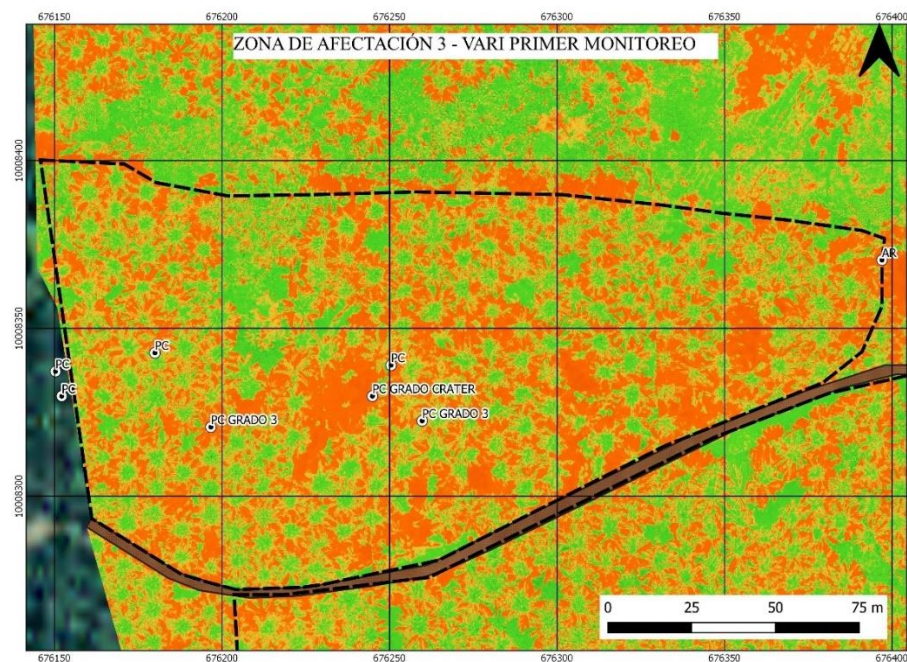


**Figura 95.** Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 1 a partir del índice GNDVI.



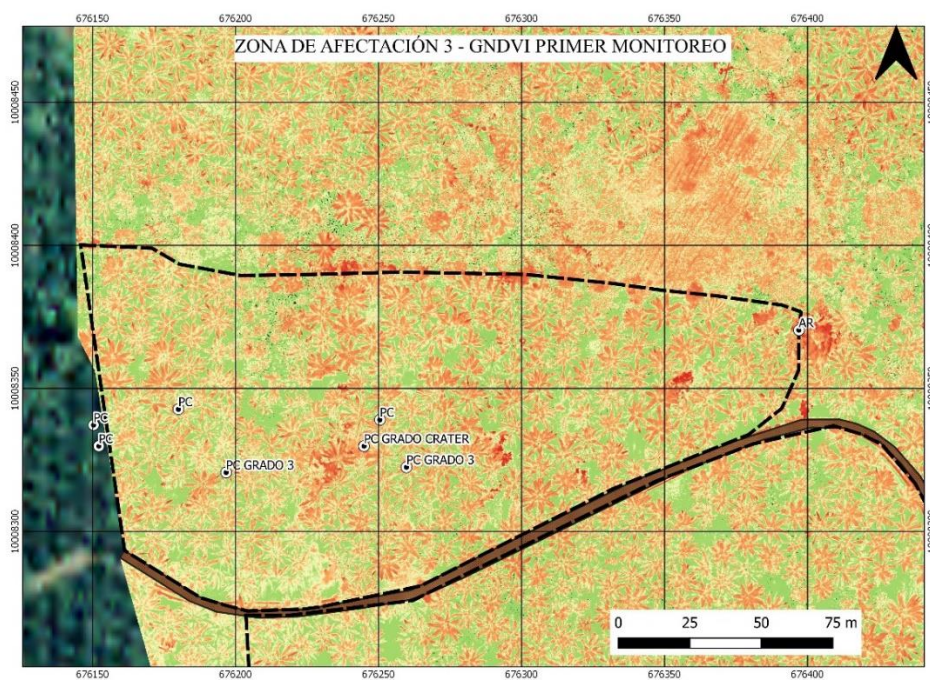
**Figura 96.** Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 1 a partir del índice GNDVI.



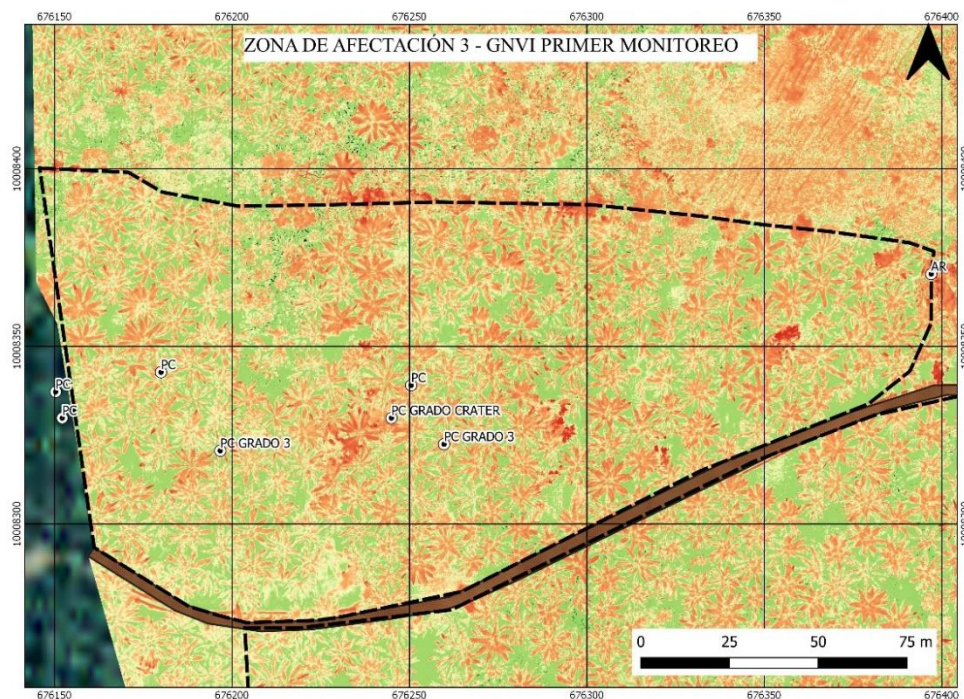


**Figura 97.** Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 3 a partir del índice VARI.

Fuente: Autor

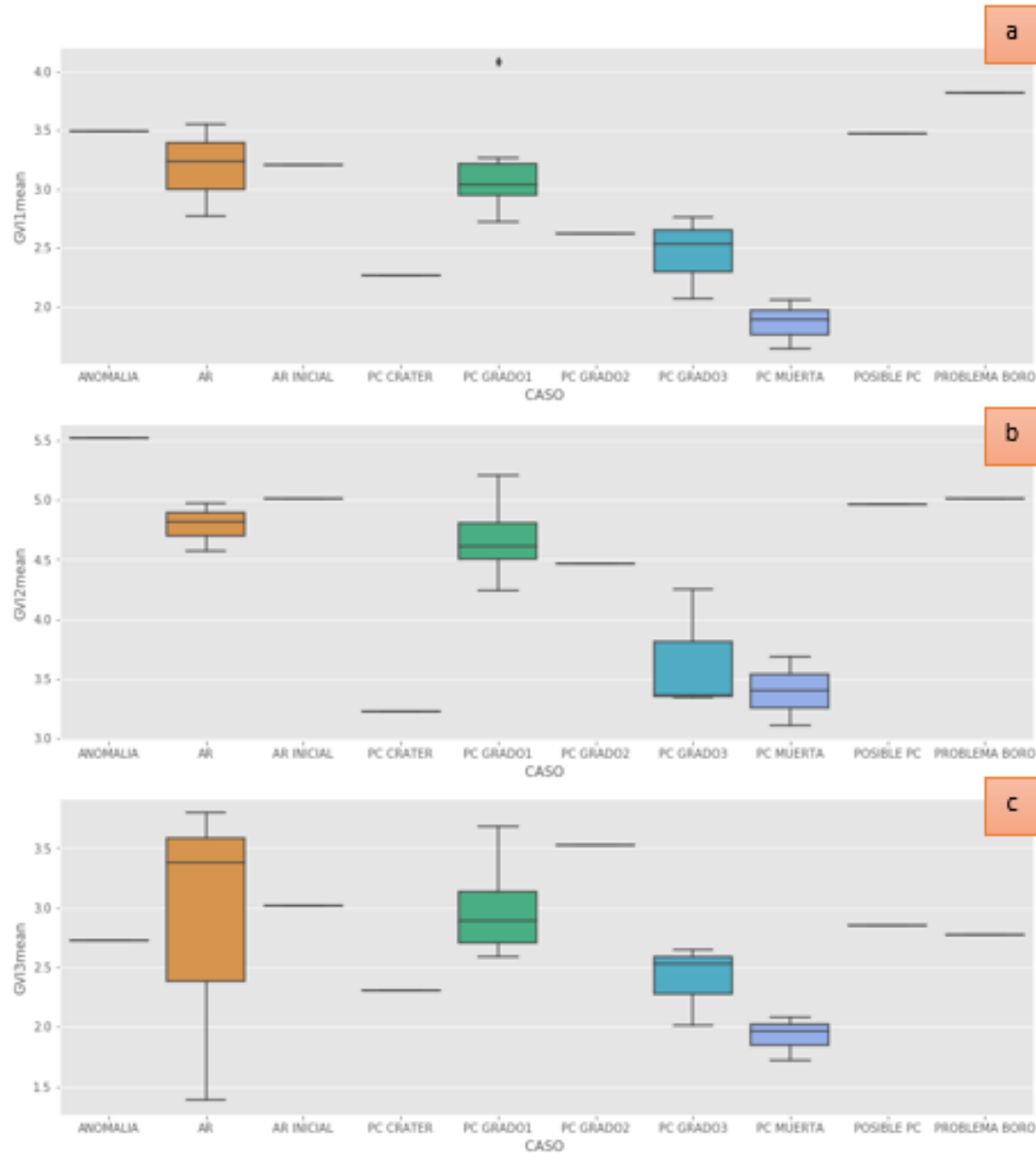


**Figura 98.** Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 3 a partir del índice VARI.



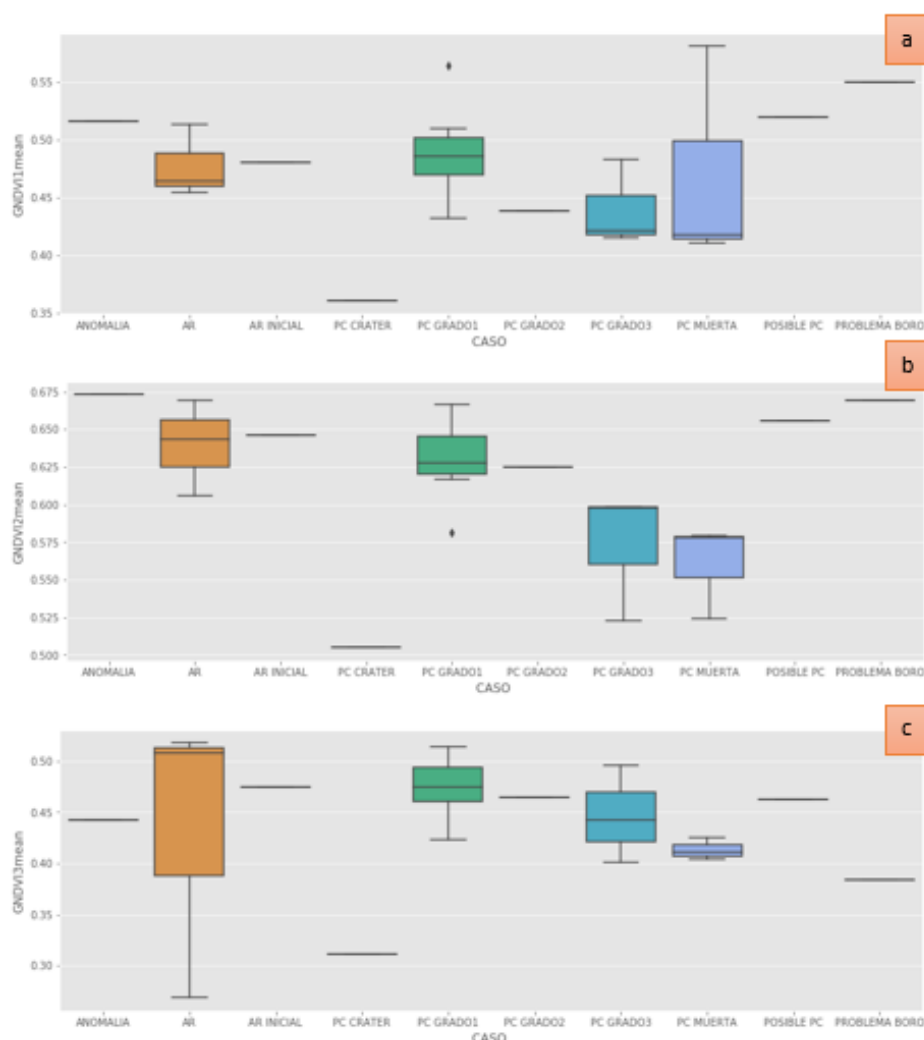
**Figura 99.** Puntos de validación de detección de focos de palmas con afectaciones ubicados en la zona de afectación 3 a partir del índice VARI.

Los puntos monitoreados en campo permitieron conocer que efectivamente los focos de palmas con afectación por PC y AR poseen índices con valores bajos en relación con el rango que maneja cada uno de los índices calculados, que dan a conocer afectaciones en la vigorosidad de la planta. En este caso se aprecia que mientras más bajo es el índice de vegetación mayor es la severidad del grado de afectación de PC, además de que las palmas con problemáticas iniciales no presentan una variación considerable respecto a la línea base (*Figura 100, Figura 101 y Figura 102*).



**Figura 100.** Diagrama de cajas de puntos de validación de los distintos grados de severidad de las afectaciones a partir del índice GVI

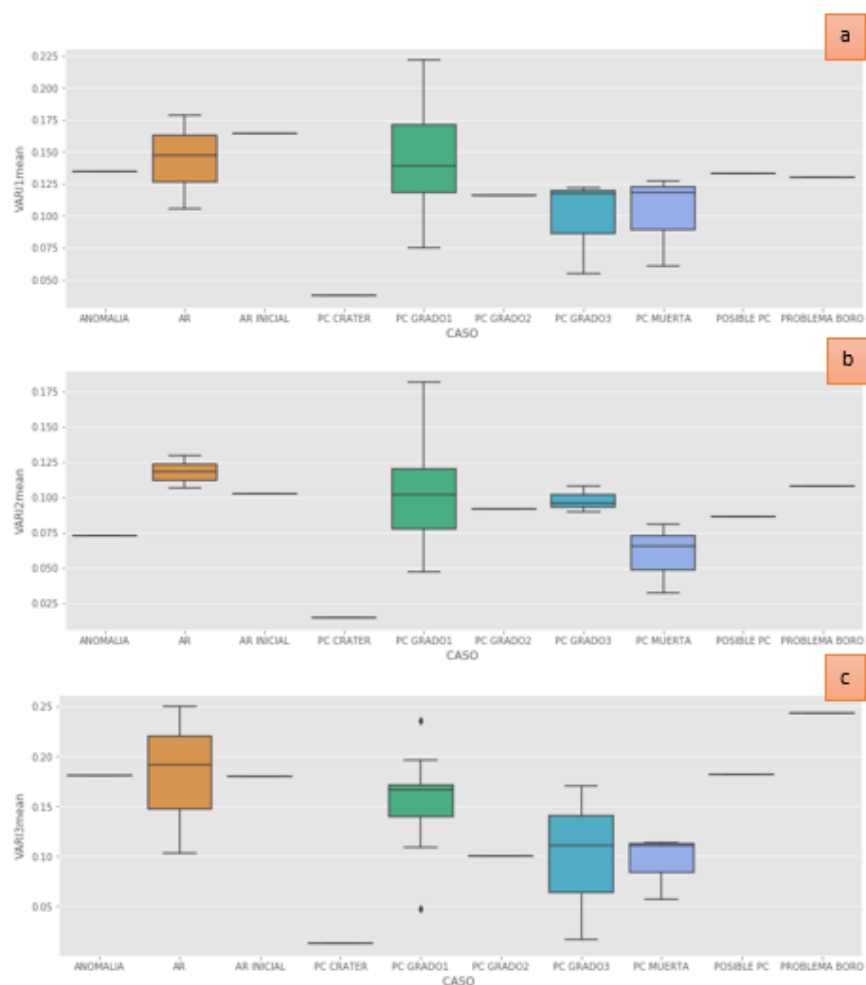




**Figura 101.** Diagrama de cajas de puntos de validación de los distintos grados de severidad de las afectaciones a partir del índice GNDVI

Con los diagramas de cajas anteriores, se puede constatar que en el caso de la severidad de tipo cráter de la PC, el índice es mucho más bajo que una planta que ya está muerta por la afectación. Este tipo de problemática puede darse por la marchitez, pudrición y posterior secamiento de las hojas, ya que se pierde la biomasa de la planta de manera que al momento del cálculo del índice están interfiriendo valores que sean correspondientes a maleza que ha crecido

sobre el cultivo o del suelo en sí. A partir del índice VARI también se puede apreciar este tipo de resultado.



**Figura 102.** Diagrama de cajas de puntos de validación de los distintos grados de severidad de las afectaciones a partir del índice VARI

A partir de la estadística descriptiva (**Tabla 50**), se puede afirmar la factibilidad del uso de tecnología geoespacial para localizar problemas en las palmas aceiteras, ya que si se compara con los valores de la línea base para la especie INIAP se tiene rangos por debajo de lo considerado sano (**Tabla 20**, **Tabla 24** y **Tabla 26**). Por ejemplo, se ha llegado al mismo resultado en investigaciones centradas en corroborar el uso de sensores remotos para detectar la infección por



*Ganoderma*, mediante el uso de teledetección hiperespectral (espectroradiómetro manual) y un sistema de imágenes hiperespectrales, además de la inclusión de un sistema UAV-*RGB-NIR* con integración de *SIG*, a lo cual los autores concluyen que la teledetección hiperespectral es una opción no destructiva para la pronta detección de enfermedades de la planta, los métodos deben desarrollarse en forma precisa y confiable para diagnosticar palmas infectadas asintomáticas antes de implementar las distintas opciones de tratamiento con máxima efectividad (Mohd et al.; 2016); además de que en el caso de que el uso de la tecnología geoespacial UAV se potencialice un sistema de análisis de la propagación de problemáticas en las plantaciones. De la misma manera, el trabajo realizado presenta gran factibilidad para detectar focos de la problemática en investigación, por lo tanto, se necesita desarrollar un sistema de monitoreo continuo con los palmicultores, para que la metodología propuesta tenga mayor eficiencia en la pronta detección en palmas asintomáticas precisamente, ya que las mismas se pueden detectar a partir de estadísticas zonales que permitan analizar diferencias en cuanto a la presencia de índices bajos en las palmas que ya poseen su polígono, de esta forma se pueden descartar problemas por cuestiones de tipo logístico, técnico o ambiental, al momento de poseer el monitoreo semanal como una de las recomendaciones, y constatar con seguridad que la palma mantiene una tendencia de acarrear un valor de los índices de vegetación bajo conforme pasa el tiempo.

**Tabla 50**

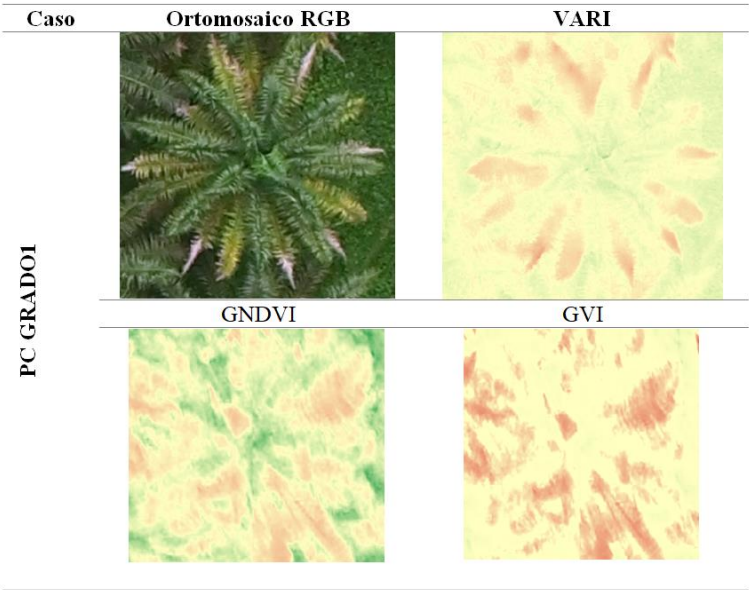
*Estadística descriptiva de la validación de detección de enfermedades*

	<b>GVI1</b>	<b>GVI2</b>	<b>GVI3</b>	<b>GNDVI1</b>	<b>GNDVI2</b>	<b>GNDVI3</b>	<b>VARI1</b>	<b>VARI2</b>	<b>VARI3</b>
<b>Media</b>	2.912	4.422	2.732	0.480	0.629	0.458	0.131	0.094	0.148
<b>Desv. Estándar</b>	0.589	0.670	0.580	0.051	0.038	0.059	0.043	0.036	0.063
<b>Índice mínimo</b>	1.638	3.102	1.384	0.361	0.505	0.269	0.037	0.015	0.013
<b>25%</b>	2.643	4.246	2.546	0.455	0.617	0.442	0.115	0.076	0.105
<b>50%</b>	2.973	4.565	2.747	0.482	0.626	0.475	0.133	0.094	0.167

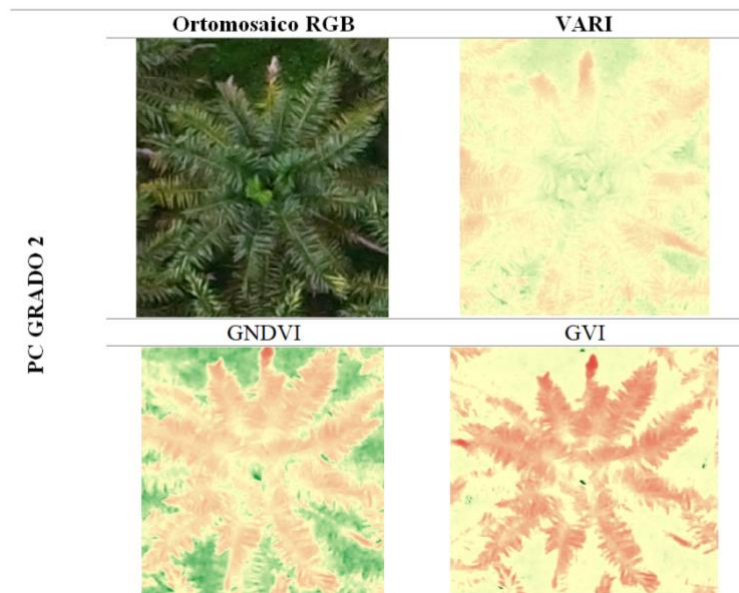
CONTINÚA 

75%	3.241	4.954	3.097	0.512	0.655	0.495	0.162	0.118	0.181
Índice máximo	4.081	5.517	3.793	0.581	0.678	0.517	0.222	0.181	0.250

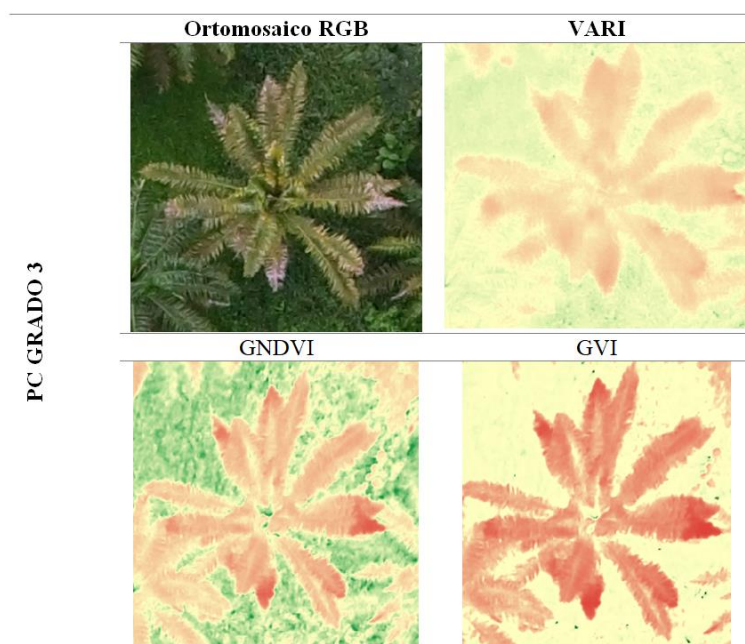
A continuación, se detalla el contraste entre el ortomosaico RGB y los índices generados, de manera que se comprueba que el grado de severidad avanzado de las afectaciones es identificable a partir de la tecnología geoespacial. En primer lugar, se toma en cuenta la afectación por PC, que mostró mayor factibilidad para ser identificada en los distintos estados que son considerados como focos de infección (ver de **Figura 103** a **Figura 108**).



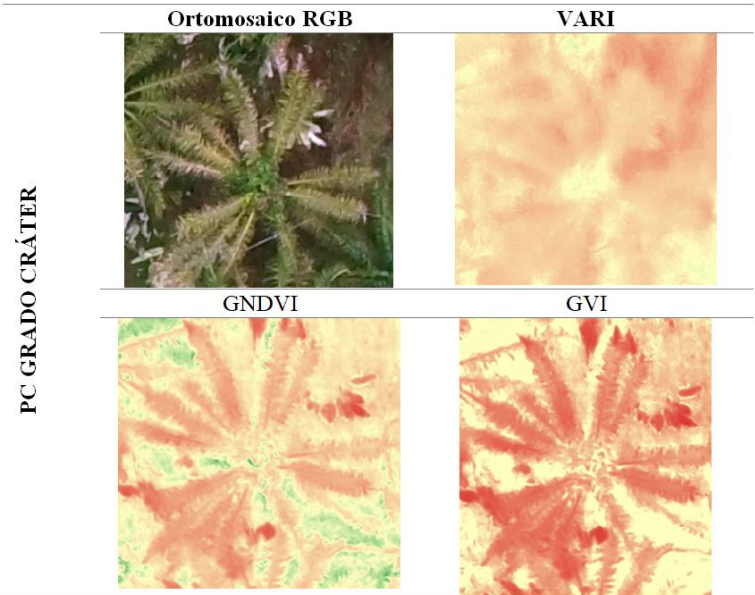
**Figura 103.** Características de la afectación PC grado 1



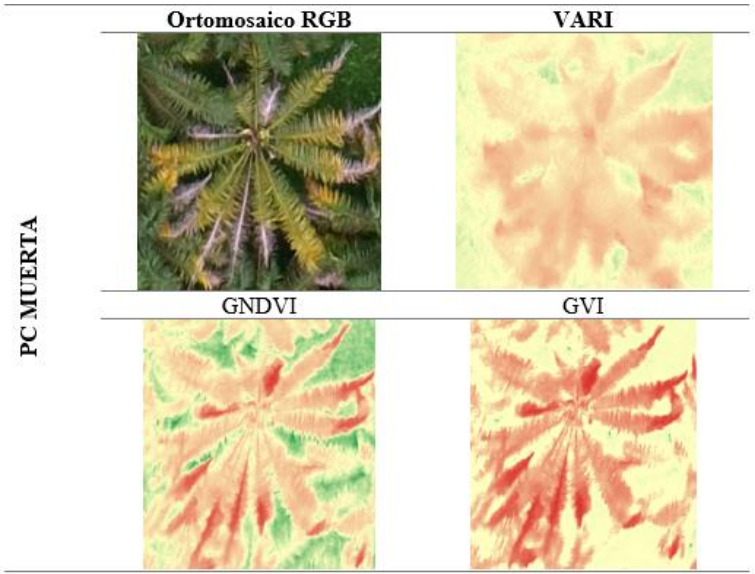
**Figura 104.** Características de la afectación PC grado 2



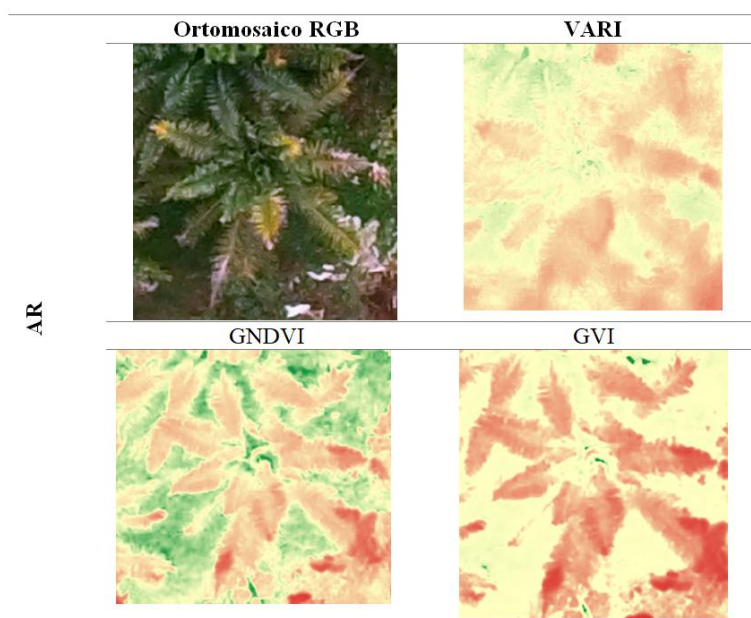
**Figura 105.** Características de la afectación PC grado 3



*Figura 106.* Características de la afectación PC grado cráter



*Figura 107.* Características de la afectación PC (muerta)



**Figura 108.** Características de la afectación AR

Los resultados obtenidos muestran que el sensor RGB y BGNIR del dron MATRICE con la cámara Zenmuse tienen la capacidad para diferenciar entre los grados de severidad, al igual que en la investigación desarrollada por Mohd et al. (2016), quienes investigaron sobre la capacidad de los sensores RGB y NIR con la tecnología UAV para diferenciar las severidades de la infección por *Ganoderma*. Cabe recalcar que los análisis realizados en esta investigación solo se desarrollaron a nivel del dosel, sin tomar en cuenta un estudio y comparación con los efectos de los antecedentes del suelo de la zona de estudio, es por ello por lo que se llega a la necesidad de medir dichos efectos con la precisión suficiente que permite discriminar entre las distintas categorías de las enfermedades y desarrollar métodos de control y mitigación de las problemáticas.

También es necesario más muestras de cada uno de los grados de severidad de las afectaciones motivo de estudio, con la finalidad de obtener métodos avanzados de clasificación y discriminación de dichas categorías para tener como resultado una diferencia significativa entre

cada una de ellas (Yuan et al., 2014). Ciertas investigaciones como la llevada a cabo por Everitt et al. (2019), confirman la factibilidad de la propuesta de este proyecto al utilizar los cañones (verde, rojo y NIR) para la detección de enfermedades en plantas. Además de que en el mismo proyecto se utilizó la prueba estadística de la *Mínima Diferencia Significativa (LSD)* para describir la diferencia entre robles vigorosos, con afectaciones y muertos. En los resultados de dicha investigación se demostró que el verde, rojo y NIR poseen una diferencia significativa estadísticamente entre todas las categorías analizadas. Por último, se comprueba al comparar con los estudios de Mohd et al. (2016) e Izzudin et al. (2015) que las longitudes de onda de los cañones verde, rojo e infrarrojo tienen la aptitud para distinguir palmas sanas e infectadas.

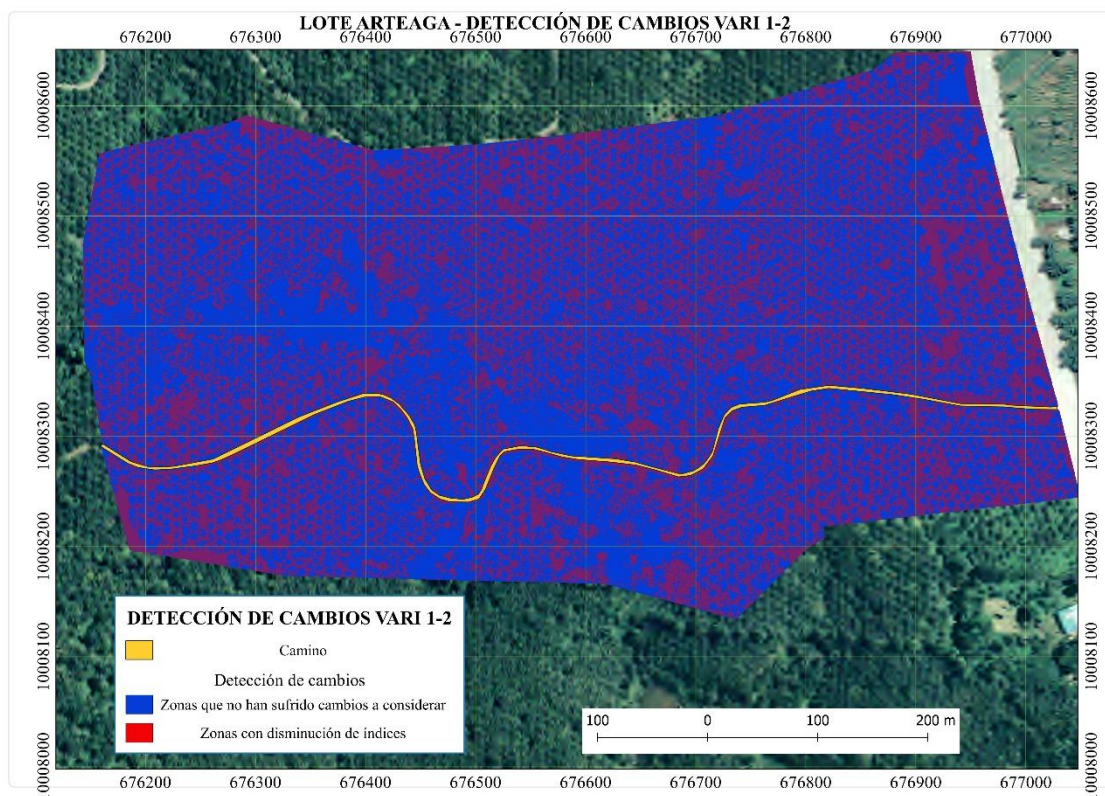
#### **4.2.5 Análisis multitemporal**

##### **4.2.5.1 Detección de cambios**

###### 4.2.5.1.1 Detección de cambios entre VARI 1 y VAR 2

Para la detección de cambios entre el primer y segundo monitoreo mediante la aplicación del índice VARI, se utilizaron un total de 987 *tie points* para analizar las zonas donde existe un decrecimiento de los valores de los índices, como resultado se tiene las zonas representadas por color rojo en la **Figura 109**, como las palmas que presentaron una reducción de valores en los índices a pesar de que como se mencionó anteriormente, el segundo monitoreo presentaba un aumento de valor en los índices debido a las condiciones atmosféricas, por lo tanto se corrobora que la tendencia de la detección de palmas con problemáticas es factible.





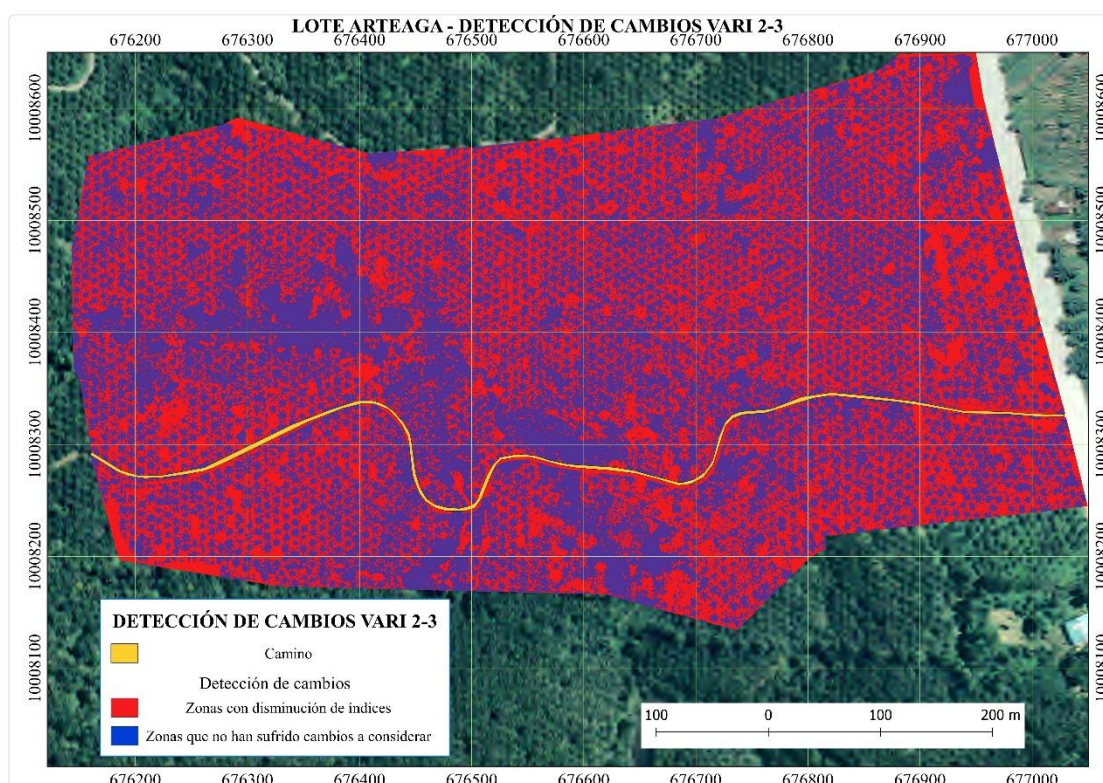
**Figura 109.** Detección de cambios VARI primer y segundo monitoreo

#### 4.2.5.1.2 Detección de cambios entre VARI 2 y VARI 3

Para la detección de cambios entre el segundo y tercer monitoreo mediante la aplicación del índice VARI, se utilizaron un total de 1000 *tie points*. En este caso se puede apreciar que las zonas que presentan un cambio en decrecimiento de índices aumentaron (**Figura 110**), lo que va acorde al avance de las afectaciones presentes en el lote, mientras que los focos de palmas con afectaciones presentan una mayor coloración roja, de manera que se puede deducir que la distribución espacial de las enfermedades de PC y AR se van distribuyendo de manera aleatoria alrededor de dichos puntos de infección. Este resultado se puede corroborar con la información detallada por Vega (2016) que menciona que una planta adulta infectada puede intervenir como fuente de infección para tres a cinco palmas



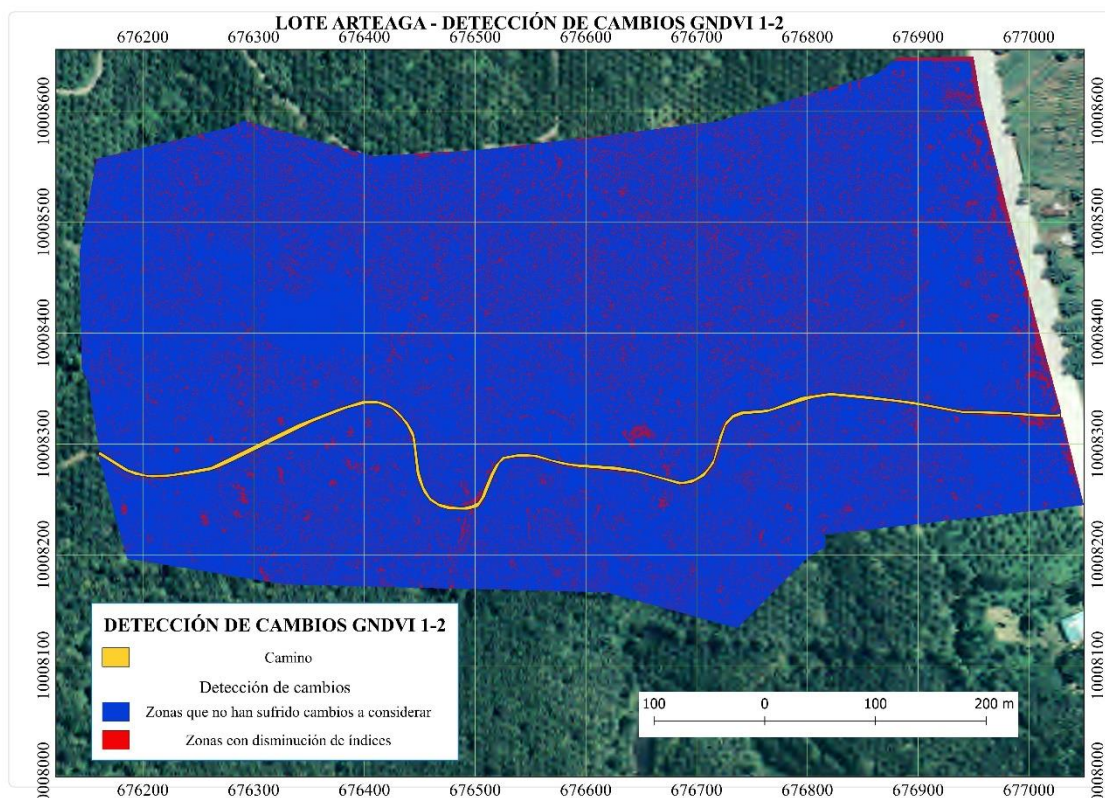
vecinas, que no pueden ser necesariamente contiguas, por lo tanto, deben ser estrictamente eliminadas. En cuanto la PC, la distribución espacial de la enfermedad, como menciona Torres (2010) la severidad de la sintomatología puede variar de manera considerable, aun entre palmas que crecen en proximidad, sin que se llegue a establecer un patrón de distribución espacial establecido.



**Figura 110.** Detección de cambios VARI segundo y tercer monitoreo

#### 4.2.5.1.3 Detección de cambios entre GNDVI 1 y GNDVI 2

Para la detección de cambios entre el primer y segundo monitoreo mediante la aplicación del índice VARI, se utilizaron un total de 945 *tie points*, con este índice no se pudo contrastar lo obtenido anteriormente, pero se marcan los focos de palmas con afectaciones como zonas de decrecimiento del índice (**Figura 111**).

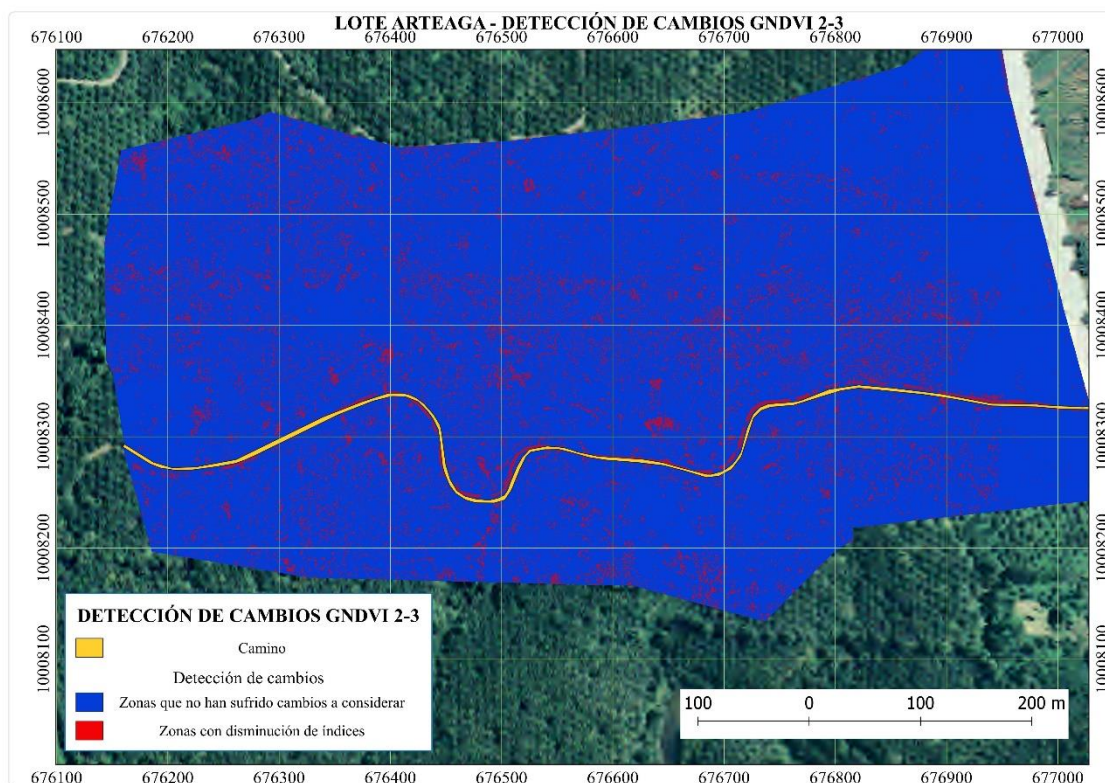


**Figura 111.** Detección de cambios GNDVI primer y segundo monitoreo

#### 4.2.5.1.4 Detección de cambios entre GNDVI 2 y GNDVI 3

Para la detección de cambios entre el segundo y tercer monitoreo mediante la aplicación del índice GNDVI, se utilizaron un total de 1000 *tie points*, de la misma manera que con el índice VARI se puede apreciar como la detección de cambios aumenta la zona de decrecimiento de índices (**Figura 112**), por lo tanto, este índice también permite apreciar el avance de las afectaciones, pero no de una manera tan eficiente como el anterior índice, pues se distingue con mayor énfasis a los focos de afectación, la finalidad de la detección de cambios a más de dicha detección es el análisis del patrón de distribución, por lo que no se visualiza como la mejor opción para el objetivo propuesto.





**Figura 112.** Detección de cambios GNDVI segundo y tercer monitoreo

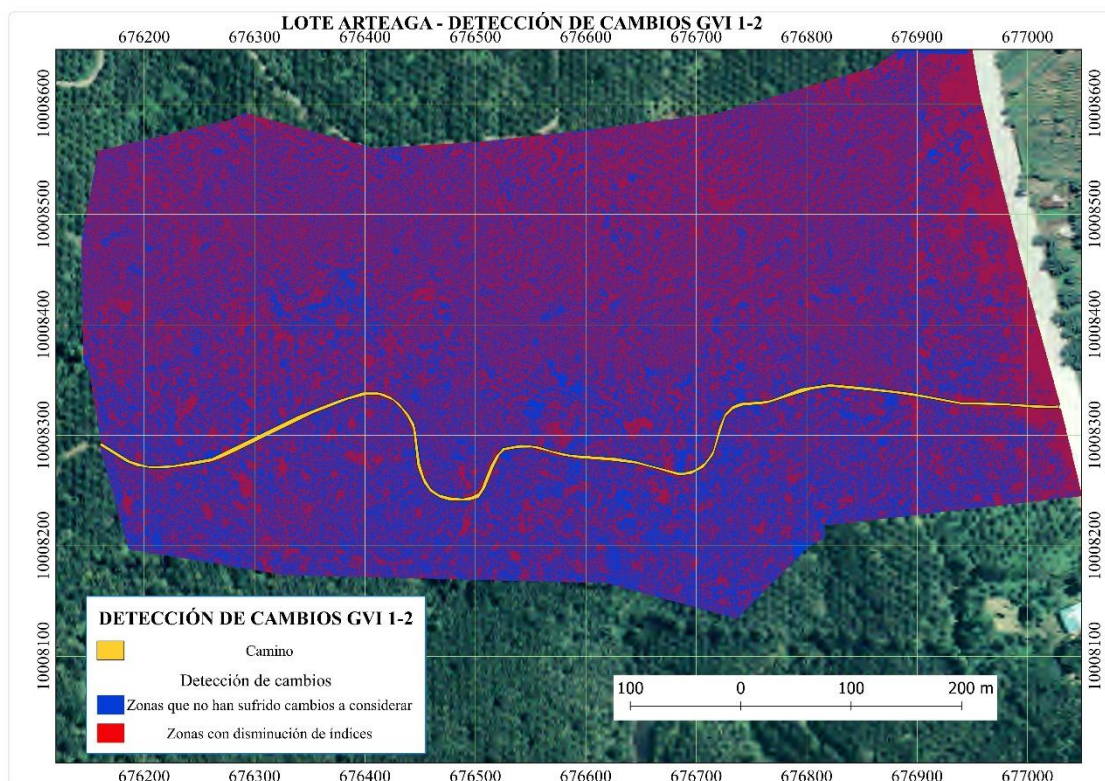
#### 4.2.5.1.5 Detección de cambios entre GVI 1 y GVI 2

Para la detección de cambios entre el segundo y tercer monitoreo mediante la aplicación del índice GVI, se utilizaron un total de 945 *tie points*, con este índice se tiene un resultado similar al VARI, se identificaron focos de afectación y zonas con decrecimiento de valores, por lo que se corroboró el primer resultado (**Figura 113**).

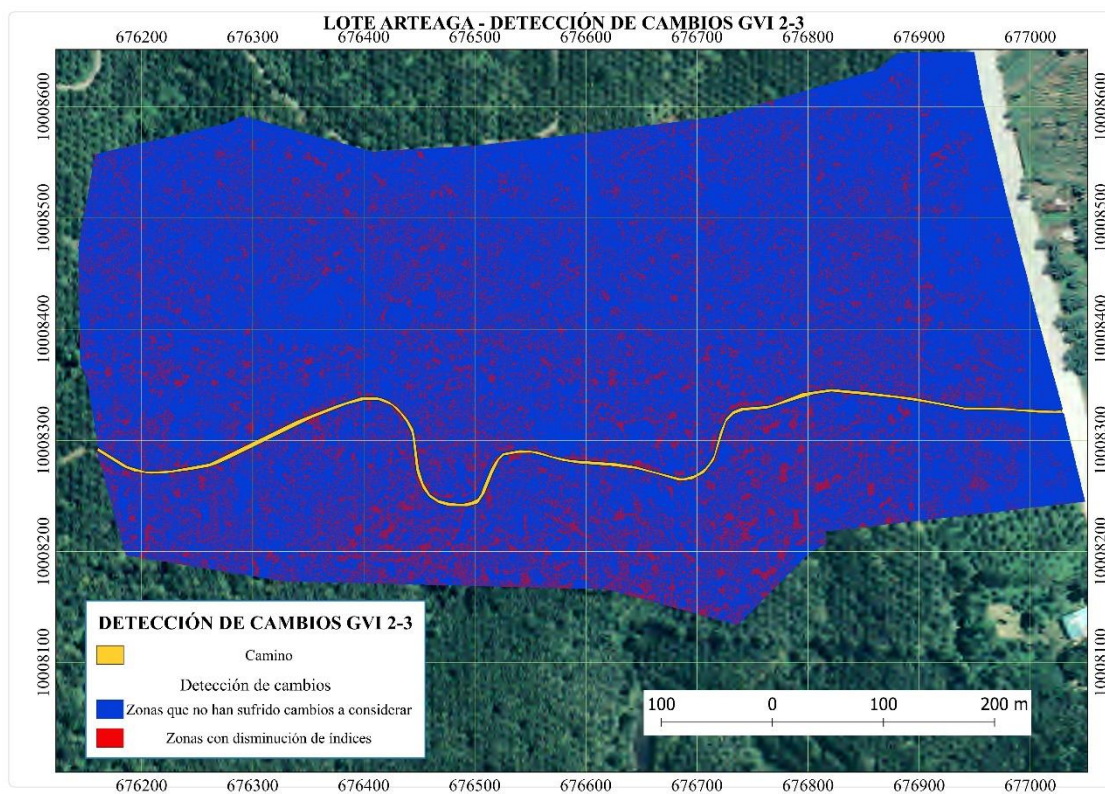
#### 4.2.5.1.6 Detección de cambios entre GVI 2 y GVI 3

Para la detección de cambios entre el segundo y tercer monitoreo mediante la aplicación del índice GVI, se utilizaron un total de 500 *tie points*, en esta comparación se marcan como cambios ciertos focos de afectaciones respecto al anterior resultado de la

detección de cambios con GVI (*Figura 114*), por lo que es necesario constatar con la otra metodología propuesta para el análisis multitemporal.



*Figura 113.* Detección de cambios GVI primer y segundo monitoreo



**Figura 114.** Detección de cambios GVI segundo y tercer monitoreo

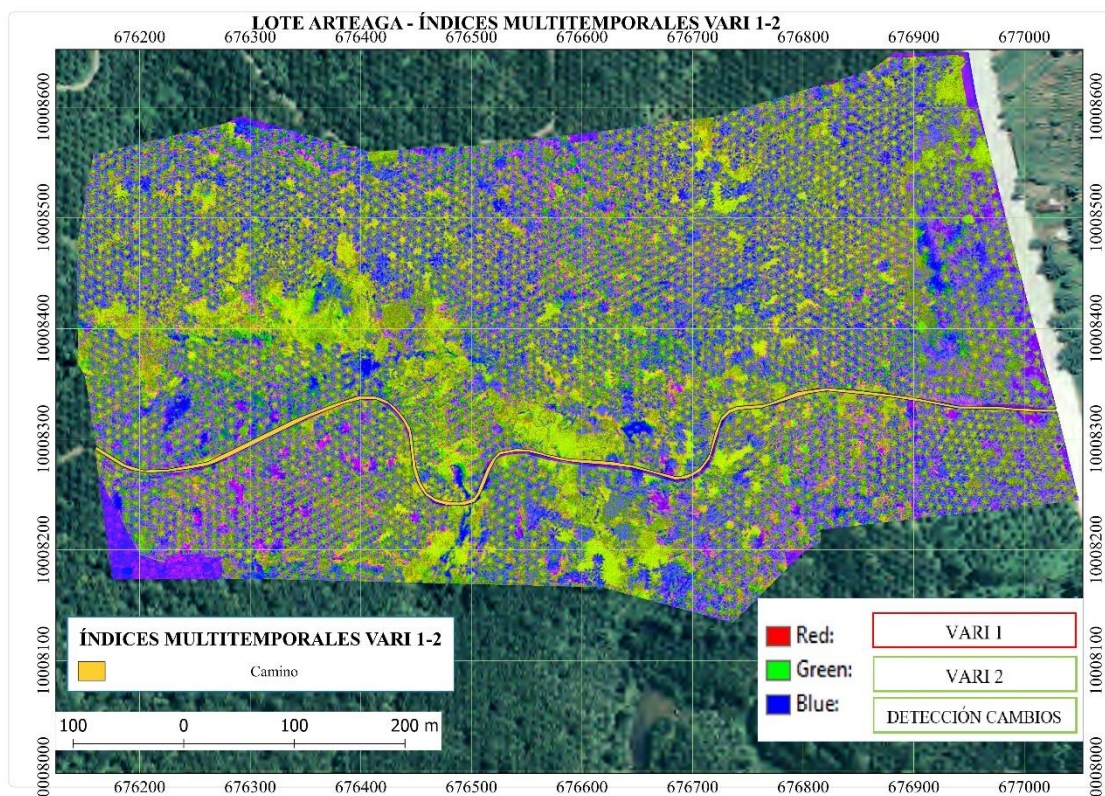
#### 4.2.6 Índices multitemporales

Para corroborar los resultados anteriores se procede a utilizar la metodología de índices multitemporales que da como resultado lo que a continuación se detalla.

##### 4.2.6.1 Índices multitemporales VARI 1 y VARI 2

Para corroborar los resultados anteriores se procede a utilizar la metodología de índices multitemporales, de manera que las zonas o cultivos que poseen una coloración azul y violeta son sitios donde han existido decrecimiento de valores de los índices, por lo que en este caso coincide con el resultado obtenido y descrito con la detección de cambios para este par de índices generados (**Figura 115**).

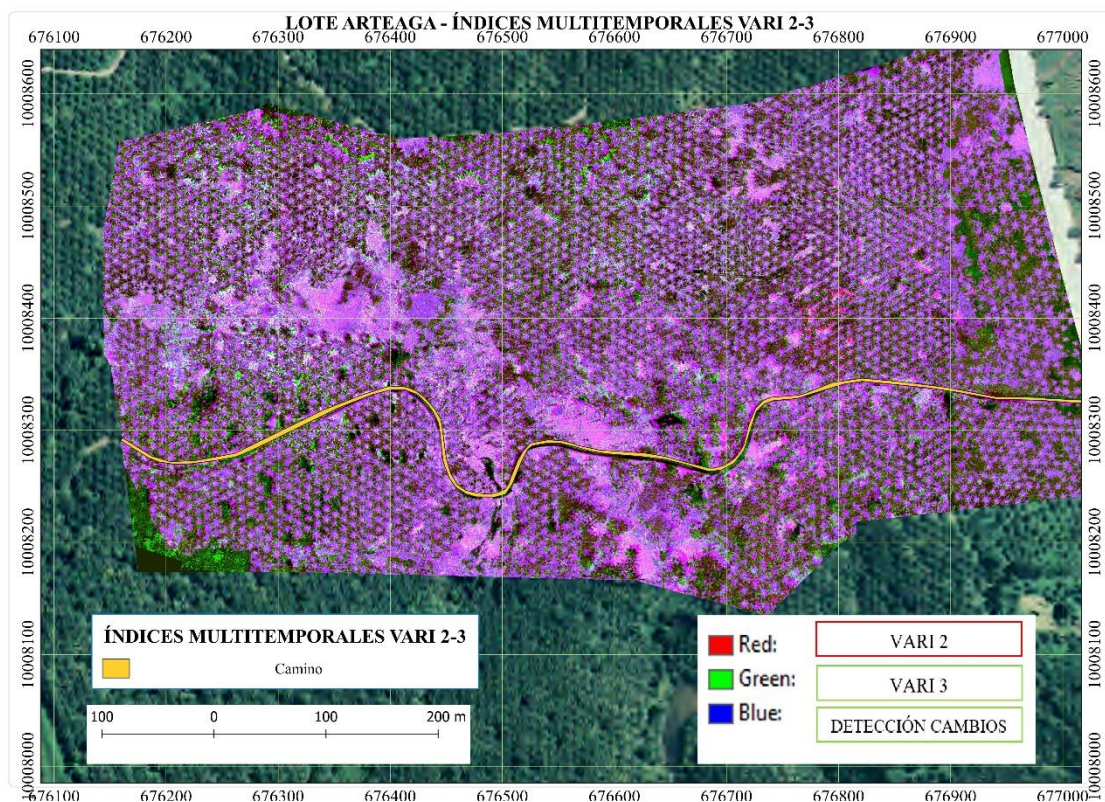




**Figura 115.** Índices multitemporales VARI 1 y VARI 2

#### 4.2.6.2. Índices multitemporales VARI 2 y VARI 3

Para este par de índices se obtuvo un resultado similar al obtenido a partir de la detección de cambios, por cual se contrasta el análisis realizado. En esta imagen se aprecia que las zonas con una coloración oscura son las que presentan cambios en cuanto a decrecimiento de valores del índice examinado (**Figura 116**).



**Figura 116.** Índices multitemporales VARI 2 y VARI 3

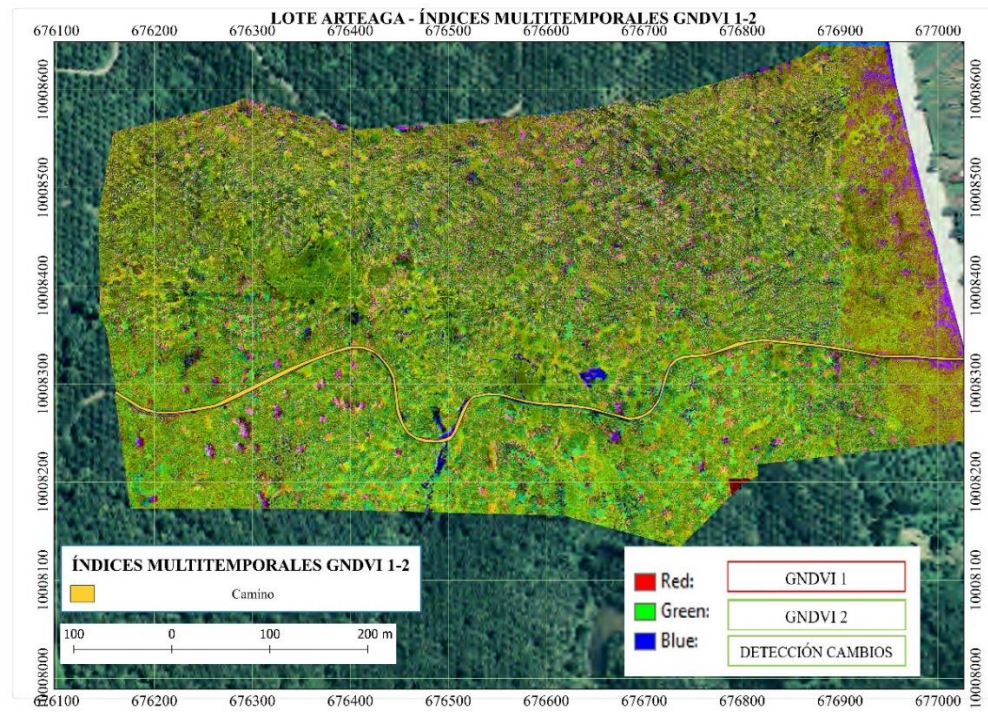
#### 4.2.6.3. Índices multitemporales GNDVI 1 y GNDVI 2

Con el índice GNDVI se mantiene la tendencia de que se detectan focos de afectación más que zonas de decrecimiento de índices al igual que la metodología de detección de cambios, se aprecia que las palmas que tienen un color oscuro y violeta son las que presentan afectaciones (**Figura 117**).

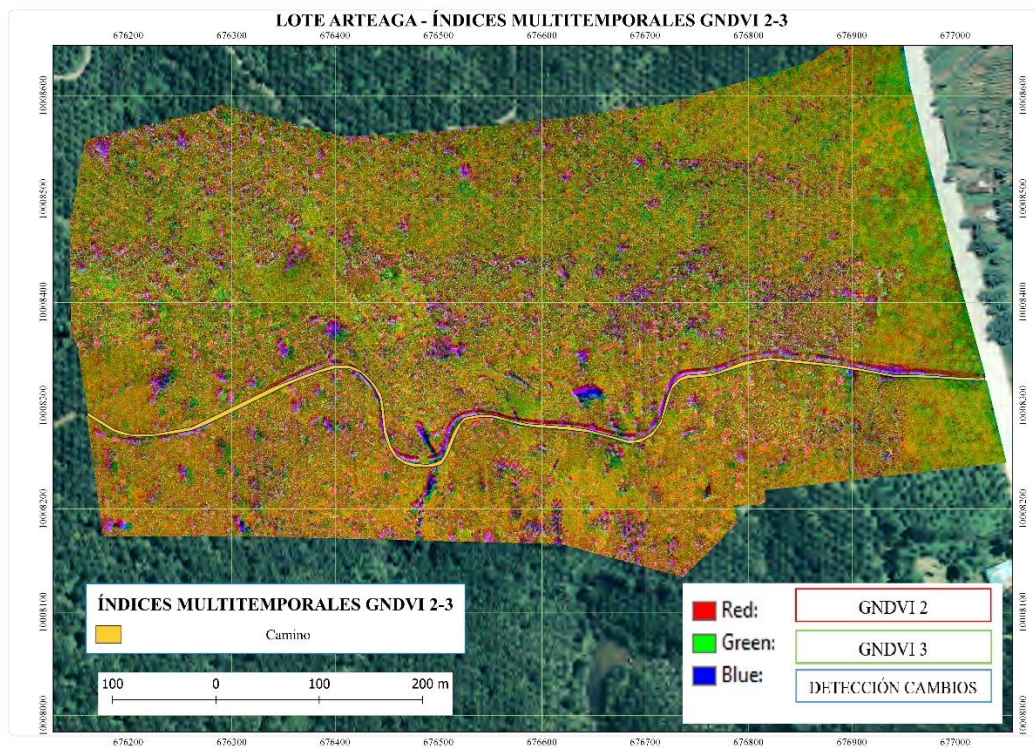
#### 4.2.6.4. Índices multitemporales GNDVI 2 y GNDVI 3

Para el segundo y tercer monitoreo obtenido con el índice GNDVI se puede observar que existe un aumento de las zonas de decrecimiento de los valores del índice, por tanto, tiene concordancia con el avance de las enfermedades en el lote, en esta imagen dichas zonas están representadas por un color violeta oscuro (**Figura 118**).





*Figura 117.* Índices multitemporales GNDVI 1 y GNDVI 2

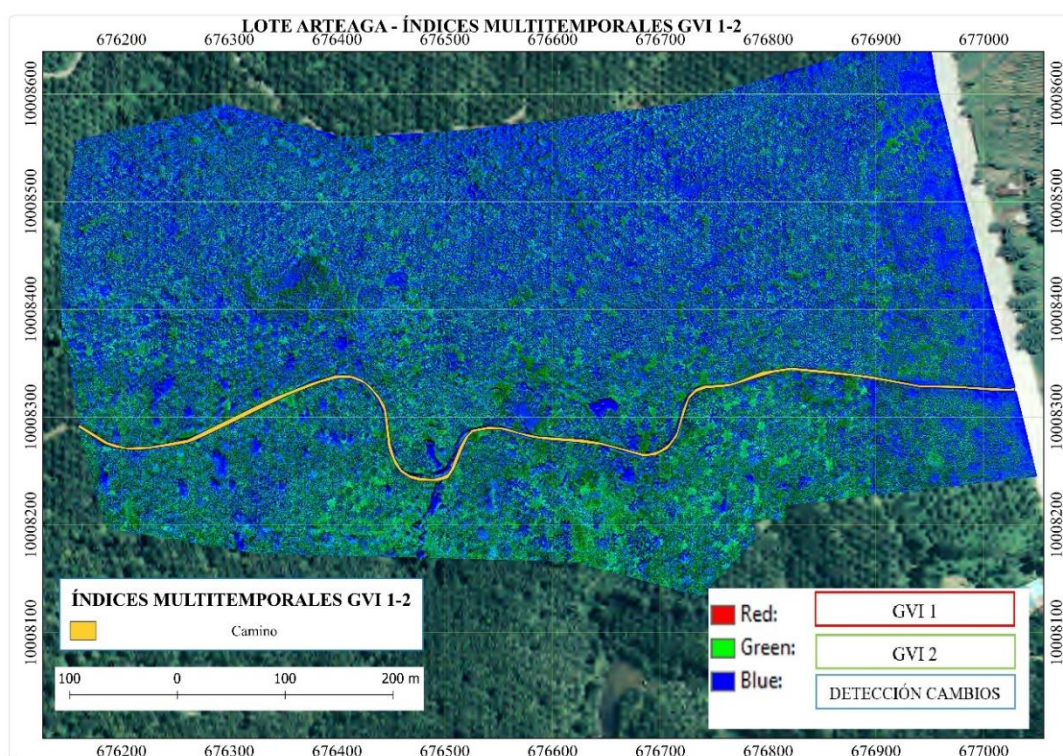


*Figura 118.* Índices multitemporales GNDVI 2 y GNDVI 3



#### 4.2.6.5. Índices multitemporales GVI 1 y GVI 2

Con el índice GVI en el primer y segundo monitoreo, se tiene que las zonas con tonos azules oscuros son zonas de decrecimiento de valores del índice, se corrobora dicho resultado con la detección de cambios analizada anteriormente (**Figura 119**).

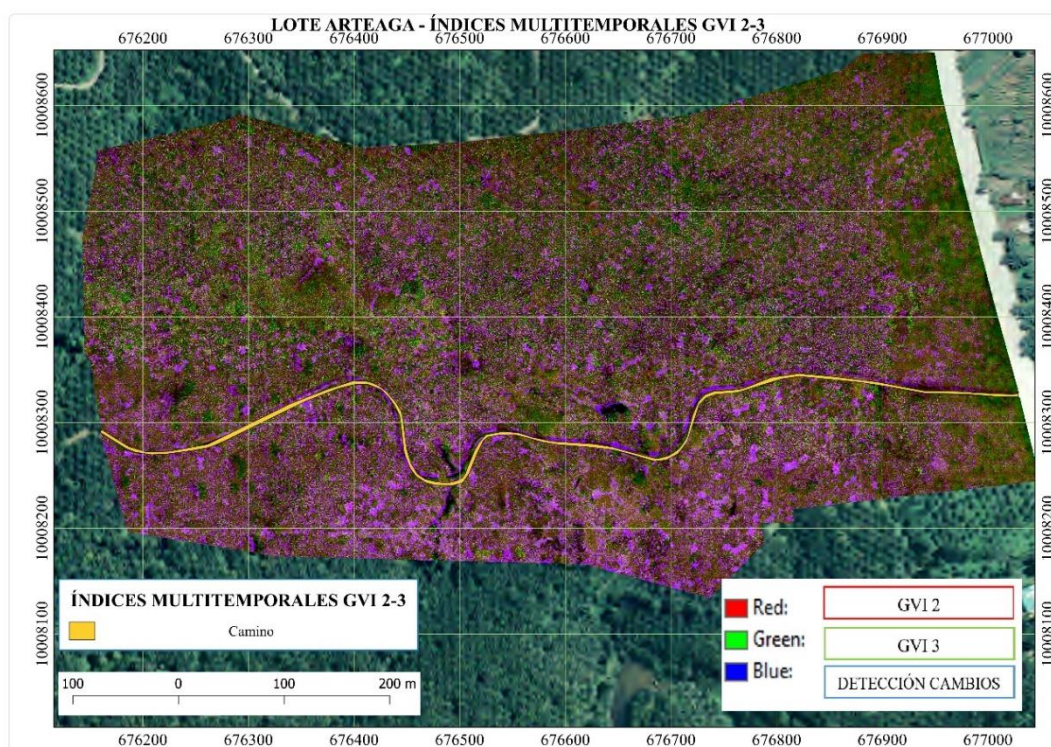


**Figura 119.** Índices multitemporales GVI 1 y GVI 2

#### 4.2.6.6. Índices multitemporales GVI 2 y GVI 3

Con el índice GVI en el segundo y tercer monitoreo, se tiene que las zonas con tonos violetas oscuros son zonas de decrecimiento de valores del índice, en relación con el anterior resultado las zonas alrededor de los focos de afectación aumentaron (**Figura 120**).

Una vez analizados todos los resultados se tiene que el índice que mejor se adapta para realizar un análisis multitemporal es el VARI, debido a que se apega a la realidad de lo visualizado en campo en los distintos monitoreos, de esta manera se planteó realizar una validación de las zonas de avance de la afectación.



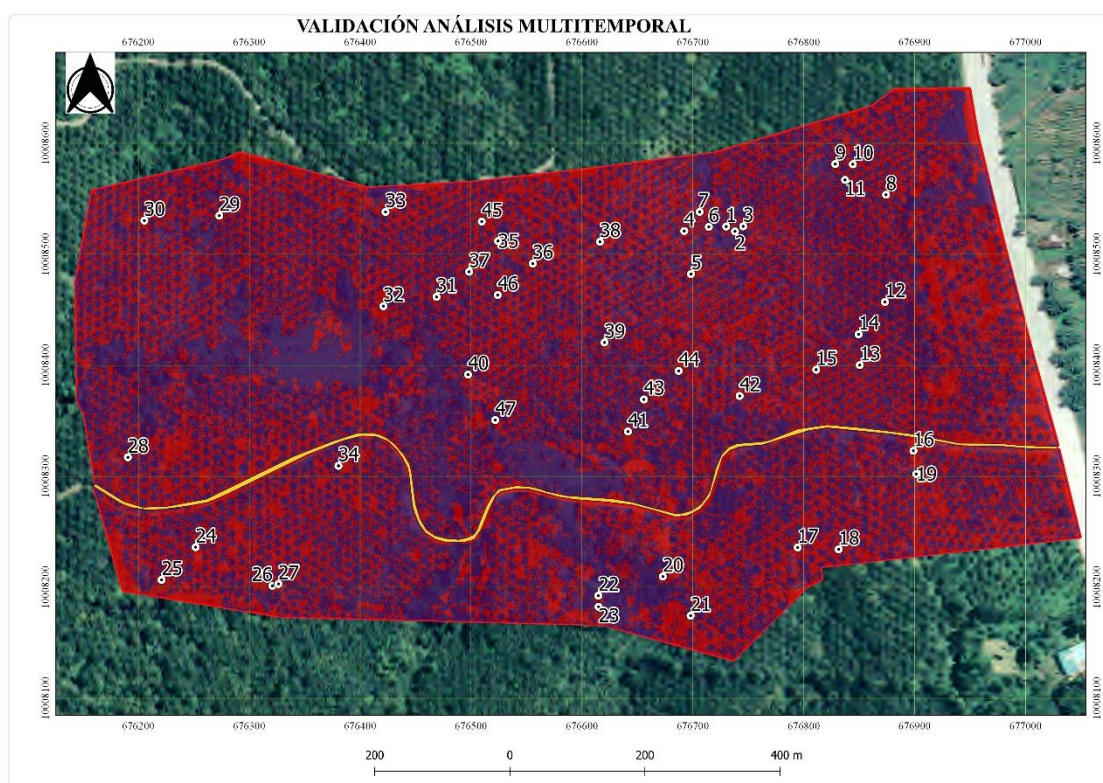
**Figura 120.** Índices multitemporales GVI 2 y GVI 3

#### 4.2.7 Validación del análisis multitemporal

Para validar el análisis multitemporal se procedió a examinar un total de 47 muestras a partir de los resultados generados de zonas con decrecimiento de índices. Se tomaron en cuenta en base a lo mencionado con anterioridad, al índice VARI como base para generar los puntos de muestreo (**Figura 121**). Se obtuvieron las coordenadas de las palmas consideradas y se realizó una inspección en campo en el mes de agosto, en la **Tabla 51** se detalla las



estadísticas de los puntos de validación obtenidos. Se puede apreciar que todos los monitoreos presentaron una media bajo la línea base establecida. De los 47 puntos analizados solo dos mostraron tener otro tipo de afectación que se debe considerar al momento de analizar los índices de vegetación, pues pueden mostrar un comportamiento similar, como es la problemática del Boro, en los demás puntos se constató que alrededor de los focos identificados correctamente existen más plantas distribuidas al azar con afectación con todo tipo de severidad, por lo tanto, mediante la metodología aplicada no se pudo apreciar un patrón de distribución espacial específico. Por el contrario, se constató un avance al azar de las problemáticas, dilema que aún no se puede esclarecer, por falta de identificación de los factores que dan lugar a la PC, y por ende la relación que tiene con el AR.



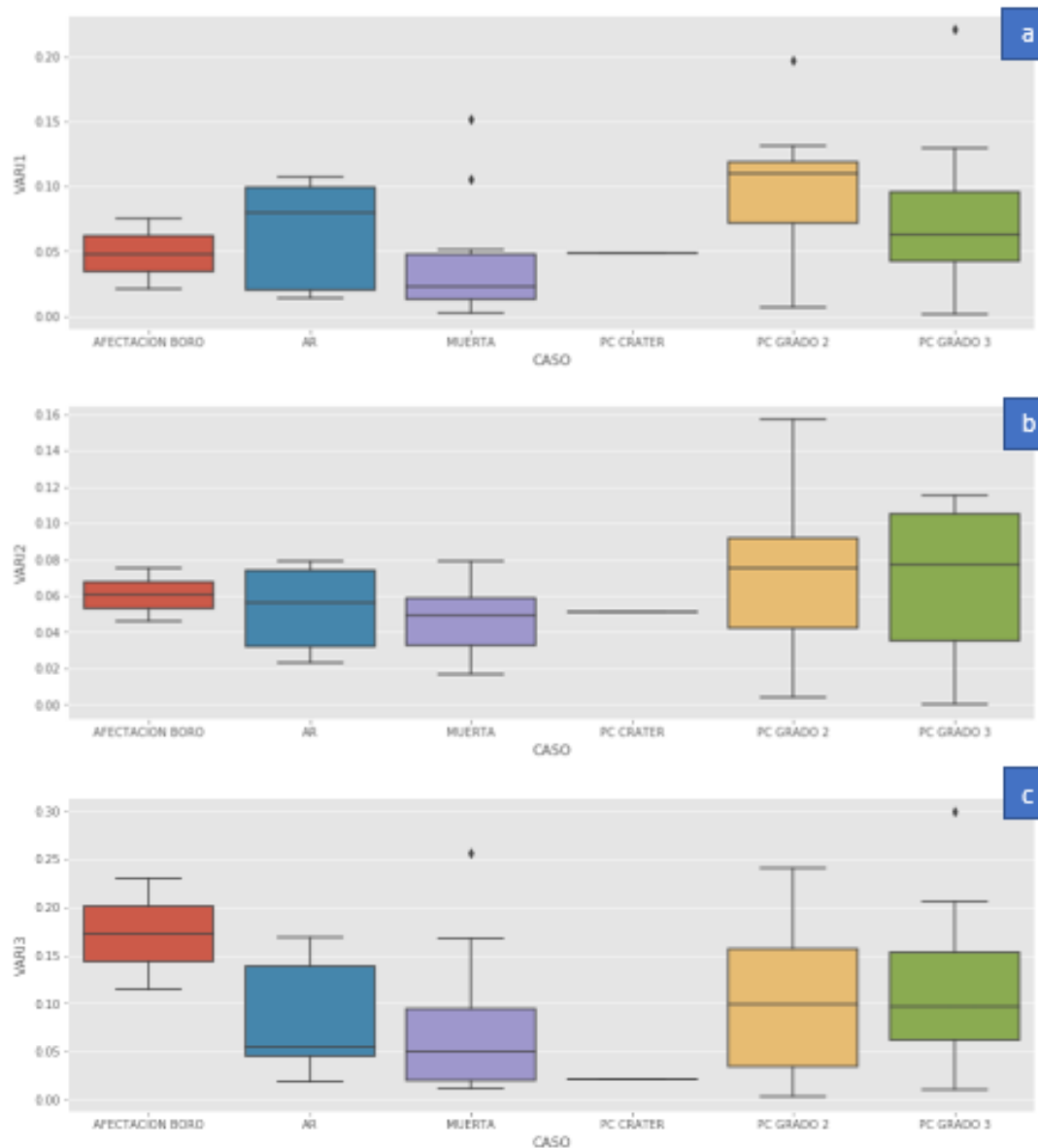
**Figura 121.** Ubicación de los puntos de muestreo para la validación del análisis multitemporal

**Tabla 51***Resumen estadístico de los puntos de validación*

	<b>VARI1</b>	<b>VARI2</b>	<b>VARI3</b>	<b>GNDVI1</b>	<b>GNDVI2</b>	<b>GNDVI3</b>	<b>GVI1</b>	<b>GVI2</b>	<b>GVI3</b>
<b>Media</b>	0.069	0.060	0.097	0.425	0.578	0.462	2.558	3.878	2.556
<b>Desv. Estandar</b>	0.051	0.035	0.075	0.052	0.045	0.054	0.340	0.527	0.626
<b>Índice mínimo</b>	0.001	0.000	0.003	0.305	0.490	0.280	1.920	3.010	1.020
<b>25%</b>	0.025	0.036	0.033	0.394	0.540	0.428	2.345	3.438	2.165
<b>50%</b>	0.060	0.059	0.080	0.432	0.580	0.470	2.510	3.730	2.610
<b>75%</b>	0.108	0.080	0.147	0.458	0.613	0.500	2.778	4.353	3.085
<b>Índice máximo</b>	0.221	0.157	0.299	0.545	0.660	0.550	3.350	5.030	3.600

Fuente: Autor

A continuación se detallan diagramas de cajas (*Figura 122, Figura 123 y Figura 124*) según cada uno de los índices obtenidos en los distintos monitoreos respecto a los puntos de validación, donde se presenta la media de las distintas afectaciones y sus correspondientes grados de severidad, lo cual permite concluir que el análisis multitemporal muestra efectivamente el avance de la problemática de manera aleatoria alrededor de los focos de infección, pues se obtuvo 95.74 % de aciertos en los puntos determinados a partir de las metodologías analizadas.

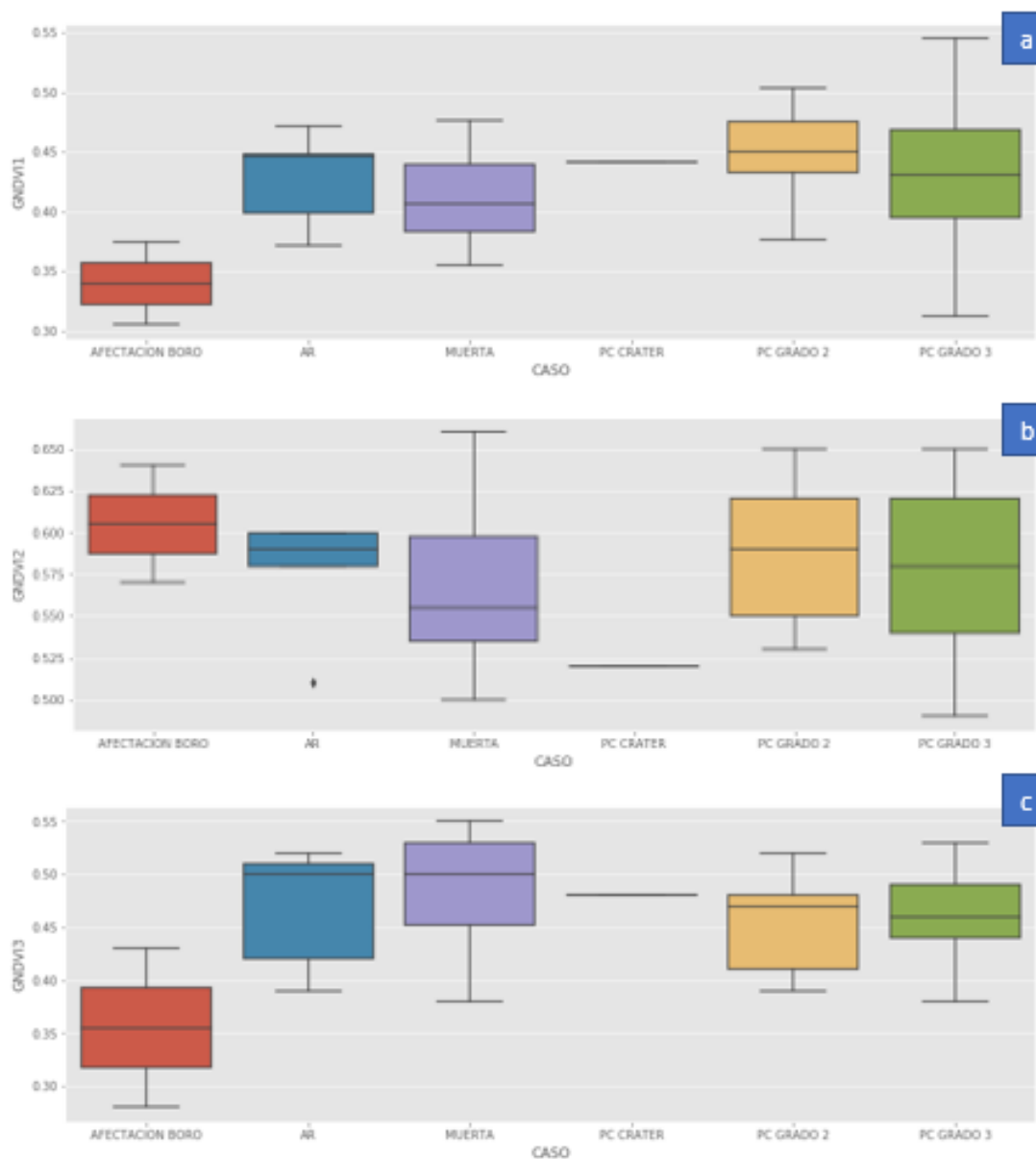


**Figura 122.** Diagrama de cajas: a) VARI primer monitoreo, b) VARI segundo monitoreo, c) VARI tercer monitoreo para los puntos de afectación establecidos

Con el índice VARI se evidencia que conforme avanza el grado de severidad de la afectación por PC disminuye el índice en cada uno de los monitoreos realizados, además de que el AR tiende a poseer un valor inferior a los grados de afectación dos y tres de la PC. Esta



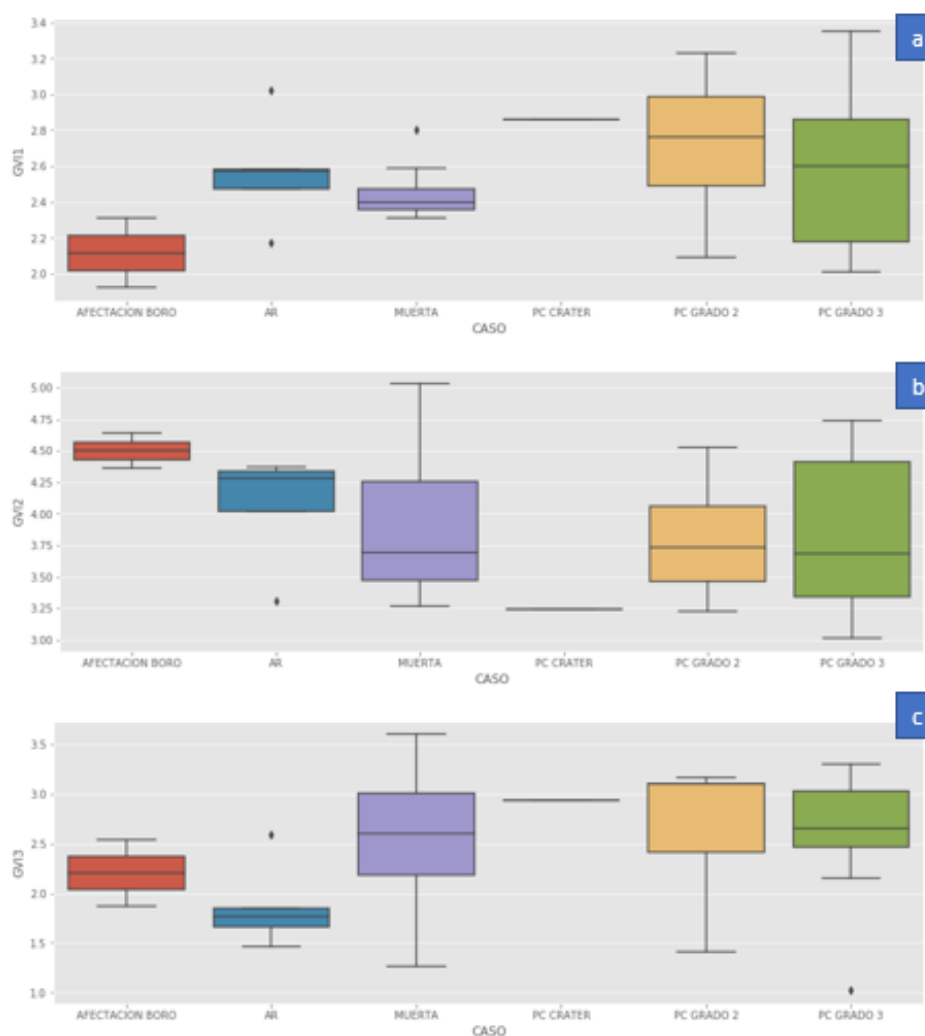
tendencia se afirma de cierta manera tras la aplicación del índice GNDVI como se visualiza a continuación en la **Figura 123**.



**Figura 123.** Diagrama de cajas: a) GNDVI primer monitoreo, b) GNDVI segundo monitoreo, c) GNDVI tercer monitoreo para los puntos de afectación establecidos

Con el índice GVI se tiene la misma tendencia obtenida a partir de los índices anteriores, cabe recalcar que la palma con afectación de PC tipo cráter presenta cierta discordancia entre

monitores, pues se posee valores altos respecto a las palmas que están muertas, en anteriores discusiones se mencionaba la posibilidad de la presencia de maleza en las palmas o también de errores acarreados por la base del cultivo que presenta maleza y es visible al monitoreo realizado, ya que la biomasa de las hojas de las palmas han desaparecido.



**Figura 124.** Diagrama de cajas: a) GVI primer monitoreo, b) GVI segundo monitoreo, c) GVI tercer monitoreo para los puntos de afectación establecidos

Se detalla a continuación los valores base para la pronta identificación de focos de afectación de PC y AR y de los grados de severidad que fueron posibles determinar, a partir de todos los índices generados (*Tabla 52*).

**Tabla 52**

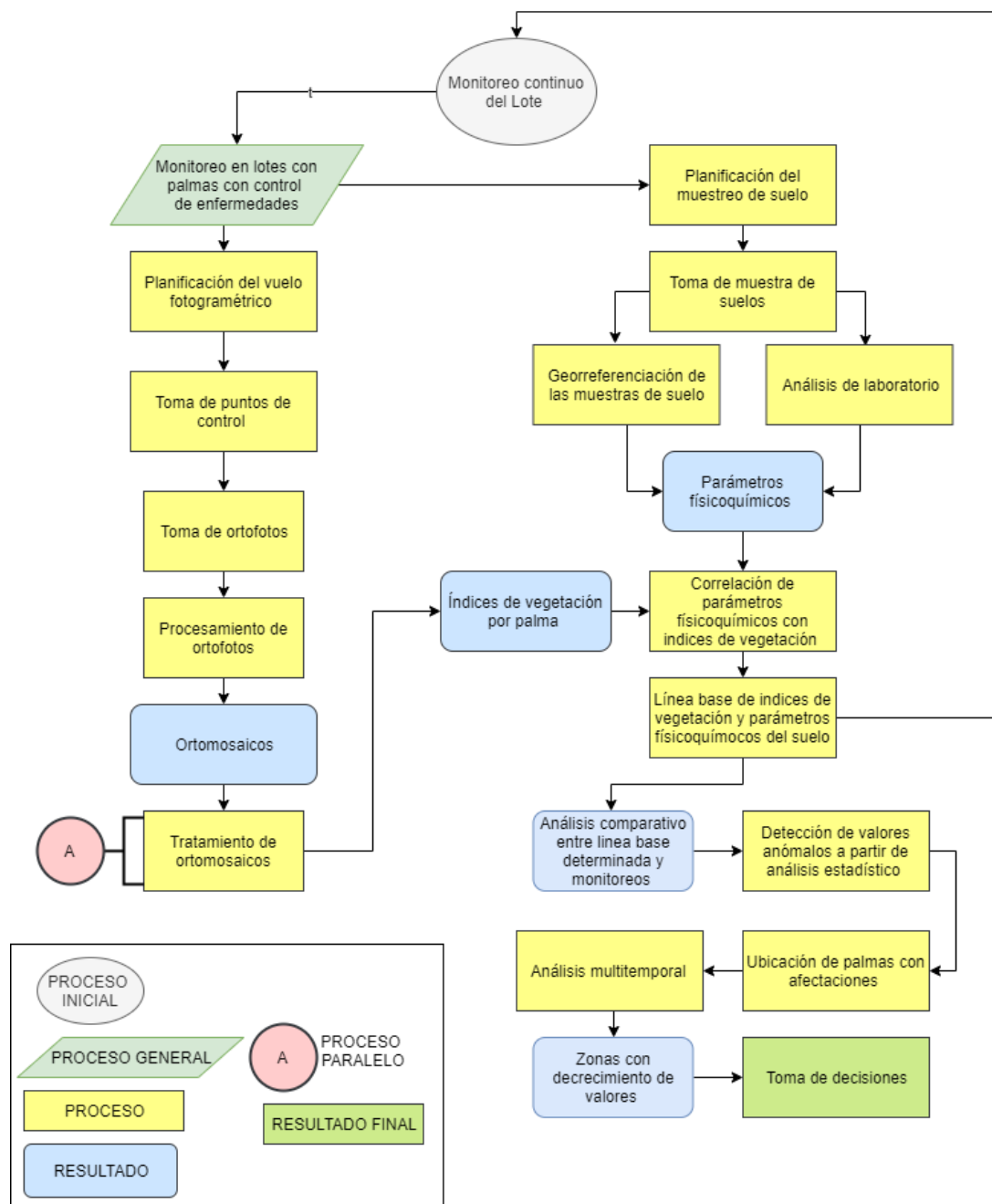
*Valores base según índices de vegetación propuestos para la identificación de afectaciones*

	<b>VARI</b>	<b>GNDVI</b>	<b>GVI</b>
<b>LÍNEA BASE</b>	0.183	0.667	5.214
<b>AFECTACION BORO</b>	0.094	0.432	2.938
<b>AR</b>	0.067	0.490	2.831
<b>PC GRADO 1 y 2</b>	0.091	0.499	3.090
<b>PC GRADO 3</b>	0.087	0.487	2.997
<b>PC CRÁTER</b>	0.041	0.479	3.014
<b>MUERTE POR PC</b>	0.053	0.488	2.980

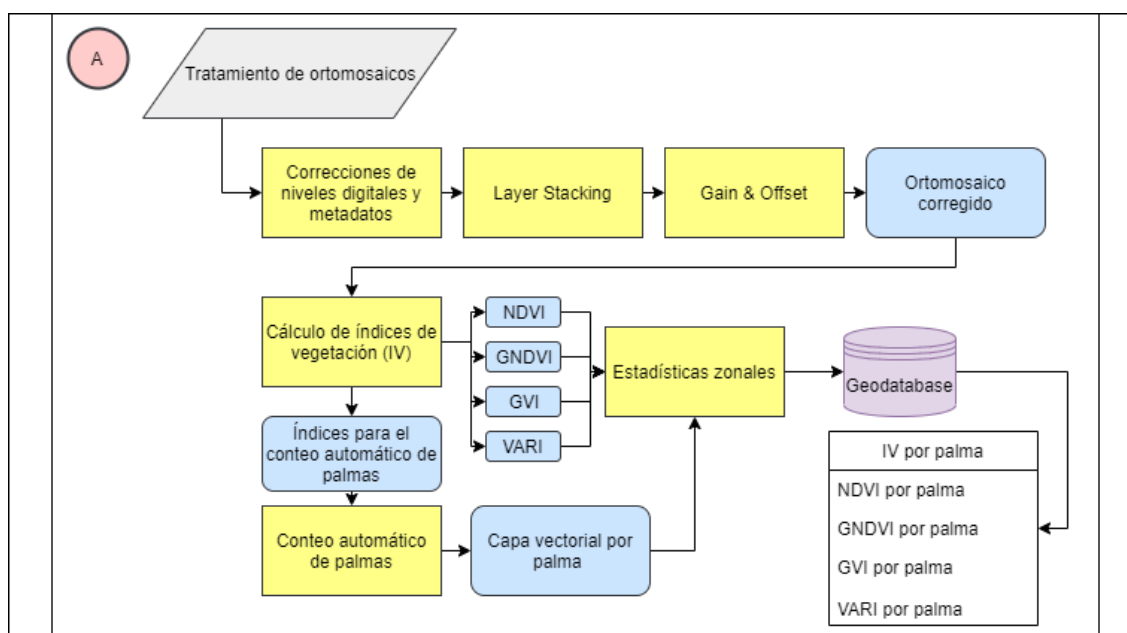
#### **4.2.8 Propuesta metodológica para la pronta detección de PC y AR**

La propuesta metodológica se basa en la metodología descrita en esta investigación, como se ha detallado en la discusión es necesario considerar el análisis de más variables consideradas por el palmicultor como posibles causantes de la problemática, es así que se plantea considerar el análisis de parámetros fisicoquímicos del suelo para correlacionar con los resultados obtenidos a partir de la tecnología geoespacial, se detalla a continuación un modelo cartográfico de la propuesta a seguir para lograr determinar una pronta detección de problemáticas en la palma aceitera (*Figura 125*), se distingue un proceso aparte determinado para el tratamiento de imágenes (*Figura 126*) que tiene como finalidad establecer una *geodatabase* que contenga una entidad de tipo vectorial correspondiente a cada palma presente en la zona de estudio, de manera que a partir de la estadística zonal se hereden los valores de los índices determinados por cada monitoreo continuo a realizar, cabe mencionar que se deben realizar vuelos semanales si es

posible para el palmicultor para el desarrollo de datos en todo tipo de condición que permita analizar de una mejor manera los resultados obtenidos en palmas que posean índices bajos. Es importante tener en cuenta que es un proceso cíclico, el palmicultor junto con la ayuda de un analista de la tecnología geoespacial deben coordinar y establecer los valores considerados como línea base a partir de la experticia que pueda brindar el equipo multidisciplinario, una vez establecidos dichos valores, se debe continuar con el monitoreo de la zona de estudio y analizar los datos obtenidos en la estadística zonal con la finalidad de apreciar mediante el uso de estadística descriptiva los valores atípicos presentes y examinar si persiste esta tendencia a lo largo del tiempo.



**Figura 125.** Propuesta metodológica para la generación de la línea base para la pronta detección de PC y AR



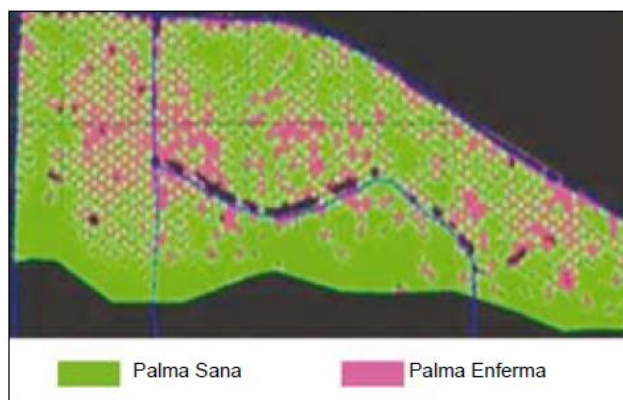
**Figura 126.** Proceso paralelo correspondiente al tratamiento de ortomosaicos

Es necesario complementar la metodología propuesta con la ejecución de censos fitosanitarios con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos a partir de la tecnología geoespacial y dirigir la toma de decisiones hacia la pronta detección de afectaciones.

Se han realizado investigaciones a través del uso de imágenes hiperespectrales para la detección de la afectación *Ganoderma* en plantaciones con palma aceitera mediante la aplicación de técnicas de interpolación lagrangiana, *Red Edge* y el cálculo de distintos índices de vegetación, de manera que se asocia el estrés de las plantas con la absorción de clorofila en reflectancia, dicho estudio es realizado por Shafri & Hamdan, (2009), ver **Figura 127**, como se aprecia en Araque & Jiménez (2009), dichos autores mencionan que el factor económico es de gran importancia para la adquisición de imágenes de alta resolución, además de costos adicionales para el almacenamiento por volumen de datos, actualización de imágenes y tiempo de procesamiento, por lo tanto, se concluye que la metodología desarrollada en este proyecto, trata



de ser una solución accesible para el sector palmicultor del país, ya que una de las ventajas de la agricultura de precisión a partir del manejo de drones supone la reducción de costos.



**Figura 127.** Mapa de clasificación de palma sana y enferma, por técnica de interpolación Lagrangiana a partir de una imagen hiperespectral.

Fuente: (Shafri & Hamdan, 2009)

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

- El desarrollo de la propuesta metodológica para la generación de la línea base para la pronta detección de enfermedades de la palma aceitera permite identificar focos de infección con dichas afectaciones, de manera que se obtuvieron índices de vegetación por palma y se identificaron valores atípicos, es decir, valores bajo la línea base establecida, a partir de estadística comparativa entre monitoreos. Es así como se identificaron posibles casos de infección, ya que estas afectaciones al momento del contagio no son sintomáticas como los focos que son de fácil detección, por ello se realizaría una pronta distinción de palmas mediante un posible decrecimiento del índice obtenido.
- Se obtuvieron ortomosaicos de las dos zonas de estudio consideradas a partir de sensores de tipo RGB-RGNIR (MAVIC) y RGB-BGNIR (MATRICE) con la finalidad de establecer la línea base y diferenciar entre especies de palmas presentes en el lote CIPAL; por otro lado, para el estudio del lote Arteaga se logró afirmar que la tecnología geoespacial a partir del sensor RGB-BGNIR es factible para discriminar la problemática.
- A partir de los índices NDVI, GNDVI, GVI generados mediante el uso de sensores RGB-RGNIR (MAVIC) y RGB-BGNIR (MATRICE) se pudo aceptar la hipótesis nula planteada, que consistía en la viabilidad de la aplicación de la tecnología geoespacial para determinar diferencias significativas estadísticamente y poder diversificar las especies de palma

correspondientes al estado fenológico de aproximadamente 20 años (INIAP, CIRAD, ASD) y del estado fenológico correspondiente a 4 años (Taisha, UNIPALMA, Amazon).

- Se logró determinar los valores para la línea base de palmas sin afectación según cada índice de vegetación propuesto. Dichos valores fueron obtenidos para cada sensor multiespectral utilizado. En el caso de RGNIR, los valores de NDVI para cada material presente en el CIPAL se establecen en la **Tabla 16.**, los valores varían de 0.737 a 0.683, se puede concluir que los valores más bajos corresponden al estado fenológico 302. Para el índice GNDVI en cambio se obtuvieron dos líneas base de valores (**Tabla 19**) según las condiciones ambientales en las que se realizaron los monitoreos, ya que al agrupar los datos obtenidos no se obtuvo una distribución normal como se aprecia en la **Figura 46 (b, c, d, e)**. De la misma manera, se mantiene la tendencia en el índice GVI, el CIRAD y ASD tiene dos líneas bases (**Tabla 23, Figura 47 y Figura 48**). Con el sensor BGNIR en cambio se obtuvieron dos líneas base según las condiciones para los índices GNDVI y GVI, de la misma manera que con lo ocurrido con el sensor RGNIR no se pudo obtener una distribución normal al agrupar los valores de los dos monitoreos, a excepción del material INIAP, que sí presentó dicha distribución (**Figura 47 y Figura 53**). Al momento de utilizar el índice VARI se obtuvieron resultados similares en ambos monitoreos y se pudo agrupar los datos (**Figura 58**).
- La metodología estadística establecida que consiste en la aplicación de la prueba ADEVA para conocer la aplicabilidad de la tecnología geoespacial para detectar diferencias estadísticamente significativas fue satisfactoria, ya que se corroboraron los mismos resultados a partir de dos sensores distintos y de distintos monitoreos realizados. La prueba

LSD de Fisher permitió diferenciar las distintas variedades de palma aceitera presentes en los lotes, por lo que se puede dar una gran ayuda al sector palmicultor para evitar problemáticas de tipo ético y económico, en cuanto a la enajenación de especies INIAP en el mercado local.

- En la prueba ADEVA realizada a partir del sensor RGNIR, permitió conocer que es factible diferenciar los materiales de palma correspondiente al estado fenológico 305 (15 años). En todos los análisis de varianza se obtuvo significancia estadística ( $p \leq 0.005$ ) y en la comparación de medias de los tratamientos, se tiene que todos los materiales difieren. Se tiene el mismo resultado con el estado 301, por lo que se concluye que es factible aplicar la tecnología geoespacial. Con el sensor BGNIR para el estado 305 se tiene ciertas particularidades, pues con el índice GNDVI y GVI se tiene el mismo resultado que con el sensor RGNIR, mientras que al utilizar el índice VARI solo se diferencia el material INIAP. Dicho resultado en el segundo monitoreo se mantiene con los índices GNDVI y GVI, con el VARI se diferencia solo el material ASD, lo que permite llegar a la conclusión de que con el sensor BGNIR se tiene la factibilidad de diferenciar el material INIAP de los demás.
- En cuanto al estado fenológico 301 solo se diferencia UNIPALMA de los demás materiales con GNDVI y GVI, mientras que con VARI únicamente se diferencia al material Amazon, en el primer monitoreo. En el segundo vuelo realizado se diferencia UNIPALMA de Taisha con todos los índices propuestos, por lo que se concluye la factibilidad para diferenciar UNIPALMA.
- En la detección de enfermedades se concluye que existe la factibilidad de emplear la tecnología geoespacial, pues se aprecia en la **Tabla 52** que efectivamente las palmas que

poseen valores bajos en comparación a los valores de la línea base establecida, además de que visualmente con los raster obtenidos a partir de los índices de vegetación propuestos se puede detectar palmas con posible afectación (ver **Figura 103** a **Figura 108**). Pero se debe tener en cuenta que se detectan focos de afectaciones que en su materia poseen grados de severidad avanzados.

- Se plantearon dos metodologías para realizar una evaluación multitemporal del comportamiento de las afectaciones de PC y AR en la zona de estudio, que resultaron admisibles para detectar cambios en el esparcimiento de las enfermedades estudiadas, en el caso de la detección de cambios se generaron zonas de decrecimiento de valores que permiten conocer palmas que han bajado el nivel de vigorosidad respecto al anterior monitoreo. En la discusión se determinó que el índice que mejor se acopla para realizar dicho método es el VARI. Para corroborar los resultados obtenidos se aplicó la metodología de índices multitemporales que permitió apreciar resultados similares y afianzar las zonas que se determinaron como avance de la problemática, de manera que se dedujo que la distribución de la problemática en estudio es de tipo aleatoria alrededor de los focos de infección identificados, dicho resultado se pudo contrastar con afirmaciones realizadas por varios autores que llegaron a la misma conclusión.
- Ante las emergencias fitosanitarias de la Zona Occidental palmera colombiana, se ha planteado estudiar la evolución espaciotemporal del avance de la PC, para determinar el nivel de incidencia por plantación y por lote, así como el análisis de la propagación y focos de la enfermedad. En dicho estudio, se definieron tres fases, la primera que consistió en el análisis espacial y temporal de la PC de la especie *Elaeis guineensis* Jacq.,

en grandes, medianos y pequeños productores asociados. La segunda que correspondió a la georreferenciación de 5.000 hectáreas de pequeños productores y la tercera en la que se buscó determinar geográficamente las plantaciones con mayor afectación por presencia del inóculo (Hurtado & Rincón , 2009b). Al contrastar dicho estudio con el presente proyecto, se puede concluir que la metodología establecida para la pronta detección de afectaciones, es complementaria al estudio mencionado anteriormente, debido a que se pueden conocer los focos de afectaciones de manera individual y no general como se ha realizado, de esta manera se puede complementar con el cálculo de la incidencia mensual de cada lote, al plantearse el monitoreo semanal, es decir, la obtención de un resultado más conciso frente a resultados generales.

## **5.2 Recomendaciones**

- Para el desarrollo de la propuesta metodológica para la pronta detección de afectaciones de la palma aceitera se recomienda realizar un censo fitosanitario de manera simultánea con la aplicación de las tecnologías geoespaciales, con la finalidad de afianzar los resultados obtenidos para la toma de decisiones. Además de que se propone realizar la metodología de manera más continua, es decir, monitoreos semanales con el objetivo de analizar los resultados obtenidos con los índices de vegetación en distintas condiciones climáticas, además de que se puede analizar de mejor manera los valores atípicos obtenidos a partir de la geodatabase generada y actualizada con cada monitoreo realizado.
- Una vez establecida la propuesta metodológica se recomienda añadir la caracterización de firmas espectrales de las afectaciones estudiadas a partir de información multiespectral adquirida en el campo y laboratorio, que sirva como insumo para estimar con mayor



solvencia las características biofísicas del cultivo, al ajustar los parámetros de reflectancia que mejor expresan el comportamiento de la problemática de sanidad vegetal como se menciona en Araque & Jiménez, (2009), pues a pesar de que en la investigación realizada por dichos autores se logró caracterizar la firma espectral de la palma aceitera a partir de imágenes satelitales, se recomienda que el ajuste del modelo que caracterice los fenómenos estudiados se soporte con datos de seguimiento en campo, con el objetivo de poseer series temporales que aporten información para el planteamiento de modelos de pronósticos (Araque & Jiménez, 2009).

- Se han presentado proyectos para la determinación del patrón de distribución espacial de las enfermedades de marchitez letal y anillo rojo, además de su relación con el factor ambiental y nutricional de la zona de estudio en Colombia según (Hurtado & Rincón, 2009a). En el presente estudio, la metodología permite hallar focos de palmas afectadas por anillo rojo con mayor incidencia, ya que esta enfermedad no presenta una sintomatología visible en sus inicios, lo que podría ser una complicación para su pronta detección, es por ello que se recomienda implementar metodologías que se centren en el estudio de la biomasa perdida por las plantas en todos los grados de severidad, para establecer una línea base de pronta detección.
- Investigaciones realizadas por el programa de Sanidad Vegetal de Cenipalma han hallado incidencia de PC en los bordes de cultivos del híbrido que limitan con cultivos materiales del material *Elaeis guineensis*, lo que acarrea una mayor cantidad de ataques y poblaciones de *Rhynchophorus plamarum* (Hurtado & Rincón , 2009b). En el presente caso de estudio es que efectivamente en los linderos de los terrenos con afectaciones hay mayor cantidad de focos de afectaciones que perjudican a los terrenos contiguos, como en

el caso del lote Arteaga, pero cabe recalcar que se encuentra presente el material INIAP. En el caso particular del lote del CIPAL, se encuentran afectaciones cercanas a los lotes de híbridos que se encuentran en estados fenológicos tempranos, para lo cual se recomienda realizar una investigación como la llevada a cabo por el ingeniero agrónomo André Bethaud del Cirad de Francia como se menciona en Hurtado & Rincón (2009b) en la que se da a conocer que se debe establecer una franja sanitaria de 200 m. , con base a la experiencia ecuatoriana y medida desde el borde de cultivo de palmas *OxG*, que se aplique a las condiciones locales de la zona de estudio .

- En cuanto al análisis de distribución espacial se pudo apreciar en este caso de estudio que existen focos de palmas con afectación y el avance de las enfermedades se da alrededor de dichos focos, que se puede considerar se han producido de manera aleatoria, como menciona (Franqueville, 2001), se ha constatado la existencia de gradientes en el avance espacial de la PC, por lo menos en su aparición. Por ejemplo, en la Amazonia ecuatoriana, se ha descubierto un claro efecto de bordadura, con los primeros casos en las áreas situadas en el borde del bosque. En Brasil y Surinam, en cambio, el avance de la afectación ha seguido el sentido de los vientos dominantes del Este hacia el Oeste según (Van de Lande H., 1993; Van Slobbe & Rocha de Souza, 1991; Mariau et al., 1992). Un análisis espacio multitemporal de la enfermedad en Surinam como menciona Franqueville (2001) fue efectuado por Van de Lande & Zadocks (1999) en el cual se deduce que la dispersión de la enfermedad siguió una dirección preferencial y que los datos son compatibles con las hipótesis expuestas a continuación:

- La PC es una afectación resultado de un proceso infeccioso.

- El agente causal es transportado por un vector, y este se desplazaría con el viento.
  - La PC aparece en dos fases distintas: en primer lugar, la fase 1 se caracteriza por algunas palmas distribuidas al azar, por último, la fase 2 se caracteriza por el desarrollo de focos a partir de casos aislados.
- Para un mejor análisis de la problemática, se recomienda realizar un muestreo de suelo, de manera que se puedan establecer parámetros fisicoquímicos que se puedan correlacionar con la presencia de las afectaciones, pues como sostiene Torres et al. (2010), desde el punto de vista nutricional, la PC puede alcanzar mayores incidencias en suelos con bajos contenidos de potasio y fósforo o en donde existen desequilibrios entre las bases (Mg, Ca y K). Por ello, se considera que una combinación potencialmente desastrosa podría resultar del uso de cantidades excesivas de nitrógeno en una situación, donde el potasio está en condiciones de deficiencia y que además se presente un déficit hídrico severo en un suelo con baja retención de humedad. Además de que el tema nutricional está dentro de un manejo integrado que implica nutrición, manejo de agua, manejo de malezas y plagas y control de plantas afectadas.
- También se propone analizar los parámetros fisicoquímicos de zinc y cobre, ya que se ha asociado la presencia de PC con un bajo contenido de dichos elementos, además de un desequilibrio en la relación manganeso y hierro (Mn / Fe), bajos contenidos de boro y la incapacidad de la planta de obtener calcio en periodos críticos del desarrollo de los puntos de crecimiento. Recientemente se ha llegado a la conclusión de la asociación entre una alta saturación de aluminio en el suelo y la PC (Torres et al., 2010).

## BIBLIOGRAFÍA

- Aldana, R., Aldana, J., & Moya, O. (2010). *Biología, hábitos y manejo de Rhynchoporus palmarum L. (Coleoptera: Curculionidae)*. Centro de investigación en Palma de Aceite. Cofinanciado por Fedepalma - Fondo de Fomento Palmero.
- Alvarado, A., Escobar, R., & Henry, J. (2013). El híbrido OxG Amazon: una alternativa para regiones afectadas por Pudrición del cogollo en palma de aceite. *PALMAS*, 34(1), 305-314.
- Amblard, P., Berthaud, A., & Durand - Gasselint, T. (2000). Oil palm seeds commercialized by the CIRAD Present and future. *PALMAS*, 21(2), 300-308.
- ANCUPA. (2017). *Situación Fitosanitaria del Cultivo de Palma Aceitera en el Ecuador*. Santo Domingo: ANCUPA.
- ANCUPA, & Agrocalidad. (2016). *Guía de campo sobre la Pudrición de Cogollo*. Departamento de comunación (ANCUPA).
- Araque, L., & 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(3), 65-79.
- Araque, L., & 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. *Revista Palmas*, 30(3), 63-79.
- Awalludin, M., Sulaiman, O., Hashim, R., Aidawati, W., & Nadhari, W. (2015). An overview of the oil palm industry in Malaysia and its waste utilization through thermochemical conversion, specifically via liquefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1470-1484.
- Barba, J., & Baquero, Y. (2013). Híbridos OxG obtenidos a partir de oleíferas Taisha Palmar del Río (PDR), Ecuador. Variedad-PDR (Taisha x Avros). *PALMAS*, 34(1), 315-325.
- Bernstein, L., Jin, X., Gregor, B., & Adler-Golden, S. (2012). Quick Atmospheric Correction Code: Algorithm Description and Recent Upgrades. *Optical Engineering*, 51(11), 1-11.
- Broge, N., & Leblanc, E. (2000). Comparing Prediction Power and Stability of Broadband and Hyperspectral Vegetation Indices for Estimation of Green Leaf Area and Canopy Chlorophyll Density. *Remote Sensing of Environment*, 76, 156-172.
- 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.

- Carrillo, M., Cevallos, V., Cedeño, C., Gualoto, W., Mite, F., Navarrete, M., . . . Zambrano, W. (2015). *Manual del cultivo de la palma aceitera*. Estación Experimental Santo Domingo . Santo Domingo : INIAP.
- Carrilo, M., Cevallos , V., Cedeño , C., Gualoto, W., Mite, F., Navarrete, M., . . . Zambrano , W. (2015). *Manual del Cultivo de la palma aceitera*. Santo Domingo: INIAP-Estación experimental Santo Domingo.
- Chinchilla, C. (1996). Epidemiología y manejo integrado del anillo rojo en palma aceitera. *X Congreso Nacional Agronómico* , 37-41.
- Chinchilla, C. (2010). *Anillo Rojo en Palma Aceitera: Una guía de manejo*. . ASD Costa Rica.
- Chong, K., Kanniah, K., Pohl, C., & Tan, K. (2017). A review of remote sensing applications for oil palm studies. *Geo-spatial Information Science*, 184-200.
- Chuvieco, E., Martin, M., & Palacios, A. (2002). Assessment of Different Spectral Indices in the Red-Near-Infrared Spectral Domain for Burned Land Discrimination. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2381-2396.
- Dalposso, G., Uribe, M., Mercante, E., & Lamparelli, R. (2013). Spatial autocorrelation of ndvi and gvi indices derived from landsat/tm images for soybean crops in the western of the state of Paraná in 2004/2005 crop season. *Engenharia Agrícola*, 33(3).
- Espinoza, C., Khot, L., Sankaran, S., & Jacoby, P. (2017). High Resolution Multispectral and Thermal Remote Sensing-Based Water Stress Assessment in Subsurface Irrigated Grapevines. *Remote Sensing*, 15.
- Everitt, J., Yang, C., Escobar , D., Webster , C., Lonard, R., & Davis , M. (1999). Using Remote Sensing and Spatial Information Technologies to Detect and Map Two Aquatic Macrophytes. *Journal of Aquatic Plant Management*, 37, 71-80.
- Fallas, J. (2012). *Análisis de varianza*. Costa Rica: UCI (Universidad para la Cooperación Internacional).
- Franqueville, H. (2001). *La pudrición del cogollo de la palma aceitera en América Latina*. Departamento de Cultivos Perennes. F34398 Montpellier cedex 5 - Francia: Cirad - Cp.
- Gitelson, A., Stark, R., Grits, U., Rundquist, D., Kaufman, Y., & Derry, D. (2002). Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2537-2562.
- Gogarty, B., & Robinson, I. (2012). Unmanned Vehicles: A (Rebooted) History, Background and Current state of the Art. *J. Law Inf. Sci.*, 21, 1-18.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill.

- Gutierrez, M., Branch, J., & Botero, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: Landsat – ETM+”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2611-2634.
- Haboudane, D., Miller, J., Pattey, E., Zarco-Tejada, P., & Strachan, I. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337-352.
- Harris Geospatial Solutions. (13 de 05 de 2019). *ENVI*. Obtenido de [https://www.harrisgeospatial.com/docs/crop\\_science\\_Introduction.html](https://www.harrisgeospatial.com/docs/crop_science_Introduction.html)
- Hernandez, J., & Montaner, D. (2009). *Patrones de respuesta espectral*. Chile: Universidad de Chile.
- Huang, W., Luo, J., Zhang, J., Zhao, J., Zhao, C., Wang, J., . . . Du, S. (2012). Crop Disease and Pest Monitoring by Remote Sensing. *Remote Sensing - Applications*, 32-76.
- Hurtado , R., & Rincón, V. (2009a). La agricultura de precisión al servicio del manejo agronómico de la palma de aceite. *Palmas*, 30(3), 11-20.
- Hurtado, R., & Rincón , V. (2009b). La geomática como instrumento para modelar y hacer seguimiento a la Pudrición del Cogollo (PC) y al insecto plaga: Rhynchophorus palmarum. Zona Occidental - Tumaco (Colombia). *Palmas*, 30(3), 21-35.
- Izzuddin, M. A., Idris, A. S., Nisfariza, N. M., & Ezzati, B. (2015). Spectral based Analysis of Airborne Hyperspectral Remote Sensing Image for Detection of Ganoderma Disease in Oil Palm. *Proceedings of 2015 Int’l Conference on Biological and Environmental Science (BIOES 2015)*, 13-20.
- Kapur, J. S. (1985). A new method for graylevel picture thresholding using the entropy of the histogram. *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 29(3), 273–285.
- Kaufman, Y., & Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270.
- Kittler, J. I. (1986). Minimum error thresholding. *Pattern recognition*, 19(1), 41-47.
- Krishna, K. (2018). *Agricultural Drones: A Peaceful Pursuit*. Oakville, Canada : Apple Academic Press .
- Liang, S., Li, X., & Wang, J. (2012). *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications*. Oxford, United Kingdom: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385954-9.00001-0>.
- Linder, W. (2013). *Digital Photogrammetry: Theory and applications*. Berlín : Springer .
- Mapir. (2018). *MAPIR Survey3 cameras*. San Diego.



- Mariau , D., Van De Lande, H., Renard, J.-L., Dollet, M., Rocha De Souza, L., Rios, R., . . . Corrado, F. (1992). Les maladies de type pourriture du coeur sur le palmier à huile en Amérique Latine: Symptomatologie - Épidémiologie - Incidence. *Oléagineux*, 47(11), 605-618.
- Martín, M. (1998). *Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Iberica a partir de imágenes NOAA AVHRR*. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares: Doctoral thesis.
- Martínez, G. (2010). Pudrición del cogollo, Marchitez sorpresiva, Anillo rojo y Marchitez letal en la palma de aceite en América. *Taller Internacional sobre Enfermedades catastróficas en la palma de aceite Kuala Lumpur.*, 31(1), 43-53.
- Martínez-Barbáchano, R., & Solís-Miranda, G. (2018). Caracterización espectral y detección de Flecha Seca en Palma Africana en Puntaneras, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*(61), 349-377.
- Mielonen, T. (2010). *Evaluation and application of passive and active optical remote sensing methods for the measurement of atmospheric aerosol properties*. Helsinki: Finnish Meteorological Institute.
- Mohd, N., Mohamed, A., Serman, A., & Bahrom, E. (2016). El uso de sensores remotos para detectar la infección por Ganoderma. *Palmas*, 37(1), 140-150.
- Munévar, F., Acosta, A., & León, P. (2000). Factores edafícos asociados con la Pudrición de Cogollo de la palma de aceite en Colombia. *Ponencia presentada en la XIII Conferencia Internacional sobre Palma de Aceite. Cartagena*, 22(2), 9-19.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 481-486.
- Okamoto, K. (2001). *Global Environment Remote Sensing*. Japón : Omsa Ltd. .
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.*, 9, 62–66.
- Padilla, O. (2005). Análisis de Cambio de Cobertura Vegetal y Fragmentación en el Corredor de Conservación Comunitaria El Ángel-Bosque Golondrinas, Provincia del Carchi (1996-2005). *Cartografía de áreas quemadas a Escala Local. España PONCE, Carlos*,(2008).
- Pereira, J. M. (1999). A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1), 217-226.
- Perez Gutierrez, C., & Muñoz Nieto, A. L. (2006). *Teledetección , Nociones y aplicaciones*. Salamanca: Universidad de Salamanca.

- Potter, L. (2011). La industria del aceite de palma en Ecuador: ¿Un buen negocio para los pequeños agricultores? *EUTOPÍA*(2), 39-54.
- Precisionhawk. (2019). *Sensors*. Obtenido de Precisionhawk: <https://www.precisionhawk.com/>
- Reyes , D., Bone , C., Padilla-Almedia, O., Ananganó , P., Guamán , S., Kirby, E., & Toulkeridis, T. (2019). Use of Multitemporal Indexes in the Identification of Forest Fires – A case study of southern Chile. *In 2019 Sixth International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG) IEE*, 203-210.
- Romero, B., Díaz, Y., España, M., & Ochoa, I. (2017). Evaluación de la respuesta de materiales Unipalma OxG y Unipalma DxP a dos planes de manejo nutricionales en etapa inmadura. *PALMAS*, 38(4), 89-98.
- Samseemoung, G., Jayasuriya, H., & Soni, P. (2011). Oil palm pest infestation monitoring and evaluation by helicopter-mounted, low altitude remote sensing platform. *Journal Applied Remote Sensing*, 5, 0535401-05354018.
- Sanz, J. (2016). Pudrición del cogollo: enfrentamiento integral contra un enemigo. *Revista Palmas*, 37(Especial), 109-114.
- Schenk, T. (2005). *Introduction to Photogrammetry*. Ohio: Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science.
- Schneider, P., Roberts, D., & Kyriakidis, P. (2008). A VARI-based relative greenness from MODIS data for computing the Fire Potential Index. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1151–1167.
- Shafri, H. Z., & Hamdan, N. (2009). Hyperspectral imagery for mapping disease infection in oil palm plantation using vegetation indices and red edge techniques. *American Journal of Applied Sciences*, 6(6), 1031-1035.
- Sobrino , J., Raissouni , N., Kerr, Y., Oliso, A., López-García, M., Belaid, A., . . . Dempere, L. (2000). *Teledetección*. (J. A. Sobrino, Ed.) Valencia, España: Servicio de publicaciones Universidad de Valencia .
- Torres, G., Sarria, G., & Martínez, G. (2010). *Identificación temprana y manejo de la Pudrición del cogollo de la palma de aceite*. Bogotá.
- Tsai, W. (1985). Moment-preserving thresholding. *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 29, 377–393.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

- Van de Lande, H. (1993). *Studies on the epidemiology of spear rot in oil palm (Elaeis guineensis Jacq.) in Suriname*. Agricultural University. Promotor(en): J.C. Zadoks. doi:ISBN 9789054851011
- Van de Lande, H., & Zadocks, J. (1999). Spatial patterns of spear rot in oil palm plantations in Suriname. *Plant Pathology*, 48(2), 189-201.
- Van Slobbe, W., & Rocha de Souza, R. (1991). Amarillamiento fatal o pudricion de cogollo en Denpasa-Brasil. *Palmas*, 12(2), 17-23.
- Vega, C. (2016). *Establecimiento de redes de trampeo. Un componente clave para el manejo y captura de Rhynchophorus palmarum. Pasos para la elaboración de trampas*. ANCUPA.
- Warner, T., Nellis, M., & Foody, G. (2009). *Imaging Spectrometers*. London.
- West, J., Atkins, S., & Fitt, B. (2009). Detection of Airborne Plant Pathogens: Halting Epidemics Before they Start. *Outlooks Pest Manage*, 20, 111-113.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*.
- Yuan, L., Zhang, J., Shi, Y., Nie, C., Wei, L., & Wang, J. (2014). Damage Mapping of Powdery Mildew in Winter Wheat with High-Resolution Satellite Image. *Remote Sensing*, 6, 3611-3623.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712.
- Zhang, Q., & Pierce, F. (2013). *Agricultural Automation: Fundamentals and Practices*. Boca Raton, Florida: CRC Press .
- Zhao, Y., & Yang, J. (2011). The design of Mini Quad-copter Unmanned Aerial Vehicles Control System. *Adv. Mater. Res*, 1-13.