

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO

FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



## **Evaluación de contenido de humedad en el suelo usando sistema de riego por gravedad en cultivo de maíz (*Zea mays* L.), mediante análisis espectral de imágenes obtenidas con RPAS**

### **TESIS**

Para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias de la Información  
Con acentuación en Geomática

**Elizandro Arturo López Fonseca**

Directores de tesis:

**Dr. Juan Martín Aguilar Villegas**  
**M.C. Miguel Armando López Beltrán**

Culiacán, Sinaloa, México

Febrero de 2022

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO

FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



## **Evaluación de contenido de humedad en el suelo usando sistema de riego por gravedad en cultivo de maíz (*Zea mays* L.), mediante análisis espectral de imágenes obtenidas con RPAS**

### **TESIS**

Para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias de la Información  
Con acentuación en Geomática

**Elizandro Arturo López Fonseca**

Directores de tesis:

**Dr. Juan Martín Aguilar Villegas**  
**M.C. Miguel Armando López Beltrán**

Culiacán, Sinaloa, México

Febrero de 2022



## Restricción de uso

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial Compartir Igual, 4.0 Internacional.





## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y ANTIPLAGIO

A través de la presente Yo: **ELIZANDRO ARTURO LÓPEZ FONSECA**, con número de cuenta: **1022474-2** y alumno del Programa de **Maestría en Ciencias de la Información**, con sede en la Facultad de Informática Culiacán y Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

### DECLARO QUE:

El trabajo de tesis que presento para su defensa y el cual se titula: **“EVALUACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO EN CULTIVO DE MAÍZ (*Zea Mays* L.), USANDO SISTEMA DE RIEGO POR GRAVEDAD, MEDIANTE ANÁLISIS ESPECTRAL DE IMÁGENES OBTENIDAS CON RPAS”**

- 1.- Es el resultado de un trabajo personal y constituye un documento original e inédito.
- 2.- Los documentos, artículos, informes, etc. Utilizados para la realización del trabajo están referenciados de forma clara, tanto en el texto principal como en el apartado de bibliografía de la presente tesis.
- 3.- Que las citas de las obras que aparecen reflejadas de forma literal y entre comillas, presentan clara especificación de la fuente (autor, año) d la que ha sido extraídas.
- 4.- Tengo conocimiento que no puedo asumir como propio el trabajo de tesis de otra persona, la copia de frases, párrafos e ideas de otro trabajo sin citar autoría, o cualquier otra acción de similares características conlleva a la realización fraudulenta del manuscrito de tesis y podrá implicar la suspensión del examen de grado en tanto no se corrija o bien la suspensión definitiva, esto acorde con el nivel en que se pudiese incurrir.
- 5.- Soy consciente de que pretender ser el autor de un trabajo, en parte o en su totalidad, escrito por otra persona constituye un delito con base en los artículos 424 y 427 del código penal federal, título vigesimosexto de los delitos en materia de derechos de autor en la República Mexicana.

Culiacán, Sinaloa a 18 de febrero de 2022

**Elizandro Arturo López Fonseca**  
Nombre y Firma del alumno



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Culiacán Rosales el día 03 del mes febrero del año 2022, el que suscribe Elizandro Arturo López Fonseca, alumno del Programa de Posgrado en Ciencias de la Información con número de cuenta 1022474-2, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Juan Martín Aguilar Villegas y el M.C. Miguel Armando López Beltrán y de acuerdo al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor, cede los derechos del trabajo intitulado “Evaluación de contenido de humedad en el suelo usando sistema de riego por gravedad en cultivo de maíz (*Zea mays* L.), mediante análisis espectral de imágenes obtenidas con RPAS”, a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su publicación, difusión, edición, reedición, traducción, compilación, distribución y explotación en medios impresos y digitales, con fines académicos y de investigación, la que será titular del mismo, en forma conjunta o separada con el autor.

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

En apego al Art. 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor Cedo el derecho de publicación, difusión, edición, reedición, traducción, compilación, distribución y explotación en medios impresos y digitales, con fines académicos y de investigación a la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Elizandro Arturo López Fonseca

Nombre completo y firma

# *Dedicatoria*

*A mi mamá, Carmen Alicia Fonseca Beltrán, es gracias a ti que  
logré esto, pero quedó pendiente una revisión crítica más de mi tía  
María Elena Fonseca Beltrán y estoy convencido que me das tu aval  
desde donde te encuentres y les dedico mi trabajo.*

**“Daría todo lo que sé, por la mitad de lo que ignoro”.**

René Descartes

# *Agradecimientos*

*Sin duda, ante la clara vulnerabilidad de la humanidad con las circunstancias vividas en esta ocasión mundialmente, reflexiono sobre el tiempo finito que venimos a coincidir, dejar nuestra huella y retirarnos sin llevarnos todo el conocimiento, las oportunidades que dejamos en nuestros sueños, incluso sin iniciarlos. Por consiguiente, mi total gratitud a Dios por permitirme seguir en este mundo para concluir la misión que tenga encomendada y me llevo los momentos que me dejó vivir con mis familiares que hoy descansan en su morada.*

*No dejaré de olvidar y agradecer a mis directores de tesis, el Dr. Juan Martín Aguilar Villegas y MC. Miguel Armando López Beltrán, más allá de las lecciones académicas y aportes profesionales para culminar este trabajo de investigación, asesorías, exigencias, recomendaciones y atenciones por los diversos medios que experimentamos en implementarlos a la distancia, sino todos sus consejos y gran apoyo que me brindaron personal y emocionalmente ante las adversidades que se presentaron en estos dos años y medio.*

*A mi alma mater le reitero mi más sincero agradecimiento por brindarme un espacio para realizar mis estudios de la mejor manera, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Facultad de Informática. Sobre todo, a CONACyT por su apoyo económico para incursionarme becado en un programa de posgrado de calidad.*

*Agradezco al Dr. Azareel Angulo Castro, quien me apoyó sin dudarle en la experimentación de campo y trabajos de laboratorio acerca de lo relacionado con la agronomía. Así mismo, a la Facultad*

*de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, quien a través del Dr. Angulo, se me permitiera hacer uso de sus laboratorios.*

*Además, el gran apoyo del Ing. Jorge Vladimir Ontiveros y su familia, brindando las áreas experimentales de los cultivos, corroborando su respaldo a la divulgación científica sin esperar nada a cambio, así como al Ing. Antonio Gutiérrez Félix, quien me brindó diversas herramientas, sensores y plataformas aéreas, hasta sus estrategias para desarrollar esta investigación y al Ing. Rubén Quintero, por su grata atención en ZonaDroneMX con su apoyo en mis RPAS y sensores a cada momento.*

*A mi mamá Carmen Alicia Fonseca Beltrán, quien le debo toda mi convicción a mis tareas y obligaciones, inculcando todos mis valores, perfeccionismo y ser un gran ejemplo para mí. A mi Padre Arturo López, que toda mi rectitud, sensatez y respeto, orgulloso yo de haberme fomentado, les debo ser mi motor que han impulsado mis sueños. Mi hermana Beatriz López, fungiendo el papel de mi segunda madre y total apoyo por su parte para exhortarme este y más metas en mi vida. Alejandra Aguilera, mi compañera leal que me auxilió en todo momento incondicionalmente y sobrinos Emmanuel y Beatrice Charlotte, que estoy seguro lograrán las metas que anhelo en ellos.*

*¡Los amo!*

*Por último y no menos importante, agradezco a cada uno de los maestros que puso su porción de conocimiento y formación integral que heredo de ustedes, un tesoro invaluable. Dra. Xiomara Zaldívar; Dra. Xóchitl Torres; Dr. Esteban Vázquez; Dr. Arturo Yee; Dr. Manuel Trejo; Dr. Sergio Monjardín; Dr. Ramón Gaxiola; MC. Gerardo Beltrán; Dr. Inés Vega.*

## Resumen

El agua es un recurso vital y de gran utilidad para la producción agrícola, destinando un suministro de alrededor del 70 % del recurso captado a nivel mundial para esta actividad, con más de 330 millones de hectáreas de instalaciones de riego, de las que un 20 % pertenece a superficie cultivada y aporta 40 % de la producción de alimentos en el mundo, según datos de la Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación, 2016.

Asimismo, el crecimiento demográfico y la demanda de alimentos prevé un futuro con demandas para incrementar la producción hasta en un 70 %, considerando las mismas áreas destinadas a estas actividades, reduciendo el uso de recursos, incluida el agua, en el sentido de que se requieren nuevas prácticas sostenibles, optimización de recursos y mejoras en el desempeño económico y productivo, con el fin de resolver estos desafíos, garantizando una dieta digna en un escenario futuro para 2050.

En el estado de Sinaloa, México, una de las principales actividades económicas es la agricultura, específicamente la producción de maíz (*Zea mays* L.) al aire libre, con una modalidad de riego por gravedad o rodadura, Sinaloa mantiene los primeros lugares en producción, en área sembrada y en rendimientos, sin embargo, es el primer lugar para la concesión de agua para uso consuntivo, principalmente para agricultura, por lo que juega un papel muy importante a nivel nacional.

La posibilidad de estimar la humedad del suelo a partir de imágenes de forma remota es atractiva, ya que la información se adquiriría con una temporalidad frecuente y una mayor resolución espacial, para analizar las variaciones que ocurren en el objeto de estudio.

Por eso, en este trabajo se presenta una metodología para analizar la variabilidad de la humedad en el suelo agrícola de cultivos de maíz de grano blanco, mediante teledetección con un sensor multiespectral montado en un RPAS, durante los ciclos de riego en la temporada de otoño. invierno 2020-2021 y validando con medidas de métodos directos en campo, como tensiómetros y el método gravimétrico.

## Abstract

Water is a vital and highly useful resource for agricultural production, allocating a supply of around 70 % of the resource captured globally for this activity, with more than 330 million hectares of irrigation facilities, with which a 20 % belongs to cultivated area and contributes 40 % of the food production in the world, according to data from the World Organization for Agriculture and Food, 2016.

Likewise, demographic growth and the demand for food foresees a future with demands to increase production by up to 70 %, considering the same areas destined for these activities, reducing the use of resources, including water, in the sense that new sustainable practices are required, optimization of resources and improvements in economic and production performance, to solve these challenges, guaranteeing a decent diet in a future scenario for 2050.

In the state of Sinaloa, Mexico, one of the main economic activities is agriculture, specifically the production of corn (*Zea mays* L.) in the open air, with a modality of irrigation by gravity or rolling, Sinaloa maintains the first places in production, in area sown and in yields, however, it is the first place for the concession of water for consumptive use, mainly for agriculture, which is why it plays a very important role at the national level.

The possibility of estimating soil moisture from images remotely is attractive, since information would be acquired with a frequent temporality and a higher spatial resolution, to analyze the variations that occur in the object of study.

That is why, in this work, a methodology is presented to analyze the variability of humidity in the agricultural soil of white grain corn crops, using remote sensing with a multispectral sensor mounted on an RPAS, during the irrigation cycles in the autumn season. winter 2020-2021 and validating with measurements from direct methods in the field, such as tensiometers and the gravimetric method.

# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. JUSTIFICACIÓN .....	7
1.2. OBJETIVOS.....	8
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	8
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	8
1.3. HIPÓTESIS .....	9
1.3.1. <i>Preguntas de investigación</i> .....	9
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>10</b>
2.1. IMPORTANCIA DEL AGUA EN LA AGRICULTURA .....	10
2.1.1. <i>El Agua en México</i> .....	12
2.1.2. <i>El Riego en Maíz</i> .....	14
2.2. LA HUMEDAD DEL SUELO.....	17
2.2.1. <i>Propiedades del Suelo que Influyen en el Almacenamiento del Agua</i> .....	17
2.2.1.1. Textura.....	17
2.2.1.2. Materia orgánica (MO).....	18
2.2.1.3. Densidad aparente ( $\rho_a$ ).....	19
2.2.1.4. Densidad real o de partículas sólidas ( $\rho_s$ ).....	19
2.2.1.5. Porosidad del suelo ( $\epsilon$ ).....	19
2.2.1.6. Profundidad efectiva o radicular ( $Pr$ ).....	20
2.2.1.7. Contenido de Humedad en el Suelo.....	21
2.3. MÉTODO DE BOUYUCOS.....	26
2.4. ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO .....	31
2.4.1. <i>Metodologías Directas</i> .....	31
2.4.2. <i>Metodologías Indirectas</i> .....	34

2.4.2.1.	La Percepción Remota o Teledetección .....	36
2.4.2.1.1.	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	41
2.4.2.1.2.	Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI).....	42
2.4.2.1.3.	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) .....	42
2.4.2.1.4.	Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE).....	43
2.4.2.1.5.	Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).....	44
2.4.2.1.6.	Índice de estrés hídrico por enfermedad (DSWI-4) .....	45
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>46</b>
3.1.	ÁREA DE ESTUDIO .....	46
3.2.	ESQUEMA METODOLÓGICO.....	47
3.2.1.	<i>El Cultivo de la Zona de Estudio.....</i>	<i>50</i>
3.2.1.1.	Método del Hidrómetro de Bouyoucos .....	50
3.2.1.1.1.	Solución Calgón. ....	52
3.2.1.1.2.	Procedimiento con la tierra del terreno.....	54
3.2.2.	<i>Equipamiento y Herramientas.....</i>	<i>56</i>
3.2.2.1.	Sensor Multiespectral.....	56
3.2.2.1.1.	Calibración de Luz Solar. ....	58
3.2.2.2.	RPAS.....	59
3.2.2.3.	Vuelos Fotogramétricos.....	60
3.2.2.4.	Puntos de Control y Validación. ....	61
3.2.2.4.1.	Recolección de Muestras en Campo. ....	64
3.2.3.	<i>Humedad del Suelo .....</i>	<i>64</i>
3.2.3.1.	Método Gravimétrico para Determinar el Contenido de Humedad del Suelo. ....	64
3.2.3.2.	Índices Espectrales.....	68
3.2.3.3.	Constantes de Humedad. ....	69
3.3.	CALIBRACIÓN DE BANDAS A LA HUMEDAD DEL SUELO.....	72
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>

4.1.	LA TEXTURA DEL SUELO EN ESTUDIO POR EL MÉTODO BOUYOUCOS.....	79
4.2.	VALORES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	80
4.2.1.	<i>Contenido de Humedad por el Método Gravimétrico para las Muestras del Área de</i>	
<i>Estudio</i>	<i>80</i>	
4.2.2.	<i>Valores Digitales de las Imágenes Multiespectrales .....</i>	<i>83</i>
4.2.3.	<i>Índices Espectrales Analizados en el Área de Estudio.....</i>	<i>86</i>
4.2.3.1.	NDVI.....	87
4.2.3.2.	NDWI .....	88
4.2.3.1.	SAVI.....	89
4.2.3.1.	NDRE.....	90
4.2.3.2.	DSWI4.....	91
4.2.3.3.	GNDVI.....	92
4.3.	VALORES DE MUESTRAS DE CALIBRACIÓN CON SUELO DESNUDO.....	93
4.3.1.	<i>Contenido de Humedad en Calibración de Bandas a la Humedad de Suelo.....</i>	<i>93</i>
4.3.2.	<i>Valores Digitales de las Imágenes Multiespectrales para la Calibración con Suelo</i>	
<i>Desnudo</i>	<i>97</i>	
4.4.	EVALUACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	98
4.4.1.	<i>Correlación en la Calibración con Suelo Desnudo. ....</i>	<i>98</i>
4.4.2.	<i>Correlación de Valores en el Área de Estudio.....</i>	<i>111</i>
4.5.	CARTOGRAFÍA DE LOS NIVELES DE HUMEDAD .....	114
4.6.	DISCUSIÓN .....	116
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PROPUESTAS .....</b>	<b>119</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>123</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>130</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Porcentajes de Unidades de Producción Según Tipos de Irrigación Utilizados .....	12
<b>Tabla 2</b> Superficie Total, Agrícola, de Riego y Temporal en México .....	13
<b>Tabla 3</b> Relación de la Superficie Sembrada y Producción de Granos.....	15
<b>Tabla 4</b> Tipos de Textura.....	18
<b>Tabla 5</b> Tabla de Corrección por Temperatura .....	28
<b>Tabla 6</b> Clases Texturales por Porcentajes de Contenido .....	30
<b>Tabla 7</b> Propiedades del Suelo con Relación a la Textura.....	31
<b>Tabla 8</b> Índices Espectrales Analizados.....	69
<b>Tabla 9</b> Contenido de Humedad para Cada Tensión Aplicada.....	70
<b>Tabla 10</b> CC y PMP en Muestras de Laboratorio con Membrana de Richards .....	71
<b>Tabla 11</b> Resultados de Observaciones del Método del Hidrómetro de Bouyoucos.....	79
<b>Tabla 12</b> Contenido de Humedad de Muestras de Suelo Antes del Riego de Presiembra.....	81
<b>Tabla 13</b> Contenido de Humedad en Cada Punto Muestral del Área de Estudio.....	82
<b>Tabla 14</b> Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto N1.....	84
<b>Tabla 15</b> Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto S1 .....	84
<b>Tabla 16</b> Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto E1 .....	85
<b>Tabla 17</b> Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto W1.....	85
<b>Tabla 18</b> Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto C1 .....	86
<b>Tabla 19</b> Valores del Índice NDVI por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo .....	87
<b>Tabla 20</b> Valores del Índice NDWI por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo .....	88
<b>Tabla 21</b> Valores del Índice SAVI por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo .....	89
<b>Tabla 22</b> Valores del Índice NDRE por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo.....	90
<b>Tabla 23</b> Valores del Índice DSWI4 por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo.....	91
<b>Tabla 24</b> Valores del Índice GNDVI por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo.....	92
<b>Tabla 25</b> Contenido de Humedad Gravimétrica del Suelo en Muestras de Calibración.....	93

<b>Tabla 26</b> Irradiancia de las Muestras de Calibración por Banda en Diferente Altura.....	97
<b>Tabla 27</b> Correlación de Valores de Irradiancia y Contenido de Humedad de la Muestra de Calibración a 0 cm de Profundidad.....	99
<b>Tabla 28</b> Correlación de Valores de Irradiancia y Contenido de Humedad de la Muestra de Calibración a 15 cm de Profundidad.....	100
<b>Tabla 29</b> Correlación de Valores de Irradiancia y Contenido de Humedad de la Muestra de Calibración a 30 cm de Profundidad.....	101
<b>Tabla 30</b> Correlación de Valores de Humedad e Irradiancia en Banda GREEN .....	103
<b>Tabla 31</b> Correlación de Valores de Humedad e Irradiancia en Banda RED.....	103
<b>Tabla 32</b> Correlación de Valores de Humedad e Irradiancia en Banda RED EDGE .....	104
<b>Tabla 33</b> Correlación de Valores de Humedad e Irradiancia en Banda NIR.....	104
<b>Tabla 34</b> Ponderación de Valores de Correlación de la Banda GREEN.....	105
<b>Tabla 35</b> Ponderación de Valores de Correlación de la Banda RED .....	106
<b>Tabla 36</b> Ponderación de Valores de Correlación de la Banda RED EDGE.....	107
<b>Tabla 37</b> Ponderación de Valores de Correlación de la Banda NIR.....	108
<b>Tabla 38</b> Ponderación de Correlación en Cada Banda En Orden Descendente a su Promedio .....	109
<b>Tabla 39</b> Orden de Ponderación de Correlaciones en cada Banda .....	110
<b>Tabla 40</b> Correlación de Humedad de Suelo y Valores de Índices y Bandas Espectrales en el Área de Estudio.....	112
<b>Tabla 41</b> Ponderación de Correlación de Valores del Área de Estudio y Humedad de Suelo .....	113

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Constantes de humedad para varias texturas de suelo.....	22
<b>Figura 2</b> Rendimiento de Cultivos en Condiciones de Estrés Hídrico.....	22
<b>Figura 3</b> Constantes de humedad del suelo.....	24
<b>Figura 4</b> Diagrama de Texturas.....	29
<b>Figura 5</b> Área de Estudio.....	46
<b>Figura 6</b> Mapa del Área de Estudio.....	47
<b>Figura 7</b> Esquema de la Metodología Planteada.....	49
<b>Figura 8</b> Solución de Hexametáfosfato de Sodio.....	52
<b>Figura 9</b> Hidrómetro de Bouyoucos Graduado de 0 a 60.....	53
<b>Figura 10</b> Solución Calgón.....	54
<b>Figura 11</b> Tamizado de la Muestra de Suelo.....	55
<b>Figura 12</b> Sensor Parrot Sequoia.....	57
<b>Figura 13</b> Pad de Calibración de Luz Solar.....	58
<b>Figura 14</b> RPAS Dji Phantom 4 Pro.....	59
<b>Figura 15</b> Colocación de Puntos de Control.....	63
<b>Figura 16</b> Área del Cultivo de Maíz con la Localización de los Puntos Muestrales.....	63
<b>Figura 17</b> Recolección de Muestras en Campo.....	64
<b>Figura 18</b> Peso del Bote (PB).....	65
<b>Figura 19</b> Peso del Recipiente con Suelo Húmedo.....	66
<b>Figura 20</b> Horno Eléctrico con Respiradero.....	67
<b>Figura 21</b> Muestras Secas Después de 48 Horas.....	67
<b>Figura 22</b> Curvas Características de Humedad de las Muestras.....	71
<b>Figura 23</b> Establecimiento de Muestras.....	73
<b>Figura 24</b> Muestras de Calibración con Suelo Desnudo.....	74
<b>Figura 25</b> Extracción de Suelo en Zonas de Muestra.....	75

<b>Figura 26</b> Tubos de Muestreo en la Calibración.....	76
<b>Figura 27</b> Tubo de Muestra en Bolsa Hermética.....	76
<b>Figura 28</b> Muestras de Suelo de Calibración en Laboratorio.....	77
<b>Figura 29</b> Gráfico del Contenido de Humedad en la Zona de Estudio de El Bledal, Sinaloa.....	83
<b>Figura 30</b> Gráfico del Índice NDVI de las Muestras en el Área de Estudio .....	87
<b>Figura 31</b> Gráfico del Índice NDWI de las Muestras en el Área de Estudio .....	88
<b>Figura 32</b> Gráfico del Índice SAVI de las Muestras en el Área de Estudio .....	89
<b>Figura 33</b> Valores del Índice NDRE por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo .....	90
<b>Figura 34</b> Valores del Índice DSWI4 por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo.....	91
<b>Figura 35</b> Gráfico del Índice GNDVI de las Muestras en el Área de Estudio .....	92
<b>Figura 36</b> Gráfica de Contenido de Humedad en Muestra de Calibración 1 .....	94
<b>Figura 37</b> Gráfica de Contenido de Humedad en Muestra de Calibración 3 .....	95
<b>Figura 38</b> Gráfica de Contenido de Humedad en Muestra de Calibración 2 .....	95
<b>Figura 39</b> Gráfica de Contenido de Humedad por Profundidad y Escena en las Tres Repeticiones .....	96
<b>Figura 40</b> Mapa de la Zona de Estudio con Valores del Índice NDVI en la Escena 14-oct-2020.....	114
<b>Figura 41</b> Mapa de la Zona de Estudio con Valores del Índice NDVI en la Escena 12-feb-2021.....	115

## 1. Introducción

La disponibilidad del agua es un problema mundial, donde asegurar este recurso en la agricultura es sumamente importante, se requiere un 70 % del recurso hídrico captado en el planeta distribuidos en más de 330 millones de hectáreas en instalaciones de riego, las cuales representan un 20 % de la superficie cultivada y aporta un 40 % de la producción de alimentos en el mundo (FAO, 2016).

Si bien muchos factores pueden reducir el rendimiento de producción, uno de ellos es el estrés hídrico de la planta causado por un suministro insuficiente de agua (Wanjura & Upchurch, 2000), por lo que la agricultura de riego debe suministrar los volúmenes requeridos para cubrir la demanda hídrica de los cultivos, en consecuencia de no cubrir ésta, puede provocar una pérdida significativa en la productividad y en casos extremos la pérdida del cultivo.

Por otro lado, el exceso de riego podría suponer un daño para el cultivo de forma directa (asfixia radicular), o indirecta (desarrollo de plagas, hongos y enfermedades) que dañan a las plantas. Uno de los enfoques principales en el manejo de los cultivos es disponer de un sistema de riego que suministre óptimamente el agua, humedeciendo el suelo hasta cubrir la profundidad radicular. Por consiguiente, es pertinente conocer la cantidad de riego para el beneficio de la vegetación y propiamente para el agricultor (INIFAP, 2017). La alta competencia por agua que requieren los cultivos hace necesaria una estrategia integral de su manejo para mejorar su utilidad sin ocasionar una afectación a sus rendimientos.

En ese sentido, la producción de alimentos pudiera sugerirse como la mayor contribución de la intensificación en zonas agrícolas; implicaría entonces, la adopción de prácticas sostenibles de gestión de la tierra y un riego más eficiente a través de una mayor flexibilidad, fiabilidad y oportunidad de entrega del agua de riego (FAO, 2013).

Dentro del contexto regional en México, el uso del agua en el sector agrícola juega un papel importante, el cual es necesario para cubrir la demanda de producción de alimentos. En cuanto a la superficie continental de México, el 16 % (32'406,000 ha) se destina a producción agrícola de riego y temporal (6'810,762 ha y 25'595,475 25.6 ha respectivamente), de esto, el 79 % utilizó la modalidad de temporal y el restante 21 % en modalidad de riego, que aproximadamente el 70 % de esta última utiliza riego por gravedad o rodado (INEGI, 2017).

Según datos reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el agua disponible en el país para usos consuntivos, el 76 % es destinado para el sector agrícola que es utilizada principalmente para el riego; un 14 % para abastecimiento público; el 5 % para la industria y el restante 5 % para energía eléctrica, excluyendo la hidroelectricidad. Estos son representados por la captación superficial del 61 % y el 39 % de forma subterránea (CONAGUA, 2018c).

Así mismo, en el Estado de Sinaloa, siendo el Estado con la primera posición en la lista que recibe el mayor volumen concesionado en el año 2017, entre los 32 estados, con alrededor del 10.88 % (9558.5 hm<sup>3</sup> de agua de los 87841.5 hm<sup>3</sup> en todo el país), y de éste, el 94.2 % ( 9005.4 hm<sup>3</sup>) destinado al

sector agrícola, colocándolo con un papel muy importante en el manejo del recurso hídrico y la actividad económica agrícola (CONAGUA, 2018c).

El asegurar una entrega confiable de suficiente agua, incrementando la transparencia del manejo del riego, y logrando la eficiencia y equidad en el acceso al agua probablemente requiera un cambio de actitud en las instituciones y los agricultores, asimismo inversiones dirigidas a la modernización de infraestructura, reestructuración institucional, y la mejora de las capacidades técnicas de los agricultores y los administradores de agua. Esto se podría reducir con tecnología e innovación, ya que cualquier aumento en la producción agrícola tendrá que basarse principalmente en la conservación y el uso eficiente de los recursos naturales.

El maíz es un cultivo demandante del agua en términos de producción total de materia seca y entre los cereales es potencialmente el cultivo de grano de mayor rendimiento. Para la producción máxima, un cultivo de grano de madurez media requiere entre 500 y 800 mm de agua dependiendo del clima (Doorenbos & Pruitt, 1977). En México, es el segundo cultivo en importancia, con una producción de 23 millones de hectáreas, y el 5to a nivel global, hasta el año 2015, donde hasta el año 2018 se ha mantenido en el 8° lugar (FAO, 2020).

Este cereal, según datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2017, ocupa una superficie cultivada de alrededor de 6.9 millones de hectáreas, las cuales el 78 % en superficie de temporal y el 12 % con riego, con una producción de 23.1 millones de toneladas, siendo esto casi un tercio de la producción agrícola nacional (INEGI, 2017). De igual manera, Sinaloa, la entidad que representa el

principal productor de maíz con modalidad de riego (44.5 % de la producción nacional) con rendimientos de producción de 12.2 ton ha<sup>-1</sup> con agricultura de riego y 2.2 ton ha<sup>-1</sup> en temporal.

Se prevé que para el año 2050 la población mundial alcance los 9.7 mil millones de personas (FAO, 2013), por lo que se hace necesario incrementar la producción agrícola al menos un 70 %, debe de ser sostenible, incrementando rendimientos de las superficies que actualmente se destinan a estas actividades, evitando mermas y producir más con menos agua, en función del crecimiento demográfico y poder subsanar la demanda de productos agrícolas.

Han existido diversas metodologías para estimar el contenido de humedad en los suelos, a partir de mediciones directas, como el método del tacto, que consiste en apretar la tierra con la palma de la mano y los dedos, exprimiendo el sedimento y estimar la humedad que contiene ese suelo, teniendo una relación entre el tipo de textura y la forma que obtiene la muestra en la mano representando la manera más rudimentaria e imprecisa de realizar la estimación de humedad (USDA, 2000). Otra metodología de datos directos es el método gravimétrico que consiste en la extracción de muestras de suelo, pesar la muestra antes, posteriormente extraer la humedad calentando el horno a 105°C por 24 a 48 horas consecutivas, con los datos de peso seco y peso húmedo se determinar el contenido volumétrico de la humedad de la muestra. Esto es algo más destructivo y tardado al tener que esperar días para conocer el contenido de una sola muestra, pero es un método preciso.

Por otra parte, hay algunas herramientas para métodos indirectos como las sondas de neutrones, el cual es una fuente radioactiva de neutrones rápidos, que al chocar con átomos de hidrógeno se vuelven lentos, de los cuales se mide la porción de electrones rápidos y lentos que regresan y poder obtener una relación para estimar el contenido de humedad, sin embargo, es costoso, riesgoso y necesario de calibrar en cada suelo. Así también, los bloques de yeso, que miden la resistencia al paso de corriente eléctrica en contacto con el suelo, pero es impreciso en los rangos de humedad bajos; por último, existen los tensiómetros, que miden la fuerza de tensión del suelo a la falta de agua en el suelo. Son instrumentos prácticos, pero como se mencionan, solamente son puntos muestrales que tienen que representar a la totalidad de la superficie estudiada, de una temporalidad baja por la demora en conseguir un resultado.

En este sentido, también existen diferentes programas y tareas empleadas para reducir los volúmenes de agua utilizados en la agricultura, como la tecnificación de riegos para calendarizarlos, estimar láminas de riegos más eficientes, sin afectar los rendimientos del cultivo, pero son procesos complejos que involucran diversos factores que, ya sean directos o indirectos, pero manifiestan desventajas, donde para estudios de extensión territorial, local o parcelaria, se requieren datos precisos con resoluciones temporales y espaciales mayores, de muestreo continuo y no puntual, como es el caso de la teledetección.

La percepción remota o teledetección, en el estudio de variables del suelo como la humedad que posee, es utilizada con herramientas y metodologías que proveen mejores resultados y resoluciones, de mayor factibilidad respecto al costo

y operación, como es el caso de imágenes obtenidas por Sistemas Aéreos Piloteados Remotamente (RPAS), que con sensores satelitales. De acuerdo con la ventaja que presenta el utilizar diferentes bandas del espectro electromagnético para analizar la relación entre el comportamiento espectral de las cubiertas vegetales y su contenido de humedad, por medio de combinar y crear índices espectrales de bandas del Infrarrojo Cercano (NIR) e Infrarrojo de Onda Corta (SWIR), y el espectro visible Red Green Blue (RGB), han manifestado resultados óptimos para su utilización en estos estudios del recurso hídrico.

## **1.1. Justificación**

El recurso hídrico utilizado en la agricultura representa al 70 % de volumen captado a nivel global, que se requiere para el riego de los cultivos, mayormente utilizada en sistemas de riego por gravedad o rodado. En el contexto nacional juega una misma posición con un uso consuntivo del 76 % y que el estado que más se dota de un volumen anualmente es Sinaloa, quien de la misma manera es utilizado para la agricultura. Esto refleja que se requieren para cubrir la demanda alimenticia global, sin embargo, debido al crecimiento demográfico, esto tendrá que ser no solo lo que actualmente se provee, sino un aumento del 70 % para el año 2050, cubierto de una manera sostenible con la misma frontera agrícola y menor utilización de los recursos, por lo que es requerido tecnificar los volúmenes concedidos a los usuarios agrícolas, de manera que, se pueda contabilizar y analizar de qué manera se están implementando los recursos hídricos para poder optimizar el agua usada en los cultivos.

Existen diferentes metodologías de teledetección satelital, por medio de índices generados con la combinación de diferentes bandas espectrales, capaces de analizar y estimar por indicadores de forma indirecta, el contenido de humedad de los suelos, que presenta ciertas ventajas sobre métodos directos o tradicionales, sin embargo, algunas resoluciones espaciales y temporales son mayores al utilizar tecnologías de cámaras multiespectrales montadas sobre sistemas aéreos pilotados remotamente RPAS.

Dicho lo anterior, resulta conveniente buscar alternativas que puedan generar un análisis del recurso hídrico en suelos agrícolas de cierta textura, por

medio de sensores multiespectrales existentes en el mercado, los cuales trabajan en las bandas del infrarrojo cercano NIR, borde rojo (RedEdge), y el espectro visible, calibrado con mediciones directas y analizando su correlación.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar la humedad del suelo agrícola en cultivo de maíz (*Zea mays* L.), mediante el análisis de imágenes multiespectrales obtenidas desde una plataforma de RPAS.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Definir los rangos del espectro electromagnético o bandas para identificar la humedad del suelo.
- Relacionar la información generada de la variación de la humedad con las diferentes mediciones directas e indirectas, con respecto a las propiedades del suelo y condiciones geográficas.
- Evaluar los resultados del análisis espectral, en función de las correlaciones de la información recopilada para su ajuste.
- Categorizar y cartografiar los niveles de humedad estimados con el análisis de la respuesta espectral.

### **1.3. Hipótesis**

El análisis de imágenes multiespectrales en el rango visible e infrarrojo cercano, obtenidas desde un RPAS, permite evaluar de manera precisa, expedita y no invasiva, el comportamiento de la humedad de suelo en el cultivo de maíz.

#### **1.3.1. Preguntas de investigación**

- ¿Es posible identificar el contenido de humedad del suelo disponible para los suelos agrícolas, en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano?
- ¿Es posible relacionar los parámetros determinantes de humedad del suelo con la respuesta espectral de imágenes obtenidas con sensor multiespectral usado en una plataforma de RPAS?
- ¿Es factible y pertinente la utilización de herramientas geoespaciales para la detección y estimación de la humedad de suelos agrícolas?

## **2. Antecedentes**

### **2.1. Importancia del Agua en la Agricultura**

El recurso hídrico utilizado propiamente para agricultura en el mundo representa un 70 % de toda el agua extraída de los acuíferos, arroyos y lagos, en una superficie alrededor de 330 millones de hectáreas con instalaciones de riego, las cuales proveen el 40 % de la producción de alimentos en el mundo. Para el año 2050, de acuerdo con el aumento de la población y la demanda de producción, se espera una demanda de aumento con alrededor del 70 % más y hasta un 100 % en países en desarrollo, por lo que se requieren prácticas sostenibles de intensificación de la producción y un uso más eficiente de la utilización del agua sin ocasionar una afectación a los rendimientos (FAO, 2013).

Debido que el agua de riego es suministrada por agencias públicas que le dan un precio en función de su costo promedio de entrega o de mantenimiento, en la mayoría de los casos ese costo, no representa su precio económico. No obstante que el sector agrícola es el principal consumidor de agua, existen pocos estudios que estiman la función de demanda por el recurso hídrico, su respuesta ante variaciones en los precios y las tarifas que se deben cobrar para inducir un uso eficiente de éste. Es por ello, que los precios deberían establecer tarifas que propician un uso racional (Ramírez-Barraza et al., 2019).

Del mismo modo, en un estudio realizado por Torres-Sombra (2015), analiza la distribución del agua entre los consumidores ante condiciones de escasez y determinar el aumento en el precio que permita reducir el consumo del recurso, mediante una reducción causada por la implementación de la verificación

de consumo en el principal sector demandante del recurso hídrico, al norte del estado de Sinaloa, argumentando que los otros sectores consumidores es casi constante su volumen utilizado (pecuario, residencial, industrial y comercial). Así mismo, esto tendría implicaciones en la reducción directa del volumen de extracción destinada para agricultura, teniendo un efecto sobre la eficiencia de su uso, no tendría reducciones de rendimientos significativos sobre el costo de producción de maíz, así como también permitiría ampliar la frontera agrícola, a razón de la disminución de requerimientos haciendo posible sembrar más hectáreas con la misma cantidad de agua (Torres-sombra, 2015).

La disponibilidad precaria del agua, constituye la principal limitación para la producción de cultivos y nuevas áreas agrícolas, así como se menciona anteriormente respecto al crecimiento demográfico, incrementa la competencia por el recurso hídrico, lo que hace necesario conservarse y usarse eficientemente mediante el mejoramiento de métodos e instrumentos, tanto para distribuir y aplicar el agua de riego, como para evaluar y controlar el estado de humedad en el cultivo (Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015). También es importante conocer la cantidad de agua que consumen los cultivos a lo largo de su ciclo fenológico, optimizando los recursos a través del riego en forma calendarizada, lo que permite reponer el agua consumida por la evapotranspiración.

Además de ello, la disponibilidad de humedad es uno de los factores más importantes en el rendimiento del cultivo, dependiendo en gran medida, del riego calendarizado en relación con sus fases fenológicas. Por esta razón, se analizan las propiedades del suelo, debido a que el contenido de humedad en el suelo no

suele ser el óptimo, sin embargo, debe estar por encima de un valor crítico ( $\theta_c$ ) donde la planta muestra síntomas de estrés hídrico, reduciendo su calidad y cantidad en cosecha. Es difícil determinar el nivel óptimo de contenido de humedad y más aún, mantenerlo durante un largo período.

### 2.1.1. *El Agua en México*

En cuanto a los casi 197 millones de hectáreas de la superficie continental de México, apenas el 16 % (32'406,000 ha) se destina a producción agrícola de riego y temporal (6'810,762 ha y 25'595,475 25.6 ha respectivamente), donde esta producción a cielo abierto toma lugar con el 97.7 % de la producción agrícola nacional. En el año 2017, solamente el 79 % utilizó la modalidad de temporal generando una producción total de 38.7 millones de toneladas y solo 21 %, el riego que generó 67.9 millones de toneladas. Asimismo, aproximadamente el 70 % de la producción de riego utiliza el tipo de irrigación por gravedad o rodado, como se muestra en la Tabla 1 (INEGI, 2017).

**Tabla 1**

#### *Porcentajes de Unidades de Producción Según Tipos de Irrigación Utilizados*

Tipos de irrigación	Porcentaje			Gravedad o rodado	Porcentaje	
	ENA 2012	ENA 2014	ENA 2017		ENA 2014	ENA 2017
Riego por gravedad o rodado	72.2	77.7	70.8	Mediante canales revestidos	49.5	25.0
Microaspersión	2.4	5.0	5.2	Mediante canales de tierra	71.9	68.1
Aspersión	8.5	12.3	5.5	Mediante tubería de compuerta	2.9	11.9
Goteo	9.7	8.8	15.6			
Riego en tiempo real	ND	ND	1.6			
Otro sistema no especificado	14.1	5.1	6.7			

*Nota.* Tabla de datos agrícolas de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014 y 2017. 2017, INEGI.

Empleando como referencia el Cálculo del Agua Renovable al Año 2017 de las Estadísticas del agua en México, 2017, el agua renovable per cápita a nivel

nacional disminuirá de 3,692 m<sup>3</sup> por habitante por año a 3,250 m<sup>3</sup> para el año 2030, como resultado del crecimiento de la población. Cabe mencionar que, para usos consuntivos del agua en México, el 61 % es superficial y el 39 % es subterránea. Agrupados en 4 categorías principales, se categorizan los usos consuntivos, quedando mayormente con un 76 % destinado al sector agrícola, principalmente para riego; un 14.4 % para abastecimiento público; un 4.9 % para la industria y un 4.7 % para la energía eléctrica (excluyendo hidroelectricidad) (CONAGUA, 2018c).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) promueve el manejo integrado y sostenible del agua en cuencas y acuíferos. Las aguas superficiales y subterráneas de México, obtenidas con la infraestructura correspondiente, abarcan una superficie irrigada de 7.32 millones de hectáreas, de las cuales aproximadamente 3.3 millones están bajo la jurisdicción de los Distritos de Riego, mientras que en las Unidades de Riego (UR) se tienen inventariadas alrededor de 4.02 millones de hectáreas (ver Tabla 2) (CONAGUA, 2018b, 2018d).

**Tabla 2**

*Superficie Total, Agrícola, de Riego y Temporal en México*

Estratos de superficie	Superficie (Hectáreas)			
	ENA 2014	%	ENA 2017	%
<b>Superficie total</b>	<b>109 254 749</b>	<b>100</b>	<b>110 258 153</b>	<b>100</b>
<b>Superficie agrícola de las UP</b>	<b>27 496 118</b>	<b>25.2</b>	<b>32 406 237</b>	<b>29.4</b>
Superficie de riego	5 576 992	20.3	6 810 762	21.0
Superficie de temporal	21 919 126	79.7	25 595 475	79.0
<b>Superficie de agostadero, enmontada y de otro tipo</b>	<b>81 758 631</b>	<b>74.8</b>	<b>77 851 916</b>	<b>70.6</b>

*Nota.* Tabla de datos agrícolas. Reproducida de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014 y 2017. 2017, INEGI.

Conforme al cálculo de la precipitación normal 1981-2010, anualmente México recibe del orden de 1'449,471 hm<sup>3</sup> (unidad de millón de litros en un volumen de 100x100m) de agua en forma de precipitación. Con los últimos cálculos hidrológicos disponibles al 2017, se estima que el 72.15 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera. El 24.77 % escurre por ríos y arroyos. El 6.38 % restante se infiltra y recarga los acuíferos. Entonces se estiman 451,585 hm<sup>3</sup> de agua dulce renovable al año, a lo que se denomina también disponibilidad natural media (CONAGUA, 2018a).

Para el estado de Sinaloa, en el año de 2017, los volúmenes concesionados para usos consuntivos por entidades federativas, recibió el mayor número entre los 32 estados, con un total de 9558.5 hm<sup>3</sup> de agua (10.88 %) de los 87841.5 hm<sup>3</sup> en todo el país, de los cuales se destinaron 9005.4 hm<sup>3</sup> al sector agrícola (94.2 % del volumen concesionado al estado), lo que posiciona a esta entidad con un papel muy importante en el manejo del recurso hídrico y las actividades económicas agrícolas (CONAGUA, 2018c).

### **2.1.2. El Riego en Maíz**

El maíz blanco (*Zea mays* L.) es el segundo cultivo en importancia en México, con una producción de 23.1 millones de hectáreas, antecedido por la Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con 56.4 millones. Esto coloca en un 5to lugar de producción de maíz al país, a nivel global hasta el año 2015 y posteriormente al año 2018, se ha mantenido en 8° lugar (FAO, 2020). En México, según datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2017 (INEGI, 2017), nos muestran que, la producción de maíz ocupa la mayor superficie cultivada

anualmente: 6.9 millones de hectáreas cultivadas mayoritariamente con el 78 % de superficie de temporal y el 12 % restante con riego.

En cuanto a la producción de maíz grano blanco fue de 23.1 millones de toneladas, el cual se posiciona como el cultivo de granos con mayor producción en el país, superior al maíz amarillo, arroz (*Oryza sativa*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), sorgo (*Sorghum spp*) y trigo (*Triticum spp*). Esto se traduce al 27.3 % de la producción agrícola nacional, aumentando casi una tasa promedio del 10 % con respecto al año 2014, derivado del incremento en los rendimientos de la cosecha, mostrado en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Relación de la Superficie Sembrada y Producción de Granos*

Nombre del cultivo	Producción (toneladas)			Superficie sembrada o plantada (hectáreas)		
	ENA 2012	ENA 2014	ENA 2017	ENA 2012	ENA 2014	ENA 2017
Arroz	133 125	139 354	134 524	22 900	22 869	22 610
Frijol	1 288 152	1 434 668	1 308 282	1 919 453	1 878 933	1 912 609
Maíz grano amarillo	NA	NA	8 071 840	NA	NA	1 502 326
Maíz grano blanco	NA	21 087 445	23 142 203	NA	6 715 157	6 947 000
Sorgo grano	6 074 303	7 196 030	NA	1 658 563	2 199 230	2 175 099
Trigo grano	3 175 169	3 494 575	3 214 047	571 323	695 290	640 580

*Nota.* Tabla de datos agrícolas de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014 y 2017. 2017, INEGI.

De acuerdo con información generada por el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019), organismo de SAGARPA, en el año 2019, Sinaloa cultivó 1,058,757.54 hectáreas, con un valor de producción de \$61,018,864.52 pesos, de las cuales, el maíz grano ocupó 557,279.25 hectáreas que representó un poco más de la mitad de superficie destinada para sembrar (52.6 % del total) y con un valor de \$ 23,513,613.70 pesos.

Con base en lo anterior, en el año 2019, Sinaloa fue el principal estado productor de maíz con modalidad de riego (44.5 % de la producción nacional). Los rendimientos de maíz promedios con agricultura de riego en el estado son de 12.2 t ha<sup>-1</sup> y en temporal 2 t ha<sup>-1</sup>, mientras que el rendimiento promedio nacional para riego se calcula en aproximadamente 6.5 t ha<sup>-1</sup> y 2 t ha<sup>-1</sup> para temporal. Esto muestra las diferencias tecnológicas, edáficas y ambientales de las zonas maiceras de México.

Por otra parte, el ejercicio de Planeación Agrícola Nacional 2017-2030 (SAGARPA, 2017) estimó un aumento de producción de maíz blanco en un 74,34 % para el año de 2030, con respecto al año 2016, obteniendo 42.82 millones de toneladas, en base a la capacidad instalada actual, rendimientos de referencia históricos y considerando que no se incrementará la frontera agrícola reportada al 2016. Esto es propuesto, entre otras, por indicadores demográficos, como para el año 2015, de acuerdo a la Encuesta Intercensal por (INEGI, 2015), expone 119,938,473 personas en México y la Comisión Nacional de Población (CONAPO, 2018) estima una población de 138 millones para el año 2030, como 148 millones de habitantes al año 2050 (alrededor de un 16 % y 23 % de aumento respectivamente para cada año).

## **2.2. La Humedad del Suelo**

### **2.2.1. *Propiedades del Suelo que Influyen en el Almacenamiento del Agua***

En lo relativo a los suelos, poseen varias propiedades que los caracterizan y diferencian. De acuerdo con las definiciones de Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, (2015), entre las más importantes, relacionadas con el riego son:

- Textura.
- Materia orgánica.
- Densidad aparente y real.
- Porosidad del suelo.

Otra característica importante es la profundidad radicular que depende del cultivo establecido.

#### **2.2.1.1. Textura.**

Se define con respecto al tamaño de las partículas que lo conforman, clasificadas en tres clases de acuerdo con su tamaño: arena, limo y arcilla. De éstas, se desprenden 12 clases texturales como se muestran en la Tabla 4, en función de los porcentajes de las fracciones granulométricas del suelo, la cual se define por la fracción dominante de porcentaje que posee respecto de las otras. Si estas fueran porciones similares, se dice que será una textura franca o migajonosa, donde los mejores suelos agrícolas son este tipo de suelos, pues presentan propiedades intermedias con relación a su capacidad de drenaje y aeración, retención de humedad y nutrimentos.

**Tabla 4**

*Tipos de Textura*

Clave	Clase de textura
R	Arcillosa
RI	Arcillo limosa
Ra	Arcillo arenosa
Cr	Franco arcillosa
CrI	Franco arcillo limosa
Cra	Franco arcillo arenosa
C	Francosas
CI	Franco limosa
L	Limosa
Ca	Franco arenosa
Ac	Areno francosa
A	Arenosa

*Nota.* Adaptada de la Norma Oficial Mexicana NOM-02-RECNAT-2000, por SEMARNAT, 2002.

**2.2.1.2. Materia orgánica (MO).**

Consta de residuos animales y vegetales en estados de descomposición, en una continua degradación por microorganismos del suelo. La MO actúa como material cementante en la formación de nuevos agregados, incrementa la infiltración, la capacidad de retención de agua y nutrimentos, disminuye la erodabilidad y la resistencia del suelo a penetración de las raíces. Comúnmente se expresa su contenido en el porcentaje de su peso con respecto al peso seco de la muestra, que en suelos agrícolas varía desde el 0.5 al 5 %.

### 2.2.1.3. Densidad aparente ( $\rho_a$ ).

Es la relación entre la masa de sólidos  $M_s$  y el volumen total del suelo  $V_t$ , definido su fórmula en la Ecuación (1).

$$\rho_a = \frac{\text{masa de la muestra seca}}{\text{volumen total de la muestra}} = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

Considera el espacio poroso del suelo entre las partículas sólidas, por lo que valores altos indicarán suelos compactados con problemas para la penetración del agua, aire y raíces. Los suelos arenosos tienen mayor densidad aparente que los arcillosos, debido a su menor porosidad.

### 2.2.1.4. Densidad real o de partículas sólidas ( $\rho_s$ ).

Es la relación entre la masa de partículas sólidas  $M_s$  y el volumen total que ocupan  $V_s$ , definido su fórmula en la Ecuación (2).

$$\rho_s = \frac{\text{masa solida de la muestra seca}}{\text{volumen solido total de la muestra}} = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

A diferencia de la densidad aparente, ésta no considera el espacio poroso, como si el suelo se comprimiera lo suficiente liberando el aire que ocupa el espacio poroso para formar un sólido. Este valor sirve para tener una idea de los minerales presentes en el suelo, así como también poder interpretar mejor la densidad aparente y estimar la porosidad, es decir el porcentaje de espacio ocupado por poros en un suelo.

### 2.2.1.5. Porosidad del suelo ( $\epsilon$ ).

Es el espacio ocupado por aire y agua, por unidad de volumen de suelo. Comúnmente los suelos arenosos tienen menor espacio poroso que los arcillosos. El contenido volumétrico de sólidos o espacio sólido es el volumen de sólidos

contenido por unidad de volumen de suelo. La suma entre la porosidad y el espacio ocupado por los sólidos es igual a la unidad, por lo que se puede estimar la porosidad con la Ecuación (3).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (3)$$

Donde  $\varepsilon$  es la porosidad del suelo,  $\rho_a$  es la densidad aparente,  $\rho_s$  es la densidad real,  $V_v$  el volumen de vacíos y  $V_t$  el volumen total del suelo.

La porosidad está determinada principalmente por el acomodo que presentan las partículas del suelo, por ejemplo, los suelos arcillosos presentan valores altos de porosidad debido a que las cargas eléctricas hacen que las partículas se acomoden dejando mucho espacio libre (poros), contrariamente a los arenosos, con bajos valores de porosidad, debido a la baja capacidad reactiva de sus partículas. Así mismo, el diámetro promedio de los poros en suelos arenosos es mayor que en arcillosos, teniendo velocidades altas de infiltración del agua y la capacidad de retención es alta. El tamaño de estos poros es importante para el crecimiento de las raíces.

#### **2.2.1.6. Profundidad efectiva o radicular ( $P_r$ ).**

Es una característica que se toma en cuenta para la determinación de la cantidad de agua que puede retener un suelo, ya que determina el volumen de agua que puede almacenar. A una mayor profundidad permite al cultivo, un mejor arraigamiento y mayor superficie de dónde explorar en busca de agua y nutrientes. De igual manera, es la profundidad a la cual la planta no tiene impedimentos físicos para el correcto crecimiento de las raíces en el suelo.

De acuerdo con la Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos de (FAO, 2006), la profundidad radicular máxima para el Maíz Grano va desde 1.0 a 1.7m, tomando en cuenta una fracción de agotamiento ( $p$ ) de 0.55 (Para una evapotranspiración (ET) a  $5\text{mm día}^{-1}$ ).

#### **2.2.1.7. Contenido de Humedad en el Suelo.**

Unos parámetros del umbral o límites del contenido de humedad son la Capacidad de Campo ( $\theta_{CC}$ ) y Punto de Marchitamiento Permanente ( $\theta_{PMP}$ ) como se observa en la ) como se observa en la Figura 1, las cuales identifican los límites para la Humedad Aprovechable (HA) en el suelo de cultivo, describiendo la variación entre las dos anteriores, generalmente expresado en porcentaje volumétrico, en función de la textura del suelo y esto se muestra en la Figura 2, mostrando la relación del rendimiento de dos cultivos bajo condiciones de estrés hídrico y el contenido de humedad de suelo. Se le conoce como Humedad Totalmente Aprovechable el rango entre la capacidad de campo y punto de marchitez permanente, descrita en la Ecuación (4).

$$HA = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (4)$$

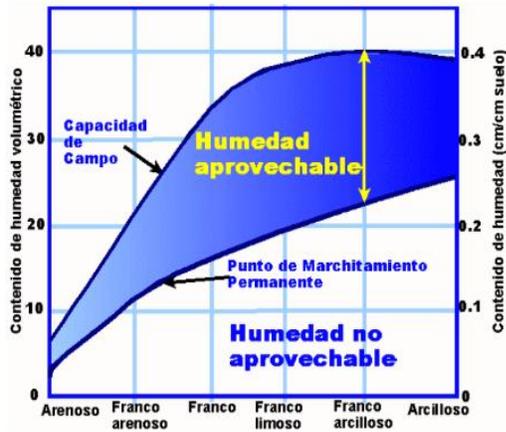
La humedad disponible actual del suelo está dada por la ecuación (5).

$$HD = \theta_{CC} - \theta_a \quad (5)$$

Donde  $\theta_a$  es la humedad actual del suelo.

## Figura 1

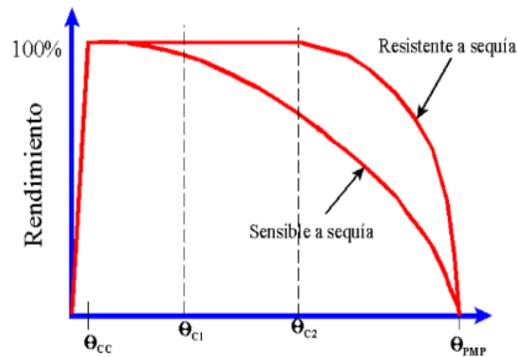
Constantes de humedad para varias texturas de suelo



Nota. Reproducida de Calendarización del riego: Teoría y práctica, Ojeda et al., 2015.

## Figura 2

Rendimiento de Cultivos en Condiciones de Estrés Hídrico



Nota. Se muestran dos vectores representando a dos cultivos en condiciones de estrés hídrico por el contenido de humedad. Reproducida de Calendarización del riego: Teoría y práctica, Ojeda et al., 2015.

Otro concepto es la Humedad Fácilmente Aprovechable (HFA), fracción que puede ser absorbida por la planta sin presentar estrés hídrico. En este punto no se afectan los rendimientos, pero sí lo hará cuando a como se va acercando al

punto de marchitamiento permanente. Por consiguiente, no se considera a la HA como el rango utilizable para el cultivo, sino que sólo una fracción, mejor conocida como Factor de Abatimiento o Déficit Máximo de Humedad Permisible (f). Este valor depende tanto del cultivo como del suelo, el riego y condiciones ambientales, así como la etapa fenológica que se encuentre. El valor crítico de humedad puede estimarse entonces como la fórmula de la ecuación (6):

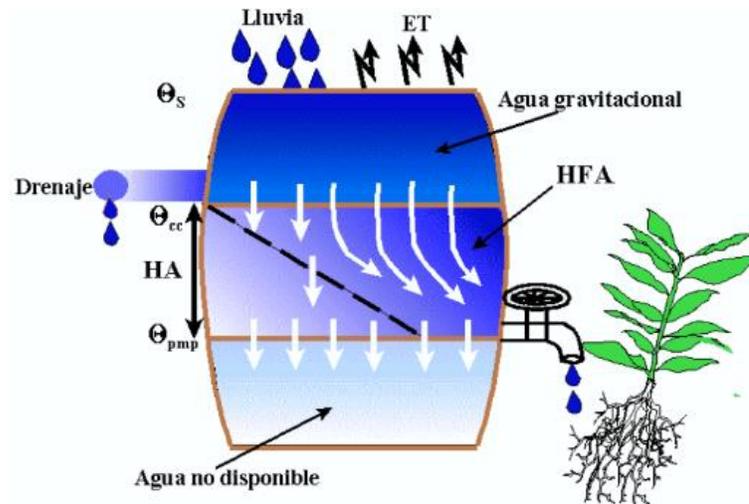
$$\theta_c = \theta_{CC} - f(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) = \theta_{CC} - f(HA) \quad (6)$$

Respecto al maíz, posee una alta sensibilidad durante la polinización, floración y formación de grano, teniendo valores de f entre 0.4 y 0.8, así como también propiamente los cultivos de riegos con baja frecuencia (riego por gravedad) varía igualmente de 0.4 a 0.8 (Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015).

Para mostrar gráficamente los parámetros de humedad del suelo, se presenta modelando al suelo en tres compartimentos identificando los tres volúmenes de almacenamiento de agua en el suelo (ver Figura 3). El primero de ellos (superior) muestra el agua gravitacional o libre que se mueve por fuera de las raíces, entre la saturación y la capacidad de campo; El segundo representa a la humedad aprovechable (HA), dispuesta para las plantas a través de sus raíces y el último (inferior) es el agua retenida en el suelo y no disponible para las plantas. Así mismo se pueden apreciar las diferentes barreras o límites que forman la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente.

### Figura 3

#### Constantes de humedad del suelo



Nota. Reproducida de Calendarización del riego: Teoría y práctica, Ojeda et al., 2015.

Paralelamente, después de mostrar la importancia de las constantes de la humedad del suelo, existen diferentes métodos para medirla. Estos pueden ser directos, basados en la extracción y cuantificación del agua del suelo mediante procesos de secado, destilación o absorción, así como también métodos indirectos, que se basan en la determinación de la variabilidad de propiedades fisicoquímicas relacionadas al contenido de humedad. Usualmente se analizan contenidos energéticos del agua presente en los poros del suelo, propiedades termales o eléctricas del suelo.

El contenido de humedad en el suelo puede expresarse en unidades gravimétricas (masa/masa = gramos/gramos), en unidades volumétricas

(volumen/volumen =  $L^3/L^3$ ) o en términos de lámina de agua por unidad lineal de profundidad de suelo (mm o cm) (Calvache, 2013).

En relación con la lámina de riego, si se tiene un cubo de  $1m^3$  de suelo con contenido de humedad volumétrico de 0.3, quiere decir que 30cm del espesor del cubo es el agua ( $100cm \cdot 0.3$ ), en un área de  $1m^2$ . En otras palabras, un valor de 30cm/m de suelo es equivalente al 30 % en porcentaje volumétrico de humedad.

$$Lr = (\theta_{v2} - \theta_{v1})P_r = \Delta\theta_v P_r \quad (7)$$

Donde  $P_r$  es la profundidad reticular y  $\Delta\theta$  el incremento en contenido de humedad.

Si el contenido está dado en unidades gravimétricas, la ecuación (7) incluye la densidad aparente relativa en la ecuación (8):

$$Lr = (\theta_{m2} - \theta_{m1})\rho_a P_r = \Delta\theta_m \rho_a P_r \quad (8)$$

Por lo tanto, si la humedad final e inicial, en unidades gravimétricas es el contenido de humedad en capacidad de campo y en punto de marchitamiento permanente, entonces la lámina para llevar el suelo a capacidad de campo, asumiendo un contenido de humedad inicial a punto de marchitamiento permanente, está dada por la ecuación (9):

$$HTA = \frac{(W_{CC} - W_{PMP})}{100} \rho_a P_r = \Delta\theta_m \rho_a P_r \quad (9)$$

A partir de esta última lámina, expresando el incremento en decimales y resolviendo con los demás parámetros, se le denomina entonces, como Humedad Totalmente Aprovechable (HTA). (FAO, 2006)

En lo relativo a los suelos, poseen varias propiedades que los caracterizan y diferencian. De acuerdo con las definiciones de Ojeda y Flores (2015), entre las

más importantes, relacionadas con el riego son la textura, la materia orgánica, porosidad del suelo, densidad y profundidad efectiva o radicular, que es la medida de la profundidad de las raíces a la cual la planta no tiene impedimentos físicos para el correcto crecimiento de éstas, en el suelo (Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015).

Del mismo modo, estas anteceden un conjunto de variables que precisan el tipo de suelo y poder conocer el comportamiento estimado del agua en el mismo, con la finalidad de saber el umbral o límite de contenido de humedad para aprovecharse en el riego de las plantas. Dos principales son la Capacidad de Campo CC y Punto de Marchitamiento Permanente PMP. En este límite es donde la planta inicia la absorción del agua y marca también el punto en que la planta va a marchitarse sin poder recuperarse. Por lo tanto, es imprescindible conocer el tipo de propiedades del suelo con que se conforma el área de estudio.

### **2.3. Método de Bouyoucos**

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, tiene por objetivo establecer las especificaciones técnicas de muestreo y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, a partir de sus características específicas de constitución, formación y distribución (SEMARNAT, 2002). Es por ello por lo que, hay diversas maneras para determinar la textura del suelo, de manera precisa, está estipulado realizar el Método del hidrómetro o de Bouyoucos, con la finalidad de poder estimar las variables de la humedad del suelo en el área de estudio, previamente a poder obtener otro tipo de resultados

directos en laboratorios especializados para la determinación de Capacidad de Campo y Punto de Marchitamiento Permanente PMP.

Esta metodología se fundamenta en la determinación cuantitativa en porcentaje de la distribución del tamaño de las partículas de las fracciones finas presentes en los suelos una vez que se tamiza, es decir, partículas de arena (0.005 a 0.075mm), de limo (0.002 a 0.005mm) y arcilla (<0.002mm) (Jiménez & González, 2020). Asimismo, el hidrómetro “ASTM Soil Hydrometer 152H” es un instrumento que se utiliza para medir la densidad relativa de los líquidos; el mismo, está construido de vidrio y consiste en un cilindro hueco con un bulbo pesado. En uno de sus extremos está graduado en unidades de densidad  $g L^{-1}$  de  $-0.5$  a  $60$  con base en la escala de Bouyoucos y su función es hacer que flote verticalmente el bulbo (Bouyoucos, 1927).

Las lecturas realizadas con el hidrómetro a los primeros 20 segundos y 2 horas, se les toma la temperatura y se realiza una corrección que se suma o resta ya sea el caso, como lo representa en la Tabla 5, de acuerdo con lo obtenido en cada una, para poder obtener el álgebra del cálculo del contenido de cada parte del sedimento en cuestión.

**Tabla 5***Tabla de Corrección por Temperatura*

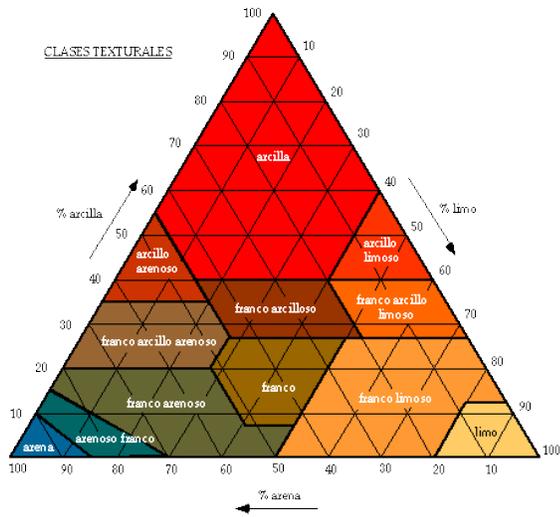
Temp. °C	Corrección	Temp. °C	Corrección
15.0	- 1.62	21.5	+ 0.18
15.5	- 1.44	22.0	+ 0.90
16.0	- 1.26	22.5	+ 1.08
16.5	- 1.08	23.0	+ 1.26
17.0	- 0.90	23.5	+ 1.44
17.5	- 0.72	24.0	+ 1.62
18.0	- 0.54	24.5	+ 1.80
18.5	- 0.36	25.0	+ 1.98
19.0	- 0.18	25.5	+ 2.15
19.5	- 0	26.0	+ 2.34
20.0	+ 0.18	26.5	+ 2.52
20.5	+ 0.36	27.0	+ 2.70
21.0	+ 0.54	27.5	+ 2.858
		28.0	+ 3.06

*Nota.* Se presentan las correcciones a las lecturas del hidrómetro, de acuerdo con la temperatura.

Paralelamente a definir estos porcentajes que contiene el suelo del área de estudio, se tiene que identificar a qué tipo de clase textural pertenece en función a los resultados obtenidos, por lo cual se dispone del diagrama textural de la Figura 4, herramienta establecida por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA (USDA, 2000). Es un triángulo equilátero en el cual cada arista representa a cada segmento de las fracciones de partículas en porcentaje de 0 a 100, donde el 100 % de uno, es el 0 % de la siguiente fracción, en sentido horario. Para ello se intersectan al menos dos valores de porcentaje y trazar una recta desde ambos puntos (Gisbert et al., 2010). Ahí es donde obtenemos el tipo de textura y se muestran en la Tabla 6.

## Figura 4

### Diagrama de Texturas



Nota. Reproducido de Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS, por Carlos Dorronsoro, 1999, (<http://www.edafologia.net/introeda/tema04/text.htm>). CC BY 4.0

**Tabla 6**

*Clases Texturales por Porcentajes de Contenido*

Arcillosa	Arcilla $\geq$ 40 %		
	Limo < 40 %		
	Arena < 45 %		
Areno-arcillosa	Arcilla $\geq$ 35 %		
	Arena $\geq$ 45 %		
Franco-arcillosa	Arcilla = 27 a 40 %		
	Arena = 20 a 45 %		
Limo-arcillosa	Arcilla $\geq$ 40 %		
	Limo $\geq$ 40 %		
Franco-limo-arcillosa	Arcilla = 27 a 40 %		
	Arena < 20 %		
Franco-areno-arcillosa	Arcilla = 20 a 35 %		
	Limo < 28 %		
	Arena $\geq$ 45 %		
Franca	Arcilla = 7 a 27 %		
	Limo = 28 a 50 %		
	Arena < 52 %		
Franco-limosa	Sí Arcilla < 12 %		
	Limo = 50 a 80 %		
	Sí Arcilla = 12 a 27 %		
Limosa	Arcilla < 12 %		
	Limo $\geq$ 80		
Franco-arenosa	Arcilla $\leq$ 20 %	ó	
	Limo + (2.0 x Arcilla) > 30 %		Arcilla < 7 %
	Arena $\geq$ 52 %		Limo < 50 % Arena = 43 a 52 %
Arenosa-franca	Sí Limo + (1.5 x Arcilla) $\geq$ 15 %		
	Arena = 85 a 90 %		
	Sí Limo + (2.0 x Arcilla) $\leq$ 30 %		
Arenosa	Limo + (1.5 x Arcilla) $\leq$ 15 %		
	Arena $\geq$ 85 %		

*Nota.* Reproducido de “La Textura del Suelo” (p.6), por Juan Gisbert et al., 2010, RiuNet, Universitat Politècnica de València.

Algunas características de los suelos en base con su clase textural se pueden describir en Tabla 7:

**Tabla 7***Propiedades del Suelo con Relación a la Textura*

Textura	Conductividad hidráulica (cm/h)	Porosidad (%)	Densidad aparente (mg/m <sup>3</sup> )	CC (% peso)	PMP (% peso)	CRAD (% vol)
Arenoso	5 (2.5-25)	38 (32-42)	1.65 (1.55-1.8)	9 (5-16)	4 (2-6)	8 (6-10)
Franco arenoso	2.5 (1.3-7.6)	43 (40-47)	1.5 (1.4-1.6)	14 (10-20)	6 (4-8)	12 (9-15)
Franco	1.3 (0.8-2.0)	47 (43-49)	1.4 (1.35-1.5)	22 (15-30)	10 (8-12)	17 (14-20)
Franco arcilloso	0.8 (0.25-1.5)	49 (47-54)	1.35 (1.3-1.4)	27 (25-35)	13 (11-15)	19 (16-22)
Arcilloso limoso	0.25 (0.3-0.5)	51 (49-53)	1.3 (1.3-1.4)	31 (27-40)	15 (13-17)	21 (18-23)
Arcilloso	0.05 (0.01-1.0)	53 (51-55)	1.25 (1.2-1.3)	35 (30-70)	17 (15-19)	23 (20-25)

*Nota.* Donde CC, capacidad de campo; PMP, punto de marchitamiento permanente; CRAD, capacidad de retención de agua disponible. Los valores entre paréntesis corresponden al rango más común (FAO, 2006; Flores & Alcalá, 2010; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015; USDA, 2000).

**2.4. Estimación de la Humedad del Suelo****2.4.1. Metodologías Directas**

Algunos estudios realizados con mediciones directas con el método del tacto, que al apretar la tierra entre el pulgar y el dedo índice o al exprimir la tierra en la palma de la mano, se puede obtener una estimación bastante aproximada de la humedad en el suelo, teniendo una relación entre la textura del suelo y la forma que obtiene la muestra en la mano (USDA, 2000).

Otro método directo es la determinación la humedad volumétrica del suelo, donde extrae muestras del suelo agrícola con un artefacto que conoce su volumen y para introducir el sedimento con humedad directamente, pesándolo inicialmente para luego calentarlo en un horno 24 horas a 105°C. Posteriormente vuelve a pesar la muestra y calcula la relación del contenido de humedad perdido en peso y contrastando contra mediciones termogravimétricas (Radulovich, 2009).

La humedad volumétrica, generalmente, se calcula como un porcentaje del volumen total del suelo. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, tiene por objetivo establecer las especificaciones técnicas de muestreo y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, a partir de sus características específicas de constitución, formación y distribución. Aquí se describe la metodología para llevar a cabo la determinación del contenido de humedad del suelo por gravimetría, realizado por el método AS-05 (SEMARNAT, 2002).

Este método se basa en la medición o determinación de la cantidad de agua expresada en gramos que contiene una muestra de suelo. Esta masa de agua se referencia de la masa de suelo seco de la muestra y su determinación de la masa de agua es a través de la diferencia en peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco. Se considera como suelo seco aquél secado a la estufa a 105°C hasta obtener un peso constante.

Concluye que es un método destructivo, pero muy sencillo, de bajo costo y muy preciso, aunque demora el tiempo del desarrollo para su cálculo después de obtener las muestras.

Por contraparte, algunas herramientas para los métodos indirectos son descritos por Muñoz, (2017), por ejemplo, una sonda de neutrones, la cual contiene una fuente radioactiva que envía neutrones rápidos, aproximadamente del tamaño de un componente esencial del agua, como el átomo de hidrógeno, que al chocar con los átomos de hidrógeno se vuelven más lentos, en el cual un detector incluido en la sonda mide la proporción de los electrones rápidos y lentos

que regresan y poder obtener una relación para estimar el contenido de humedad, sin embargo se requiere calibrar para cada suelo puesto que se tienen diversas fuentes de hidrógeno, su costo es bastante caro y requieren permiso para el uso de material radioactivo (Martin & Munoz, 2017).

Otro caso de instrumentación son los Bloques de yeso, los cuales miden la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con el suelo y estos bloques se conectan a un medidor para tomar lecturas. Su uso es prácticamente limitado ya que funcionan bien en el rango de humedad disponible alto, pero impreciso en el rango bajo, aunque su costo es relativamente barato.

En la misma línea, se tienen las mediciones de la tensión del suelo a medida que sus partículas retienen con mayor fuerza el agua cuando se seca. La magnitud de esta intensidad es obtenida con tensiómetros con una punta de cerámica en la punta o porosa en una columna de agua a cierta profundidad, por lo que el suelo absorbe agua de esa columna cuando se va secando y produce una succión en el bulbo de cerámica, generando una fuerza de succión, medida y tomada su lectura ya sea en un marcador de aguja o electrónico. Su funcionamiento es bueno en altos contenidos de agua, pero tienden a perder buen contacto con el suelo cuando la tierra se pone muy seca. Su costo implica un factor importante para decidir por alguno, tales como un precio barato con medidores de aguja o los dispositivos electrónicos que son muy caros, aunque se pueden obtener lecturas en múltiples sitios.

Por su parte, la medición con sensores del método de reflectometría de dominio temporal TDR, basados en la determinación de la constante dieléctrica

de un objeto mediante el uso de electrodos que se insertan dentro del objeto del cual se requiere conocer tal constante, que es utilizado como tal en la estimación del contenido de humedad del suelo, ya que esta constante es mucho mayor que la de cualquier otro componente del suelo. Es muy práctico, sin embargo, varios estudios reportaron la necesidad de calibrarse en laboratorio o in situ, para poder estimar razonablemente el contenido volumétrico del agua del suelo, y Quichimbo et al., (2016), realizaron una comparación entre el método gravimétrico y la reflectometría, obteniendo correlaciones bajas en texturas arcillosas que sería necesario calibrar específicamente para estos suelos.

#### **2.4.2. Metodologías Indirectas**

Existen herramientas tecnológicas computacionales y software, como Irrimodel (INIFAP & CENID-RASPA, 2007), un sistema inteligente para programación de riego bajo condiciones variables de clima y de disponibilidad de agua y manejo. Pronostica el riego con un alto nivel de precisión basado en el concepto grados día (GD). Con aplicación a nivel parcelario (un productor) o por distritos de riego, llevando un seguimiento automático de la variación de la humedad del suelo en la zona de raíces (Balance de humedad). La plataforma se enlaza en forma automática vía internet a la red de estaciones climáticas de la red INIFAP y ejecuta los procesos de programación integral de riego de un número indefinido de parcelas manejadas por los usuarios, éstos pueden ser productores técnicos y operadores de módulos de riego. Para tener acceso a la plataforma el usuario debe solicitar al CEVAF un usuario y contraseña, estar conectado a internet y dar de alta parcelas y siembras con la información requerida por el

mismo programa, por ejemplo, tipo de suelo, estación meteorológica más cercana, fecha de siembra, cultivo, variedad y sistema de riego.

Con referencia a la tecnología de las redes inalámbricas de sensores (RIS o WSN, por sus siglas en inglés), consisten en varios módulos electrónicos con sensores distribuidos en un área para monitorear, donde se obtiene la información por los sensores y procesada en los nodos, se transmite inalámbricamente entre los demás nodos sensores o bien, un nodo coordinador, que está conectado a un servidor y registra toda la información de la RIS. Estos sistemas deben de ser adecuados para las condiciones del lugar, funcionar sin requerir un mantenimiento continuo y fiable, alimentados de energías renovables, autónomos, sustentables, y económicos, de tal modo que desde un lugar remoto se tenga acceso a la información (Flores-Medina et al., 2015).

La calendarización del riego es una de las tareas empleadas para calcular el volumen de agua para cada parcela y tipo de cultivo en específico, tomando en cuenta información oportuna y completa de los cambios probables en el contenido de humedad, el pronóstico de la fecha y lámina del riego próximo para cada una de las parcelas, la estimación cuantitativa de los efectos adversos en la calidad y cantidad del rendimiento al posponer o adelantar el riego y por último los parámetros que permiten evaluar si los objetivos del riego fueron cumplidos. Es una idea central en la estimación de cuánto y cuándo hay que aplicar el riego a los cultivos a lo largo de su ciclo fenológico. Tal como describen estudios de INIFAP & CENID-RASPA, (2007); Ojeda-Bustamante et al., (2006) y Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, (2015), el proceso es una tarea compleja que

involucra varios factores, como la tasa consuntiva de cultivos que varía hora a hora, capacidad de retención y transmisión de agua en los suelos, el tipo y capacidad de los sistemas de suministro y del riego, así como de sistema de aplicación del riego.

#### **2.4.2.1. La Percepción Remota o Teledetección.**

Por otro lado, la percepción remota se ha convertido en una herramienta útil para la solución de problemáticas dentro del territorio cubriendo grandes extensiones de la superficie terrestre, apreciando las características de cualquier zona, por medio de procesamientos de imágenes, dando como resultados los cambios de uso de suelo, densidades vegetativas, contaminación del suelo, entre otras, que por medio de este se han podido observar e identificar algunas de las propiedades físico - químicas. Por lo tanto, es una herramienta accesible para detectar humedad en el suelo, como un método indirecto que no requiere obtener datos en terreno.

En este sentido, Douglas-Mankin, (2018), describe que existen muchas más oportunidades para aprovechar los datos multiespectrales de sistemas aéreos no tripulados (UAS) e imágenes satelitales para revolucionar la investigación en sistemas agrícolas y naturales, con un desafío en la aplicación de manera remota, los datos detectados para mejorar la comprensión de las distribuciones espacio-temporales y tendencias de humedad del suelo, estrés de cultivos, patrones de vegetación, cambio de uso del suelo, erosión efímera de barrancos, degradación de arroyos, cambios geomorfológicos de un canal aluvial, sedimentación en estanques / lagos, calidad del agua, acumulación de nieve,

tierras de cultivo y bosque estructura del dosel, características del recurso terrestre, así como numerosas otras propiedades y procesos del agroecosistema.

Partiendo de la información previamente mencionada se tiene que hay diferentes instrumentaciones y metodologías desarrolladas para la obtención de variables del suelo como la humedad que posee, ya sean métodos directos o indirectos, pero siempre manifiestan algunas desventajas, por lo que para un estudio de una extensión territorial local o parcelaria en una zona que se encuentran múltiples terrenos agrícolas, se requieren datos precisos con resoluciones temporales y espaciales mayores, dando lugar a resultados donde el muestreo es continuo y no puntual como el caso de las mediciones en campo contando con las herramientas para el análisis espectral de imágenes obtenidas con sistemas aéreos piloteados remotamente, así como una mayor disponibilidad y factibilidad respecto al costo y operación de estos sistemas en relación a imágenes obtenidas con sensores satelitales.

En adición a la percepción remota en la humedad del suelo, proporciona una cobertura generalizada y puede superar este problema, pero sufre otros problemas derivados de su baja resolución espacial. En este contexto, el algoritmo de desagregación basado en el cambio de escala física y teórica (DISPATCH) Fontanet et al., (2018) utilizado para reducir la escala de datos satelitales de humedad del suelo de 40 a 1 km de resolución combinando datos de humedad suelo de baja resolución de la misión satelital SMOS, con los conjuntos de datos del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de alta resolución y temperatura de la superficie terrestre (LST) obtenidos de un sensor de

espectroradiómetro de imagen de resolución moderada (MODIS). En este trabajo, comparó las estimaciones DISPATCH con sensores de humedad del suelo y mediciones gravimétricas para validar el algoritmo DISPATCH.

Los resultados muestran estimaciones apropiadas de la humedad del suelo durante los eventos generales de lluvia, pero no cuando el riego por aspersión genera heterogeneidad ocasional. Para explicar estas diferencias, muestran que las escalas espaciales asociadas con las propiedades NDVI y LST son demasiado grandes para representar las variaciones de la humedad promedio del suelo en el sitio.

La posibilidad de estimar la humedad del suelo a partir de imágenes de manera remota es atractiva, ya que se adquiriría información espacialmente distribuida, con cierta frecuencia y en este sentido, poder estudiar las variaciones de la humedad que presente en cierto tipo de suelo agrícola bajo ciertas condiciones de análisis, de tal manera que no sean solamente estudios y relación de variables medidas in situ, sino involucrando también las aplicaciones de teledetección con sensores multiespectrales montados en plataformas de sistemas aéreos piloteados remotamente, suponiendo mejores resoluciones, tanto espaciales y temporales en primera instancia (Izaguirre-Azkutia, 2011).

Sin embargo, las imágenes aéreas recolectadas con RPAS son cada vez más reconocidas por la comunidad de investigación, como una herramienta importante para monitorear la vegetación y los ecosistemas. Así mismo, por los avances tecnológicos han sido mayormente asequibles el uso de sensores multiespectrales livianos para RPAS con objetivos variados en su aplicación. A

pesar de tener mayor presencia productos obtenidos de éstos, aún no se han desarrollado protocolos estandarizados y mejores prácticas para el mapeo multiespectral. Por ello, Assmann et al., (2019), presentan los desafíos de recopilar y analizar datos multiespectrales adquiridos con plataformas de RPAS y propone protocolos comunes que podrían implementarse en el campo, a partir de ejemplos de aplicación de tecnología de RPAS a la investigación (Assmann et al., 2019). A su vez Bustamante et al., (2016) y Marcial & Ojeda, (2017), también estudian el uso de sensores multiespectrales montados en RPAS para la determinación de variables agronómicas del cultivo de maíz, estimando el índice de área foliar y el Coeficiente de Cultivo  $K_c$  y evapotranspiración, a partir de imágenes multiespectrales.

Luego de revisar diferentes estudios acerca de la humedad del suelo en diferentes cultivos, en base a métodos indirectos como la utilización de la teledetección, se encuentra que, hay misiones satelitales destinadas a la recopilación de imágenes de todo el planeta para diversos fines, tales como estudios de salinidad oceánica, coberturas territoriales a gran escala de la superficie terrestre y su humedad relativa, otros más acerca de cálculos indirectos a través de productos conformados por imágenes satelitales en diferentes rangos del espectro electromagnético, tales como el infrarrojo de onda corta, imágenes de radar y térmicas, consiguiendo indicadores de temperatura y fusionando resultados para determinar la evapotranspiración de la superficie estudiada.

Sin embargo, esto presenta deficiencias en resoluciones espaciales, temporales y otros más factores que son en efecto, debido a que estos sensores

espaciales fueron diseñados e implementados para este tipo de finalidad y dimensiones por observar, por lo que, si se requiere utilizarse para estudios a nivel parcelario, no se apreciarán ciertos detalles que se pretenden encontrar, según sea el caso.

Por otro lado, desde que los vehículos aéreos no tripulados han tenido un auge en el mercado, ha causado que estos sean más accesibles y comunes en diversas tareas que se implementan, pudiendo ser esta una oportunidad para adecuar las tareas de percepción remota satelital y aérea a una visión más cercana y de mayor precisión, de acuerdo con la finalidad del requerimiento de la cobertura de estudio necesaria.

Así mismo, el desarrollo en sensores multiespectrales para este tipo de aeronaves ha sido benéfico ampliando las posibilidades y opciones de selección y adquisición. Además, estructuralmente adaptándose a mejores características de peso, autonomía, mayores resoluciones espectrales, espaciales y radiométricas.

Paralelamente a esto, los rendimientos de cultivos, la optimización de recursos, prácticas sostenibles y en pro del medio ambiente, han sido los resultados de aplicar tareas de agricultura de precisión en diversos casos, abriendo campo y posibilidades para satisfacer demandas de alimentos y sus requerimientos.

Por lo que se refiere a los índices espectrales, existen estudios que utilizan variables como la Temperatura superficial y una función del día del año para estimar el contenido del agua en pastos con imágenes temporales NOAA-AVHRR

(Arango et al., 2015). También Lopez Beltran et al., (2016), trabaja con productos MODIS y parámetros de entrada como temperaturas superficiales terrestres e índices de vegetación como el índice TVDI (Temperature- Vegetation Dryness Index), generado por los productos de la misión TERRA, donde readapta aquellos valores acordes a los cuerpos de agua presentan humedad saturada y ajusta toda la zona de estudio.

En diversos estudios descritos a continuación, se ha analizado la relación entre el comportamiento espectral de las cubiertas vegetales y su contenido en humedad utilizando índices espectrales del Infrarrojo Cercano (NIR) y el SWIR. No obstante, debido a que algunos sensores no disponen del infrarrojo de onda corta (SWIR) se presentan otra serie de trabajos enfocados en el cálculo del contenido de humedad sin esta región del espectro, por ejemplo, el NDVI, utilizando las bandas del Rojo y NIR. Los autores concluyen de manera similar a otros trabajos que, a pesar de las altas correlaciones encontradas, el NDVI no mide directamente al contenido en agua de la planta sino más bien la cantidad de biomasa verde, determinada por el área foliar y el contenido en clorofila.

#### ***2.4.2.1.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).***

Normalized Difference Vegetation Index, es un índice de medida de la cubierta vegetal más utilizado desde su aparición en los primeros productos del sensor ERTS I (Rouse et al., 1973). Sus valores están dados por la banda roja y una en el infrarrojo cercano NIR, que están influenciadas por la cantidad de clorofilas (Red) y el contenido del agua (NIR) (Lopez Beltran et al., 2016), lo que lo coloca como un indicador indirecto del contenido de humedad de suelo,

mediante la respuesta de la planta. Este es expresado como lo indica la Ecuación (10).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (10)$$

es un indicador simple de biomasa fotosintéticamente activa o, en términos simples, un cálculo de la salud de la vegetación. Ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo (artificial) y determinar su estado general. También permite definir y visualizar áreas con vegetación en el mapa, así como detectar cambios anormales en el proceso de crecimiento.

#### **2.4.2.1.2. Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI).**

Green Normalized Difference Vegetation Index, es la vertiente del índice NDVI, pero con la cualidad de sustituir la banda del rojo por el verde y resulta un indicador del “verdor” de la planta o actividad fotosintética de la cubierta vegetal. Es utilizado para determinar la captación de agua y la concentración del nitrógeno en el dosel del cultivo. Es más sensible a la concentración de clorofila y por su respuesta espectral, es utilizado en etapas intermedias o finales de un ciclo de cultivo, así como cultivos con canopeos densos, mientras que el NDVI es adecuado en etapas iniciales. Se describe su fórmula en la Ecuación (11), (Gitelson et al., 1996).

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad (11)$$

#### **2.4.2.1.3. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).**

Soil-Adjusted Vegetation Index, es prácticamente el índice NDVI, con la modificación de agregar un coeficiente para corregir la influencia del suelo, cuando

hay menor vegetación. Este valor ayuda a reajustar la influencia de la banda del rojo. Se expresa su fórmula como la Ecuación (12).

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L) \quad (12)$$

Algunas condiciones como la temperatura o humedad pueden influir en las bandas de trabajo analizadas, por lo tanto, en los resultados ocurre del mismo modo. En este caso este índice trata de evitar la incurrencia del suelo sobre los resultados añadiendo el coeficiente L. El valor de L está dado por la cobertura vegetal, de tal manera que, cuando es densa, tiende a ser igual a 0; contrariamente a las zonas escasas de vegetación, será 1. Ante las zonas con desarrollo vegetativo, el factor L es igual a 0 para inalterar la ecuación y es entonces, igual al NDVI. Los suelos medianamente expuestos tendrán un valor igual a 0,5 (Huete & Jackson, 1988).

#### **2.4.2.1.4. Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE).**

Normalized Difference Red Edge, es un índice que se formula a partir del NDVI, pero ahora modificando su banda roja por la del borde rojo (RedEdge), la cual no siempre está disponible en todos los sensores. Debido a que la luz de borde rojo puede atravesar las hojas mucho más profundamente que la luz roja, es sensible a los niveles medio a altos de contenido de clorofila, y, por lo tanto, al nitrógeno de la hoja. Los valores altos de este índice representan niveles más altos de contenido de clorofila en las hojas, el suelo tiene valores más bajos y las plantas no saludables tienen valores intermedios, pero las más sanas tienen valores más altos (Barnes et al., 2000).

Entonces, es un índice que representa de una mejor manera las condiciones de las plantas que el NDVI para cultivos en temporada media y tardía, ya que este se vuelve más impreciso después de acumular un nivel crítico de cubierta de hojas o contenido de clorofila. Su fórmula se muestra en la Ecuación (13).

$$NDRE = \frac{NIR - REG}{NIR + REG} \quad (13)$$

#### **2.4.2.1.5. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).**

Normalized Difference Water Index, es utilizado generalmente para la identificación de masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad. Diferentes versiones han utilizado bandas espectrales diferentes para la composición de la fórmula, como por ejemplo, la implementación de las bandas NIR y SWIR (Gao, 1996), que el infrarrojo de onda corta muestra una alta absorción de luz debido al agua, pero (McFeeters, 1996) lo modifica para implementar la banda del verde a cambio del infrarrojo de onda corta (SWIR), que esta relación permite maximizar la reflectancia del agua al trabajar con longitudes de onda en el verde, maximiza la reflectancia de vegetación y minimiza la reflectancia de masas de agua gracias al NIR. Se expresa en la Ecuación (14).

$$NDRE = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (14)$$

Es útil para ver las zonas potenciales húmedas y delimitar entornos húmedos. Los valores altos significan suficiente humedad, mientras que los más bajos un estrés hídrico.

#### **2.4.2.1.6. Índice de estrés hídrico por enfermedad (DSWI-4).**

Disease Water Stress Index, es un ratio o razón entre la banda verde y roja, para estimar la humedad basado en estas bandas de absorción de agua, siendo un indicador de estrés hídrico por enfermedad (Apan et al., 2003). En su estudio se encontró que las áreas afectadas por enfermedades tienen valores relativamente más bajos en las regiones del Verde y NIR, así como lo contrario en el dominio del rojo y SWIR, por lo que las combinaciones estas bandas responden favorablemente a la detección del estrés hídrico a nivel del dósel. Su fórmula está en la Ecuación (15).

$$DSWI4 = \frac{GREEN}{RED} \quad (15)$$

### 3. Metodología

#### 3.1. Área de Estudio

El municipio de Navolato se ubica en el litoral central del estado de Sinaloa, colinda con los municipios de Culiacán, Angostura y Mocorito, con una extensión territorial de 2335 km<sup>2</sup> y una población de 135 mil habitantes, según el censo del INEGI, (2015). Se destinan alrededor de 93,638 hectáreas para producción agrícola, alrededor del 62 % de su extensión, siendo una actividad económica muy importante para la región (INEGI, 2015).

Presenta un clima seco muy cálido con rangos de temperatura entre los 22 a 26°C y un rango de precipitación de 400 a 600 mm. Para el año 2018, se sembraron 79,621 hectáreas de maíz grano blanco con modalidad de riego, con una producción de 945,706 ton y un rendimiento promedio de 11.88 ton ha<sup>-1</sup>, con un valor de 3.5 millones de pesos.

La parcela cultivada con maíz grano que se estudia en este proyecto (ver Figura 5), se localiza en el ejido el Bledal, perteneciente a Navolato, Sinaloa (ver Figura 6). Posee una extensión de 7.56 hectáreas.

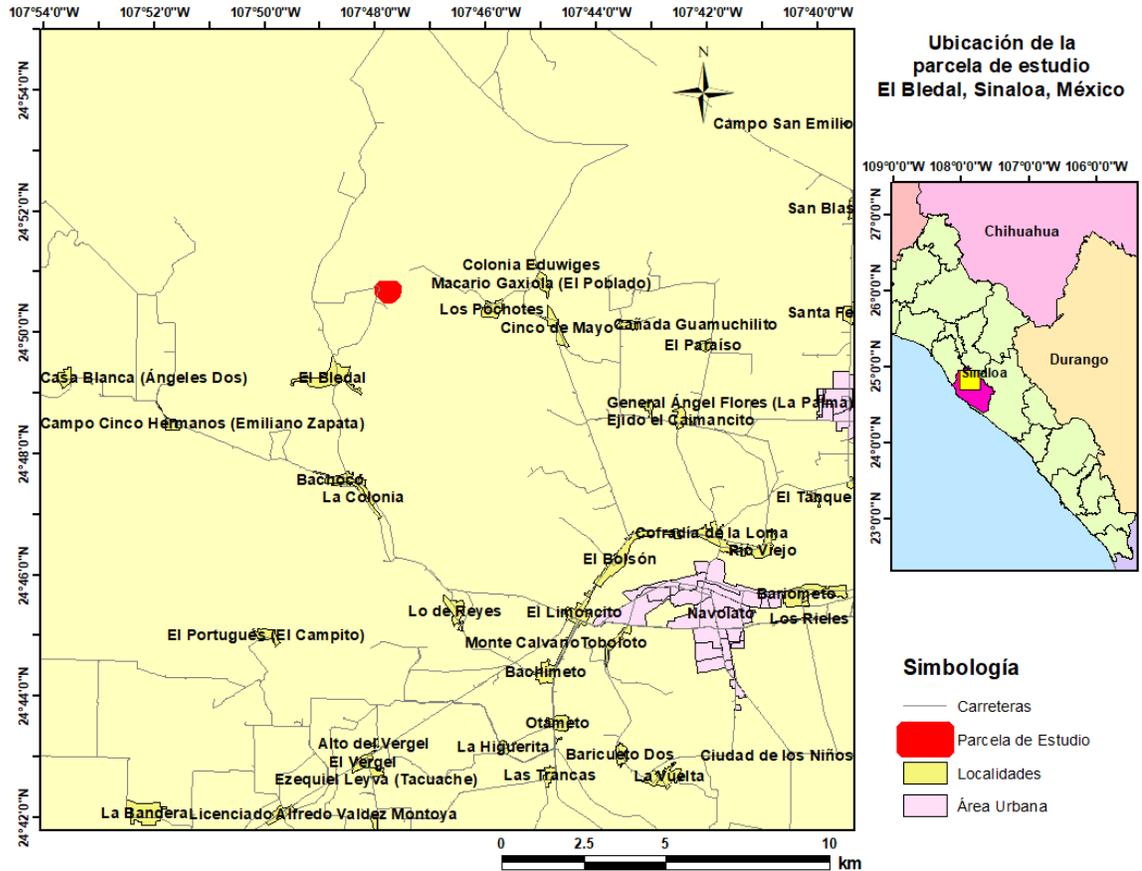
#### **Figura 5**

##### *Área de Estudio*



**Figura 6**

*Mapa del Área de Estudio*



### 3.2. Esquema Metodológico

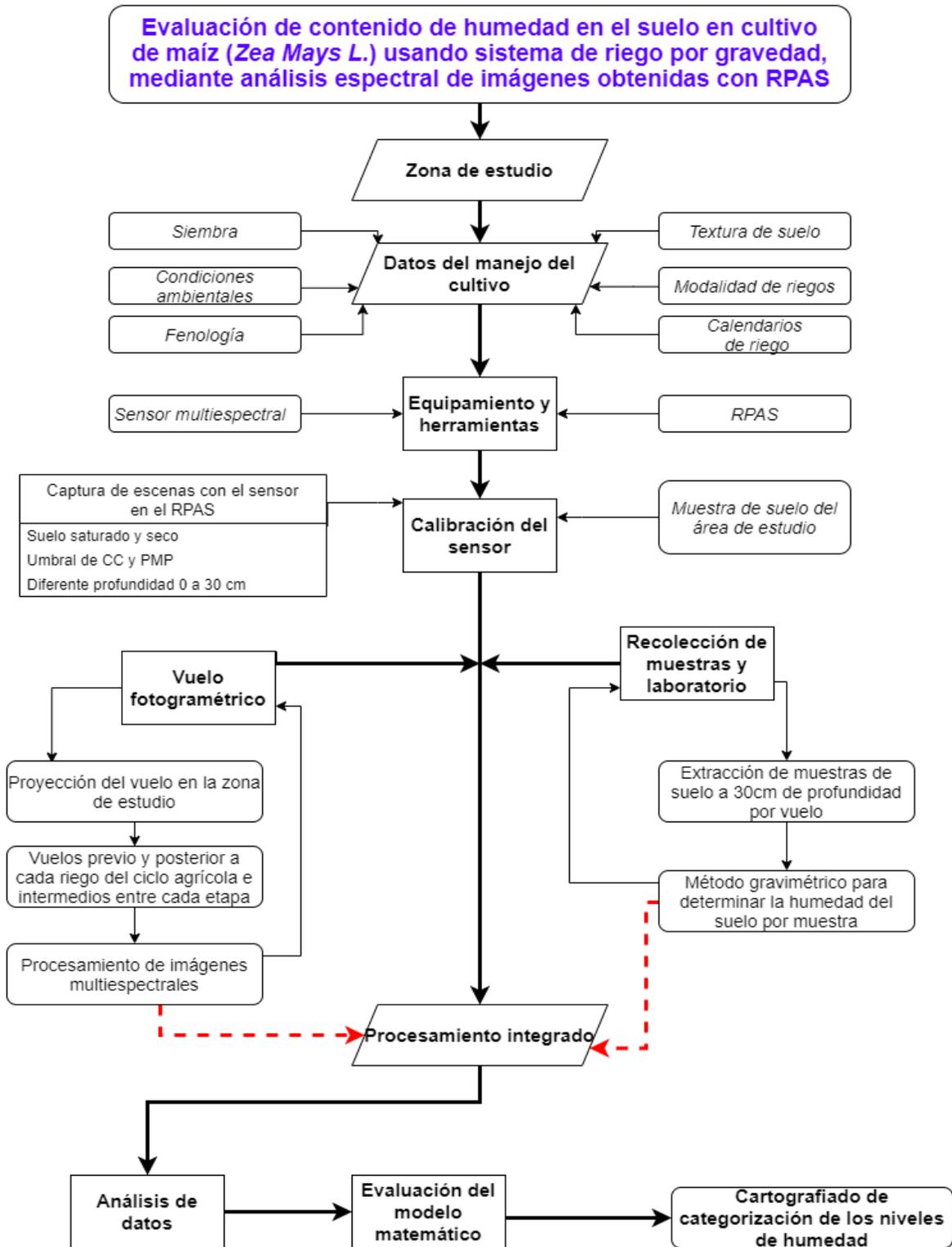
Para la realización de los trabajos en el estudio de la evaluación del contenido de agua en suelos agrícolas, por medio de imágenes multiespectrales en suelos de cultivo de maíz, se propone el siguiente esquema metodológico para estimar la variabilidad de la humedad del suelo en cultivos de maíz, con modalidades de riego por rodado o gravedad.

La Figura 7 representa el procedimiento metodológico de este proyecto, a modo de esquema donde se presentan los pasos para efectuar la investigación.

Básicamente parte de la zona de estudio donde, es importante conocer qué tipo de parámetros y condiciones del terreno es lo que se estudia, tales como los datos del manejo de cultivo y todo lo que concierne en esto. Posteriormente se cuenta con el equipamiento y herramientas para definir con qué tipo de sensor y plataforma será utilizado, en este caso un sensor multiespectral comercial y es colocado en un RPAS multirrotor. Para esto será necesaria una calibración del sensor, que consiste en replicar las condiciones del suelo en estudio y llevar a cabo la saturación de este para poder encontrar los límites del intervalo entre la Capacidad de Campo CC y Punto de Marchitez Permanente PMP, así como la obtención de muestras a diferente profundidad para analizar la respuesta en una profundidad radicular del cultivo en la zona de estudio. Luego de la calibración, se procede a realizar los vuelos fotogramétricos y la recolección de muestras y análisis en laboratorio ya del área estudiada, que este proceso consta de series de muestreo y vuelos durante todo el ciclo de cultivo Otoño Invierno, en los riegos de resiembra y auxilio, antes y después de cada uno de ellos, los cuales toda esta información tendrá que ser procesada de una manera integrada para poder correlacionar los valores obtenidos del contenido de humedad de suelo con respecto a los valores digitales de las imágenes multiespectrales, así como de los índices espectrales analizados en este estudio y finalmente poder evaluar estos indicadores y valores de correlación para ser cartografiada la categorización de los niveles de humedad.

**Figura 7**

*Esquema de la Metodología Planteada*



### **3.2.1. El Cultivo de la Zona de Estudio**

Diferentes datos del manejo del cultivo son necesarios para poder efectuar el trabajo en campo, principalmente como el tipo de cultivo que este caso es el Maíz grano, así como sus fechas de cultivo. Debido a que se estudia el riego por gravedad o rodado, particularmente en Navolato, Sinaloa, existen 2 ciclos de cultivo, al cual le corresponde el de riego a Otoño Invierno, que es desde noviembre hasta aproximadamente mayo. Es aquí donde se conoce el tiempo en que se estará trabajando y medianamente estimar las fechas de riego para el área donde se está sembrando. Aquí es donde implica saber la modalidad y calendarios de riego, así como el tipo de siembra, condiciones ambientales y su fenología.

Otro dato importante por conocer es la textura del suelo, ya que esta nos indica un estimado de los niveles del contenido de humedad del suelo para poder conocer cuándo se sobrepasa este umbral al momento de cuantificar la humedad del suelo y también definir las etapas que un cultivo más requiere al recurso hídrico y señalar estas mediciones de manera directa, las cuales se pretenden relacionar con los datos de las imágenes multiespectrales. Existen algunos métodos para conocer la textura del suelo, lo que en este estudio se utilizó el método de Bouyoucos, siendo un método establecido por la normativa mexicana vigente oficial.

#### **3.2.1.1. Método del Hidrómetro de Bouyoucos.**

Para determinar la textura del suelo de estudio, se realizó esta metodología, con lo que en el terreno se recolectaron al menos 5 muestras de suelo, de acuerdo

con la metodología de extracción de muestras significativas para identificar el predio estratégicamente y luego mezclarse, promediando los resultados por medio del método de Bouyoucos. Cabe mencionar que las muestras deberán de estar secas y lo más reciente posible adquiridas, almacenados en bolsas resellables y herméticas.

Este método se realiza a través del método AS-09, según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), con base a las muestras del área de estudio que se adquieren antes de realizar el riego de presiembra o de asiento, con la finalidad de que éstas vengan secas para poder determinar con precisión el tipo de textura que posee este suelo.

En cuanto a la extracción de la muestra, se tomaron los criterios regulados en la NOM-021-RECNAT-2000, de tal manera que, con una pala de acero de punta se retiraron los escombros superficiales en un área de 30 x 30 cm aproximadamente. Una vez limpia el área, se extrajeron cerca de 30 cm de profundidad que en la práctica se convierte a cavar la pala y extraer el contenido que alcanza a sacarse, libre de rocas y materiales sólidos grandes, donde luego se introduce a una bolsa resistente y resellable para evitar salga la humedad y sea lo más fiel al terreno al momento de su extracción hasta el camino al laboratorio.

Este proceso es utilizado para la determinación de la textura del suelo la cual se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo y su determinación es rápida y precisa. En general, el problema se encuentra en la

separación de los agregados y análisis de las partículas. Se eliminó la agregación debida a materia orgánica y la floculación debida a los cationes calcio y magnesio. No se eliminan otros cementantes como carbonatos.

En cuanto a las lecturas del hidrómetro se efectuaron a los 40 segundos al inicio y dos horas posteriores a esta última lectura, con el fin de observar la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y mayores de 0.002 mm (limo y arena), estipulados estos umbrales de tiempo por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos y se han usado para construir el triángulo de texturas (SEMARNAT, 2002; USDA, 2000).

#### **3.2.1.1.1. Solución Calgón.**

Este reactivo está hecho a base de 36 g de Hexametafosfato de Sodio ( $\text{Na}_3\text{PO}_3$ )<sub>6</sub> disueltos en 1 litro de agua, preferentemente destilada y aforado a un litro en un matraz aforado, como se observa en la Figura 8.

### **Figura 8**

#### *Solución de Hexametafosfato de Sodio*



*Nota.* Se pesan los gramos requeridos de Hexametafosfato de Sodio para realizar la solución (Izquierda); se vierte agua para diluir por completo hasta no dejar grumos (Centro) y se deposita en un matraz aforado a 1 litro (Derecha).

Ya obtenido el litro de agua con el ingrediente activo, se colocó sobre una probeta de Bouyoucos, un hidrómetro o densímetro graduado de 0 a 60 dentro del recipiente como el de la Figura 9, para llenar de agua hasta la línea que indica los 1130ml y corroborar que contenga los 36g en la lectura de este instrumento.

---

**Figura 9**

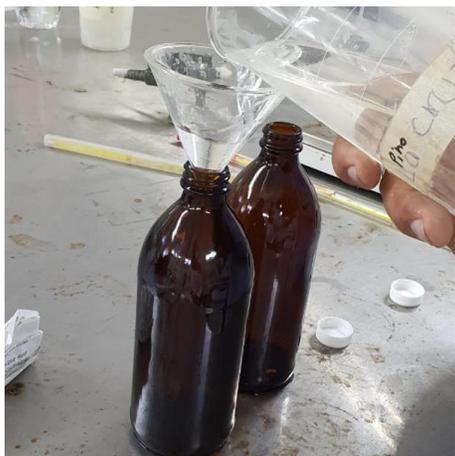
*Hidrómetro de Bouyoucos Graduado de 0 a 60*



A partir que se encuentran estas cantidades, esto pasa a llamarse solución Calgón. Se almacenó en recipientes de cristal café para evitar el contenido del líquido sea dañado por la luz solar, como en la Figura 10.

**Figura 10**

*Solución Calgón*



*Nota.* Solución Calgón depositada en recipiente ambar para evitar daño por rayos solares (Izquierda); Matraz aforado (Derecha).

### **3.2.1.1.2. Procedimiento con la tierra del terreno.**

Se procedió a pesar 50 g de tierra del conjunto de las muestras revueltas para crear y combinar solo una. Luego se va a tamizar el contenido con una malla de 2 mm, dando lugar a una fina capa de tierra (ver Figura 11). De estos gramos, se le agregó agua hasta los 100 ml y después, con una pipeta graduada se agregaron 25 ml para luego batirlo con un agitador de mano.

Teniendo una vez las cantidades requeridas, pasaron a ser licuadas en los agitadores electrónicos del laboratorio por 15 minutos sin detenerse. Rápidamente, sosteniendo la base de la probeta y tapando con la otra mano, se agitó 1 minuto para lograr una consistencia homogénea. Al término de esta actividad, de inmediato se colocó el densímetro y anotar la medición, junto con la temperatura en el termómetro. Pasaron 40 segundos para poder obtener la

primera lectura. Se dejó estable y sin moverse cada una de las probetas para esperar 2 horas posteriores a la lectura previamente realizada. En cada anotación es importante colocar la lectura del hidrómetro y la temperatura, que son valores que se tienen que corregir para poder determinar la textura y ser bastante precisos y puntuales con el tiempo.

### **Figura 11**

#### *Tamizado de la Muestra de Suelo*



*Nota.* Tamizado la muestra (Izquierda); Solución Calgón en muestra de suelo (Centro y derecha).

Luego de obtener los resultados, se corrigieron las lecturas del hidrómetro agregando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5°C restando la misma cantidad por cada grado a bajo de dicha temperatura. La lectura a los 40 segundos multiplicada por 2 es igual al porcentaje de arcilla más limo. Restando de 100 se obtiene el porcentaje de arena, La lectura obtenida a 2 horas multiplicadas por 2 es igual al porcentaje de arcilla. El porcentaje de limo se obtuvo por diferencia. Cuando se usan 100 g no debe multiplicarse porque por 2 ya que el hidrómetro está calibrado en porcentajes considerando 100 g de suelo. Con los porcentajes de limo, arena y arcilla se determinó la textura correspondiente con el triángulo de texturas.

Interpolando los tres resultados de los componentes del suelo, de acuerdo al porcentaje de cada uno, se estableció el tipo de textura como lo han marcado el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2000).

### **3.2.2. Equipamiento y Herramientas**

#### **3.2.2.1. Sensor Multiespectral.**

La cámara utilizada en este trabajo de investigación es una Parrot Sequoia (Parrot, 2017), diseñado para estudios de agricultura y ser transportado en drones de tipo de alas y multirrotores, para trabajos fotogramétricos y teledetección (ver Figura 12). Permite la captura de imágenes de parcelas agrícolas en diversas bandas espectrales que miden el estado de la vegetación: verde ( $\lambda$  550 nm banda pasante de 40nm), rojo ( $\lambda$  660 nm banda pasante de 40nm), Red Edge ( $\lambda$  735 nm banda pasante de 10nm) e infrarrojo cercano ( $\lambda$  790 nm banda pasante de 40nm), con una resolución de 1,2 Mpx. Así mismo posee un sensor RGB de 16 Mpx. Es manejado por un dispositivo comunicado mediante WiFi al sensor. Cuenta con memoria interna de 64 GB, el elemento Central Inercial, un magnetómetro, pesa 72 g y mide 59mm x 41mm x 29,5 mm.

Este a su vez, se compone de otro sensor solar que permite calibrar las imágenes en función de la incidencia solar. Gracias a este, es posible comparar imágenes en el tiempo, frente a las variaciones de luz de la toma. Este se colocó en la parte superior de los RPAS y fue alimentado de la energía del sensor multiespectral. En él se encuentran los módulos de GPS/GNSS, el puerto para la

SD, un centro inercial, magnetómetro. Pesa 35 g y mide 47 mm x 39.6 mm x 18.5 mm.

*Nota.* La cámara multispectral está montada sobre una base elaborada propiamente para el Phantom 4 Pro, también con la carga de la batería que se muestra detrás del sensor.

## Figura 12

### *Sensor Parrot Sequoia*



Una vez configurado con la interfaz del dispositivo externo y la conexión wifi, se configuraron los parámetros de las capturas de imágenes, de modo a distancias regulares, indicadas en metros entre cada fotografía. Las tomas de cada una de ellas fueron tomadas con la configuración que tendrá el vuelo del RPAS, siendo éstas independientes la planeación y manejo del vuelo a la del sensor multispectral.

Para este sensor, se adaptó en una base impresa en 3D, para soportar la carga útil en la aeronave, junto a una batería de LiPo que alimenta todo el sensor y la cámara multispectral durante toda la toma de escena.

### 3.2.2.1.1. *Calibración de Luz Solar.*

El sensor fue necesario calibrarlo antes de cada uno de los vuelos realizados de tal manera que, se tomó una serie de fotografías con un Pad de calibración de fábrica (ver Figura 13), que posee cada sensor colocado en el suelo a una altura de 1 m aproximadamente, sin crear sombras sobre este objeto para obtener las imágenes de calibración que son requeridas en el proceso fotogramétrico.

**Figura 13**

*Pad de Calibración de Luz Solar*



*Nota.* Se observa el pad abierto para la calibración frente al Sol (Derecha) y el RPAS con el sensor montado para realizar los vuelos fotogramétricos.

Este procedimiento es inmediatamente antes de iniciar un vuelo para que los datos tomados coincidan mayormente con las imágenes capturadas de

calibración. Es necesario ponerlo en un sentido frontal a la luz del Sol para efectos de evitar cualquier sombra en la zona del Pad, así como tratar de mantener limpio y sin polvo encima de esta zona, pero evitar usar cualquier solvente o líquido para tratar de asear esta área, ya que puede cambiar los valores que calibran a las imágenes.

### 3.2.2.2. RPAS.

El vehículo aéreo no tripulado utilizado fue un DJI Phantom 4 Pro (DJI, 2017), el cual consta de cuatro rotores, con una autonomía de vuelo junto a la carga útil del sensor es de alrededor de los 16 minutos (ver Figura 14).

Cuenta con un sensor RGB de 20 Mpx. Con obturador mecánico y es controlado con un dispositivo Ipad, para el manejo de la aplicación DJI Gs Pro, donde se planificaron todos los vuelos fotogramétricos.

### Figura 14

*RPAS Dji Phantom 4 Pro*



*Nota.* Es la plataforma RPAS utilizada en este proyecto de investigación. En la parte inferior se observa la carga útil, la cual es montada sobre una base impresa en 3D, junto a la batería de LiPo y el Sunshine Sensor.

### **3.2.2.3. Vuelos Fotogramétricos.**

Una vez en el área de estudio, ya conociendo previamente la zona requerida para tomar imágenes y poder evaluar, se planteó una proyección de vuelo bajo todas sus configuraciones necesarias, con el fin de establecer el área de despegue y de aterrizaje, el área de interés, traslapes de imágenes, altura de vuelo, precisión de la imagen, dirección del recorrido y sobre todo, las velocidades de la aeronave, para que vaya de acuerdo con la velocidad de obturación del sensor, obteniendo los mejores y adecuados resultados.

El número de vuelos está en relación con el calendario de riego utilizado por los agricultores del terreno, donde se plantearon tanto un riego de asiento o presiembra y 4 riegos auxiliares. Por tanto, se establecieron 2 vuelos en cada riego: uno antes y otro después de cada riego, de acuerdo con las variables de humedad de campo a la fecha que se presente, según el tipo de textura y riego por parcela. También se realizaron, tanto un vuelo entre el riego posterior y el siguiente vuelo previo del próximo riego, con la finalidad de tener indicadores intermedios.

Para volar las hectáreas del área de estudio fueron necesarias las configuraciones de un traslape longitudinal y transversal de 70 % entre imágenes para no generar un exceso de imágenes y demorar los procesos fotogramétricos, volando a una velocidad de alrededor de 10 m/s a una altura de 80 metros sobre la superficie. Esto garantizaba al menos 3 cm de resolución por píxel en el sensor RGB del drone, y alrededor de 8 a 9 cm en el sensor multiespectral. De igual manera, fue la altura que mejor funcionaba con la autonomía del RPAS para poder

volar toda la zona en un solo vuelo de manera concluyente y sin exponer la aeronave a accidentes por quedar sin batería. Siempre se buscó la misma ventana de horario y condiciones de luz solar para no sesgar los resultados. Sin embargo, hubo ocasiones que fue requerido realizar vuelos en condiciones de cielo nublado, lo que cambió algunos resultados.

Fueron vuelos simples de una composición de líneas de vuelo paralelas sin realizar vuelos en doble rejilla, con el sensor colocado a 90 ° de la trayectoria de vuelo hacia el nadir. De este modo, también fue considerada la configuración para el sensor multiespectral, de manera que, fueran tomadas casi al mismo tiempo que las del sensor del RPAS.

#### **3.2.2.4. Puntos de Control y Validación.**

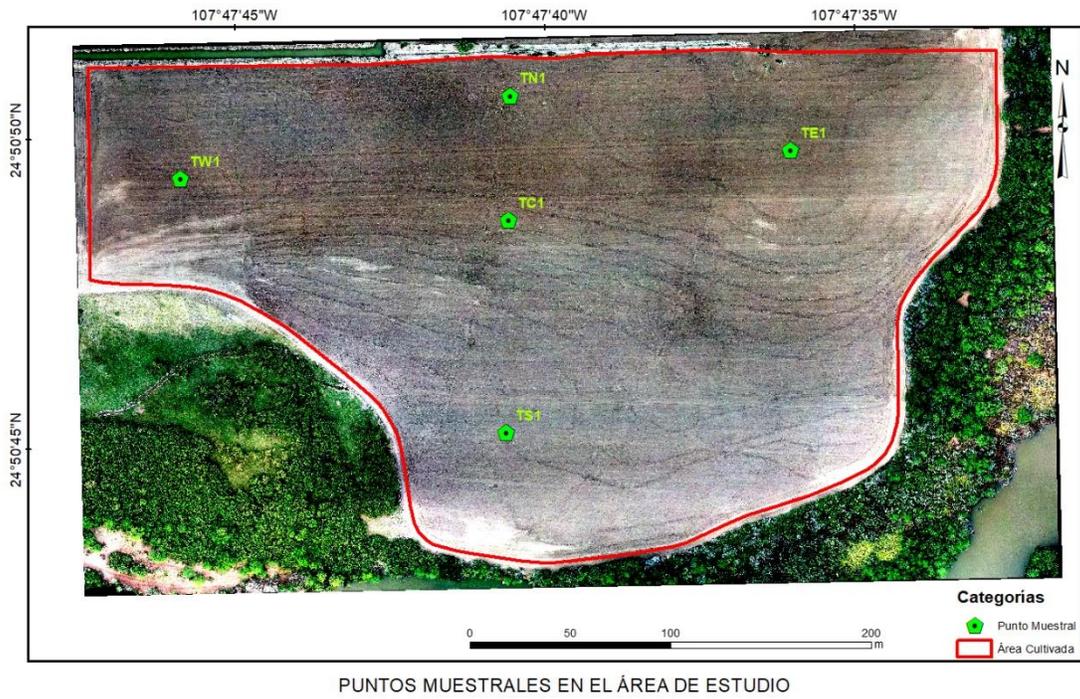
En la zona de estudio se colocaron 5 puntos georreferenciados con un GNSS RTK Hi Target V60, como se muestra en la Figura 16 , para la toma de muestras en todo el ciclo de cultivo para la obtención de datos de este estudio, los que se colocaron estratégicamente distanciados entre sí, con un acceso práctico en la totalidad de duración de la cosecha, que evitara cualquier accidente y pérdida de señalización para cada uno de ellos (ver Figura 15) .

La finalidad de mantener los puntos ubicados y resguardados fue para conservar el mismo lugar para la toma de muestras de suelo donde se extrajo la tierra, se colocaron marcas que no obstruyeran el paso del agua al regar, así como evitar que los operadores tuvieran accidente en ellos y en los vehículos para cosechar. De igual manera fueron cinco para mantener más datos del área en diferentes sectores, ya sea por su relieve como el caso del punto al sur, que es un

bajo y se acumulaba más humedad, así como los puntos al norte del sector que fueron más secos que el resto, y no mantener solamente uno como representación puntual de toda la extensión de la parcela.

**Figura 16**

*Área del Cultivo de Maíz con la Localización de los Puntos Muestrales*



**Figura 15**

*Colocación de Puntos de Control*



#### **3.2.2.4.1. Recolección de Muestras en Campo.**

De manera estratégica se seleccionaron diferentes áreas para extraer una muestra de suelo en cada punto con una pala de punta recta. Se excavó a una profundidad de alrededor de 30 cm, que se almacenó en una bolsa resellable y se tomaba su ubicación geográfica con un receptor GNSS RTK. (SEMARNAT, 2002), como en la Figura 17.

**Figura 17**

*Recolección de Muestras en Campo*



#### **3.2.3. Humedad del Suelo**

##### **3.2.3.1. Método Gravimétrico para Determinar el Contenido de Humedad del Suelo.**

Con base en las muestras del área de estudio que se adquieren antes de realizar cada riego, así como después, también se propuso realizar un levantamiento entre riegos, con la finalidad de analizar un punto inicial o seco, cercano al punto de marchitamiento permanente PMP, así como tratar de obtener el punto en capacidad de campo CC, donde en función de este umbral poder

estimar un índice espectral con las imágenes obtenidas desde el RPAS, para generar resultados de calibración y verificación del contenido de humedad en el suelo.

Para poder describir el procedimiento, se enfoca en un solo caso particular, donde a cada una de las muestras obtenidas de la zona estudiada, se colocó en un recipiente de aluminio limpio y libre de cualquier contenido, tres submuestras de cada una de ellas de tal manera que, se obtuvieron tres repeticiones por muestra. En este contenido de tierra se quitaron rocas y fragmentos o porciones grandes con la finalidad de introducir el material fino de cada muestra.

Cada recipiente de aluminio se pesó en una báscula con precisión en miligramos, además de anotarle en una etiqueta el nombre de la muestra, el número de repetición, el peso del recipiente como en la Figura 18.

### **Figura 18**

#### *Peso del Bote (PB)*



*Nota.* Peso del recipiente de aluminio para cada repetición de las muestras.

Es sumamente importante llevar un orden de todas las anotaciones tanto en una libreta de apuntes, como directamente al recipiente, tratando de evitar

confusiones con valores de otras muestras y ser mejor identificados en su manejo. Es recomendable que cada muestra sea representativa y ronde de los 30 a 50 gramos, aproximadamente (ver Figura 19).

$$\text{Peso del bote} + \text{Suelo Húmedo} (PB + Psh) \quad (16)$$

### Figura 19

*Peso del Recipiente con Suelo Húmedo*



Una vez que tenemos toda la relación de pesos de las muestras, se precalentó el horno eléctrico a una temperatura de 105°-110°C hasta que los alcance totalmente y después introducir todas las muestras debidamente ordenadas, al mismo tiempo y tomar nota del horario en que se efectuó esta tarea, ya que luego de 24 o 48 horas sean retiradas, como se muestra en la Figura 20.

**Figura 20**

*Horno Eléctrico con Respiradero*



*Nota.* Se disponen todo el conjunto de muestras para calentar a 110°C, con el respiradero encendido para desalojar la humedad.

Luego de retirar las muestras del horno, hay que esperar a que enfríen los recipientes para poder manipularlos y así entonces, poder pesarlo. Por consiguiente, se obtuvo el peso del bote más el peso del suelo seco como el de la Figura 21, con la Ecuación (17).

$$\text{Peso del bote} + \text{Suelo seco (PB + Pss)} \quad (17)$$

**Figura 21**

*Muestras Secas Después de 48 Horas*



De acuerdo con la norma oficial mexicana para los procedimientos de determinación del contenido de humedad (Radulovich, 2009; SEMARNAT, 2002), a partir de 24 horas es probable que ya alcance un peso constante, retirando toda la humedad, pero garantizar su total sequedad y por efectos prácticos, se pueden utilizar las 48 horas y confiar en que las muestras ya no poseen contenido de humedad.

Con los datos obtenidos en el procedimiento, se aplicó la Ecuación (18) para determinar el contenido de humedad gravimétrica, expresado en porcentaje:

$$\theta g = \frac{(PB + Psh) - (PB + Pss)}{(PB + Pss) - PB} * 100 \quad (18)$$

$\theta g$ = Contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje (%)

$PB$ = Peso del bote con tapa (g)

$Psh$ = Peso de suelo húmedo (g)

$Pss$ = Peso del suelo seco (g)

Este método tiene las bondades de ser muy simple, no tan caro y tampoco es necesario equipos sofisticados. Sin embargo, las mediciones no son in situ y el muestreo es destructivo al sitio.

### **3.2.3.2. Índices Espectrales.**

En este estudio se analizaron algunos índices que se relacionan con el contenido del agua, mediante el análisis de la vegetación y ciertas bandas espectrales que algunos sensores poseen. Por lo tanto, se enlistaron en la Tabla 8, de los índices o combinaciones de bandas, así como sus ecuaciones.

**Tabla 8***Índices Espectrales Analizados*

ÍNDICE	FÓRMULA	ECUACIÓN	PUBLICACIÓN	AÑO
NDVI	$\frac{800nm - 670nm}{800nm + 670nm}$	(19)	Rouse et al.	1973
GNDVI	$\frac{790nm - 550nm}{790nm + 550nm}$	(20)	Gitelson et al.	1996
NDRE	$\frac{790nm - 720nm}{790nm + 720nm}$	(21)	Clarke	1999
NDWI	$\frac{550nm - 790nm}{550nm + 790nm}$	(22)	McFeeters	1996
DSWI-4	$\frac{550nm}{680nm}$	(23)	Apan et al.	2003
SAVI	$\frac{800nm - 670nm}{800nm + 670nm + L} (1 + L)$ $L = 0.5$	(24)	Huete	1988

*Nota.* Las ecuaciones están dadas por la longitud de onda central de cada banda utilizada expresados en nanómetros, aunque en algunos casos el ancho de banda no está definido en específico por cada índice.

**3.2.3.3. Constantes de Humedad.**

De las extracciones muestrales del área de estudio, se determinaron el porcentaje de contenido de humedad del suelo en Capacidad de Campo CC y Punto de Marchitez Permanente PMP mediante la determinación de la Curva Característica de retención de Humedad del Suelo. Estas fueron enviadas al laboratorio del Colegio de Posgraduados COLPOS, campus Montecillo, Edo. De México.

Este estudio consistió en la metodología de la determinación de la curva de retención de humedad mediante la ayuda de la olla de presión (Membrana de Richards), sometida a diferentes presiones. Los límites de capacidad de campo se hallan a la tensión de 0.3 Bar, así como el punto de marchitez permanente PMP es a los 15 Bar. El porcentaje de humedad se determinó a las presiones de 0.3,

0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 10.0, 12.0, 15.0 y 20.0 Bar, en cada una de las muestras enviadas (véase Tabla 9 y Figura 22).

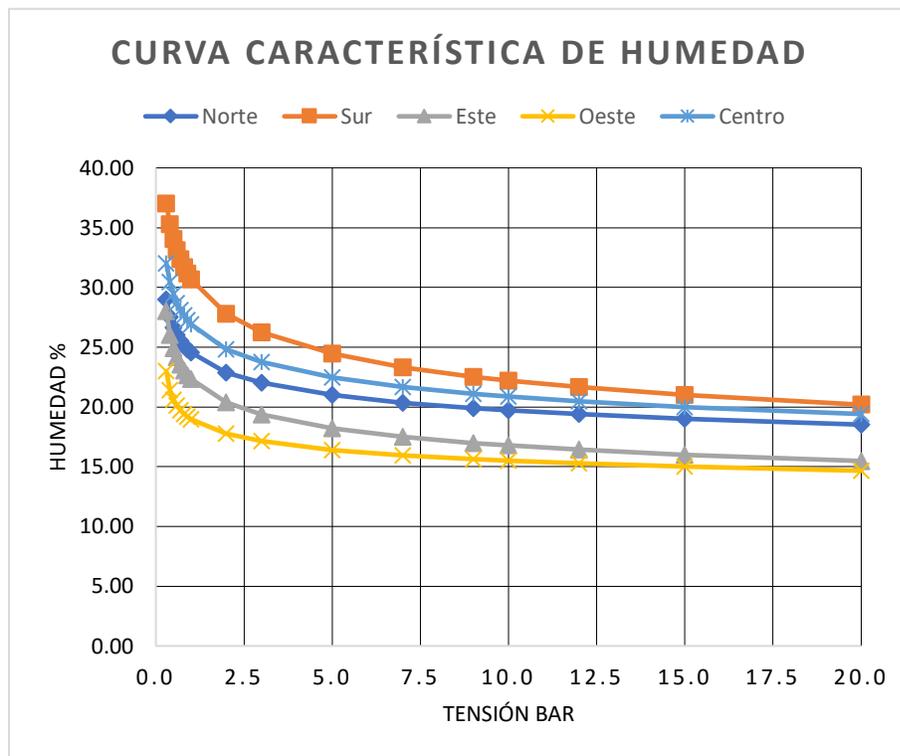
**Tabla 9**

*Contenido de Humedad para Cada Tensión Aplicada*

	Norte	Sur	Este	Oeste	Centro
Tensión (bar)	Hum (%)				
20.0	18.52	20.19	15.47	14.66	19.41
15.0	19.00	21.00	16.00	15.00	20.00
12.0	19.38	21.66	16.42	15.27	20.47
10.0	19.70	22.21	16.77	15.50	20.87
9.00	19.89	22.53	16.98	15.63	21.11
7.00	20.35	23.33	17.49	15.96	21.67
5.00	20.98	24.44	18.20	16.40	22.47
3.00	22.00	26.24	19.36	17.13	23.74
2.00	22.87	27.78	20.36	17.74	24.82
1.00	24.53	30.68	22.33	18.96	26.89
0.90	24.81	31.16	22.67	19.17	27.24
0.80	25.14	31.71	23.06	19.41	27.64
0.70	25.53	32.34	23.54	19.71	28.12
0.60	26.02	33.11	24.13	20.09	28.70
0.50	26.64	34.05	24.91	20.61	29.43
0.40	27.53	35.27	26.04	21.39	30.44
0.30	29.00	37.00	28.00	23.00	32.00

**Figura 22**

*Curvas Características de Humedad de las Muestras*



Finalmente se obtuvieron los porcentajes de humedad para los límites de CC y PMP, representados en la Tabla 10, que promediando cada uno de ellos con el conjunto de las 5 muestras, corresponde a una CC media = 29.80 % y PMP media = 18.20 %.

**Tabla 10**

*CC y PMP en Muestras de Laboratorio con Membrana de Richards*

	Tensión (bar)	Norte Hum (%)	Sur Hum (%)	Este Hum (%)	Oeste Hum (%)	Centro Hum (%)	$\bar{x}$	$\sigma$
CC	0.30	29.00	37.00	28.00	23.00	32.00	29.80	4.62
PMP	15.0	19.00	21.00	16.00	15.00	20.00	18.20	2.32

### **3.3. Calibración de Bandas a la Humedad del Suelo.**

Para establecer valores radiométricos de las imágenes obtenidas con datos de muestras del suelo húmedo determinadas por el método gravimétrico, se sometieron 3 áreas para depositar el mismo material de suelo del área de estudio para elaborar tres repeticiones bajo las mismas condiciones, de las cuales se evaluará el comportamiento de la pérdida de contenido de humedad por evaporación y no por filtración, para efectos de retener un tiempo más prolongado y observarse más detalladamente.

Estos son 3 cuadros son de un área de 1 m x 1 m con una altura de 0.30 m para replicar la profundidad radicular del maíz que se tiene en campo, así como las especificaciones de la normativa oficial para el muestreo de suelos (Figura 23) (SEMARNAT, 2002).

. Las paredes de estas muestras son de madera y se recubrió el fondo hasta la parte superior con una capa de polietileno negro para evitar la filtración del agua depositada y solamente permitir la pérdida por evaporación.

El contenido de suelo fue alrededor de 8 sacos de 50 kg por cada muestra repartidos y distribuidos en igual proporción. Para humedecer las muestras, se utilizaron 4 bidones con agua de 25 litros a cada una de ellas, con un riego de gravedad con manguera para humedecer homogéneamente sin erosionar el suelo por la caída de agua, como lo representa la Figura 24.

## Figura 23

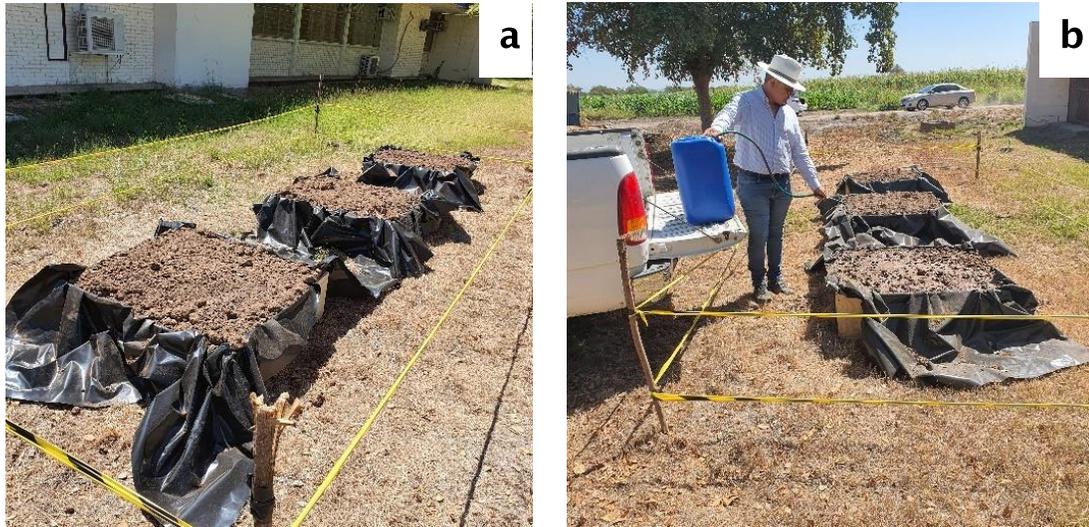
### *Establecimiento de Muestras*



*Nota.* Distribución de costales de muestra (a); Colocación de polietileno negro como membrana en la caja de muestra (b); Distribución del sedimento en cada muestra (c); Vista de las tres muestras (d).

## Figura 24

### *Muestras de Calibración con Suelo Desnudo*



*Nota.* Muestra 1, 2 y 3 de calibración con sedimento antes de ser humedecidas (a); Aplicación de riego por gravedad con manguera en cada zona muestral (b).

El proceso consta de capturar imágenes con el sensor multiespectral montado en el RPAS a cada 10 metros de altura desde las muestras, para poder obtener los valores radiométricos del área de cada uno de los cuadros hasta llegar a los 150 metros, para compararlos y calibrar contra los datos del contenido de humedad obtenido por el método gravimétrico en el trío de repeticiones.

Otra de las condiciones a efectuar es tomar tres muestras dentro de cada cuadro que corresponde la primera a la superficie o los 0.00 m, la segunda a una profundidad de 0.15 m que es la mitad del cuadro y por último la tercera que es al fondo o los 0.30 m y analizar el comportamiento del asentamiento de la humedad en cada muestra, así como ver en qué grado está capturando este procedimiento con las imágenes, como las de la Figura 25.

## Figura 25

### *Extracción de Suelo en Zonas de Muestra*

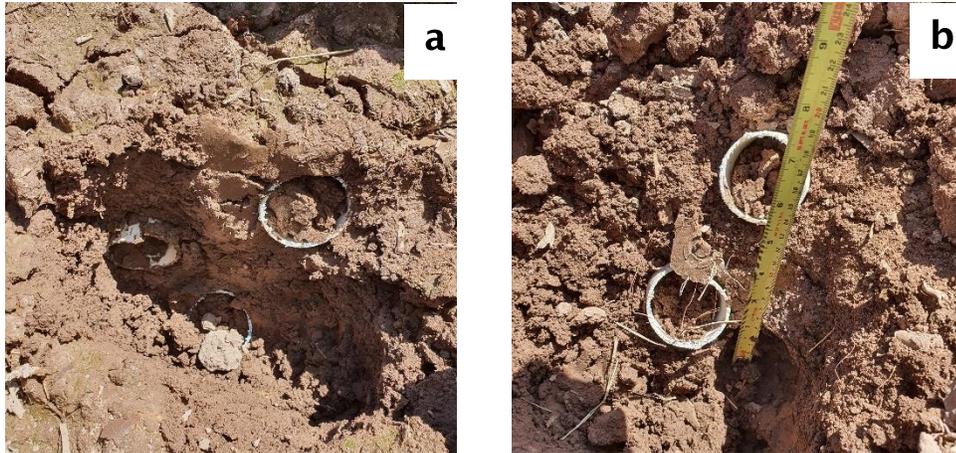


*Nota.* Se aprecia una de las excavaciones con una pala chica para llegar hasta el fondo de la muestra, una vez obtenida la extracción con los tubos desde la superficie, la zona intermedia y el fondo de ésta.

Para la extracción del muestreo consta de sacar un tubo de PVC de 3 pulgadas de 10 cm de largo, encajado al sedimento en las tres ubicaciones anteriormente descritas, el cual una vez obtenido el primero de la superficie se excava con una pala de tamaño pequeño para evitar la mayor destrucción y movimiento de tierra llegando a los 15 centímetros e incrustar el otro tubo y por último llegar hasta el fondo sin tocar el límite del plástico (ver Figura 26).

## Figura 26

### *Tubos de Muestreo en la Calibración*



*Nota.* Colocación de tubos de muestreo en cada profundidad indicada (a); Profundidad medida con flexómetro (b).

Una vez extraídos estos tubos con una pinza para tratar de obtener la menor perturbación del sedimento, se almacenaron en una bolsa hermética resellable cada una para evitar la pérdida de humedad hasta llegar al laboratorio, debidamente marcada con su nombre y fecha, observada en la Figura 27.

## Figura 27

### *Tubo de Muestra en Bolsa Hermética*

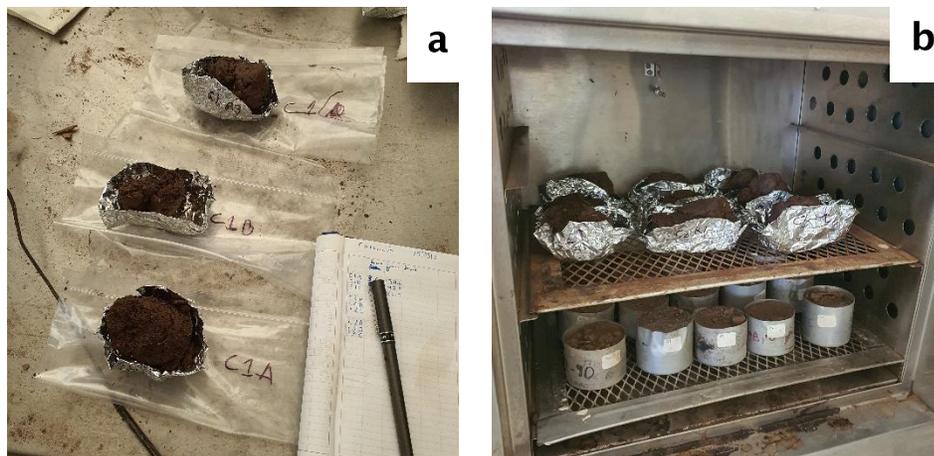


Ya en el laboratorio, las muestras fueron pesadas junto al recipiente que las contiene, efectuando el método gravimétrico a 105°C en el horno durante al menos 24 horas y llegar a peso constante sin humedad, pesándose nuevamente y obtener el contenido de humedad, ilustrado en la Figura 28.

Es importante realizar la mayor cantidad de escenas consecutivas para tener un mayor número de datos y formar la curva del cambio de humedad en el suelo, así como la fecha de tomas de muestra en el mes de abril, ya que se evita la mayor posibilidad de lluvias y humedad relativa para disminuir estos efectos que modifiquen los resultados, de acuerdo con datos meteorológicos históricos para el lugar donde se establecieron estas muestras.

### Figura 28

#### *Muestras de Suelo de Calibración en Laboratorio*



*Nota.* Conjunto de 3 muestras de diferente profundidad por zona de calibración (a); Recipientes con suelo húmedo colocados en el horno (b).

Acercas de la calibración radiométrica y procesamiento de las imágenes para su interpretación, se realizó un código programado en Python utilizando librerías elaboradas para el sensor Micasense, que se adaptaron sus algoritmos para el

sensor utilizado Parrot Sequoia, de tal manera que, pueden calibrarse radiométricamente las imágenes una a una, con los datos del sensor solar, el panel de calibración y valores que se contienen en el EXIF (Fenger, 2019).

Se muestra el código para la calibración de cada imagen en el Anexo 1.

## 4. Resultados

### 4.1. La Textura del Suelo en Estudio por el Método Bouyoucos

Las lecturas obtenidas del hidrómetro en tres muestras colocadas en probetas de Bouyoucos simultáneamente tuvieron un comportamiento y valores muy similares, después de experimentar con la muestra representativa compuesta del conjunto de las cinco submuestras tomadas del área de experimentación, anotados en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Resultados de Observaciones del Método del Hidrómetro de Bouyoucos*

	Intervalo tiempo	Lectura	Temperatura °C	Corrección a lectura	Lectura Corregida	Arcilla+ limo	Arena %	Arcilla %	Limo %
M1	40 s	33	27	2.7	35.7	71.4	28.6	37.96	33.44
	2 h	17	25	1.98	18.98				
M2	40 s	33	27	2.7	35.7	71.4	28.6	37.96	33.44
	2 h	17	25	1.98	18.98				
M3	40 s	37	26	2.34	39.34	78.68	21.32	41.24	37.44
	2 h	19	24	1.62	20.62				

De igual manera se observan resultados meramente iguales ante las muestras de Bouyoucos. Una vez corregidos los valores, de acuerdo con la norma oficial, se obtienen valores aproximadamente del 28.6 % de arena, el 37 % de arcilla y 33.44 % de limo.

De acuerdo con el triángulo de texturas se puede estimar las características del suelo en el área de estudio, que pertenece a la clase textural Franco Arcilloso, que contiene una conductividad hidráulica de 0.8 cm/hr; una porosidad de 49 %; la densidad aparente de 1.35 Mg/m<sup>3</sup>; su capacidad de campo CC de 27 %, el

punto de marchitamiento permanente PMP de 13 % y su capacidad de retención de agua disponible de 19 % (FAO, 2006; Flores & Alcalá, 2010; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015; USDA, 2000). Por lo tanto, estos valores fueron utilizados en un inicio, como referencia para los resultados obtenidos con las imágenes multiespectrales del RPAS y verificados por el método gravimétrico para comprobar el contenido de humedad que se posee en el momento del levantamiento de las muestras, hasta que se obtuvieron los resultados precisos con las Curvas de Retención de Humedad. Particularmente se mencionó que consta de una CC= 30 % y PMP= 18 %, no muy distanciado a los valores teóricos.

#### **4.2. Valores del Área de Estudio**

##### ***4.2.1. Contenido de Humedad por el Método Gravimétrico para las Muestras del Área de Estudio***

Los valores de las mediciones del peso de cada componente se introdujeron a la Ecuación (18) para determinar el contenido de humedad, promediando las 3 repeticiones de cada muestra para obtener su valor único representativo, como se observa en la Tabla 12.

**Tabla 12***Contenido de Humedad de Muestras de Suelo Antes del Riego de Presiembra*

Muestra	Peso recipiente	Con peso húmedo	Con peso seco	Contenido humedad parcial		Contenido humedad muestral	
N1	16.0	139.0	128.8	0.0904	9.04%		
N2	14.6	147.2	135.4	0.0977	9.77%	0.0957	9.57%
N3	15.6	142.2	130.8	0.0990	9.90%		
S1	15.8	150.6	135.0	0.1309	13.09%		
S2	15.2	122.4	110.6	0.1237	12.37%	0.1277	12.77%
S3	14.6	139.4	125.2	0.1284	12.84%		
E1	18.6	136.6	123.8	0.1217	12.17%		
E2	14.8	159.2	143.4	0.1229	12.29%	0.1225	12.25%
E3	21.0	161.6	146.2	0.1230	12.30%		
W1	14.6	160.6	150.8	0.0720	7.20%		
W2	22.2	179.0	167.4	0.0799	7.99%	0.0754	7.54%
W3	20.4	138.8	130.6	0.0744	7.44%		
C1	22.0	158.4	152.0	0.0492	4.92%		
C2	15.4	153.4	146.6	0.0518	5.18%	0.0498	4.98%
C3	22.4	179.0	171.8	0.0482	4.82%		

*Nota.* Peso expresado en gramos y contenido de humedad en porcentaje.

Se tiene un antecedente en la zona de estudio de una fertilización, lo que es notable su poca humedad que quedó acumulada en la zona sur del predio, identificado en la muestra S1-S2-S3, en la cual también presenta un relieve bajo formando un tipo de suelo anegado, pero este valor indica poca humedad. Dado que es previo al primer riego, en estas condiciones y de acuerdo con la clase textural que posee, todas estas muestras rebasan el límite del punto de marchitamiento permanente PMP, es decir, 13 %, según datos estadísticos y estándares de (FAO, 2006; Flores & Alcalá, 2010; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015; USDA, 2000).

Entonces, mostrando esta tabla con el procedimiento descrito, de la misma manera se replicó en cada uno de todos los conjuntos de muestras que se sacaron del área de estudio en cada escena que se fue a realizar los vuelos, encontrando los diversos resultados del contenido de humedad que poseen para ese momento.

En todo el ciclo de cultivo, el comportamiento de humedad del suelo obtenido con este método se presentan los resultados en la Tabla 13 y la Figura 29.

**Tabla 13**

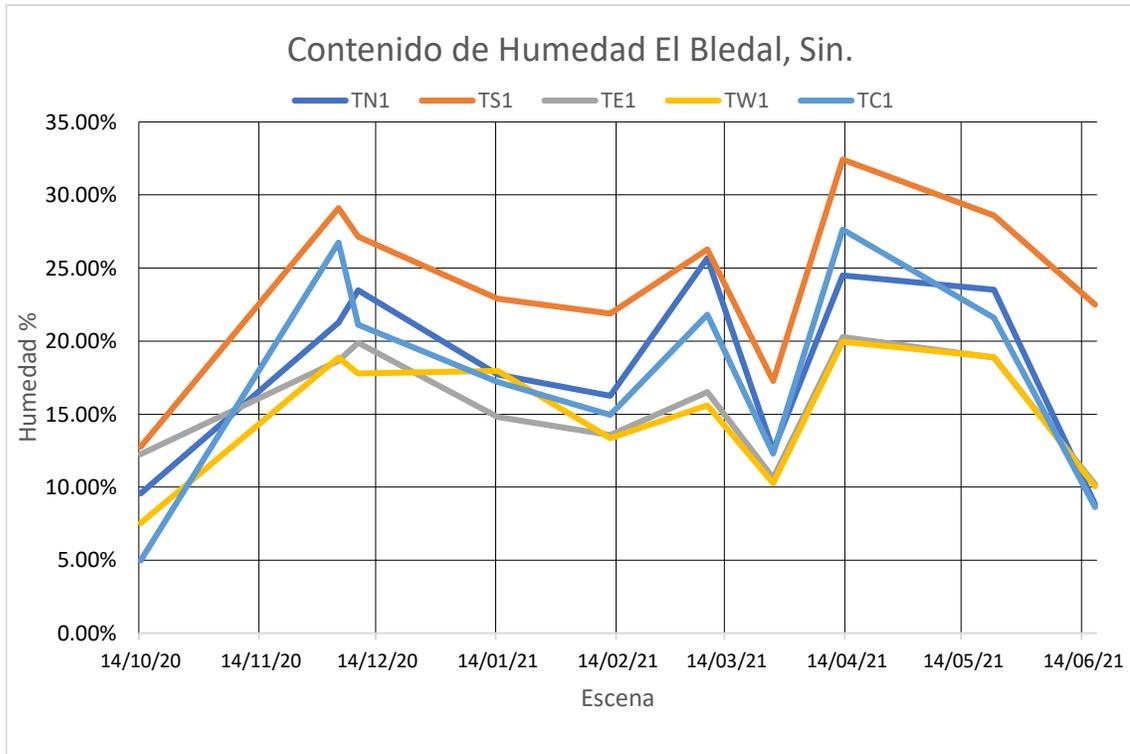
*Contenido de Humedad en Cada Punto Muestral del Área de Estudio*

Fecha	TN1	TS1	TE1	TW1	TC1
14/10/2020	9.57	12.77	12.25	7.54	4.98
04/12/2020	21.28	29.09	18.65	18.87	26.76
09/12/2020	23.47	27.14	19.88	17.78	21.13
14/01/2021	17.70	22.90	14.80	17.95	17.18
12/02/2021	16.25	21.90	13.56	13.35	14.94
09/03/2021	25.68	26.27	16.51	15.61	21.82
26/03/2021	12.50	17.26	10.64	10.27	12.31
13/04/2021	24.49	32.43	20.28	19.96	27.63
22/05/2021	23.52	28.59	18.86	18.92	21.61
17/06/2021	8.82	22.48	10.19	10.03	8.64

*Nota.* Contenido expresado en porcentaje

**Figura 29**

*Gráfico del Contenido de Humedad en la Zona de Estudio de El Bledal, Sinaloa*



#### **4.2.2. Valores Digitales de las Imágenes Multiespectrales**

Se extrajeron los valores digitales de cada una de las bandas que captura el sensor, en cada área muestral, resumiéndose desde la Tabla 14 a la Tabla 18, respectivamente a cada fecha de escena y el valor del contenido de humedad en el suelo. Este procedimiento se realizó con el software QGIS con la herramienta de Estadísticos Zonales de tal modo que, por medio de los vectoriales de cada punto muestral se obtuvo el valor promedio del valor digital de la imagen que aparece en el buffer del punto a 0.5 m de diámetro.

**Tabla 14***Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto N1*

Escena	Humedad	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
14-oct	0.0957	24242.10	26455.10	28832.61	27735.94
04-dic	0.2128	11871.60	21405.13	23390.25	23310.83
09-dic	0.2347	26751.24	27887.31	11366.54	26935.21
14-ene	0.1770	25986.45	21611.58	26583.72	23892.68
12-feb	0.1625	11573.51	15089.66	26504.90	21824.65
09-mar	0.2568	2138.72	2344.99	14075.33	23125.81
26-mar	0.1250	11230.48	5418.81	27596.21	30406.07
13-abr	0.2449	10422.45	7542.50	29897.75	27073.54
22-may	0.2352	18678.13	13221.45	30080.40	25767.37
17-jun	0.0882	15100.74	19719.36	24336.66	22972.21

*Nota.* Representa los valores digitales tomados de cada escena de vuelo, en cada una de las bandas del sensor multiespectral. El contenido de humedad es el porcentaje expresado en decimales.

**Tabla 15***Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto S1*

Escena	Humedad	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
14-oct	0.1277	22400.83	25145.98	22925.90	19867.74
04-dic	0.2909	14373.20	15151.73	22113.42	20863.37
09-dic	0.2714	27606.56	27792.05	11695.71	26033.61
14-ene	0.2290	23205.31	20808.18	23700.38	21678.29
12-feb	0.2190	12204.15	14213.78	26134.73	23687.23
09-mar	0.2627	2314.24	2628.71	14621.78	24529.68
26-mar	0.1726	11918.91	6837.48	16659.79	32607.24
13-abr	0.3243	10791.81	5697.70	19268.20	27649.60
22-may	0.2859	22099.67	21937.14	28968.42	26556.06
17-jun	0.2248	18557.12	24024.72	25721.86	25783.33

*Nota.* Representa los valores digitales tomados de cada escena de vuelo, en cada una de las bandas del sensor multiespectral. El contenido de humedad es el porcentaje expresado en decimales.

**Tabla 16***Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto E1*

Escena	Humedad	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
14-oct	0.1225	21094.80	24605.47	27638.69	25502.43
04-dic	0.1865	12662.13	21254.62	24514.22	22554.60
09-dic	0.1988	25943.16	26856.10	12751.10	26305.71
14-ene	0.1480	25007.11	19290.66	26739.35	24662.38
12-feb	0.1356	11879.67	10956.74	25441.02	21448.37
09-mar	0.1651	3197.76	4071.68	14941.13	27554.06
26-mar	0.1064	12233.71	6305.62	25801.14	32981.49
13-abr	0.2028	10860.24	5722.41	25333.47	27342.76
22-may	0.1886	21146.61	20711.85	28933.00	28149.28
17-jun	0.1019	19131.60	24265.74	27768.27	22956.83

*Nota.* Representa los valores digitales tomados de cada escena de vuelo, en cada una de las bandas del sensor multiespectral. El contenido de humedad es el porcentaje expresado en decimales.

**Tabla 17***Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto W1*

Escena	Humedad	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
14-oct	0.0754	22878.65	25930.82	28659.54	27343.09
04-dic	0.1887	11660.07	22298.78	24966.46	24517.89
09-dic	0.1778	25085.12	26100.49	12069.18	26043.14
14-ene	0.1795	25193.16	18592.08	28160.81	24703.09
12-feb	0.1335	13062.88	12926.25	26611.82	22079.84
09-mar	0.1561	2538.85	3355.41	13348.36	22149.13
26-mar	0.1027	11977.38	7364.41	22851.38	27359.67
13-abr	0.1996	10921.54	6010.33	23693.26	23708.83
22-may	0.1892	22895.24	24677.33	25209.97	21034.24
17-jun	0.1003	19490.83	23688.92	25644.05	23180.34

*Nota.* Representa los valores digitales tomados de cada escena de vuelo, en cada una de las bandas del sensor multiespectral. El contenido de humedad es el porcentaje expresado en decimales.

**Tabla 18***Valores Digitales de las Bandas Espectrales para el Punto C1*

Escena	Humedad	GREEN	RED	RED EDGE	NIR
14-oct	0.0498	24528.15	26933.11	29052.26	28619.81
04-dic	0.2676	12572.64	22223.94	29752.71	28022.56
09-dic	0.2113	29115.46	30877.38	12421.07	29761.06
14-ene	0.1718	19793.39	22276.93	28430.06	28046.23
12-feb	0.1494	12386.69	8615.41	30633.17	27375.64
09-mar	0.2182	2335.45	2494.81	15320.38	25040.88
26-mar	0.1231	11113.91	5580.81	27948.42	33560.98
13-abr	0.2763	9617.17	5045.97	25199.20	25619.91
22-may	0.2161	17262.86	13253.13	29294.46	27608.43
17-jun	0.0864	16381.95	20791.97	27554.31	25513.90

*Nota.* Representa los valores digitales tomados de cada escena de vuelo, en cada una de las bandas del sensor multiespectral. El contenido de humedad es el porcentaje expresado en decimales.

#### **4.2.3. Índices Espectrales Analizados en el Área de Estudio**

A partir de las imágenes multiespectrales que se obtuvieron para cada escena de la parcela del cultivo de maíz analizado, se generaron los diferentes índices de vegetación que tienen relación con la humedad y pudiendo ser algún indicador para los suelos.

En cuanto a los datos dispuestos por muestra, se presentan los valores digitales de las imágenes, de acuerdo con cada escena y su valor de contenido de humedad, en las siguientes tablas y figuras.

### 4.2.3.1. NDVI.

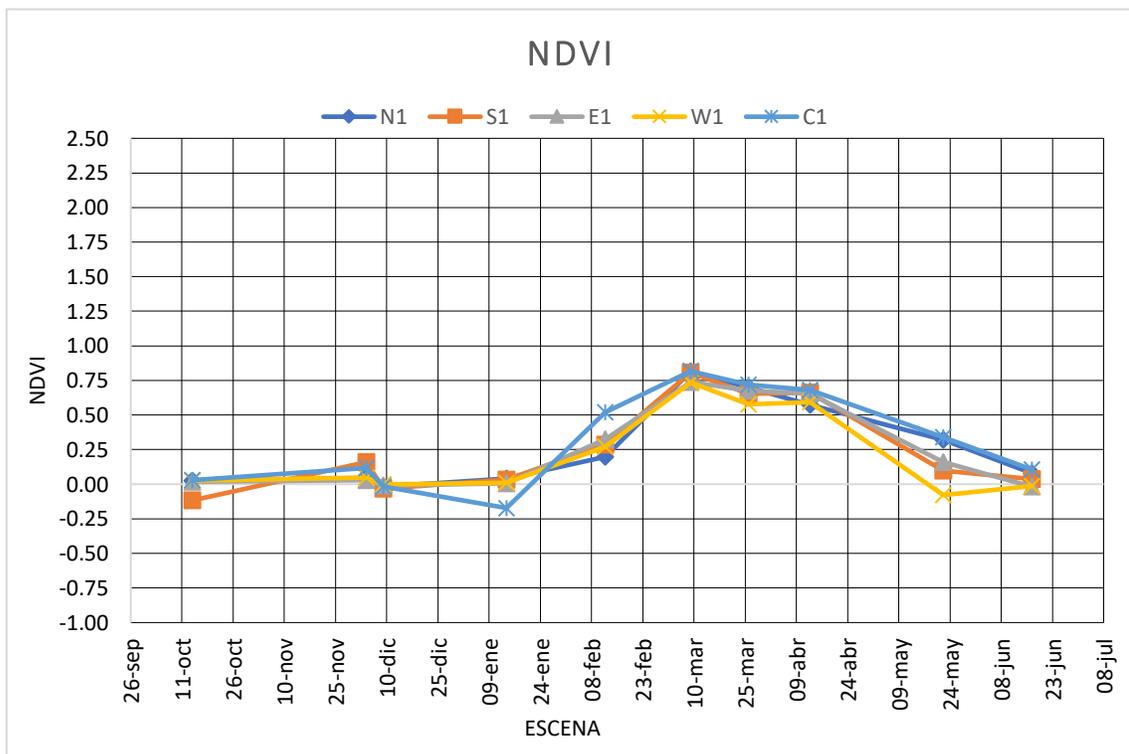
**Tabla 19**

*Valores del Índice NDVI por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo*

Escena	N1	S1	E1	W1	C1
14-oct	0.02	-0.12	0.02	0.03	0.03
04-dic	0.04	0.16	0.03	0.05	0.12
09-dic	-0.02	-0.03	-0.01	0.00	-0.02
14-ene	0.04	0.03	0.01	0.01	-0.17
12-feb	0.20	0.29	0.33	0.27	0.52
09-mar	0.81	0.81	0.74	0.74	0.82
26-mar	0.70	0.66	0.68	0.58	0.72
13-abr	0.57	0.66	0.65	0.59	0.68
22-may	0.32	0.10	0.16	-0.08	0.34
17-jun	0.08	0.04	-0.02	-0.01	0.10

**Figura 30**

*Gráfico del Índice NDVI de las Muestras en el Área de Estudio*



### 4.2.3.2. NDWI.

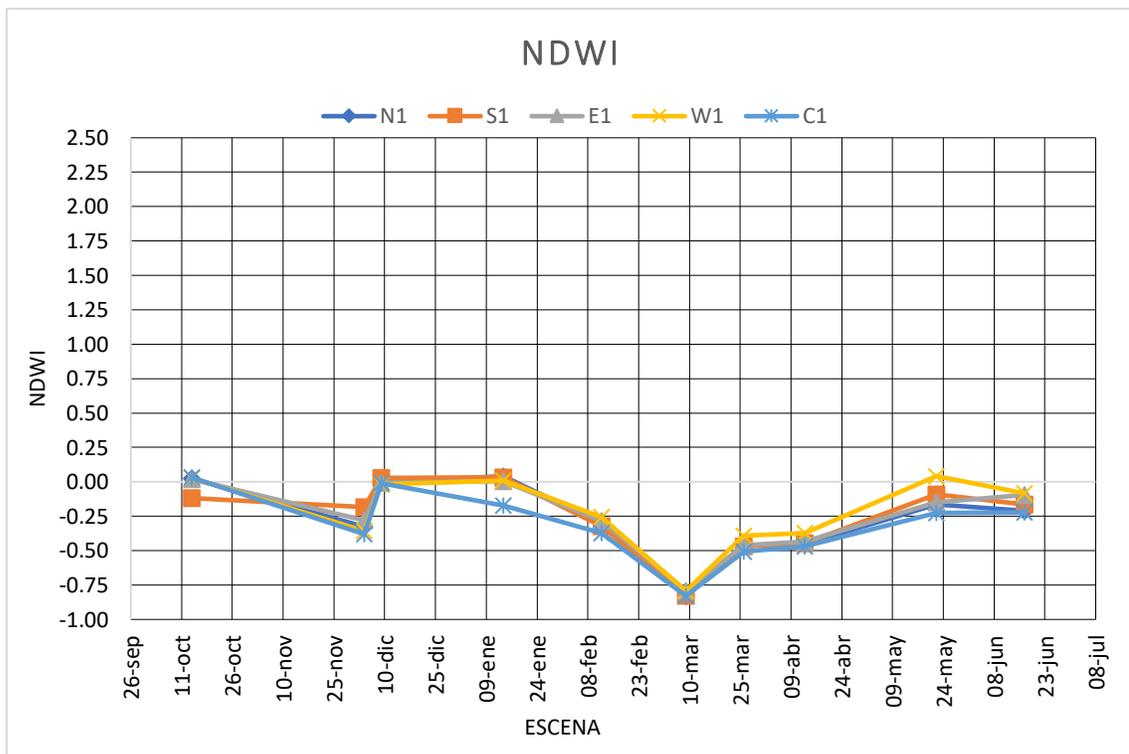
**Tabla 20**

*Valores del Índice NDWI por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo*

Escena	N1	S1	E1	W1	C1
14-oct	0.02	-0.12	0.02	0.03	0.03
04-dic	-0.33	-0.18	-0.28	-0.36	-0.38
09-dic	0.00	0.03	-0.01	-0.02	-0.01
14-ene	0.04	0.03	0.01	0.01	-0.17
12-feb	-0.30	-0.32	-0.28	-0.26	-0.37
09-mar	-0.83	-0.83	-0.79	-0.79	-0.83
26-mar	-0.47	-0.47	-0.46	-0.39	-0.51
13-abr	-0.45	-0.45	-0.43	-0.37	-0.47
22-may	-0.16	-0.09	-0.15	0.04	-0.23
17-jun	-0.21	-0.16	-0.10	-0.08	-0.22

**Figura 31**

*Gráfico del Índice NDWI de las Muestras en el Área de Estudio*



### 4.2.3.1. SAVI.

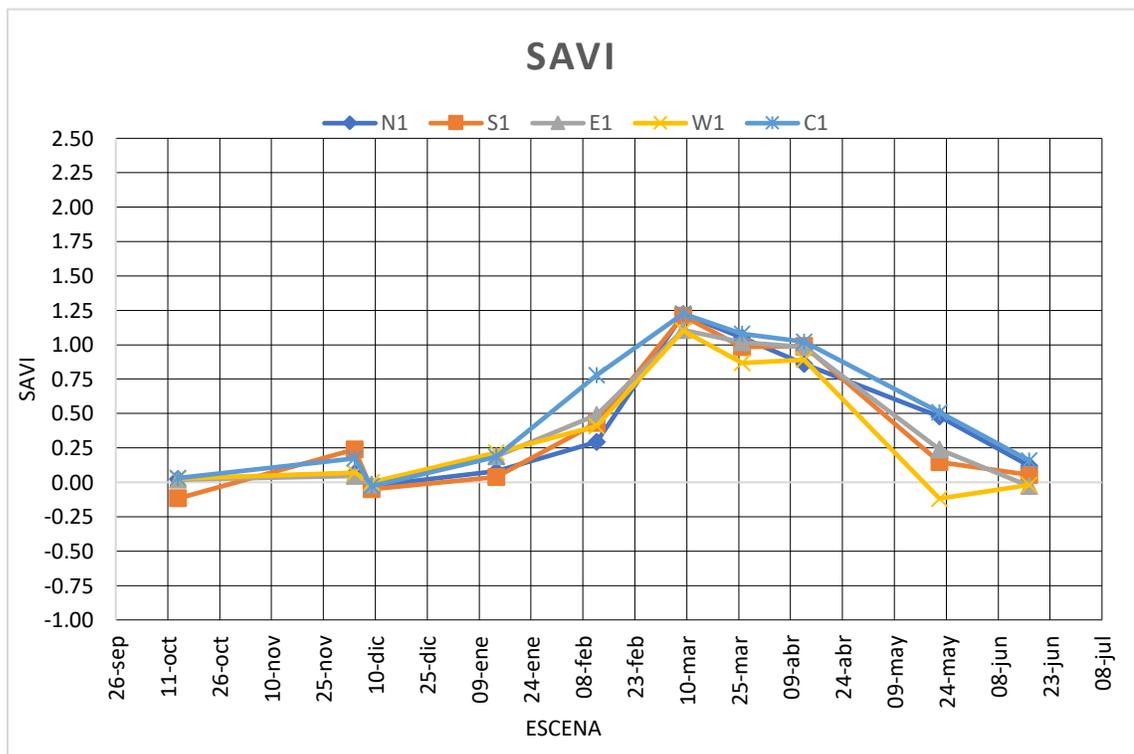
**Tabla 21**

*Valores del Índice SAVI por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo*

Escena	N1	S1	E1	W1	C1
14-oct	0.02	-0.12	0.02	0.03	0.03
04-dic	0.06	0.24	0.04	0.07	0.17
09-dic	-0.03	-0.05	-0.02	0.00	-0.03
14-ene	0.08	0.04	0.19	0.22	0.19
12-feb	0.29	0.43	0.49	0.41	0.78
09-mar	1.22	1.21	1.11	1.10	1.23
26-mar	1.05	0.98	1.02	0.87	1.08
13-abr	0.86	0.99	0.98	0.89	1.02
22-may	0.48	0.15	0.24	-0.12	0.51
17-jun	0.12	0.05	-0.03	-0.02	0.16

**Figura 32**

*Gráfico del Índice SAVI de las Muestras en el Área de Estudio*



### 4.2.3.1. NDRE.

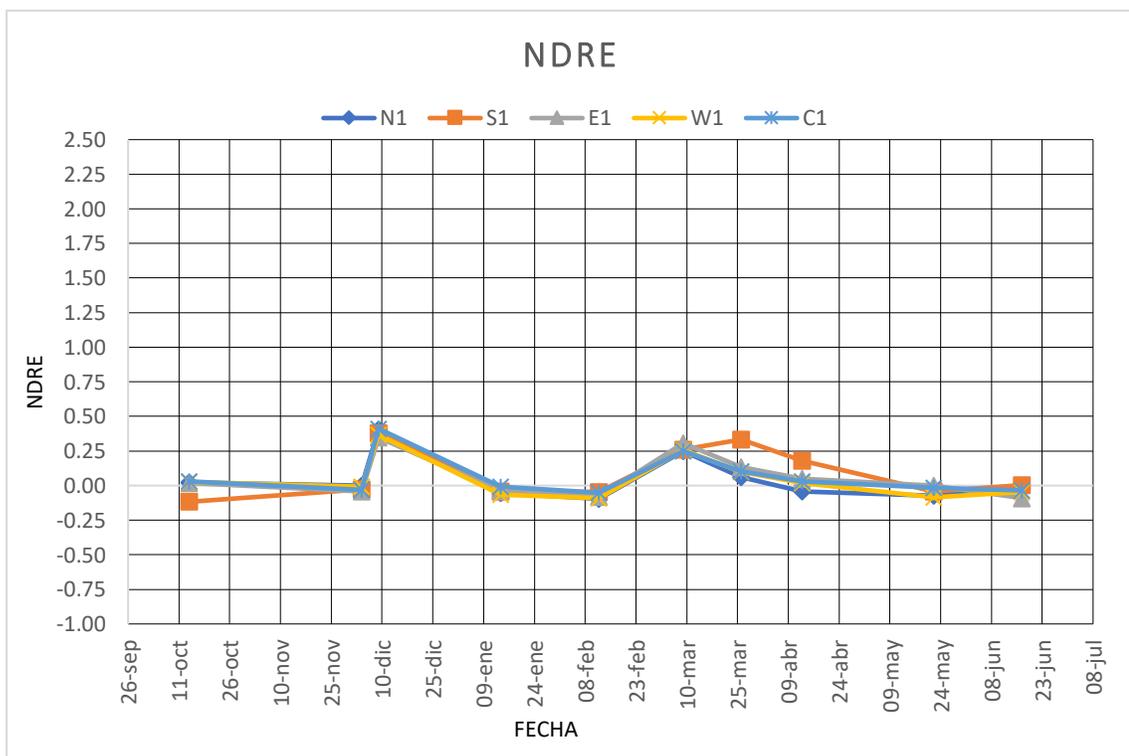
**Tabla 22**

*Valores del Índice NDRE por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo*

Escena	N1	S1	E1	W1	C1
14-oct	0.02	-0.12	0.02	0.03	0.03
04-dic	0.00	-0.03	-0.04	-0.01	-0.03
09-dic	0.41	0.38	0.35	0.37	0.41
14-ene	-0.05	-0.04	-0.04	-0.07	-0.01
12-feb	-0.10	-0.05	-0.08	-0.09	-0.05
09-mar	0.25	0.26	0.30	0.25	0.25
26-mar	0.06	0.33	0.13	0.10	0.10
13-abr	-0.04	0.18	0.05	0.02	0.03
22-may	-0.07	-0.04	0.00	-0.09	-0.02
17-jun	-0.02	0.00	-0.09	-0.05	-0.03

**Figura 33**

*Valores del Índice NDRE por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo*



### 4.2.3.2. DSWI4.

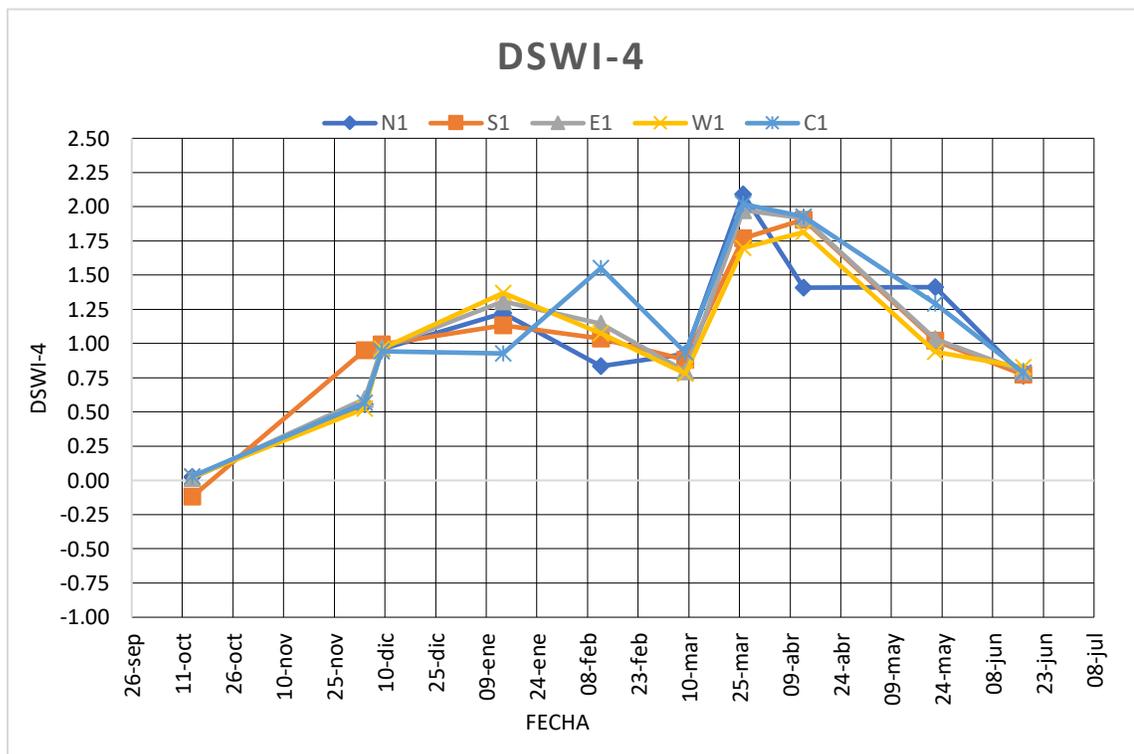
**Tabla 23**

*Valores del Índice DSWI4 por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo*

Escena	N1	S1	E1	W1	C1
14-oct	0.02	-0.12	0.02	0.03	0.03
04-dic	0.56	0.95	0.60	0.52	0.57
09-dic	0.96	0.99	0.97	0.96	0.94
14-ene	1.22	1.13	1.31	1.37	0.93
12-feb	0.83	1.04	1.15	1.08	1.55
09-mar	0.92	0.88	0.80	0.78	0.93
26-mar	2.09	1.77	1.98	1.70	2.02
13-abr	1.41	1.91	1.92	1.81	1.93
22-may	1.41	1.02	1.03	0.94	1.29
17-jun	0.77	0.77	0.80	0.83	0.79

**Figura 34**

*Valores del Índice DSWI4 por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo*



### 4.2.3.3. GNDVI.

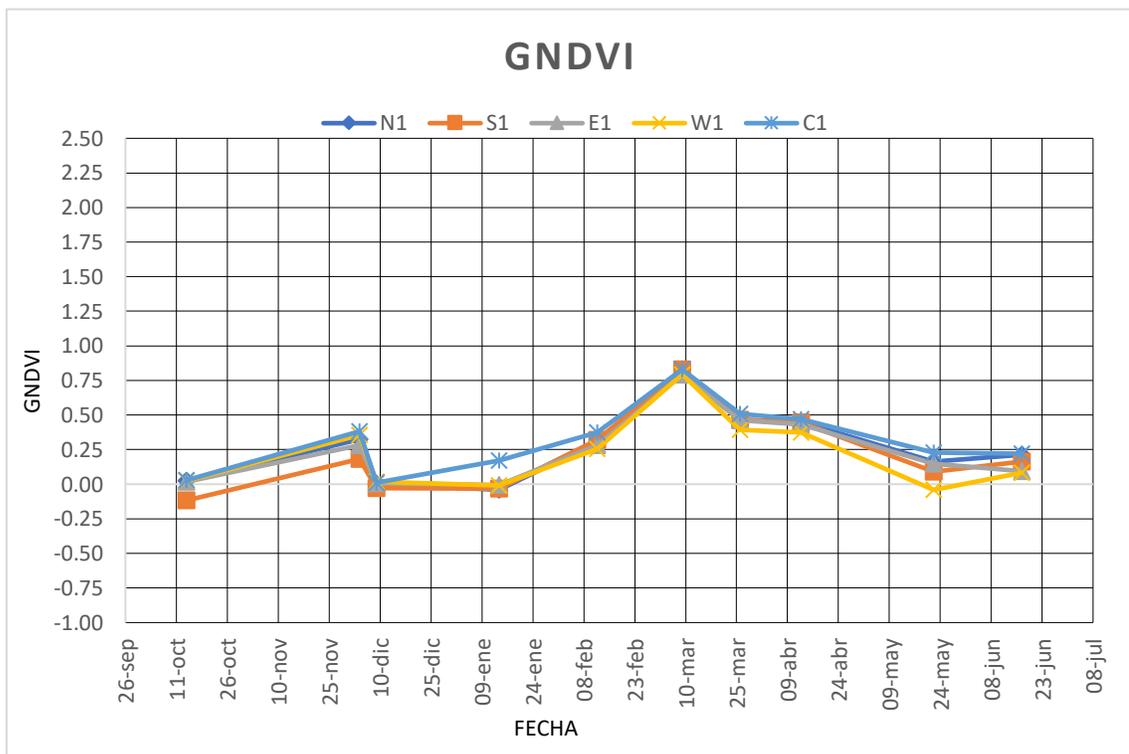
**Tabla 24**

*Valores del Índice GNDVI por Muestra en cada Escena del Área de Cultivo*

Escena	N1	S1	E1	W1	C1
14-oct	0.02	-0.12	0.02	0.03	0.03
04-dic	0.33	0.18	0.28	0.36	0.38
09-dic	0.00	-0.03	0.01	0.02	0.01
14-ene	-0.04	-0.03	-0.01	-0.01	0.17
12-feb	0.30	0.32	0.28	0.26	0.37
09-mar	0.83	0.83	0.79	0.79	0.83
26-mar	0.47	0.47	0.46	0.39	0.51
13-abr	0.45	0.45	0.43	0.37	0.47
22-may	0.16	0.09	0.15	-0.04	0.23
17-jun	0.21	0.16	0.10	0.08	0.22

**Figura 35**

*Gráfico del Índice GNDVI de las Muestras en el Área de Estudio*



### 4.3. Valores de Muestras de Calibración con Suelo Desnudo

#### 4.3.1. Contenido de Humedad en Calibración de Bandas a la

#### *Humedad de Suelo*

Durante esta etapa se realizaron 16 tomas de datos, de las cuales los resultados de la medición del contenido de humedad de las muestras, para cada profundidad y repetición, se muestran en la Tabla 25, expresados en porcentaje y las gráficas de cada una de las muestras desde la Figura 36 a la Figura 39.

**Tabla 25**

#### *Contenido de Humedad Gravimétrica del Suelo en Muestras de Calibración*

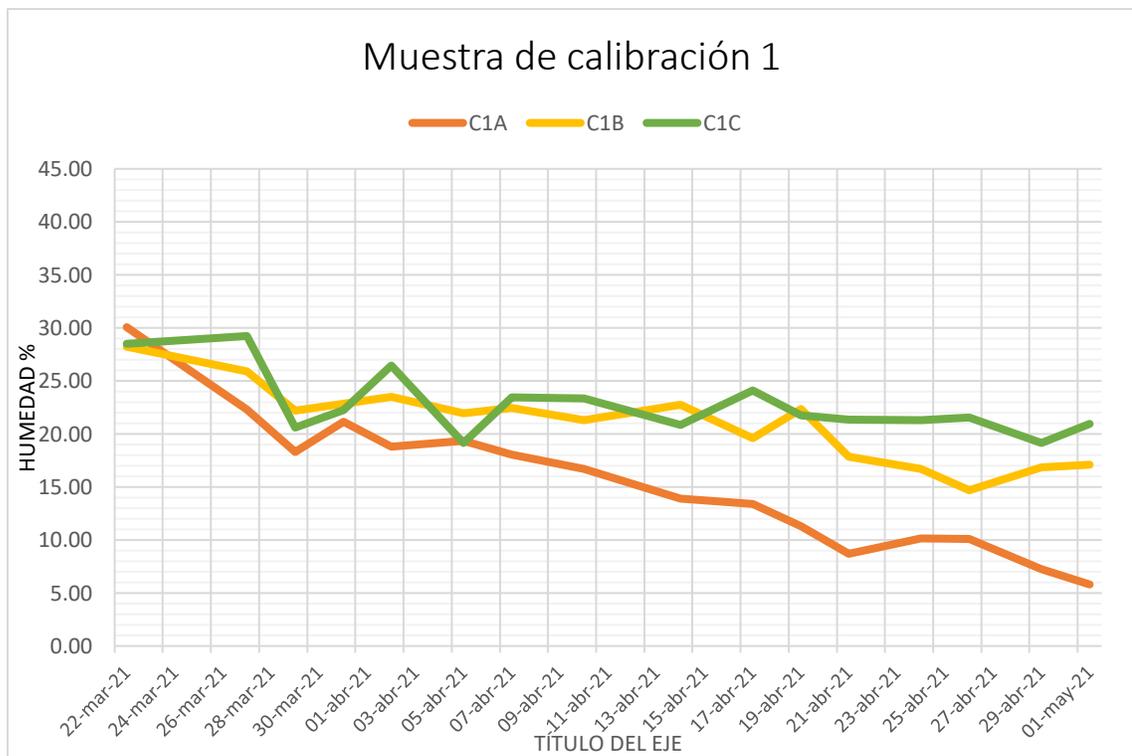
Muestra	22-mar-21	27-mar-21	29-mar-21	31-mar-21	02-abr-21	05-abr-21	07-abr-21	10-abr-21
C1A	30.07	22.30	18.29	21.15	18.82	19.35	18.06	16.70
C1B	28.23	25.89	22.22	22.85	23.52	21.95	22.45	21.28
C1C	28.48	29.23	20.62	22.25	26.45	19.15	23.47	23.37
C2A	31.18	25.62	20.72	23.17	19.12	13.89	20.15	16.61
C2B	30.79	28.83	23.57	22.74	22.24	20.00	20.90	21.09
C2C	30.94	26.19	21.76	24.69	21.37	21.13	22.20	20.54
C3A	40.83	32.91	25.20	23.38	19.95	22.95	18.84	17.86
C3B	40.89	27.72	28.01	24.76	23.00	23.96	21.14	19.35
C3C	39.52	29.81	27.95	25.67	24.19	22.85	22.14	19.74
	14-abr-21	17-abr-21	19-abr-21	21-abr-21	24-abr-21	26-abr-21	29-abr-21	01-may-21
	13.88	13.38	11.28	8.70	10.14	10.11	7.24	5.81
	22.75	19.59	22.34	17.86	16.69	14.69	16.84	17.11
	20.85	24.09	21.77	21.36	21.28	21.55	19.15	20.93
	16.00	13.20	11.45	13.53	8.06	7.80	7.77	6.48
	18.90	17.45	18.42	18.92	16.84	16.00	16.05	14.77
	19.62	22.62	20.65	20.05	17.30	13.70	15.61	16.30
	13.17	10.97	14.49	8.49	8.86	6.77	7.41	10.92
	17.93	16.97	17.47	17.87	16.19	5.26	14.81	15.77
	17.11	18.57	19.71	17.60	17.26	14.20	18.58	15.79

*Nota.* El valor de cada muestra está expresado en porcentaje de humedad. Las muestras A representan la profundidad 00 cm; las B son a los 15 cm y las C a los 30 cm.

Se destacó una disminución paulatina en todas las capas muestreadas, pero en algunos puntos se observaron unos ligeros aumentos repentinos de humedad, que pudiera ser causado por el lugar de muestreo en ese momento, así como el tiempo atmosférico para esa fecha con el punto de rocío y humedad relativa. De igual manera se ha notado un crecimiento de la vegetación adyacente, debido a una fuga de tubería de las regaderas para el jardín, por lo que puede ser un factor para tomar en cuenta en ese pequeño incremento al final de las escenas.

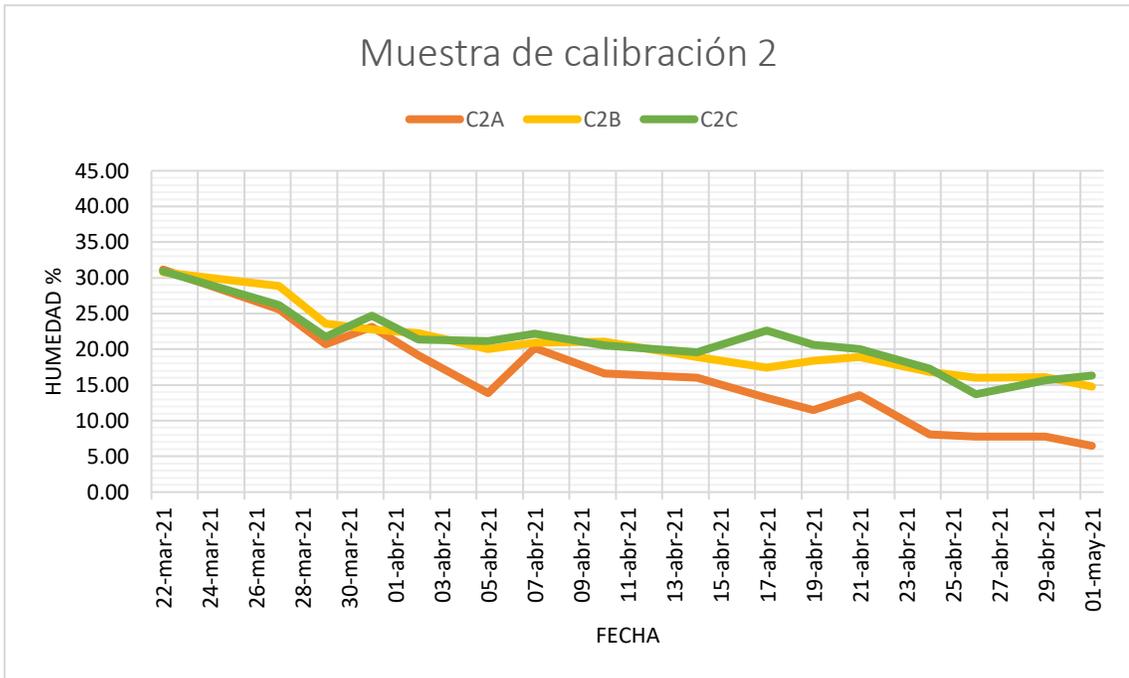
**Figura 36**

*Gráfica de Contenido de Humedad en Muestra de Calibración 1*



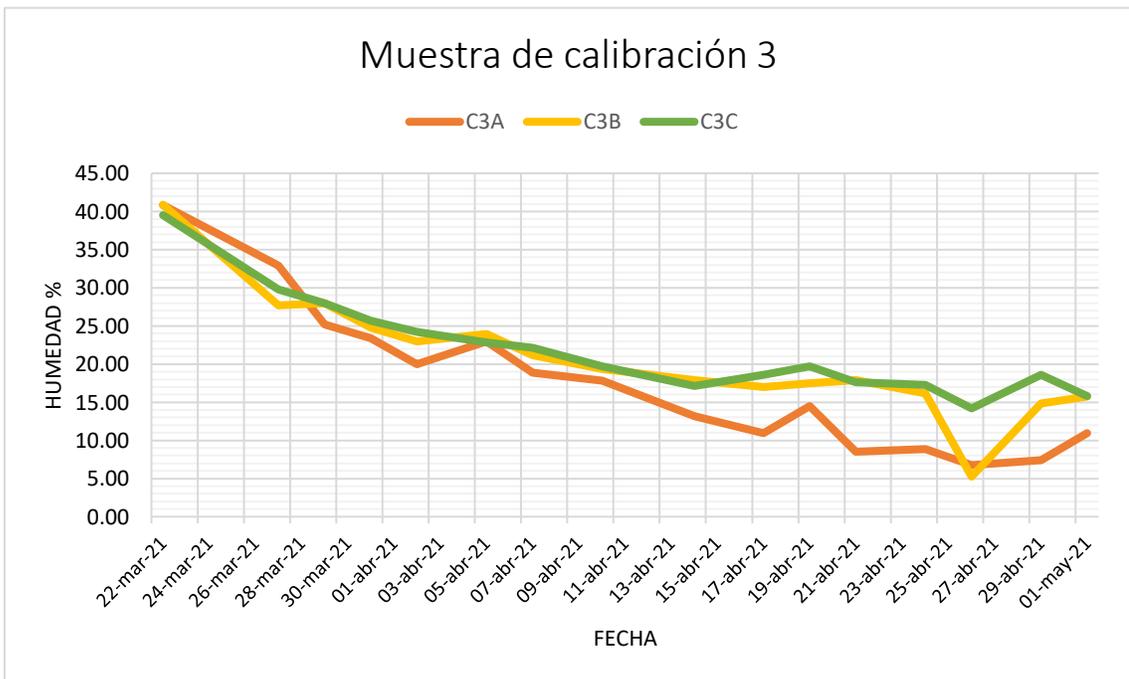
**Figura 38**

*Gráfica de Contenido de Humedad en Muestra de Calibración 2*



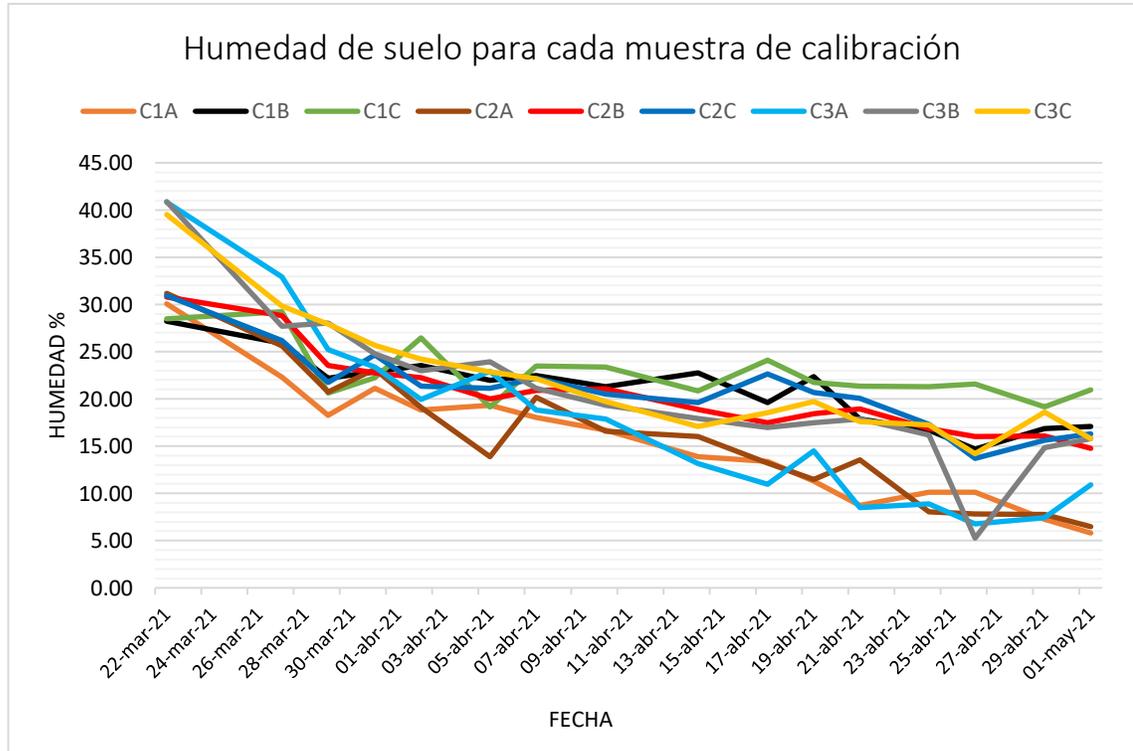
**Figura 37**

*Gráfica de Contenido de Humedad en Muestra de Calibración 3*



**Figura 39**

*Gráfica de Contenido de Humedad por Profundidad y Escena en las Tres Repeticiones*



### 4.3.2. Valores Digitales de las Imágenes Multiespectrales para la Calibración con Suelo Desnudo

Después de recolectar todas las escenas de cada vuelo, las imágenes se procesaron y calibraron con un script de Python con librerías del Sensor Micasense, los cuales arrojan valores de irradiancia de cada banda. Para esto, se extrajo el valor promedio a partir de una vecindad de pixeles en cada una de las muestras y su desviación estándar, en cada una de las alturas obtenidas para cada escena. Como ejemplo se muestran los valores de la primera escena, que corresponde al día más saturado de agua, correspondiente al 22 de marzo de 2021 (ver Tabla 26). Los demás valores se encuentran en el Anexo 2.

**Tabla 26**

*Irradiancia de las Muestras de Calibración por Banda en Diferente Altura*

		GREEN								
Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m
C1A	30.07	9.8863	8.0087	7.8349	8.1567	8.1609	8.1324	8.2645	8.3034	8.7618
C2A	31.18	7.8794	7.6272	7.6358	7.7851	7.9164	8.0963	8.1968	8.2024	8.3233
C3A	40.83	7.4389	7.6804	8.1213	8.0392	8.1048	8.2655	8.4448	8.4254	8.7139
		100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m			
		8.2511	8.5176	8.3894	8.4086	8.9896	8.7722			
		8.2019	8.4028	8.3221	8.4340	8.6880	8.4415			
		8.4933	8.7498	8.4294	8.4650	8.6650	8.5644			
		RED								
Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m
C1A	30.07	15.4552	12.5809	12.3711	12.6867	12.6997	12.8767	13.2834	12.9726	13.5728
C2A	31.18	15.4552	11.8332	12.2311	12.3521	12.4896	12.7184	12.5677	12.3522	12.7737
C3A	40.83	11.8383	11.9941	12.8804	12.2032	12.2812	12.5382	12.8609	12.6649	13.4580
		100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m			
		12.4940	12.7746	12.2604	12.2472	12.4696	12.1564			
		12.1255	12.0993	12.0333	11.8577	12.1252	11.4500			
		12.5337	12.3309	12.3023	11.8892	12.0145	12.0375			
		RED EDGE								

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m
C1A	30.07	4.9332	2.9803	4.0606	4.3246	4.3525	4.7738	4.6407	4.5991	4.8487
C2A	31.18	4.6790	2.9669	4.1384	4.3454	4.3114	4.7854	4.5926	4.6577	4.7970
C3A	40.83	4.6343	3.1215	4.3627	4.4783	4.4978	4.9090	4.8045	4.9156	5.1470
		100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m			
		4.6404	4.8422	4.8859	4.9527	4.9859	4.8177			
		4.7317	4.7907	4.9871	4.9328	4.9411	4.8791			
		5.0087	4.9916	5.1405	5.0791	5.0940	5.1483			
NIR										
Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m
C1A	30.07	11.8793	10.6724	10.8165	10.5515	10.4420	10.4582	10.7361	10.7745	11.4907
C2A	31.18	10.7593	10.3841	10.9648	10.5990	10.5349	10.6284	10.7208	10.5631	11.2503
C3A	40.83	10.6974	10.8455	11.8376	10.9784	11.0909	11.1747	11.0329	11.3061	11.8464
		100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m			
		10.5991	10.5216	10.7160	11.2323	13.2171	13.0605			
		10.6982	10.7151	10.6007	11.3802	12.8851	12.8986			
		11.4170	11.2835	11.1536	11.7418	13.3471	13.5465			

*Nota.* Estos valores representan la irradiancia para cada una de las zonas de calibración a diferente altura de vuelo, mostrando también el contenido de humedad en cada una de ellas, para la escena del 22 de marzo 2021.

#### 4.4. Evaluación del Modelo Matemático

##### 4.4.1. Correlación en la Calibración con Suelo Desnudo.

Los valores de irradiancia obtenidos son correlacionados con el valor de las muestras del porcentaje de contenido de humedad, a diferente profundidad, por medio del estadístico del Coeficiente de Determinación  $R^2$ , de tal manera que, se disponen los valores radiométricos de irradiancia en cada escena en diferente profundidad (véase de la Tabla 27 a la Tabla 29). Estos resultados son sobre la correlación de la misma escena del día 22 de marzo, por lo que es a modo de ejemplo este conjunto de tablas. El resto de las correlaciones por vuelo se muestran en el Anexo 3.

**Tabla 27**

*Correlación de Valores de Irradiancia y Contenido de Humedad de la Muestra de Calibración a 0 cm de Profundidad*

Altitud	00 cm			
	green	red	red edge	nir
10	0.5017	0.9912	0.4710	0.3797
20	0.2201	0.1600	0.9707	0.5248
30	0.7583	0.9126	0.9756	0.9983
40	0.0133	0.6357	0.9990	0.9999
50	0.0430	0.8247	0.9096	0.9985
60	0.9139	0.8537	0.9997	0.9818
70	0.8752	0.0386	0.9058	0.9813
80	0.7152	0.0079	0.9935	0.8668
90	0.1049	0.0854	0.9475	0.7649
100	0.9377	0.2451	0.9787	0.9997
110	0.8302	0.0728	0.8866	0.9768
120	0.5222	0.2958	0.9058	0.9167
130	0.8672	0.2685	0.9524	0.9635
140	0.3962	0.5674	0.8603	0.4211
150	0.0570	0.0722	0.9933	0.8911
$\bar{x}$	0.5171	0.4021	0.9166	0.8443
$\sigma$	0.3410	0.3454	0.1267	0.2124
CV	0.6594	0.8590	0.1383	0.2515
CV%	65.9419	85.8992	13.8255	25.1536

*Nota.* Estos valores representan la correlación para el día 22 de marzo de 2021, en las muestras de calibración, con base en la profundidad de 0 cm o parte superior de la muestra. Se muestran los valores Promedios, Desviación Estándar y Coeficiente de Variación.

**Tabla 28**

*Correlación de Valores de Irradiancia y Contenido de Humedad de la Muestra de Calibración a 15 cm de Profundidad*

15 cm				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.7028	0.0135	0.7304	0.8081
20	0.9247	0.9601	0.0015	0.2733
30	0.0893	0.0080	0.1289	0.0619
40	0.8975	0.5728	0.0573	0.0470
50	0.8342	0.3590	0.0090	0.0609
60	0.0076	0.3215	0.0372	0.1150
70	0.0225	0.9998	0.0103	0.0053
80	0.1191	0.9854	0.0825	0.0264
90	0.7353	0.7642	0.0004	0.0849
100	0.0017	0.5569	0.1220	0.0510
110	0.0452	0.9961	0.0176	0.1264
120	0.2756	0.4998	0.2489	0.0068
130	0.3036	0.8924	0.0001	0.1535
140	0.7946	0.6410	0.0295	0.3702
150	0.9991	0.7847	0.0829	0.0158
$\bar{x}$	0.4502	0.6237	0.1039	0.1471
$\sigma$	0.3807	0.3243	0.1798	0.2022
CV	0.8456	0.5200	1.7302	1.3749
CV%	84.5560	51.9971	173.0170	137.4868

*Nota.* Estos valores representan la correlación para el día 22 de marzo de 2021, en las muestras de calibración, con base en la profundidad de 15 cm o parte superior de la muestra. Se muestran los valores Promedios, Desviación Estándar y Coeficiente de Variación.

**Tabla 29**

*Correlación de Valores de Irradiancia y Contenido de Humedad de la Muestra de Calibración a 30 cm de Profundidad*

Altitud	30 cm			
	green	red	red edge	nir
10	0.3679	0.9983	0.3386	0.2544
20	0.1196	0.0744	0.9987	0.6574
30	0.8634	0.9731	0.9171	0.9692
40	0.0616	0.5021	0.9725	0.9796
50	0.1138	0.7113	0.9714	0.9700
60	0.9738	0.7464	0.9859	0.9285
70	0.9499	0.0039	0.9691	1.0000
80	0.8281	0.0021	0.9540	0.9443
90	0.2013	0.1752	0.9908	0.8686
100	0.9864	0.3694	0.9227	0.9769
110	0.9185	0.0189	0.9573	0.9191
120	0.6550	0.4253	0.8130	0.9754
130	0.7631	0.1585	0.9929	0.8966
140	0.2692	0.4324	0.9399	0.5560
150	0.0111	0.1569	0.9537	0.9601
$\bar{x}$	0.5388	0.3832	0.9118	0.8571
$\sigma$	0.3682	0.3313	0.1594	0.2019
CV	0.6834	0.8646	0.1748	0.2356
CV%	68.3376	86.4574	17.4838	23.5621

*Nota.* Estos valores representan la correlación para el día 22 de marzo de 2021, en las muestras de calibración, con base en la profundidad de 30 cm o parte superior de la muestra. Se muestran los valores Promedios, Desviación Estándar y Coeficiente de Variación.

Observando los valores anteriores se puede hacer notar que, ciertamente los valores de la superficie de cada muestra son los que realmente se aprecian, por lo que las correlaciones solo serán válidas en esta parte. Sin embargo, estos son necesarios para ver el comportamiento interior de cada muestra y hasta qué punto llega perder humedad en cierto intervalo de observación.

Uno de los análisis de estos estadísticos es que, el promedio y la desviación estándar de todos los valores por cada banda, son más fiables en la

parte superior, ya que estos se disparan cuando se toman en cuenta los de 15 y 30 cm de profundidad. De igual manera para corroborar esto se muestra el valor del coeficiente de variación.

Así mismo, se puede notar que los valores de las bandas en que la respuesta espectral se correlaciona más son en el Red Edge, siendo muy alto en casi todas las alturas de vuelo, así como en el infrarrojo cercano NIR, que contrariamente al Green y Red, estos no tienen una gran coincidencia.

Por otro lado, se tiene que, en las alturas de 60, 100 y 130 metros, es donde ocurre mayor correlación con los valores de irradiancia y contenido de humedad en las muestras, por lo que se puede sugerir que los estudios posteriores de este mismo material sean analizados en esas alturas.

En cuanto a los valores radiométricos de esta calibración, se correlacionaron con los valores de humedad de suelo, de tal modo que, se buscó para cada banda y en todas las escenas, las alturas con el mejor promedio de coeficiente de determinación  $R^2$ .

Por consiguiente, se muestran los resultados para cada banda espectral, con respecto a cada una de las alturas de vuelo, dispuestas entre una categorización de 5 rangos en escala de color, desde 0 a 1, presentados desde la Tabla 30 a la Tabla 33.

**Tabla 30**

*Correlación de Valores de Humedad e Irradiancia en Banda GREEN*

h	22-mar	27-mar	29-mar	31-mar	02-abr	05-abr	07-abr	10-abr	14-abr	17-abr	19-abr	21-abr	24-abr	26-abr	29-abr	01-may	Σ	x̄
10	0.50	0.14	0.26	0.14	0.58	0.23	1.00	0.40	0.49	0.65	0.47	0.10	0.91	0.25	0.29	0.58	7.00	0.44
20	0.22	0.25	0.26	0.17	0.46	0.95	0.01	0.03	0.92	0.58	0.51	0.34	0.93	0.23	0.55	0.24	6.65	0.42
30	0.76	0.22	0.23	0.13	0.19	0.55	0.35	0.37	0.68	0.79	0.09	0.36	0.99	0.09	0.77	0.45	7.05	0.44
40	0.01	0.19	0.22	0.16	0.04	0.69	0.98	0.09	0.51	0.89	0.18	0.34	0.93	0.07	0.67	0.41	6.37	0.40
50	0.04	0.11	0.22	0.12	0.64	0.50	0.90	0.09	0.10	0.53	0.01	0.75	0.60	0.26	1.00	0.38	6.24	0.39
60	0.91	0.23	0.24	0.29	0.91	0.41	0.30	0.08	0.02	0.56	0.03	0.99	0.91	0.34	0.90	0.15	7.28	0.45
70	0.88	0.28	0.17	0.18	0.57	0.78	0.90	0.20	0.20	0.58	0.16	0.99	0.99	0.02	0.80	0.24	7.94	0.50
80	0.72	0.23	0.11	0.17	0.72	0.71	0.38	0.39	0.78	0.80	0.09	0.91	0.87	0.04	0.79	0.36	8.05	0.50
90	0.10	0.23	0.12	0.15	0.76	0.85	0.90	0.16	0.82	0.04	0.20	0.95	0.87	0.00	0.71	0.15	7.03	0.44
100	0.94	0.17	0.23	0.10	0.96	0.87	0.14	0.11	0.69	0.89	0.91	0.91	0.98	0.01	0.97	0.01	8.89	0.56
110	0.83	0.20	0.16	0.00	0.98	0.34	0.51	0.08	0.41	0.85	0.68	1.00	0.92	0.02	1.00	0.06	8.04	0.50
120	0.52	0.27	0.22	0.03	0.97	0.72	0.42	0.63	0.19	0.46	0.28	0.93	0.93	0.05	0.82	0.17	7.60	0.47
130	0.87	0.27	0.21	0.18	0.20	0.75	1.00	0.64	0.93	0.45	0.16	0.82	0.54	0.00	0.93	0.34	8.29	0.52
140	0.40	0.30	0.24	0.13	0.60	0.51	0.31	0.25	0.98	0.66	0.00	0.93	0.93	0.15	0.97	0.39	7.75	0.48
150	0.06	0.22	0.24	0.19	0.78	0.33	0.52	0.52	0.64	0.39	0.82	0.20	1.00	0.02	0.42	0.17	6.51	0.41

Nota. El valor de R<sup>2</sup> es expresado en una normalización de 0 a 1. La penúltima columna representa la sumatoria de cada fila o altura y la última columna es su promedio.

**Tabla 31**

*Correlación de Valores de Humedad e Irradiancia en Banda RED*

h	22-mar	27-mar	29-mar	31-mar	02-abr	05-abr	07-abr	10-abr	14-abr	17-abr	19-abr	21-abr	24-abr	26-abr	29-abr	01-may	Σ	x̄
10	0.99	0.14	0.17	0.02	0.91	0.27	0.09	0.39	0.73	0.59	0.32	0.19	1.00	0.01	0.57	0.51	6.92	0.43
20	0.16	0.25	0.28	0.41	0.11	0.77	0.88	0.28	0.43	0.01	0.45	0.83	0.99	0.48	0.80	0.00	7.11	0.44
30	0.91	0.22	0.24	0.26	0.98	0.41	0.36	0.07	0.37	0.82	0.13	0.52	0.97	0.15	1.00	0.28	7.69	0.48
40	0.64	0.19	0.26	0.28	0.43	0.37	0.94	0.16	0.48	0.94	0.15	0.86	0.73	0.01	0.85	0.19	7.46	0.47
50	0.82	0.11	0.25	0.23	0.85	0.35	0.90	0.34	0.22	0.76	0.17	0.93	0.22	0.05	0.81	0.31	7.33	0.46
60	0.85	0.23	0.24	0.26	0.98	0.51	0.01	0.31	0.01	0.81	0.10	0.68	0.73	0.01	0.96	0.00	6.70	0.42
70	0.04	0.28	0.22	0.29	0.72	0.75	0.84	0.78	0.14	0.73	0.89	0.73	0.73	0.07	0.92	0.00	8.17	0.51
80	0.01	0.23	0.16	0.27	0.00	0.42	0.34	0.95	0.24	0.95	0.76	1.00	0.61	0.04	0.72	0.25	6.94	0.43
90	0.09	0.23	0.18	0.18	0.72	0.27	0.73	0.98	0.48	0.99	0.55	0.99	0.80	0.05	0.97	0.01	8.22	0.51
100	0.25	0.17	0.20	0.04	0.99	1.00	0.07	0.52	0.95	0.85	0.74	0.81	0.69	0.13	0.93	0.02	8.33	0.52
110	0.07	0.20	0.12	0.16	0.93	0.49	0.81	0.95	0.63	0.00	0.89	0.91	0.56	0.36	0.92	0.53	8.53	0.53
120	0.30	0.27	0.11	0.14	0.96	0.73	0.83	0.46	0.81	1.00	0.64	0.94	1.00	0.26	0.93	0.39	9.78	0.61
130	0.27	0.27	0.31	0.13	0.69	0.39	0.07	0.74	0.83	0.65	0.33	0.67	0.98	0.28	0.84	0.80	8.26	0.52
140	0.57	0.30	0.22	0.17	0.04	0.39	0.89	0.54	0.45	0.04	0.03	0.75	0.94	0.99	0.96	0.77	8.04	0.50
150	0.07	0.22	0.27	0.02	0.81	0.73	0.00	0.86	0.85	0.26	0.68	0.78	0.53	0.06	0.97	0.14	7.26	0.45

Nota. El valor de R<sup>2</sup> es expresado en una normalización de 0 a 1. La penúltima columna representa la sumatoria de cada fila o altura y la última columna es su promedio.

**Tabla 32**

*Correlación de Valores de Humedad e Irradiancia en Banda RED EDGE*

h	22-mar	27-mar	29-mar	31-mar	02-abr	05-abr	07-abr	10-abr	14-abr	17-abr	19-abr	21-abr	24-abr	26-abr	29-abr	01-may	Σ	$\bar{x}$
10	0.47	0.15	0.15	0.02	0.65	0.07	0.97	0.52	0.09	0.79	0.62	0.03	0.02	0.00	0.12	0.66	5.35	0.33
20	0.97	0.15	0.13	0.25	0.74	0.75	0.99	0.25	0.33	0.86	0.68	0.18	0.90	0.01	0.52	0.31	8.02	0.50
30	0.98	0.21	0.21	0.13	0.17	0.48	0.97	0.38	0.33	0.93	0.26	0.17	0.98	0.16	0.89	0.51	7.76	0.48
40	1.00	0.16	0.19	0.09	0.37	0.59	0.96	0.43	0.36	1.00	0.15	0.21	0.81	0.22	0.84	0.33	7.70	0.48
50	0.91	0.09	0.19	0.16	0.75	0.42	0.73	0.79	0.19	0.94	0.05	0.63	0.64	0.40	0.99	0.35	8.24	0.52
60	1.00	0.20	0.15	0.25	0.99	0.60	0.97	0.18	0.07	0.89	0.01	0.76	0.99	0.25	0.95	0.10	8.36	0.52
70	0.91	0.11	0.12	0.38	0.02	0.49	1.00	0.78	0.15	0.92	0.39	0.99	0.99	0.34	0.85	0.11	8.53	0.53
80	0.99	0.21	0.14	0.09	0.96	0.58	0.57	0.98	1.00	1.00	0.00	0.62	0.91	0.36	0.99	0.29	9.68	0.61
90	0.95	0.28	0.14	0.08	0.85	0.96	0.30	0.95	0.93	0.92	0.22	0.50	0.97	0.14	0.84	0.11	9.14	0.57
100	0.98	0.22	0.17	0.17	0.58	0.89	0.61	0.49	0.85	0.98	0.01	0.83	0.84	0.04	0.99	0.06	8.71	0.54
110	0.89	0.22	0.14	0.12	0.54	0.97	0.69	1.00	0.64	0.91	0.15	0.93	0.97	0.30	0.98	0.08	9.52	0.60
120	0.91	0.18	0.16	0.19	0.21	0.96	0.71	0.23	0.29	0.55	0.06	0.99	0.99	0.70	1.00	0.26	8.40	0.52
130	0.95	0.13	0.22	0.03	0.79	0.81	0.02	0.97	0.78	0.58	0.25	0.99	0.82	0.02	0.88	0.01	8.25	0.52
140	0.86	0.27	0.21	0.11	1.00	0.12	0.00	0.61	0.03	0.01	0.30	0.68	1.00	0.04	0.95	0.40	6.59	0.41
150	0.99	0.32	0.17	0.07	0.97	0.66	0.68	0.67	0.81	0.59	0.00	0.89	0.56	0.01	0.97	0.07	8.42	0.53

Nota. El valor de R<sup>2</sup> es expresado en una normalización de 0 a 1. La penúltima columna representa la sumatoria de cada fila o altura y la última columna es su promedio.

**Tabla 33**

*Correlación de Valores de Humedad e Irradiancia en Banda NIR*

h	22-mar	27-mar	29-mar	31-mar	02-abr	05-abr	07-abr	10-abr	14-abr	17-abr	19-abr	21-abr	24-abr	26-abr	29-abr	01-may	Σ	$\bar{x}$
10	0.38	0.01	0.05	0.18	0.73	0.32	0.45	0.35	0.37	0.57	0.12	0.19	0.99	0.00	0.26	0.45	5.41	0.34
20	0.52	0.06	0.14	0.93	0.57	0.74	0.81	0.91	0.47	1.00	0.41	0.96	0.99	0.01	0.61	0.22	9.36	0.58
30	1.00	0.11	0.17	0.75	0.99	0.37	0.48	0.01	0.44	0.94	0.61	0.22	0.97	0.16	0.41	0.19	7.81	0.49
40	1.00	0.10	0.16	0.67	0.79	0.36	0.88	0.99	0.40	0.83	0.73	0.88	0.23	0.22	0.59	0.05	8.87	0.55
50	1.00	0.03	0.19	0.57	0.74	0.35	0.31	0.15	0.37	0.84	0.08	0.49	0.10	0.40	0.57	0.40	6.58	0.41
60	0.98	0.21	0.25	0.56	0.90	0.39	0.68	0.07	0.04	1.00	0.12	0.97	0.70	0.25	0.84	0.00	7.97	0.50
70	0.98	0.11	0.12	0.70	0.93	0.54	0.91	0.30	0.27	0.94	0.93	0.91	0.58	0.34	0.83	0.06	9.45	0.59
80	0.87	0.15	0.13	0.53	0.71	0.41	0.74	0.85	0.46	0.95	0.44	0.56	0.78	0.36	0.63	0.34	8.90	0.56
90	0.76	0.28	0.11	0.42	1.00	0.63	0.78	0.77	0.83	0.99	0.06	0.29	0.95	0.14	0.83	0.12	8.96	0.56
100	1.00	0.20	0.14	0.44	0.98	0.97	0.20	0.89	0.52	1.00	0.05	0.62	0.82	0.04	0.89	0.01	8.77	0.55
110	0.98	0.11	0.12	0.21	0.45	0.53	0.95	0.69	0.11	0.53	0.23	0.95	0.75	0.30	0.86	0.04	7.81	0.49
120	0.92	0.23	0.15	0.54	1.00	0.71	0.61	0.97	0.99	0.63	0.32	0.99	1.00	0.70	0.66	0.03	10.46	0.65
130	0.96	0.21	0.10	0.16	0.99	0.93	0.95	0.53	0.96	0.49	0.00	0.63	0.83	0.02	0.97	0.18	8.92	0.56
140	0.42	0.29	0.20	0.17	0.80	0.91	0.74	0.00	0.97	0.69	0.01	0.57	0.40	0.04	0.51	0.17	6.92	0.43
150	0.89	0.27	0.19	0.37	0.63	0.65	0.40	0.15	0.71	0.96	0.10	0.28	0.64	0.01	0.88	0.04	7.18	0.45

Nota. El valor de R<sup>2</sup> es expresado en una normalización de 0 a 1. La penúltima columna representa la sumatoria de cada fila o altura y la última columna es su promedio.

Posteriormente se realizó una ponderación de cada uno de los valores, tomando como criterios darles mayor peso a los valores más altos de correlación, de tal manera que, cuando el resultado de la correlación sea menor a 0.40 toma un valor de 0; si está entre 0.40 y 0.60 será 1; si el intervalo es entre 0.6 y 0.8 es igual a 1.5 y finalmente si es mayor a 0.80 es igual a 2. Después se realiza una suma de las ponderaciones con base en cada altura para determinar el valor mayor y ordenarlos de mayor a menor. Esto se muestra de la Tabla 34 a la Tabla 37.

**Tabla 34**

*Ponderación de Valores de Correlación de la Banda GREEN*

h	22-mar	27-mar	29-mar	31-mar	02-abr	05-abr	07-abr	10-abr	14-abr	17-abr	19-abr	21-abr	24-abr	26-abr	29-abr	01-may	Σ
10	1	0	0	0	1	0	2	0	1	1.5	1	0	2	0	0	1	10.50
20	0	0	0	0	1	2	0	0	2	1	1	0	2	0	1	0	10.00
30	1.5	0	0	0	0	1	0	0	1.5	1.5	0	0	2	0	1.5	1	10.00
40	0	0	0	0	0	1.5	2	0	1	2	0	0	2	0	1.5	1	11.00
50	0	0	0	0	1.5	1	2	0	0	1	0	1.5	1.5	0	2	0	10.50
60	2	0	0	0	2	1	0	0	0	1	0	2	2	0	2	0	12.00
70	2	0	0	0	1	1.5	2	0	0	1	0	2	2	0	1.5	0	13.00
80	1.5	0	0	0	1.5	1.5	0	0	1.5	1.5	0	2	2	0	1.5	0	13.00
90	0	0	0	0	1.5	2	2	0	2	0	0	2	2	0	1.5	0	13.00
100	2	0	0	0	2	2	0	0	1.5	2	2	2	2	0	2	0	17.50
110	2	0	0	0	2	0	1	0	1	2	1.5	2	2	0	2	0	15.50
120	1	0	0	0	2	1.5	1	1.5	0	1	0	2	2	0	2	0	14.00
130	2	0	0	0	0	1.5	2	1.5	2	1	0	2	1	0	2	0	15.00
140	0	0	0	0	1.5	1	0	0	2	1.5	0	2	2	0	2	0	12.00
150	0	0	0	0	1.5	0	1	1	1.5	0	2	0	2	0	1	0	10.00

*Nota.* Establece cada valor la ponderación dada a cada rango de valores y representando gráficamente por un color, donde 0 es menor al 40 % de la correlación; 1 está entre 40 y 60 %; 1.5 está entre el 60 y 80 % y 2 es mayor al 80 %. La última columna muestra la sumatoria de cada fila de ponderación o altura.

**Tabla 35**

*Ponderación de Valores de Correlación de la Banda RED*

h	22-mar	27-mar	29-mar	31-mar	02-abr	05-abr	07-abr	10-abr	14-abr	17-abr	19-abr	21-abr	24-abr	26-abr	29-abr	01-may	Σ
10	2	0	0	0	2	0	0	0	1.5	1	0	0	2	0	1	1	10.50
20	0	0	0	1	0	1.5	2	0	1	0	1	2	2	1	1.5	0	13.00
30	2	0	0	0	2	1	0	0	0	2	0	1	2	0	2	0	12.00
40	1.5	0	0	0	1	0	2	0	1	2	0	2	1.5	0	2	0	13.00
50	2	0	0	0	2	0	2	0	0	1.5	0	2	0	0	2	0	11.50
60	2	0	0	0	2	1	0	0	0	2	0	1.5	1.5	0	2	0	12.00
70	0	0	0	0	1.5	1.5	2	1.5	0	1.5	2	1.5	1.5	0	2	0	15.00
80	0	0	0	0	0	1	0	2	0	2	1.5	2	1.5	0	1.5	0	11.50
90	0	0	0	0	1.5	0	1.5	2	1	2	1	2	2	0	2	0	15.00
100	0	0	0	0	2	2	0	1	2	2	1.5	2	1.5	0	2	0	16.00
110	0	0	0	0	2	1	2	2	1.5	0	2	2	1	0	2	1	16.50
120	0	0	0	0	2	1.5	2	1	2	2	1.5	2	2	0	2	0	18.00
130	0	0	0	0	1.5	0	0	1.5	2	1.5	0	1.5	2	0	2	1.5	13.50
140	1	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	1.5	2	2	2	1.5	14.00
150	0	0	0	0	2	1.5	0	2	2	0	1.5	1.5	1	0	2	0	13.50

*Nota.* Establece cada valor la ponderación dada a cada rango de valores y representando gráficamente por un color, donde 0 es menor al 40 % de la correlación; 1 está entre 40 y 60 %; 1.5 está entre el 60 y 80 % y 2 es mayor al 80 %. La última columna muestra la sumatoria de cada fila de ponderación o altura.

**Tabla 36**

*Ponderación de Valores de Correlación de la Banda RED EDGE*

h	22-mar	27-mar	29-mar	31-mar	02-abr	05-abr	07-abr	10-abr	14-abr	17-abr	19-abr	21-abr	24-abr	26-abr	29-abr	01-may	Σ
10	1	0	0	0	1.5	0	2	1	0	1.5	1.5	0	0	0	0	1.5	10.00
20	2	0	0	0	1.5	1.5	2	0	0	2	1.5	0	2	0	1	0	13.50
30	2	0	0	0	0	1	2	0	0	2	0	0	2	0	2	1	12.00
40	2	0	0	0	0	1	2	1	0	2	0	0	2	0	2	0	12.00
50	2	0	0	0	1.5	1	1.5	1.5	0	2	0	1.5	1.5	1	2	0	15.50
60	2	0	0	0	2	1	2	0	0	2	0	1.5	2	0	2	0	14.50
70	2	0	0	0	0	1	2	1.5	0	2	0	2	2	0	2	0	14.50
80	2	0	0	0	2	1	1	2	2	2	0	1.5	2	0	2	0	17.50
90	2	0	0	0	2	2	0	2	2	2	0	1	2	0	2	0	17.00
100	2	0	0	0	1	2	1.5	1	2	2	0	2	2	0	2	0	17.50
110	2	0	0	0	1	2	1.5	2	1.5	2	0	2	2	0	2	0	18.00
120	2	0	0	0	0	2	1.5	0	0	1	0	2	2	1.5	2	0	14.00
130	2	0	0	0	1.5	2	0	2	1.5	1	0	2	2	0	2	0	16.00
140	2	0	0	0	2	0	0	1.5	0	0	0	1.5	2	0	2	0	11.00
150	2	0	0	0	2	1.5	1.5	1.5	2	1	0	2	1	0	2	0	16.50

*Nota.* Establece cada valor la ponderación dada a cada rango de valores y representando gráficamente por un color, donde 0 es menor al 40 % de la correlación; 1 está entre 40 y 60 %; 1.5 está entre el 60 y 80 % y 2 es mayor al 80 %. La última columna muestra la sumatoria de cada fila de ponderación o altura.

**Tabla 37**

*Ponderación de Valores de Correlación de la Banda NIR*

h	22-mar	27-mar	29-mar	31-mar	02-abr	05-abr	07-abr	10-abr	14-abr	17-abr	19-abr	21-abr	24-abr	26-abr	29-abr	01-may	Σ
10	0	0	0	0	1.5	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0	1	6.50
20	1	0	0	2	1	1.5	2	2	1	2	1	2	2	0	1.5	0	19.00
30	2	0	0	1.5	2	0	1	0	1	2	1.5	0	2	0	1	0	14.00
40	2	0	0	1.5	1.5	0	2	2	0	2	1.5	2	0	0	1	0	15.50
50	2	0	0	1	1.5	0	0	0	0	2	0	1	0	1	1	0	9.50
60	2	0	0	1	2	0	1.5	0	0	2	0	2	1.5	0	2	0	14.00
70	2	0	0	1.5	2	1	2	0	0	2	2	2	1	0	2	0	17.50
80	2	0	0	1	1.5	1	1.5	2	1	2	1	1	1.5	0	1.5	0	17.00
90	1.5	0	0	1	2	1.5	1.5	1.5	2	2	0	0	2	0	2	0	17.00
100	2	0	0	1	2	2	0	2	1	2	0	1.5	2	0	2	0	17.50
110	2	0	0	0	1	1	2	1.5	0	1	0	2	1.5	0	2	0	14.00
120	2	0	0	1	2	1.5	1.5	2	2	1.5	0	2	2	1.5	1.5	0	20.50
130	2	0	0	0	2	2	2	1	2	1	0	1.5	2	0	2	0	17.50
140	1	0	0	0	2	2	1.5	0	2	1.5	0	1	1	0	1	0	13.00
150	2	0	0	0	1.5	1.5	1	0	1.5	2	0	0	1.5	0	2	0	13.00

*Nota.* Establece cada valor la ponderación dada a cada rango de valores y representando gráficamente por un color, donde 0 es menor al 40 % de la correlación; 1 está entre 40 y 60 %; 1.5 está entre el 60 y 80 % y 2 es mayor al 80 %. La última columna muestra la sumatoria de cada fila de ponderación o altura.

Con la lista ordenada en la Tabla 38, de las alturas de vuelo con mayor media y sumatoria de ponderación en cada banda espectral, se seleccionaron estratégicamente los 5 primeros puestos que de la misma manera manifiestan un valor de  $R^2 \geq 50\%$  de modo que, para las 4 bandas del sensor con la altura de vuelo de 120 m es la cual aparece con el mejor resultado de todo el conjunto, por lo que se resulta que de los 100 a 130 m es una altitud óptima de acuerdo con este sensor multiespectral y las condiciones de vuelo e iluminación para estimar los resultados requeridos. Posteriormente se promediaron los resultados para obtener un valor medio de cada altura y contrastarlo con el criterio de ponderación.

**Tabla 38**

*Ponderación de Correlación en Cada Banda En Orden Descendente a su Promedio*

GREEN			RED			RED EDGE			NIR		
h	$\bar{x}$	$\Sigma$	h	$\bar{x}$	$\Sigma$	h	$\bar{x}$	$\Sigma$	h	$\bar{x}$	$\Sigma$
100	<b>0.56</b>	<b>17.5</b>	120	<b>0.61</b>	<b>18.0</b>	110	<b>0.60</b>	<b>18.0</b>	120	<b>0.65</b>	<b>20.5</b>
110	0.50	15.5	110	0.53	16.5	80	0.61	17.5	20	0.58	19.0
130	0.52	15.0	100	0.52	16.0	100	0.54	17.5	70	0.59	17.5
120	0.47	14.0	70	0.51	15.0	90	0.57	17.0	100	0.55	17.5
70	0.50	13.0	90	0.51	15.0	150	0.53	16.5	130	0.56	17.5
80	0.50	13.0	140	0.50	14.0	130	0.52	16.0	80	0.56	17.0
90	0.44	13.0	130	0.52	13.5	50	0.52	15.5	90	0.56	17.0
60	0.45	12.0	150	0.45	13.5	60	0.52	14.5	40	0.55	15.5
140	0.48	12.0	20	0.44	13.0	70	0.53	14.5	30	0.49	14.0
40	0.40	11.0	40	0.47	13.0	120	0.52	14.0	60	0.50	14.0
10	0.44	10.5	30	0.48	12.0	20	0.50	13.5	110	0.49	14.0
50	0.39	10.5	60	0.42	12.0	30	0.48	12.0	140	0.43	13.0
20	0.42	10.0	50	0.46	11.5	40	0.48	12.0	150	0.45	13.0
30	0.44	10.0	80	0.43	11.5	140	0.41	11.0	50	0.41	9.5
150	0.41	10.0	10	0.43	10.5	10	0.33	10.0	10	0.34	6.5

*Nota.* Valores promedios de las correlaciones de ponderación de bandas espectrales, ordenados de mayor a menor porcentaje, en cada escena.

Es aquí donde se eligen los cinco primeros valores con mayor suma de ponderación, se ordenan desde el mayor valor en cada conjunto de alturas. Se observa que, los vuelos a 100m a 120m son los que tienen una moda con un coeficiente  $R^2$  mayor a 50 %. De igual manera también aparecen alturas de 80m a 130 m categorizados en rango mayor de  $R^2$ .

**Tabla 39***Orden de Ponderación de Correlaciones en cada Banda*

Altura	Banda	$\bar{x}$	$\sum$ Ponderación
20	NIR	0.58	19.00
70	NIR	0.59	17.50
70	RED	0.51	15.00
70	GRE	0.50	13.00
80	REG	0.61	17.50
90	REG	0.57	17.00
90	RED	0.51	15.00
100	GRE	0.56	17.50
100	REG	0.54	17.50
100	NIR	0.55	17.50
100	RED	0.52	16.00
110	REG	0.60	18.00
110	RED	0.53	16.50
110	GRE	0.50	15.50
120	NIR	0.65	20.50
120	RED	0.61	18.00
120	GRE	0.47	14.00
130	NIR	0.56	17.50
130	GRE	0.52	15.00
150	REG	0.53	16.50

Cabe mencionar que, en la Tabla 39 se promedian los resultados de correlación para cada banda de dos maneras; una es promediando las medias de cada una de las correlaciones en cada banda espectral y la otra es el promedio que resulta de la suma de ponderaciones con respecto a una matriz ideal de todos sus valores igual a 2, en este caso la sumatoria de la columna de sumas ponderadas entre 480. Los valores resultantes se comportan de la misma manera de tal modo que, la banda del GREEN obtiene un promedio de 46 % y 0,39 respectivamente; en la banda RED 49 % y 0.43; en RED EDGE 51 % y 0.46; NIR 51 % y 0.47.

De acuerdo con estos resultados, se puede observar que las mejores respuestas espectrales se encuentran en el espectro del RED EDGE y NIR, con un valor de  $R^2$  de 51 %, siendo de los más altos en comparación con las otras bandas.

#### **4.4.2. Correlación de Valores en el Área de Estudio**

Se realizó una correlación entre los datos de humedad gravimétrica y digitales de las imágenes de la parcela en estudio, para poder determinar cualquier falta de incumplimiento en precisiones, si los resultados favorecen a los indicadores de humedad de suelo, de acuerdo con el grado en la relación del cultivo y la respuesta espectral obtenida. Se presenta la Tabla 40 con los valores de correlación para cada índice y valores de cada banda con respecto de la humedad en el suelo.

**Tabla 40**

*Correlación de Humedad de Suelo y Valores de Índices y Bandas Espectrales en el Área de Estudio*

Banda	14-oct	04-dic	09-dic	14-ene	12-feb	09-mar	26-mar	13-abr	22-may	17-jun	$\Sigma$	$\bar{x}$
Green	0.57	0.59	0.25	0.02	0.05	0.56	0.01	0.12	0.00	0.12	2.17	0.24
Red	0.76	0.45	0.06	0.04	0.23	0.71	0.00	0.05	0.01	0.26	2.32	0.26
Red Edge	0.58	0.01	0.35	0.54	0.02	0.05	0.50	0.25	0.21	0.03	2.51	0.28
Nir	0.56	0.00	0.01	0.40	0.02	0.03	0.16	0.22	0.06	0.36	1.46	0.16
NDVI	0.87	0.95	0.92	0.07	0.04	0.83	0.03	0.23	0.03	0.02	3.97	0.44
NDWI	0.31	0.16	0.87	0.07	0.12	0.87	0.14	0.38	0.02	0.00	2.95	0.33
SAVI	0.85	0.95	0.92	0.55	0.04	0.83	0.03	0.23	0.03	0.02	4.43	0.49
NDRE	0.39	0.06	0.13	0.03	0.37	0.23	0.74	0.43	0.01	0.33	2.39	0.27
DSWI4	0.74	0.53	0.42	0.05	0.07	0.68	0.03	0.02	0.03	0.09	2.58	0.29
GNDVI	0.99	0.16	0.87	0.07	0.12	0.87	0.14	0.38	0.02	0.00	3.63	0.40

Estos datos indican valores en menor correlación tomando en cuenta a todos, banda por banda e índice. Para esto se promedian uno a uno y se genera una ponderación como en la calibración de los valores espectrales, que se observa al final de la Tabla 41.

**Tabla 41**

*Ponderación de Correlación de Valores del Área de Estudio y Humedad de Suelo*

Banda	14-oct	04-dic	09-dic	14-ene	12-feb	09-mar	26-mar	13-abr	22-may	17-jun	Σ
Green	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3.0
Red	1.5	1	0	0	0	1.5	0	0	0	0	4.0
Red Edge	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	3.0
Nir	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2.0
NDVI	2	2	2	0	0	2	0	0	0	0	8.0
NDWI	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	4.0
SAVI	2	2	2	1	0	2	0	0	0	0	9.0
NDRE	0	0	0	0	0	0	1.5	1	0	0	2.5
DSWI4	1.5	1	1	0	0	1.5	0	0	0	0	5.0
GNDVI	2	0	2	0	0	2	0	0	0	0	6.0

Como se puede observar, los valores que mejor representan una correlación en esta zona de estudio son en la primera escena, que corresponde a un suelo desnudo sin humedad. Los índices con mayor valor de correlación son SAVI, NDVI y GNDVI, pero estos se obtienen valores mayores en etapas tempranas y medias. Una vez que el cultivo ya es más alto y denso, no es posible ver la superficie del suelo, por lo que la humedad en etapas medias y finales pudieran ser mejor representadas con el índice NDRE, que por su capacidad del borde rojo que detalla más a la planta por su capacidad de introducirse más, es la respuesta a estos valores.

Sin embargo, aquí se presentan valores que el rojo y el borde rojo funcionan de una manera un poco más viable que en suelo desnudo.

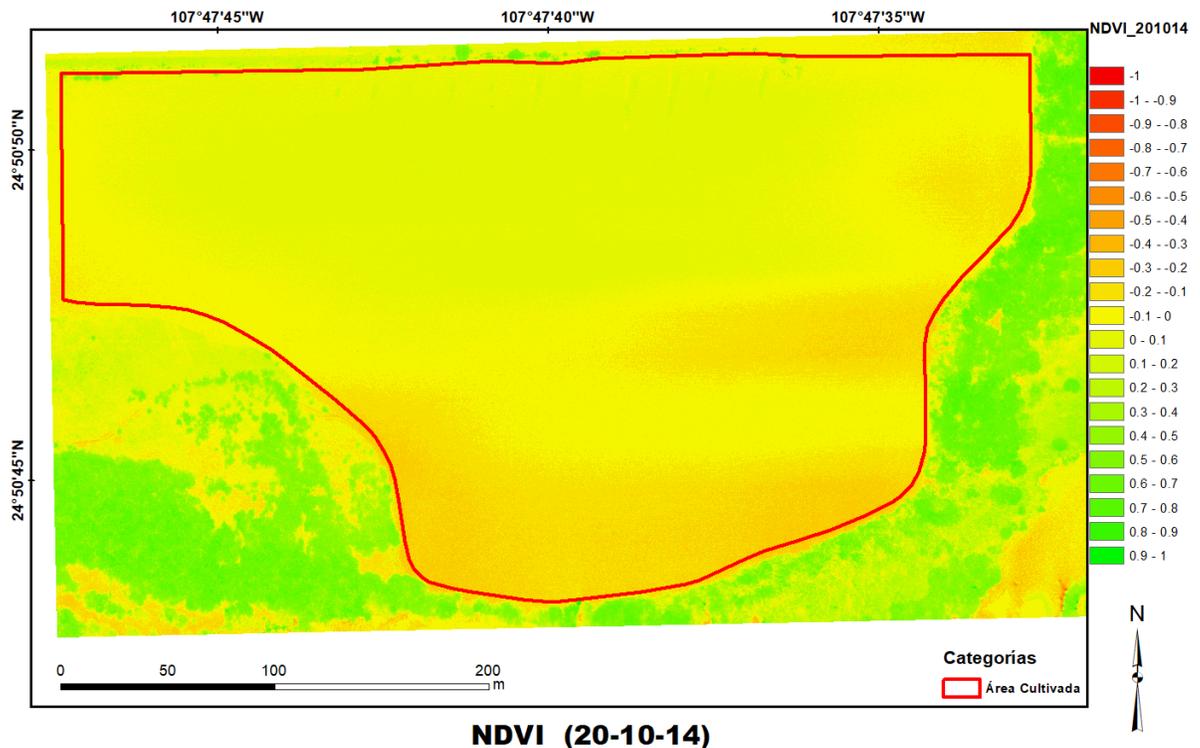
#### 4.5. Cartografía de los Niveles de Humedad

Se realizó una serie de cartografía digital, acerca de los datos ya evaluados sobre la variabilidad de la humedad de suelo en terrenos, en función de la categorización determinada a partir de los resultados observados y validados.

Para uno de los diferentes índices analizados en el área de estudio, se muestran los mapas a modo de ejemplo, dos de las escenas en todo el ciclo del cultivo, que comprende la etapa antes de iniciar a cultivar como se muestra en la Figura 40 y una etapa intermedia como en la Figura 41.

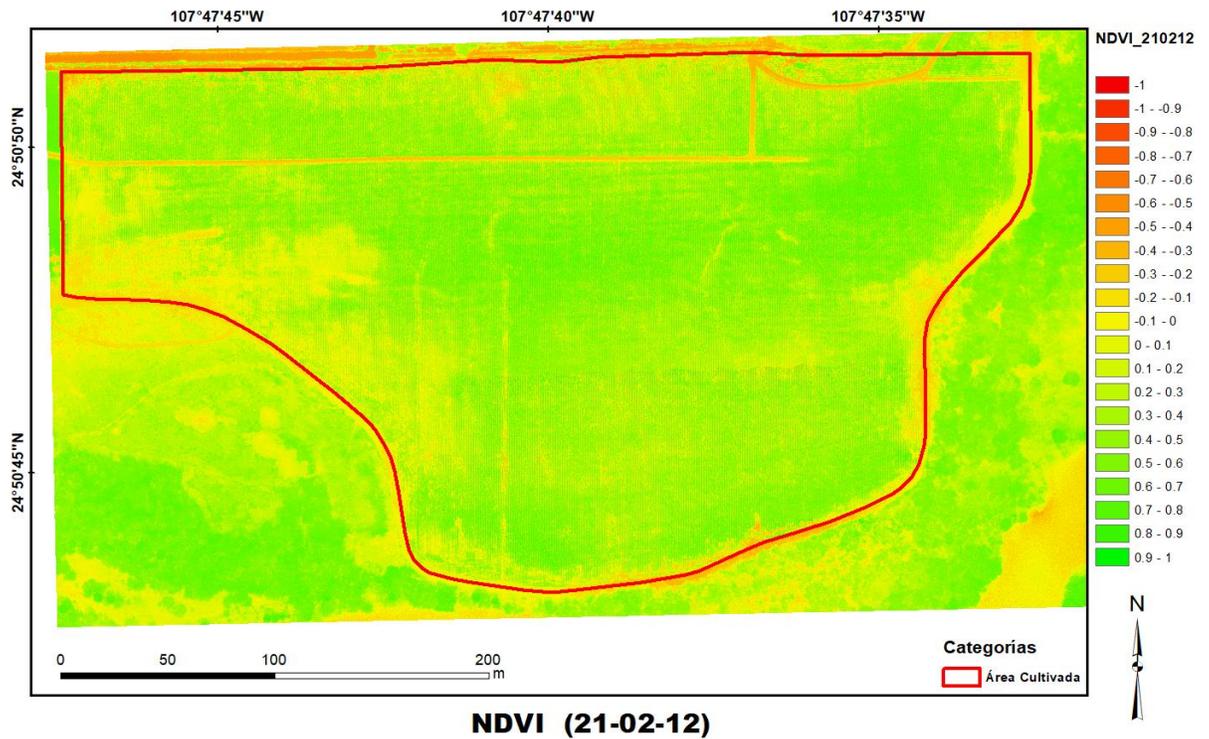
**Figura 40**

*Mapa de la Zona de Estudio con Valores del Índice NDVI en la Escena 14-oct-2020*



**Figura 41**

*Mapa de la Zona de Estudio con Valores del Índice NDVI en la Escena 12-feb-2021*



De este modo se fueron realizando todo el conjunto de mapas para cada una de las bandas e índices estudiados en este proyecto. La totalidad de la cartografía se presentan en el Anexo 4.

#### **4.6. Discusión**

Acerca de los resultados obtenidos primeramente de la calibración de valores de humedad en zonas de muestreo controlado, fue considerable tomar en cuenta el análisis de las alturas de vuelo para realizar el conjunto de vuelos fotogramétricos en el área de estudio.

En tal sentido, para encontrar un equilibrio entre los diferentes factores que influyen en obtener mejores resoluciones temporal, espacial, radiométrica, un volumen de imágenes que asegure un proceso fotogramétrico óptimo, los tiempos de vuelo para el consumo de energía de baterías, se encontraron las alturas con el mayor coeficiente de determinación  $R^2$  que fueron poco mayor al 50% para este estudio, desde los 70 m hasta los 130 m en todas las bandas sin embargo, en las bandas NIR y Red Edge a partir de los 20 m de altitud ya se muestran valores por arriba de  $R^2 \geq 50\%$  de tal modo que, a mayor altura ya decrecía el porcentaje de correlación considerablemente. Cabe mencionar que las altitudes con mejores resultados en sus 4 bandas son las de 100 m a 130 m.

Esto sirvió de pauta para elegir una misma altura en todos los vuelos realizados, también bajo la normativa legal vigente para los techos máximos de vuelos con RPAS pequeños que permite operar a una altura máxima de 122 metros (400 ft) (NOM-107-SCT3-2019, 2019). Por consiguiente, dentro del intervalo de 70m a 130m que se tienen con  $R^2 \geq 50\%$ , se eligieron los 80 m, para efectos de la autonomía de la batería, la resolución especial y traslapes entre fotos fuera óptimo en cubrirlo con un solo vuelo en toda la zona de estudio.

De acuerdo con los valores radiométricos de la calibración del suelo desnudo demostró que la mejor correspondencia de valores se observa en las bandas del borde rojo RED EDGE e infrarrojo NIR, con un valor de  $R^2$  mayor a 50 % en promedio, por lo que, estas bandas espectrales juegan un papel importante en la selección de los índices estudiados en este trabajo sin embargo, para poder identificar el contenido de humedad se investigó con diferentes índices relacionado con ello también usando las otras bandas Green y Red.

En este sentido, comparando el estudio en el área de la parcela con el cultivo, analizando las diferentes etapas fenológicas y de riegos de auxilio, los índices que mejor obtuvieron respuesta de correlación fueron el SAVI con un  $R^2$  de 49 %, NDVI con  $R^2$  de 44 % y el GNDVI con  $R^2$  de 40 %. El resto de los índices se obtienen valores favorables, pero en diferentes etapas como las tardías o finales con respecto al índice NDRE, debido a su espectro que da una respuesta más precisa ocasionado por el traspaso de esta longitud de onda sobre los cultivos. A su vez, la banda espectral con mejor  $R^2$  fueron el Red Edge y Red (28 % y 26 % respectivamente).

Ahora bien, en cuanto a los valores de contenido de humedad del suelo por el método gravimétrico que son los más precisos para poder ser tomados como referencia (Radulovich, 2009) y relacionar los parámetros determinantes de humedad del suelo con la respuesta espectral de las imágenes, siguen siendo datos discretos que se necesita una distribución de puntos muestrales para poder encontrar valores estimados interpolados en el resto del área, lo que este estudio presenta ventajas sobre una continuidad de valores por la utilidad de las

imágenes. Del mismo modo, Quichimbo et al., (2016) consideró áreas controladas para estimar la humedad en estado de Capacidad de campo CC con los sensores TDR, así como una textura que en este estudio también se analizó (Arcillosa) que debido a ello, resalta la necesidad de una calibración específica de los sensores para mejorar las estimaciones, sugiere que en los suelos de textura fina el uso de esta tecnología tendría que ser recomendada o restringida tras una evaluación y calibración de los equipos, especialmente en el caso de suelos con arcillas expansibles.

Por lo tanto, la estimación con sensores multiespectrales en el espectro de NIR, Red Edge y visible, presentaron en este estudio un mayor intervalo del umbral de tiempo de riego entre valores de CC y PMP, los resultados estadísticos corresponden a un >50% de correlación con los valores de referencia.

## 5. Conclusiones, recomendaciones y propuestas

El objetivo de esta investigación es validar la utilización del sensor multiespectral montado sobre un RPAS como una herramienta de reconocimiento e identificación de valores de contenido de humedad del suelo en zonas agrícolas. La calibración de bandas a la humedad de suelo fue un trabajo considerable para esta investigación y poder partir de los resultados para el trabajo de campo.

De este modo se encontraron las alturas de vuelo más significativas y correlacionado a la humedad del suelo para realizar los vuelos en el área de estudio. Si bien se tuvo pensado en principio que las alturas más bajas responderían mejor a los resultados, fue trascendente hallar que para el sensor multiespectral utilizado en las áreas de calibración replicando la parcela cultivada en análisis, son alturas entre 70 y 130 m. Esto fue una ventaja ya que permite un amplio intervalo de altitud de vuelo de acuerdo con la normativa vigente de RPAS y también evitar algún alcance con postes, árboles o edificios que se encontraran a una baja altitud.

Así mismo, se encontró que, las bandas con el valor del coeficiente de determinación  $R^2$  a estas alturas de vuelo se encuentran mayor a 50%, siendo las bandas del Red Edge y Nir con mayor correlación que Green y Red, de acuerdo con un intervalo del riego en la zona de calibración, es decir, desde el punto de saturación de agua, pasando por Capacidad de Campo CC, hasta llegar a un punto de sequedad que rebase el punto de marchitez permanente PMP, con el fin de poder identificar los días que transcurren para que esto ocurra y qué valores presentaba en las imágenes multiespectrales, los cuales servirán como referencia

al replicar vuelos fotogramétricos con este sensor multiespectral en estas condiciones.

Si bien, las metodologías de manera directa para poder conocer el valor de humedad del suelo en su mayoría son destructivas, puntuales (método gravimétrico, sensores electrónicos TDR, tensiómetros) y algunas no tan precisas (método del tacto), el trabajo presentado en esta investigación presenta las ventajas de poder obtener los datos de cierta manera más rápida, incluso en el mismo día, de una manera indirecta que no se requiere destruir zonas en los suelos para tomar muestras y ocasionalmente tapar algún surco de riego, plantas o invertir tiempo en ir a obtenerlas, llevarlas a algún laboratorio y esperar días en saber el contenido de humedad. Sin embargo, por la acotación del tiempo y disponibilidad de áreas de estudio y laboratorios, solamente se analizó este tipo de suelos, lo que sería benéfico replicar este estudio en otras texturas para poder conocer la respuesta a ello y tener una calibración del mismo sensor, con la finalidad de saber si se comporta de la misma manera para tener que realizar vuelos fotogramétricos solamente.

Luego de estudiar diferentes índices espectrales de vegetación y relacionados de manera indirecta con la humedad del suelo, con las imágenes del área de estudio se crearon cada uno de ellos en todas las etapas de vuelo, donde los que mejor obtuvieron respuesta de correlación fueron el SAVI con un  $R_2$  de 49%, NDVI con  $R_2$  de 44% y el GNDVI con  $R_2$  de 40%. El resto de los índices se obtienen valores favorables, pero en diferentes etapas como las tardías o finales con respecto al índice NDRE, debido a su espectro que da una respuesta más precisa ocasionado

por el traspaso de esta longitud de onda sobre los cultivos. A su vez, la banda espectral con mejor  $R_2$  fueron el Red Edge y Red (28% y 26% respectivamente).

Así como este estudio tomó en cuenta todas las etapas del cultivo, es preciso decir que cuando se contrasta solamente el suelo desnudo en el primer escenario, todos los resultados fueron factibles y con buena correlación, causado por la no influencia del cultivo ocultando al suelo, por lo que como resultado se tiene una disminución de correlación al suelo húmedo con una vegetación existente en ello.

Tomando la metodología de Quichimbo et al., (2016) en la comparación con el método gravimétrico vs sensores TDR, es similar en algunas partes de este estudio, solo que aquí se comparó contra el sensor multiespectral montado en un RPAS. Hubo grandes ventajas como poder representar las condiciones de humedad de manera continua en una cartografía representado por los índices y relacionar los valores digitales o de irradiancia de las imágenes, así como claramente elaborar diferentes mapeos con índices de vegetación para indicar diferentes parámetros que se busquen en los suelos y cultivos, pero a diferencia de su estudio, los valores estadísticos de correlación en su estudio fueron bajos o nulos en los suelos arcillosos, a diferencia de los que se obtuvieron en esta investigación, alrededor de un 50% de correlación.

De este modo, se sugiere que hay que tomar más parámetros del suelo para estudios posteriores, diferentes texturas de suelo, diferente cultivo y condiciones atmosféricas para analizar las diferentes respuestas y ampliar el catálogo de la base de datos de correspondencia entre valores de humedad y los radiométricos de las imágenes, ya que, si bien contrastando el estudio de los sensores TDR sólo acotaban a condiciones de Capacidad de campo, en contraste, se analizaron todas las etapas del ciclo fenológico del maíz que se sembró en el área de estudio, todos los riegos

aplicados y conocer un punto entre el intervalo de PMP y CC con respecto a los valores digitales.

En tal sentido, la utilización de las herramientas geoespaciales en la participación de la agricultura de precisión, son en principio de gran utilidad para el análisis de los cultivos, ya que muchos eventos no son visibles al ojo humano, se pueden reducir costos e insumos al poder detectar qué áreas son las que requieren atenderse con mayor precisión y en cuanto al consumo de agua, poder definir si es realmente necesario regar o poder esperar, incluso no hacerlo.

## 6. Referencias

- Apan, A., Held, A., Phinn, S., & Markley, J. (2003). Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 Hyperion imagery for discriminating sugarcane disease. *Spatial Sciences*, 1–13. <http://eprints.usq.edu.au/8061>
- Arango, D. F., Isabel, M. P. M., Vilar, L., Hoyo, D. E. L., & Pacheco-labrador, J. (2015). *ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA VEGETACION HERBÁCEA EN UNA ZONA DE DEHESA A PARTIR DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES ADQUIRIDAS POR EL SENSOR AEROPORTADO CASI*. 177–204.
- Assmann, J. J., Kerby, J. T., Cunliffe, A. M., & Myers-Smith, I. H. (2019). Vegetation monitoring using multispectral sensors — best practices and lessons learned from high latitudes. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(1), 54–75. <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0018>
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi C., R. E., Thompson, T., Lascano, R. J., Li, H., & Moran, M. S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. *Proc. 5th Int. Conf. Precis Agric, July 2015*.
- Bouyoucos, G. (1927). THE HYDROMETER AS A NEW METHOD FOR THE MECHANICAL ANALYSIS OF SOILS. *Soil Science*, 23(5), 343–354. <https://doi.org/10.1097/00010694-192705000-00002>
- Bustamante, W. O., Flores, J., Ronald, V., & Ontiveros Capurata, E. (2016). Uso

- y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 1(1), 150/430. [www.gob.mx/imta](http://www.gob.mx/imta)
- Calvache, M. (2013). Riego Andino Tecnificado. En *Academia*.  
[https://www.academia.edu/41049807/Riego\\_Andino\\_Tecnificado](https://www.academia.edu/41049807/Riego_Andino_Tecnificado)
- CONAGUA, C. N. del A. (2018a). *Atlas del agua en México*.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/AAM2018.pdf>
- CONAGUA, C. N. del A. (2018b). *Estadísticas Agrícolas de las Unidades de Riego*.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/SGIH-3-18.pdf>
- CONAGUA, C. N. del A. (2018c). *Estadísticas del agua en México*.
- CONAGUA, C. N. del A. (2018d). *Numeragua*.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/Numeragua2018.pdf>
- CONAPO, C. N. de P. (2018). *Indicadores demográficos de México de 1950 a 2050*.  
[http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa\\_Ind\\_Dem18/index\\_2.html](http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa_Ind_Dem18/index_2.html)
- DJI. (2017). Manual del Usuario Phantom 4 PRO/PRO+. *Dji*, 477, 1–43.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements crop water requirements. En *Irrigation and Drainage paper* (Número 24).
- Douglas-Mankin, K. R. (2018). Current research in land, water, and

- agroecosystems. *American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASABE*, 61(5), 1639–1651. <https://doi.org/10.13031/trans.12821>
- FAO, F. and A. O. of the U. N. (2006). Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. En *Serie Didáctica, Facultad de Agronomía y Zootécnica, Universidad Nacional de Tucumán* (Vol. 2).
- FAO, F. and A. O. of the U. N. (2013). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Managing systems at risk*. <https://doi.org/10.4324/9780203142837>
- FAO, F. and A. O. of the U. N. (2016). *Extracción de agua por sectores , alrededor de 2010*. 2–3.
- FAO, F. and A. O. of the U. N. (2020). *Countries by commodity*. FAOSTAT. [http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity)
- Fenger, R. (2019). *Parrot Sequoia Image Processing Tutorial*. Github. [https://github.com/rasmusfenger/micasense\\_imageprocessing\\_sequoia/blob/master/Sequoia Image Processing Tutorial.ipynb](https://github.com/rasmusfenger/micasense_imageprocessing_sequoia/blob/master/Sequoia%20Image%20Processing%20Tutorial.ipynb)
- Flores-Medina, M., Flores-García, F., Velasco-Martínez, V., González-Cervantes, G., & Jurado-Zamarripa, F. (2015). Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 75–88.
- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. *Instituto de Geología (UNAM)*, 56. [https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL DEL LABORATORIO DE FISICA DE SUELOS1.pdf](https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf)

- Fontanet, M., Fernández-García, D., & Ferrer, F. (2018). The value of satellite remote sensing soil moisture data and the DISPATCH algorithm in irrigation fields. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5889–5900. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5889-2018>
- Gao, B.-C. (1996). A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Elsevier Science Inc*, 23(3), 257–266. <https://doi.org/10.24059/olj.v23i3.1546>
- Gisbert, J., Ibáñez, S., & Moreno, H. (2010). La textura del suelo. *OAI*.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Huete, A. R., & Jackson, R. D. (1988). Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. *Remote Sensing of Environment*, 25(1), 89–105. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90043-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90043-0)
- INEGI, I. N. de E. y G. (2015). *Población*. Encuesta Intercensal 2015. <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- INEGI, I. N. de E. y G. (2017). *Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2017 Conociendo el campo de México*. [http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/encagro/ena/2017/doc/ena2017\\_pres.pdf](http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/encagro/ena/2017/doc/ena2017_pres.pdf)
- INIFAP, I. N. de I. F. A. y P. (2017). *Agenda Técnica Agrícola de Sinaloa*. INIFAP.
- INIFAP, I. N. de I. F. A. y P., & CENID-RASPA, C. N. de I. D. en R. A.-S.-P.-A.

- (2007). *Programa para calcular las demandas de agua y calendarizar los riegos de los cultivos* (p. 31). INIFAP.
- Izaguirre-Azkutia, A. (2011). EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN CULTIVOS DE CEREAL A PARTIR DE IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN RADAR. En *Universidad Pública de Navarra*.
- Jiménez, J., & González, A. (2020). *Estimacion de las distribuciones del tamaño de particula del suelo a partir de mediciones de hidrometro*.
- Lopez Beltran, M. A., López Meza, M., & Ramirez Tirado, M. A. (2016). Ajuste de un modelo para estimar el contenido de humedad del suelo utilizando TVDI en el Estado de Sinaloa, México. *UGCiencia*, 22(1), 25. <https://doi.org/10.18634/ugcj.22v.1i.505>
- Marcial, M. de J., & Ojeda, W. (2017). *DETERMINACIÓN DE VARIABLES AGRONÓMICAS DEL CULTIVO DE MAÍZ MEDIANTE IMÁGENES OBTENIDAS DESDE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (VANT)*. [http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1750/T\\_075.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1750/T_075.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Martin, E. C., & Munoz, C. (2017). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo? *Extensión cooperativa de la Universidad de Arizona, AZ1220s*, 8. <http://hdl.handle.net/10150/625275>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

- Ojeda-Bustamante, W., & Flores-Velázquez, J. (2015). *Calendarización del riego: Teoría y práctica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., & Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40, 13–25.
- Parrot. (2017). *Sequoia user guide*.
- Quichimbo, P., Guamán, J., Cajamarca, M., & Aguirre, A. J. (2016). Evaluación del contenido de humedad del suelo por gravimetría y reflectometría. *ECUADOR ES CALIDAD: Revista Científica Ecuatoriana*.  
<https://doi.org/10.36331/revista.v4i1.25>
- Radulovich, R. (2009). Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense*, 33(1), 121–124.  
[www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)
- Ramírez-Barraza, B., González-Estrada, A., Valdivia-Alcalá, R., Salas-González, J., & García-Salazar, J. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3), 539–550.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & 1, D. W. D. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *3th Earth Resources Technology Satellite*, 3, 309.
- SAGARPA, S. de A. G. D. rural P. y A. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*. <https://www.gob.mx/agricultura/documentos/planeacion-agricola-nacional-2017-2030?state=published>

NOM-107-SCT3-2019, DIARIO OFICIAL (2019).

<http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/>

SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. *DIARIO OFICIAL*, 73.

SIAP, S. de I. A. y P. (2019). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Cierre de la producción agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Torres-sombra, J. (2015). Uso del agua en el norte de Sinaloa: ¿ a cuál consumidor asignar el recurso? *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI(1), 167–173.

USDA, U. S. D. of A. (2000). *Estimating Soil Moisture Feel Appearance*.

Wanjura, D. F., & Upchurch, D. R. (2000). Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status. *American Society of Agricultural Engineers, ASAE*, 43(4), 867–875.

## 7. Anexos

### 1. Código para transformación de valores digitales a reflectancia

```
"""
OPENING AN IMAGE WITH PYPLOT
"""

import cv2
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os, glob
import math
%matplotlib inline
imagePath = os.path.join('.', 'data', 'Sequoia', '0077')
imageName =
os.path.join(imagePath, 'IMG_180413_080658_0000_NIR.TIF')
# Read raw image DN values
# reads 16 bit tif - this will likely not work for 12 bit
images
imageRaw=plt.imread(imageName)
# Display the image
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8,6))
ax.imshow(imageRaw, cmap='gray')
plt.show()
"""

Adding a colorbar
"""

import micasense.plotutils as plotutils
# Optional: pick a color map that fits your viewing style
# one of 'gray, viridis, plasma, inferno, magma,
nipy_spectral'
plotutils.colormap('viridis')
plotutils.plotwithcolorbar(imageRaw, title='Raw image
values with colorbar');
"""

Reading Sequoia Metadata
"""

import micasense.metadata as metadata
exiftoolPath = None
if os.name == 'nt':
    exiftoolPath = 'C:/exiftool/exiftool.exe'
# get image metadata
meta = metadata.Metadata(imageName,
exiftoolPath=exiftoolPath)
cameraMake = meta.get_item('EXIF:Make')
cameraModel = meta.get_item('EXIF:Model')
```

```

    firmwareVersion = meta.get_item('EXIF:Software')
    bandName = meta.get_item('XMP:BandName')
    print('{0} {1} firmware version: {2}'.format(cameraMake,
                                                cameraModel,
                                                firmwareVersion))
    print('Exposure Time: {0}
seconds'.format(meta.get_item('EXIF:ExposureTime')))
    print('Imager Gain:
{0}'.format(meta.get_item('EXIF:ISO')/100.0))
    print('Size: {0}x{1}
pixels'.format(meta.get_item('EXIF:ImageWidth'),meta.get_it
em('EXIF:ImageHeight')))
    print('Band Name: {0}'.format(bandName))
    print('Center Wavelength: {0}
nm'.format(meta.get_item('XMP:CentralWavelength')))
    print('Bandwidth: {0}
nm'.format(meta.get_item('XMP:WavelengthFWHM')))
    print('Focal Length:
{0}'.format(meta.get_item('EXIF:FocalLength')))
    """
    Converting raw Sequoia images to irradiance
    """
    import micasense.sequoiutils as msutils
    SequoiaIrradiance, V = msutils.sequoia_irradiance(meta,
imageRaw)
    plotutils.plotwithcolorbar(V,'Vignette Factor');
    plotutils.plotwithcolorbar(SequoiaIrradiance,'Sequoia
irradiance image with vignette factor applied');
    """
    Sunshine calibration of Sequoia irradiance image
    """
    # Sunshine sensor Irradiance
    SunIrradiance = msutils.GetSunIrradiance(meta)
    print ('Sunshine sensor irradiance: ', SunIrradiance)

    # Light calibrated sequoia irradiance
    SequoiaIrradianceCalibrated =
SequoiaIrradiance/SunIrradiance
    plotutils.plotwithcolorbar(SequoiaIrradianceCalibrated,'L
ight calibrated Sequoia irradiance image');
    """
    Convert irradiance to reflectance
    """
    markedImg = SequoiaIrradianceCalibrated.copy()
    ulx = 380 # upper left column (x coordinate) of panel
area

```

```

    uly = 290 # upper left row (y coordinate) of panel area
    lrx = 510 # lower right column (x coordinate) of panel
area
    lry = 410 # lower right row (y coordinate) of panel area
    cv2.rectangle(markedImg, (ulx,uly), (lrx,lry), (0,255,0),3)
    # Our panel calibration by band (from MicaSense for our
specific panel)
    panelCalibration = {
        "Green": 0.69,
        "Red": 0.69,
        "Red edge": 0.68,
        "NIR": 0.66
    }

    # Select panel region from radiance image
    panelRegion = SequoiaIrradianceCalibrated[uly:lry,
ulx:lrx]
    plotutils.plotwithcolorbar(markedImg, 'Panel region in
radiance image')
    meanRadiance = panelRegion.mean()
    print('Mean Radiance in panel region: {:.3f}
W/m^2/nm/sr'.format(meanRadiance))
    panelReflectance = panelCalibration[bandName]
    radianceToReflectance = panelReflectance / meanRadiance
    print('Radiance to reflectance conversion factor:
{:.3f}'.format(radianceToReflectance))
    reflectanceImage = SequoiaIrradianceCalibrated *
radianceToReflectance
    plotutils.plotwithcolorbar(reflectanceImage, 'Converted
Reflectane Image');
    """
    verify the reflectance in that region
    """
    panelRegionRaw = imageRaw[uly:lry, ulx:lrx]
    panelRegionRefl = reflectanceImage[uly:lry, ulx:lrx]
    panelRegionReflBlur =
cv2.GaussianBlur(panelRegionRefl, (55,55),5)
    plotutils.plotwithcolorbar(panelRegionReflBlur, 'Smoothed
panel region in reflectance image')
    print('Min Reflectance in panel region:
{:.2f}'.format(panelRegionRefl.min()))
    print('Max Reflectance in panel region:
{:.2f}'.format(panelRegionRefl.max()))
    print('Mean Reflectance in panel region:
{:.2f}'.format(panelRegionRefl.mean()))
    print('Standard deviation in region:
{:.4f}'.format(panelRegionRefl.std()))

```

```
"""
Undistorting images
"""
# correct for lens distortions to make straight lines
straight
undistortedImage =
msutils.correct_lens_distortion_sequoia(meta,
SequoiaIrradianceCalibrated)
plotutils.plotwithcolorbar(undistortedImage, 'Undistorted
image');
```

## 2. Irradiancia de las Muestras de Calibración por Banda en Diferente Altura

22 de marzo de 2021

GREEN									
Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	30.07	9.8863	8.0087	7.8349	8.1567	8.1609	8.1324	8.2645	8.3034
C2A	31.18	7.8794	7.6272	7.6358	7.7851	7.9164	8.0963	8.1968	8.2024
C3A	40.83	7.4389	7.6804	8.1213	8.0392	8.1048	8.2655	8.4448	8.4254
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		8.7618	8.2511	8.5176	8.3894	8.4086	8.9896	8.7722	
		8.3233	8.2019	8.4028	8.3221	8.4340	8.6880	8.4415	
		8.7139	8.4933	8.7498	8.4294	8.4650	8.6650	8.5644	

RED									
Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	30.07	15.4552	12.5809	12.3711	12.6867	12.6997	12.8767	13.2834	12.9726
C2A	31.18	15.4552	11.8332	12.2311	12.3521	12.4896	12.7184	12.5677	12.3522
C3A	40.83	11.8383	11.9941	12.8804	12.2032	12.2812	12.5382	12.8609	12.6649
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		13.5728	12.4940	12.7746	12.2604	12.2472	12.4696	12.1564	
		12.7737	12.1255	12.0993	12.0333	11.8577	12.1252	11.4500	
		13.4580	12.5337	12.3309	12.3023	11.8892	12.0145	12.0375	

RED EDGE									
Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	30.07	4.9332	2.9803	4.0606	4.3246	4.3525	4.7738	4.6407	4.5991
C2A	31.18	4.6790	2.9669	4.1384	4.3454	4.3114	4.7854	4.5926	4.6577
C3A	40.83	4.6343	3.1215	4.3627	4.4783	4.4978	4.9090	4.8045	4.9156
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		4.8487	4.6404	4.8422	4.8859	4.9527	4.9859	4.8177	
		4.7970	4.7317	4.7907	4.9871	4.9328	4.9411	4.8791	
		5.1470	5.0087	4.9916	5.1405	5.0791	5.0940	5.1483	

NIR									
Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	30.07	11.8793	10.6724	10.8165	10.5515	10.4420	10.4582	10.7361	10.7745
C2A	31.18	10.7593	10.3841	10.9648	10.5990	10.5349	10.6284	10.7208	10.5631
C3A	40.83	10.6974	10.8455	11.8376	10.9784	11.0909	11.1747	11.0329	11.3061
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		11.4907	10.5991	10.5216	10.7160	11.2323	13.2171	13.0605	
		11.2503	10.6982	10.7151	10.6007	11.3802	12.8851	12.8986	
		11.8464	11.4170	11.2835	11.1536	11.7418	13.3471	13.5465	

27 de marzo de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	22.30	9.8221	9.7058	8.9991	9.7430	10.2849	8.5659	8.2909	7.6648
C2A	25.62	13.2171	12.7742	11.8982	12.8454	13.8273	10.8465	10.3769	9.9080
C3A	32.91	9.0405	8.3160	7.8475	8.7198	9.7539	7.6126	7.1787	6.7459
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.4559	6.6030	6.0581	7.4497	8.2702	9.1314	9.7780	
		6.7770	8.6062	7.8777	9.4517	10.2874	11.4199	11.8284	
		4.9199	6.0442	5.4334	6.4649	7.2551	7.8332	8.9715	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	22.30	9.8221	9.7058	8.9991	9.7430	10.2849	8.5659	8.2909	7.6648
C2A	25.62	13.2171	12.7742	11.8982	12.8454	13.8273	10.8465	10.3769	9.9080
C3A	32.91	9.0405	8.3160	7.8475	8.7198	9.7539	7.6126	7.1787	6.7459
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.4559	6.60304	6.05808	7.44967	8.27025	9.13140	9.77801	
		6.7770	8.60621	7.87773	9.45172	10.28745	11.41986	11.82843	
		4.9199	6.04416	5.43336	6.46490	7.25510	7.83315	8.97155	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	22.30	5.8474	3.4334	4.3004	5.2945	5.9706	4.8370	5.2524	5.5675
C2A	25.62	7.4441	4.3642	5.3548	6.6882	7.4420	5.9182	6.6205	6.9220
C3A	32.91	5.4534	3.2000	3.9157	4.9178	5.8061	4.4592	5.0295	5.0717
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.0711	5.3618	5.2834	4.4456	4.2026	4.0577	4.2114	
		6.1511	6.6605	6.5384	5.6047	5.1969	4.8827	5.0242	
		4.5037	4.8530	4.7814	4.0909	3.9957	3.6393	3.7121	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	22.30	14.5584	14.6015	13.9129	15.3339	16.3194	13.5257	12.9944	12.0084
C2A	25.62	19.0239	18.2834	17.0094	18.9696	20.4141	15.7645	15.4462	14.4035
C3A	32.91	16.0451	14.4856	13.4430	14.8503	16.5049	12.6936	12.6037	11.4435
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		8.6313	10.6134	9.6799	11.5386	12.8618	14.4916	15.6098	
		9.8430	12.5278	11.7012	13.5808	15.1307	16.7025	17.8298	
		8.0065	9.9585	9.3712	10.6924	12.0205	13.2707	14.4941	

29 de marzo de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.29	7.4658	7.6091	6.5363	5.6276	5.5906	4.5002	5.0367	5.1689
C2A	20.72	9.1391	9.4578	8.1023	6.9570	6.7474	5.4347	6.0852	6.4741
C3A	25.20	6.5021	6.5803	5.7609	5.0037	5.0554	4.0255	4.6659	4.8804
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		7.4919	9.0481	7.6505	8.8856	6.9409	7.0026	8.8692	
		9.1784	10.7875	9.3444	10.7991	8.4176	8.4693	10.5439	
		7.0934	8.1808	7.0716	7.9827	6.2901	6.2568	8.0200	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.29	11.1930	11.3828	9.7022	9.6972	8.1744	6.5678	7.3248	7.4436
C2A	20.72	13.7170	13.7702	11.8372	11.7867	9.7028	7.9446	8.6355	9.0226
C3A	25.20	10.2945	9.9099	8.6199	8.5210	7.3346	5.8715	6.6989	6.9323
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		11.0849	13.0229	10.9249	12.5343	10.0796	9.8874	12.7465	
		13.2943	15.7343	13.5623	15.6051	11.7905	11.9111	15.0646	
		10.2309	11.8817	10.3035	11.8385	8.8780	8.9614	11.3589	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.29	6.0935	4.7218	5.2999	5.9681	5.9481	6.1119	6.0676	6.2897
C2A	20.72	7.4265	5.7878	6.3586	7.1241	7.0927	7.2610	7.2803	7.5770
C3A	25.20	5.6707	4.4460	4.8301	5.5126	5.5041	5.7546	5.7799	5.9233
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		6.5968	6.2411	5.6041	5.2194	5.2512	5.4606	5.0650	
		7.9106	7.3552	6.5593	6.1317	6.0383	6.3531	6.0308	
		6.2163	5.8561	5.3292	4.9141	4.8894	5.0606	4.7321	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.29	13.2274	10.8378	12.0075	11.8836	12.9927	13.7336	13.1295	13.3605
C2A	20.72	15.9598	12.8220	14.0131	13.8628	14.9074	15.6663	15.1193	15.5008
C3A	25.20	13.0765	10.2750	11.2985	11.2370	12.2392	12.7001	12.6388	12.7868
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		14.2605	12.4822	11.3585	9.9843	9.5862	10.2525	10.0152	
		16.5122	14.3651	13.1972	11.6633	10.8931	11.6286	11.1487	
		13.7481	11.9323	10.8992	9.4556	9.3257	9.6710	9.5542	

02 de abril de 2021

## GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.82	7.2788	8.6954	8.6613	7.1948	7.1414	7.4906	8.1820	6.5644
C2A	19.12	6.9422	8.4577	8.5488	7.0605	7.0952	7.4559	8.0973	6.5302
C3A	19.95	7.7347	8.4689	8.5863	7.1348	7.2173	7.4259	8.2931	6.6441
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		7.3556	7.8979	8.1101	7.5110	7.4529	7.0812	6.4750	
		7.2990	7.9098	8.1343	7.5777	7.2448	6.9897	6.4036	
		7.5190	8.0774	8.1704	7.6687	7.5083	7.2152	6.7107	

## RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.82	11.9538	14.5246	14.4708	11.8183	11.6632	12.0179	13.3050	10.7143
C2A	19.12	11.8943	14.2793	14.4875	11.7412	11.8316	12.0486	13.2366	10.6774
C3A	19.95	13.5254	14.5462	14.5888	11.8790	11.9328	12.2249	13.4702	10.7052
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		12.0196	12.9148	13.1608	12.4483	11.7484	11.6393	10.4839	
		11.9453	13.0015	13.2850	12.4661	11.9093	11.5503	10.4539	
		12.1935	13.1604	13.4045	12.6775	11.9487	11.6001	10.6029	

## RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.82	5.9452	4.4260	4.5110	4.2865	4.5813	4.3013	4.9702	4.6895
C2A	19.12	5.6454	4.3431	4.4721	4.2586	4.5792	4.3528	5.0590	4.6976
C3A	19.95	5.5902	4.3140	4.4861	4.2627	4.5873	4.4497	5.0052	4.8067
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		4.8932	4.8709	4.4345	4.4149	4.1169	4.2210	4.1729	
		4.8798	4.8444	4.4522	4.4637	4.0759	4.1982	4.1906	
		4.9744	4.9059	4.4529	4.4004	4.2603	4.1144	4.3358	

## NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.82	22.4665	17.2123	16.5552	16.8631	17.0189	17.3563	19.3455	18.8794
C2A	19.12	22.0104	17.0330	16.6411	16.8319	16.9421	17.4937	19.3450	18.8459
C3A	19.95	23.6125	17.4449	16.7846	16.9773	17.2195	17.6071	19.6233	18.9561
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		19.8947	19.0708	16.3194	14.4116	15.4687	14.8440	14.7211	
		20.0808	19.1247	16.6060	14.5795	15.5262	15.0781	14.8826	
		20.5082	19.4287	16.5884	14.9463	15.8216	15.1902	14.9081	

05 de abril de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	19.35	15.1784	14.6421	14.5793	14.8235	15.4013	14.5152	14.1799	14.5944
C2A	13.89	16.0435	14.2557	14.6658	14.7862	15.5586	14.6581	14.0719	14.5576
C3A	22.95	17.2326	14.7371	15.4560	15.4491	16.4112	15.1084	14.7375	14.9983
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		14.9240	14.2020	14.6930	14.3828	14.0498	14.6709	14.2538	
		14.8014	14.0556	14.8954	14.3531	13.9820	14.7632	14.4145	
		15.2784	14.5878	15.3435	14.6696	14.5295	15.3328	14.7538	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	19.35	22.5192	21.2858	21.6676	22.0032	23.2768	21.3832	21.1066	21.3918
C2A	13.89	23.8686	21.0813	22.1669	22.4276	23.9117	21.5377	20.8922	21.6487
C3A	22.95	26.1361	22.4323	23.7727	23.4972	25.4319	22.4544	22.4939	22.5096
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		21.7638	20.7847	21.5633	21.0084	20.2131	21.7500	20.7927	
		22.0893	20.3415	21.7557	20.9305	20.6051	22.0300	20.6767	
		22.6269	21.0617	22.7509	21.6482	21.7264	22.8435	21.7997	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	19.35	6.6834	3.7736	4.9023	5.8453	6.3445	5.2033	5.8850	5.9204
C2A	13.89	7.2814	3.7546	4.9441	5.8599	6.4168	5.2148	5.9261	5.9337
C3A	22.95	7.6405	3.9047	5.1421	6.0834	6.6604	5.4421	6.1382	6.1087
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		6.0911	5.1562	5.9469	4.8940	4.9950	5.0398	4.9860	
		6.0168	5.0863	5.8308	4.8695	4.9501	5.1516	4.9832	
		6.1908	5.3091	5.9817	4.9255	5.1718	5.2462	5.1111	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	19.35	16.5631	16.6198	16.9830	17.1870	18.3723	16.7745	18.3665	18.1930
C2A	13.89	17.6092	16.4961	17.4598	17.5926	18.9370	16.9956	18.5020	18.3529
C3A	22.95	19.7175	17.5047	18.6896	18.5756	20.2645	17.6198	19.5642	18.8612
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		19.8171	16.6550	18.8547	16.6286	17.2792	17.9422	16.6755	
		19.8301	16.3946	18.9689	16.5948	17.1565	17.8070	16.6633	
		20.6362	16.9646	19.7515	16.9872	17.4950	18.2125	17.7159	

07 de abril de 2021

## GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.06	4.1165	4.5108	4.4926	3.7847	4.0583	4.3626	4.8839	5.5847
C2A	20.15	4.0499	4.5038	4.5095	3.8484	4.0939	4.3866	4.9628	5.6961
C3A	18.84	4.0922	4.4031	4.4734	3.8165	4.0603	4.3978	4.8893	5.7326
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		6.3275	5.1658	4.5820	3.9783	4.1649	5.1284	5.8010	
		6.5237	5.1971	4.6389	4.0655	4.2020	5.2978	5.8966	
		6.3406	5.2276	4.6466	4.0880	4.1772	5.3758	5.7431	

## RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.06	7.4958	8.0525	8.0570	6.7989	7.2471	7.7950	8.7448	10.0903
C2A	20.15	7.4492	8.1575	8.1629	6.9631	7.4005	7.8124	8.8735	10.2628
C3A	18.84	7.7180	8.1241	8.2020	6.8210	7.3465	7.8670	8.8392	10.3317
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		11.3143	9.2217	8.0456	7.0967	7.2352	9.0319	10.0596	
		11.6220	9.2094	8.2821	7.2877	7.2293	9.4984	10.1003	
		11.5807	9.3082	8.2273	7.0878	7.2738	9.3445	10.3116	

## RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.06	4.0029	3.7458	3.3790	3.2913	3.6196	3.8228	3.8585	3.9508
C2A	20.15	4.1552	3.8443	3.4272	3.3690	3.6589	3.8875	3.9319	3.9942
C3A	18.84	4.0824	3.7905	3.3896	3.3334	3.6111	3.8361	3.8836	3.9967
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		3.9380	3.4263	3.4999	3.5359	3.3648	3.4555	3.3864	
		3.9924	3.5034	3.5901	3.6451	3.3908	3.4684	3.4094	
		4.0189	3.5038	3.5826	3.6331	3.4528	3.5262	3.3793	

## NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	18.06	14.4156	13.9949	12.5104	11.7211	12.8266	14.0036	14.7254	14.6998
C2A	20.15	14.9628	14.3367	12.7042	11.9197	13.0458	14.4043	14.9536	15.0172
C3A	18.84	15.0774	14.2599	12.7379	11.8563	13.1464	14.3745	14.8711	14.9702
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		15.0090	11.5723	11.8187	12.2272	12.2529	11.8404	11.3890	
		15.1711	11.6702	12.3253	12.3878	12.3150	11.9466	11.5554	
		15.1394	11.7430	12.1080	12.3897	12.2884	11.9312	11.6040	

10 de abril de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	16.70	13.9982	10.1459	9.7025	9.5885	9.1414	9.2526	9.3272	9.3713
C2A	16.61	10.3645	9.5148	9.1446	9.2725	8.9241	9.1125	9.1348	9.1690
C3A	17.86	9.2634	9.7012	9.0008	9.3268	9.0786	9.1386	9.1348	9.3936
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		9.3535	9.7649	9.4466	9.5171	9.4506	9.6822	9.2526	
		9.2424	9.2500	9.1177	9.2386	9.3328	9.2778	8.9774	
		9.2476	9.6318	9.3471	9.6515	9.5119	9.6506	9.3316	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	16.70	19.9236	15.2850	14.5012	14.4960	13.8415	13.7637	13.8862	13.7266
C2A	16.61	15.6674	14.8545	13.8037	14.0773	13.5268	13.5279	13.8058	13.6301
C3A	17.86	14.4622	15.2703	13.9378	14.4154	13.8527	13.7638	13.9599	13.9534
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		13.7259	14.2814	13.7266	14.0819	13.8670	14.0065	13.4979	
		13.6837	13.9836	13.6085	13.7821	13.5235	13.6232	13.3036	
		13.8719	14.3658	14.0024	14.1422	14.1344	14.1327	13.7557	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	16.70	7.0044	5.3484	5.7922	5.0627	5.6482	5.4923	1.0568	5.8258
C2A	16.61	6.0647	5.1548	5.5772	4.9666	5.6005	5.3820	1.1911	5.8203
C3A	17.86	5.5618	5.1407	5.5191	4.9317	5.5280	5.4739	0.9362	5.7446
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.8509	5.8296	5.5130	5.5056	5.2357	5.3233	4.8427	
		5.8312	5.7263	5.5023	5.3767	5.2490	5.2712	4.7670	
		5.9007	5.8550	5.6675	5.4934	5.3627	5.3471	4.8860	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	16.70	15.1192	12.6776	12.8746	12.0127	14.4613	14.5050	14.5734	14.5282
C2A	16.61	12.4870	12.4741	12.5557	11.9793	14.3278	14.4105	14.3203	14.4180
C3A	17.86	11.9075	13.0333	12.7184	12.1930	14.4347	14.4296	14.5699	14.6623
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		14.5568	15.0328	13.7994	12.9990	11.8663	11.9294	11.8166	
		14.3672	14.9277	13.6636	12.9311	11.6583	11.8026	11.4708	
		14.7200	15.1917	13.8847	13.2171	11.9317	11.8515	11.7470	

14 de abril de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	13.88	14.8804	13.0682	14.4261	15.7585	17.6009	19.0910	18.4367	14.1375
C2A	16.00	14.8784	12.9377	14.3253	15.7408	17.9829	19.9323	19.0407	13.9921
C3A	13.17	15.0395	13.2019	14.8028	16.2789	18.4890	20.5345	20.4493	14.4520
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		14.9397	14.4989	14.3575	14.1574	14.2960	14.6387	14.2959	
		14.8330	14.4057	14.3850	14.2783	14.0468	14.3582	14.2094	
		15.1258	14.8273	14.7083	14.5448	14.5332	14.8015	14.7211	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	13.88	21.3339	19.1871	20.8726	22.7046	24.9552	27.7293	26.0301	20.0194
C2A	16.00	21.8827	19.2356	20.9762	22.7015	25.4135	29.0777	27.0479	20.2112
C3A	13.17	19.8053	19.9801	21.7288	23.5602	26.5880	29.8654	28.7139	20.7655
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		21.2474	20.9496	20.5719	20.3927	20.1370	20.2602	20.2679	
		21.2511	20.7071	20.4840	20.2515	19.8069	20.2868	19.9698	
		21.7914	21.1540	21.0456	20.6536	20.6865	21.0631	20.7085	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	13.88	6.5851	5.7971	4.6073	5.1523	6.2344	7.5506	6.5545	5.8807
C2A	16.00	6.8052	5.8184	4.6330	5.1724	6.3407	7.7671	6.7882	5.7267
C3A	13.17	6.7994	5.9276	4.7666	5.3011	6.5667	8.0024	7.1921	5.9180
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		6.0480	5.3276	4.9612	4.7229	4.7451	4.9073	5.1949	
		5.9912	5.2478	4.9506	4.7586	4.6953	4.9708	5.1179	
		6.1019	5.4497	5.0144	4.8923	4.8542	4.9792	5.3399	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	13.88	15.9305	14.8124	15.9192	17.0619	18.3068	20.1754	18.9187	15.5308
C2A	16.00	16.1195	14.8223	15.9507	17.1296	18.4377	21.1343	19.3017	15.5408
C3A	13.17	17.4384	15.4980	16.6637	17.7809	19.4180	21.9843	20.5840	15.8860
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		16.2921	15.9253	15.9436	15.9366	15.8518	15.9573	16.2394	
		16.1268	15.9089	15.9995	15.5490	15.6313	15.6218	15.7089	
		16.5750	16.3015	16.0792	16.1545	16.0218	16.1933	16.0637	

17 de abril de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	13.38	14.4858	11.4443	11.3206	11.4023	11.3878	11.8246	11.7867	11.6267
C2A	13.20	12.2573	11.0102	10.9657	11.1924	11.1171	11.5165	11.4004	11.4705
C3A	10.97	11.0904	10.8384	10.6283	10.8760	11.0332	11.4083	11.2513	11.3196
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		11.1497	11.3834	11.4863	9.0967	11.3365	11.2070	11.1249	
		10.8988	11.2035	11.3825	8.2099	11.2292	11.1106	11.0883	
		10.9937	10.9283	11.2523	8.0369	11.2085	11.2936	11.1355	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	13.38	21.0454	17.5410	16.9632	17.0216	17.0434	17.5896	17.0755	16.9781
C2A	13.20	18.4069	17.3151	16.7228	16.8816	16.7029	17.2720	16.7915	17.0135
C3A	10.97	17.3189	17.4585	16.4664	16.5664	16.4213	16.9413	16.5787	16.8079
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		16.1828	16.2517	16.5784	7.6642	16.3428	16.4897	16.2042	
		16.1293	16.1253	16.4216	8.4707	16.1888	16.2542	15.9378	
		15.8245	16.5117	16.5030	14.3404	16.4741	16.3454	16.2275	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	13.38	6.7396	5.0651	5.5364	5.5469	4.8947	5.5552	5.6494	5.6235
C2A	13.20	6.1865	4.9193	5.4522	5.5204	4.8529	5.4659	5.5905	5.6147
C3A	10.97	5.6550	4.7307	5.2821	5.3204	4.7597	5.3282	5.4822	5.4654
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.3963	5.3944	5.0648	6.5514	5.0962	5.0056	5.0730	
		5.4124	5.4041	5.0123	5.9224	5.0566	5.1248	5.0463	
		5.3419	5.2833	4.9223	5.7100	5.0411	5.0675	5.0916	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	13.38	20.6936	14.9067	16.8398	15.7285	16.8224	17.1842	17.3531	17.1427
C2A	13.20	18.6785	14.9248	16.7225	15.5744	16.5812	17.1810	17.0764	16.9536
C3A	10.97	17.9254	15.2614	16.4633	15.3972	16.3013	16.7683	16.4941	16.5185
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		17.3697	17.9015	14.5676	14.4252	14.4613	14.5666	16.0620	
		17.2985	17.8882	14.3597	14.3549	14.6205	14.6577	15.9217	
		16.9528	17.5777	14.2940	14.3206	14.3875	14.4749	15.5587	

19 de abril de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	11.28	14.8650	13.8477	12.7272	12.7938	12.9222	12.9979	12.7855	12.6803
C2A	11.45	12.6730	12.7034	12.1620	12.4282	12.5689	12.6321	12.5100	12.3811
C3A	14.49	12.1261	12.3456	12.3120	12.4797	12.7346	12.7779	12.7637	12.6233
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		12.6486	12.4152	12.4898	12.2219	12.8399	12.5304	12.2724	
		12.4343	12.3237	12.3631	12.0203	12.4799	12.3071	12.1727	
		12.6453	12.6761	12.6054	12.2404	12.8152	12.4235	12.4331	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	11.28	21.5304	20.0931	18.9143	18.9597	18.8605	18.8224	18.3350	18.3455
C2A	11.45	18.9094	18.9279	18.3081	18.5934	18.4072	18.3868	18.1823	18.2126
C3A	14.49	18.8046	18.6762	18.8460	18.9268	18.8372	18.7493	18.7067	18.5111
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		18.1879	18.1618	17.8301	17.2921	18.1328	17.0838	16.9487	
		17.8292	17.8669	17.7204	17.0329	17.5598	16.8368	16.6676	
		18.3885	18.4902	18.0892	17.4940	18.2327	17.0068	17.1974	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	11.28	7.5706	5.4687	5.3674	5.0007	5.8387	5.8167	5.8937	5.8669
C2A	11.45	6.8999	5.2158	5.1930	4.8728	5.7029	5.6631	5.7866	5.7418
C3A	14.49	6.5600	5.0540	5.2003	4.8968	5.7488	5.7308	5.9213	5.8112
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.9847	5.8945	6.1547	6.0376	5.3887	5.4894	5.0982	
		5.8904	5.7682	5.9922	5.8861	5.3035	5.3683	5.0238	
		5.9854	5.8243	6.1415	6.0029	5.3930	5.3663	5.0631	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	11.28	16.3894	15.8273	15.0438	15.0142	15.0536	14.9551	14.9364	14.9560
C2A	11.45	14.8177	15.0215	14.8399	14.8920	14.6313	14.6534	14.8805	14.6673
C3A	14.49	15.1630	14.8987	15.1868	15.1496	14.9662	14.7225	15.1227	15.0573
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		17.1582	17.3076	17.1285	16.8444	14.7596	15.1126	14.9613	
		16.8955	16.9650	16.7194	16.3773	14.2062	14.2482	14.7122	
		17.0961	17.2165	17.1370	16.9186	14.4990	14.6270	14.7762	

21 de abril de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	8.70	13.5649	11.8559	12.4572	12.0862	11.6942	11.5871	11.3376	11.6092
C2A	13.53	11.3553	11.0236	11.5727	11.5317	11.3220	11.1371	10.9199	11.1929
C3A	8.49	10.8790	11.1478	11.7238	11.6115	11.5209	11.5498	11.4101	11.4945
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		11.5620	11.5430	11.5670	11.3283	11.2534	11.0610	10.8928	
		11.2684	11.2949	11.1715	11.0672	10.9487	10.8834	10.9611	
		11.6641	11.4735	11.6084	11.4452	11.5056	11.1410	11.5122	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	8.70	19.7326	17.5937	18.3067	17.7285	17.2318	17.0706	16.3018	16.9290
C2A	13.53	16.8867	16.8206	17.1350	16.9953	16.6855	16.7097	15.9460	16.4036
C3A	8.49	16.7771	17.2936	17.5057	17.4750	17.0978	17.6197	16.7308	16.9248
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		17.0687	16.7316	16.7142	16.6580	16.4137	15.8667	16.2946	
		16.6575	16.3048	16.4107	16.2708	16.1991	15.5388	15.7964	
		17.1240	16.5575	16.8681	16.8087	16.7505	16.2336	16.7890	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	8.70	6.4973	5.8792	5.2722	4.7773	5.1099	5.5051	5.3443	5.4141
C2A	13.53	5.8732	4.7362	4.9921	4.6028	4.9846	5.3113	5.1755	5.1910
C3A	8.49	5.6014	4.6620	4.9734	4.6004	5.0365	5.4163	5.3328	5.2820
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.4170	5.2062	4.6773	4.6512	4.6383	4.6161	4.6159	
		5.2721	5.0121	4.5308	4.4926	4.5530	4.4216	4.4006	
		5.3155	5.1325	4.7411	4.6414	4.6347	4.5117	4.5491	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	8.70	17.6841	14.3991	14.8343	14.4968	14.1676	15.7165	14.9312	16.4511
C2A	13.53	15.6698	13.9389	14.2901	14.0002	13.7927	15.4176	14.6597	16.1042
C3A	8.49	15.5901	14.3130	14.2893	14.3353	13.9024	15.6753	14.8587	16.2264
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		16.6792	16.3243	14.0383	14.0610	13.9765	13.6765	14.6295	
		16.3858	15.7207	13.7314	13.4775	13.8643	13.2216	13.8716	
		16.4112	15.9693	14.1484	14.0275	14.1797	13.3876	13.9311	

24 de abril de 2021

## GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	10.14	17.1022	15.6635	15.7156	15.1618	15.6348	15.4949	15.5942	15.5103
C2A	8.06	14.4944	14.5261	14.7359	14.4019	15.0489	14.7692	15.0295	14.8597
C3A	8.86	14.7300	14.6726	15.1851	14.8669	15.6536	15.2415	15.2976	15.3229
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		15.6621	15.6878	15.2460	15.5908	15.1788	15.5314	15.2194	
		14.8042	14.9502	14.6193	14.8416	14.3769	14.4558	14.7979	
		15.4105	15.3227	15.0168	15.3094	15.2645	15.1185	14.9531	

## RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	10.14	23.0909	22.1481	22.3229	21.6065	22.5300	22.0821	22.1859	22.1361
C2A	8.06	20.6331	20.8143	21.3386	20.6386	21.9743	21.0299	21.4224	21.1205
C3A	8.86	21.5607	21.2143	21.8660	21.4963	22.9251	21.9534	22.0934	22.1557
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		22.3421	22.4299	21.7545	21.7141	21.8546	21.9424	21.8540	
		21.1912	21.2191	20.8016	21.0317	21.0346	20.7523	20.8784	
		22.1043	22.3487	21.8300	21.2868	21.4558	21.4602	21.9712	

## RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	10.14	6.3774	5.8380	5.1930	5.2470	5.7901	5.5543	6.3920	6.3653
C2A	8.06	6.3798	5.7112	5.0295	5.1314	5.6292	5.3512	6.2112	6.1706
C3A	8.86	6.7319	5.7211	5.0742	5.2220	5.7872	5.4482	6.2981	6.2977
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.9906	6.3898	6.1194	5.3799	5.5078	5.0970	5.6496	
		5.7825	6.0952	5.8550	5.2486	5.3044	4.9024	5.4628	
		5.8283	6.3167	5.9970	5.2853	5.4618	4.9845	5.6641	

## NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	10.14	16.7211	16.7599	16.9117	16.4738	17.3685	16.8120	17.1431	16.9284
C2A	8.06	15.6037	15.8671	16.3922	16.1564	17.0439	16.5050	16.8870	16.6125
C3A	8.86	16.1519	16.2671	16.6682	16.6946	17.7742	16.7857	17.1574	16.8715
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		16.9215	17.1081	16.8506	17.0093	17.0239	16.8567	17.1656	
		16.4706	17.0067	16.5463	16.5690	16.6701	16.6206	16.5807	
		16.5519	17.0011	16.4960	16.7621	16.9393	16.9292	17.1555	

26 de abril de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	10.11	9.0836	3.9220	3.9458	3.9255	3.8430	3.8670	3.9824	4.0800
C2A	7.80	8.6828	3.8358	3.7930	3.8391	3.7523	3.7780	3.8535	3.9929
C3A	6.77	8.9601	4.0960	3.9300	3.9211	3.8138	3.8314	3.9936	4.0827
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		8.5512	7.1710	5.7818	8.7558	6.4190	7.7432	6.9513	
		8.3049	7.0074	5.6507	8.5532	6.2068	7.3686	6.8604	
		8.6264	7.2520	5.7941	8.7513	6.4768	7.6689	7.0018	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	10.11	17.8135	5.7035	5.6149	5.5607	5.4951	5.5869	5.6129	5.7454
C2A	7.80	17.3515	5.6677	5.5308	5.4237	5.3526	5.4491	5.5409	5.6687
C3A	6.77	17.8857	6.1454	5.7300	5.6217	5.4932	5.6033	5.6761	5.7963
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		12.0946	10.3104	8.2688	12.6225	9.1897	10.9694	10.0130	
		11.9175	10.0151	8.2106	12.1734	9.0173	10.8580	9.7378	
		12.2321	10.2632	8.5016	12.4770	9.1306	10.8259	10.2431	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	10.11	3.7385	2.6273	2.5794	2.5036	2.3903	2.5786	2.6252	2.6331
C2A	7.80	3.6796	2.5672	2.5090	2.4278	2.3160	2.5072	2.5473	2.5492
C3A	6.77	3.7583	2.6563	2.5650	2.4827	2.3564	2.5565	2.5944	2.5982
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		2.7035	2.6521	2.8504	2.4807	2.6077	2.6312	2.6995	
		2.6332	2.5962	2.7602	2.3594	2.5801	2.5966	2.6182	
		2.6905	2.6908	2.8180	2.3929	2.6236	2.6550	2.7112	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	10.11	3.7385	2.6273	2.5794	2.5036	2.3903	2.5786	2.6252	2.6331
C2A	7.80	3.6796	2.5672	2.5090	2.4278	2.3160	2.5072	2.5473	2.5492
C3A	6.77	3.7583	2.6563	2.5650	2.4827	2.3564	2.5565	2.5944	2.5982
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		2.7035	2.6521	2.8504	2.4807	2.6077	2.6312	2.6995	
		2.6332	2.5962	2.7602	2.3594	2.5801	2.5966	2.6182	
		2.6905	2.6908	2.8180	2.3929	2.6236	2.6550	2.7112	

29 de abril de 2021

GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	7.24	17.5701	16.9700	15.5672	16.5974	15.5722	15.9783	16.0701	16.6924
C2A	7.77	16.1417	15.9498	14.8036	15.7903	15.0313	15.3613	15.4560	16.0963
C3A	7.41	15.5931	15.9483	14.9904	15.8935	15.4113	15.6110	15.6251	16.2566
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		16.6810	16.1777	16.4137	15.5748	15.2776	15.4102	15.1835	
		15.9162	15.6148	15.7003	15.0464	14.7573	14.9159	15.0423	
		16.0468	16.0875	16.2226	15.2026	15.2515	15.1739	15.3400	

RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	7.24	24.6450	24.3295	22.1118	23.7373	22.3919	22.5925	23.0110	23.2958
C2A	7.77	23.2982	23.1334	21.3730	22.8225	21.8284	22.0325	21.9195	22.6262
C3A	7.41	23.3266	23.4563	21.9075	23.1272	22.4918	22.3230	22.4005	22.7504
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		23.0588	22.8256	22.7918	21.7470	21.1845	21.7106	21.3031	
		22.2654	21.9816	22.1662	20.8307	20.8162	21.0026	20.7232	
		22.6852	22.3664	22.4361	21.2393	21.2257	21.6317	21.2210	

RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	7.24	7.5975	6.1497	5.6613	5.4451	6.0718	5.4321	5.8334	5.6044
C2A	7.77	7.2813	5.8171	5.4380	5.1712	5.8370	5.2261	5.6335	5.3784
C3A	7.41	7.0048	5.8061	5.5255	5.2592	5.9822	5.3279	5.6997	5.5139
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		5.5728	5.4754	5.4489	5.3196	5.2630	5.2116	5.2392	
		5.3795	5.2859	5.2208	5.1459	5.1062	5.0695	5.0640	
		5.4409	5.4026	5.4082	5.2608	5.1650	5.1380	5.1555	

NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	7.24	9.3261	6.2645	5.5539	6.0786	6.3780	6.8600	7.0700	7.2627
C2A	7.77	8.1847	5.8212	5.2209	5.7690	6.0895	6.5538	6.8059	6.9590
C3A	7.41	7.6824	5.8507	5.1587	5.7815	6.0941	6.6540	6.8875	6.9844
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		7.3783	7.2942	6.9831	6.4690	6.3286	6.5869	6.7115	
		7.0582	6.9727	6.6399	6.1722	6.1250	6.3883	6.3540	
		7.1578	7.0998	6.7608	6.2085	6.2324	6.3793	6.4872	

01 de mayo de 2021

## GREEN

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	5.81	18.2547	15.1214	15.0847	14.6092	14.4502	14.1809	14.3154	14.7327
C2A	6.48	14.6820	13.8785	13.9829	13.7738	13.6663	13.5599	13.7455	14.1564
C3A	10.92	13.5919	14.0615	13.8642	13.7252	13.6505	13.7145	13.8251	14.1585
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		14.4650	14.0321	14.5783	14.2467	13.6385	13.6914	13.7541	
		13.8266	13.7974	13.8703	13.5729	13.2455	13.2386	13.3282	
		13.9882	13.9240	14.1495	13.7277	13.7537	13.2237	13.4265	

## RED

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	5.81	25.6798	22.0574	21.8877	21.1262	20.4800	20.6181	20.6986	20.9467
C2A	6.48	21.3929	20.8672	20.5164	20.1025	19.6664	19.8333	20.0198	20.2083
C3A	10.92	20.5536	21.6205	20.6517	20.3162	19.7179	20.3201	20.4484	20.3084
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		20.6783	20.8044	20.5478	19.7391	19.1270	19.7715	19.5863	
		20.0115	20.4405	20.1640	19.3696	18.5683	19.3662	19.3674	
		20.3724	20.7060	20.0788	19.3571	20.1861	19.0795	19.5807	

## RED EDGE

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	5.81	9.3261	6.2645	5.5539	6.0786	6.3780	6.8600	7.0700	7.2627
C2A	6.48	8.1847	5.8212	5.2209	5.7690	6.0895	6.5538	6.8059	6.9590
C3A	10.92	7.6824	5.8507	5.1587	5.7815	6.0941	6.6540	6.8875	6.9844
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		7.3783	7.2942	6.9831	6.4690	6.3286	6.5869	6.7115	
		7.0582	6.9727	6.6399	6.1722	6.1250	6.3883	6.3540	
		7.1578	7.0998	6.7608	6.2085	6.2324	6.3793	6.4872	

## NIR

Muestra	Hum %	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m
C1A	5.81	21.1305	17.6695	17.4947	17.0462	16.7472	16.9474	17.0527	17.2344
C2A	6.48	18.2411	16.9042	16.5142	16.3431	16.0255	16.2846	16.5643	16.5950
C3A	10.92	17.9323	17.7518	16.7097	16.6315	15.9938	16.6615	16.7547	16.6123
		90 m	100 m	110 m	120 m	130 m	140 m	150 m	
		18.5591	20.2190	16.8309	16.9690	17.3446	16.6325	16.6679	
		17.8073	19.7084	16.2257	16.3963	16.3160	16.1403	16.1734	
		18.0321	19.9720	16.4879	16.6526	17.3933	16.6490	16.5689	

### 3. Correlación de Valores de Irradiancia y Contenido de Humedad de la Muestra de Calibración a 0 cm de Profundidad

22 de marzo de 2021					27 de marzo de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir	Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.5017	0.9912	0.4710	0.3797	10	0.1443	0.1443	0.1521	0.0144
20	0.2201	0.1600	0.9707	0.5248	20	0.2488	0.2488	0.1540	0.0563
30	0.7583	0.9126	0.9756	0.9983	30	0.2233	0.2233	0.2082	0.1076
40	0.0133	0.6357	0.9990	0.9999	40	0.1917	0.1917	0.1634	0.0991
50	0.0430	0.8247	0.9096	0.9985	50	0.1068	0.1068	0.0897	0.0295
60	0.9139	0.8537	0.9997	0.9818	60	0.2329	0.2329	0.2010	0.2114
70	0.8752	0.0386	0.9058	0.9813	70	0.2842	0.2842	0.1127	0.1111
80	0.7152	0.0079	0.9935	0.8668	80	0.2291	0.2291	0.2088	0.1470
90	0.1049	0.0854	0.9475	0.7649	90	0.2273	0.2273	0.2809	0.2766
100	0.9377	0.2451	0.9787	0.9997	100	0.1675	0.1675	0.2208	0.1975
110	0.8302	0.0728	0.8866	0.9768	110	0.1981	0.1981	0.2246	0.1081
120	0.5222	0.2958	0.9058	0.9167	120	0.2662	0.2662	0.1804	0.2312
130	0.8672	0.2685	0.9524	0.9635	130	0.2712	0.2712	0.1338	0.2110
140	0.3962	0.5674	0.8603	0.4211	140	0.2987	0.2987	0.2730	0.2924
150	0.0570	0.0722	0.9933	0.8911	150	0.2215	0.2215	0.3181	0.2709
prom	0.5171	0.4021	0.9166	0.8443	prom	0.2208	0.2208	0.1948	0.1576
devP	0.3410	0.3454	0.1267	0.2124	devP	0.0509	0.0509	0.0616	0.0878
CV	0.6594	0.8590	0.1383	0.2515	CV	0.2304	0.2304	0.3162	0.5574
CV%	65.9419	85.8992	13.8255	25.1536	CV%	23.0397	23.0397	31.6201	55.7362

29 de marzo de 2021					31 de marzo de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir	Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.2644	0.1712	0.1541	0.0464	10	0.1404	0.0200	0.0246	0.1818
20	0.2565	0.2806	0.1284	0.1393	20	0.1662	0.4053	0.2539	0.9326
30	0.2312	0.2362	0.2094	0.1701	30	0.1330	0.2598	0.1275	0.7492
40	0.2203	0.2591	0.1878	0.1583	40	0.1556	0.2840	0.0926	0.6678
50	0.2175	0.2537	0.1852	0.1876	50	0.1198	0.2313	0.1569	0.5693
60	0.2366	0.2356	0.1513	0.2477	60	0.2904	0.2644	0.2469	0.5587
70	0.1702	0.2238	0.1190	0.1231	70	0.1770	0.2887	0.3781	0.7046
80	0.1120	0.1570	0.1397	0.1324	80	0.1671	0.2711	0.0864	0.5288
90	0.1186	0.1846	0.1419	0.1148	90	0.1531	0.1752	0.0814	0.4184
100	0.2327	0.1995	0.1666	0.1430	100	0.1048	0.0380	0.1665	0.4361
110	0.1649	0.1183	0.1411	0.1244	110	0.0006	0.1593	0.1231	0.2111
120	0.2214	0.1144	0.1618	0.1531	120	0.0256	0.1419	0.1924	0.5438
130	0.2081	0.3128	0.2162	0.1027	130	0.1766	0.1334	0.0277	0.1603
140	0.2368	0.2153	0.2113	0.2002	140	0.1262	0.1670	0.1054	0.1733
150	0.2362	0.2734	0.1662	0.1934	150	0.1939	0.0240	0.0724	0.3747
prom	0.2085	0.2157	0.1653	0.1491	prom	0.1420	0.1909	0.1424	0.4807
devP	0.0448	0.0563	0.0296	0.0461	devP	0.0655	0.1066	0.0914	0.2248
CV	0.2147	0.2611	0.1793	0.3092	CV	0.4615	0.5583	0.6422	0.4677
CV%	21.4651	26.1122	17.9292	30.9248	CV%	46.1544	55.8334	64.2227	46.7662

02 de abril de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.5835	0.9145	0.6457	0.7317
20	0.4609	0.1063	0.7448	0.5718
30	0.1931	0.9823	0.1701	0.9868
40	0.0409	0.4288	0.3671	0.7949
50	0.6350	0.8470	0.7547	0.7393
60	0.9125	0.9840	0.9930	0.9044
70	0.5746	0.7236	0.0204	0.9308
80	0.7168	0.0004	0.9595	0.7129
90	0.7574	0.7174	0.8512	0.9987
100	0.9585	0.9918	0.5762	0.9845
110	0.9787	0.9289	0.5351	0.4482
120	0.9713	0.9625	0.2133	0.9977
130	0.1968	0.6852	0.7884	0.9875
140	0.6044	0.0378	0.9964	0.8032
150	0.7796	0.8058	0.9729	0.6276
prom	0.6243	0.6744	0.6393	0.8147
devP	0.2865	0.3455	0.3089	0.1691
CV	0.4590	0.5123	0.4833	0.2076
CV%	45.8989	51.2322	48.3280	20.7587

05 de abril de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.2261	0.2735	0.0669	0.3159
20	0.9535	0.7689	0.7479	0.7447
30	0.5533	0.4144	0.4792	0.3703
40	0.6884	0.3654	0.5878	0.3570
50	0.4978	0.3544	0.4231	0.3504
60	0.4106	0.5092	0.5994	0.3890
70	0.7780	0.7542	0.4910	0.5394
80	0.7114	0.4221	0.5795	0.4122
90	0.8537	0.2694	0.9593	0.6277
100	0.8672	0.9998	0.8946	0.9719
110	0.3372	0.4915	0.9670	0.5258
120	0.7202	0.7328	0.9635	0.7137
130	0.7457	0.3916	0.8110	0.9256
140	0.5139	0.3948	0.1220	0.9076
150	0.3264	0.7283	0.6590	0.6507
prom	0.6122	0.5247	0.6234	0.5868
devP	0.2138	0.2104	0.2727	0.2187
CV	0.3492	0.4010	0.4374	0.3727
CV%	34.9229	40.1006	43.7420	37.2665

07 de abril de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.9999	0.0917	0.9714	0.4544
20	0.0074	0.8816	0.9917	0.8090
30	0.3497	0.3554	0.9715	0.4794
40	0.9799	0.9366	0.9630	0.8822
50	0.8956	0.9045	0.7300	0.3093
60	0.3039	0.0080	0.9669	0.6798
70	0.9024	0.8422	0.9987	0.9109
80	0.3789	0.3392	0.5676	0.7438
90	0.9016	0.7318	0.2961	0.7845
100	0.1417	0.0658	0.6115	0.2000
110	0.5072	0.8148	0.6876	0.9496
120	0.4213	0.8350	0.7103	0.6060
130	0.9978	0.0695	0.0215	0.9495
140	0.3086	0.8896	0.0007	0.7416
150	0.5234	0.0000	0.6766	0.4008
prom	0.5746	0.5177	0.6777	0.6601
devP	0.3281	0.3749	0.3260	0.2326
CV	0.5709	0.7242	0.4811	0.3523
CV%	57.0918	72.4191	48.1072	35.2347

10 de abril de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.3976	0.3855	0.5234	0.3455
20	0.0275	0.2810	0.2462	0.9113
30	0.3695	0.0743	0.3775	0.0060
40	0.0856	0.1564	0.4330	0.9935
50	0.0897	0.3369	0.7945	0.1512
60	0.0778	0.3088	0.1754	0.0692
70	0.1956	0.7842	0.7793	0.2973
80	0.3947	0.9481	0.9843	0.8471
90	0.1636	0.9777	0.9547	0.7689
100	0.1095	0.5155	0.4908	0.8879
110	0.0815	0.9475	0.9999	0.6911
120	0.6269	0.4605	0.2326	0.9734
130	0.6450	0.7444	0.9744	0.5347
140	0.2456	0.5436	0.6148	0.0044
150	0.5177	0.8643	0.6686	0.1498
prom	0.2685	0.5552	0.6166	0.5088
devP	0.2020	0.2926	0.2805	0.3653
CV	0.7523	0.5269	0.4548	0.7180
CV%	75.2281	52.6914	45.4834	71.7971

14 de abril de 2021

Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.4919	0.7298	0.0895	0.3673
20	0.9195	0.4266	0.3315	0.4683
30	0.6786	0.3713	0.3338	0.4436
40	0.5098	0.4841	0.3583	0.3964
50	0.1009	0.2222	0.1875	0.3744
60	0.0216	0.0085	0.0694	0.0427
70	0.2048	0.1385	0.1486	0.2688
80	0.7786	0.2437	0.9967	0.4563
90	0.8216	0.4752	0.9313	0.8254
100	0.6881	0.9473	0.8473	0.5178
110	0.4107	0.6256	0.6355	0.1136
120	0.1942	0.8100	0.2867	0.9856
130	0.9306	0.8309	0.7757	0.9580
140	0.9835	0.4518	0.0298	0.9677
150	0.6377	0.8542	0.8060	0.7053
prom	0.5581	0.5080	0.4552	0.5261
devP	0.3043	0.2756	0.3295	0.2904
CV	0.5451	0.5425	0.7240	0.5519
CV%	54.5125	54.2462	72.3991	55.1928

17 de abril de 2021

Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.6460	0.5904	0.7948	0.5691
20	0.5814	0.0080	0.8590	0.9996
30	0.7922	0.8186	0.9310	0.9414
40	0.8873	0.9435	0.9982	0.8348
50	0.5315	0.7588	0.9425	0.8368
60	0.5563	0.8132	0.8912	0.9966
70	0.5761	0.7345	0.9184	0.9358
80	0.7959	0.9495	0.9998	0.9458
90	0.0412	0.9945	0.9214	0.9909
100	0.8898	0.8543	0.9812	0.9992
110	0.8530	0.0019	0.9083	0.5350
120	0.4559	0.9979	0.5481	0.6290
130	0.4547	0.6485	0.5793	0.4884
140	0.6628	0.0372	0.0076	0.6938
150	0.3882	0.2567	0.5932	0.9571
prom	0.6075	0.6272	0.7916	0.8236
devP	0.2187	0.3549	0.2561	0.1816
CV	0.3601	0.5659	0.3235	0.2204
CV%	36.0056	56.5895	32.3472	22.0449

19 de abril de 2021

Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.4747	0.3228	0.6205	0.1239
20	0.5149	0.4523	0.6783	0.4074
30	0.0937	0.1334	0.2584	0.6132
40	0.1811	0.1485	0.1468	0.7349
50	0.0068	0.1748	0.0526	0.0762
60	0.0265	0.0988	0.0131	0.1176
70	0.1558	0.8928	0.3878	0.9295
80	0.0854	0.7641	0.0003	0.4444
90	0.1998	0.5532	0.2161	0.0607
100	0.9129	0.7364	0.0123	0.0465
110	0.6841	0.8885	0.1546	0.2254
120	0.2759	0.6415	0.0646	0.3221
130	0.1630	0.3328	0.2464	0.0002
140	0.0005	0.0276	0.3041	0.0138
150	0.8217	0.6759	0.0002	0.0993
prom	0.3065	0.4562	0.2104	0.2810
devP	0.2915	0.2904	0.2083	0.2786
CV	0.9513	0.6366	0.9899	0.9915
CV%	95.1283	63.6621	98.9869	99.1544

21 de abril de 2021

Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.0993	0.1930	0.0346	0.1922
20	0.3435	0.8252	0.1761	0.9553
30	0.3642	0.5168	0.1749	0.2183
40	0.3386	0.8601	0.2098	0.8755
50	0.7531	0.9269	0.6260	0.4907
60	0.9878	0.6753	0.7607	0.9735
70	0.9898	0.7345	0.9906	0.9143
80	0.9091	0.9982	0.6186	0.5566
90	0.9545	0.9947	0.4983	0.2872
100	0.9061	0.8079	0.8324	0.6229
110	0.9975	0.9122	0.9318	0.9518
120	0.9285	0.9440	0.9918	0.9924
130	0.8237	0.6674	0.9946	0.6313
140	0.9278	0.7532	0.6792	0.5706
150	0.1963	0.7824	0.8863	0.2805
prom	0.7013	0.7728	0.6270	0.6342
devP	0.3176	0.2014	0.3238	0.2862
CV	0.4529	0.2606	0.5164	0.4513
CV%	45.2929	26.0608	51.6386	45.1286

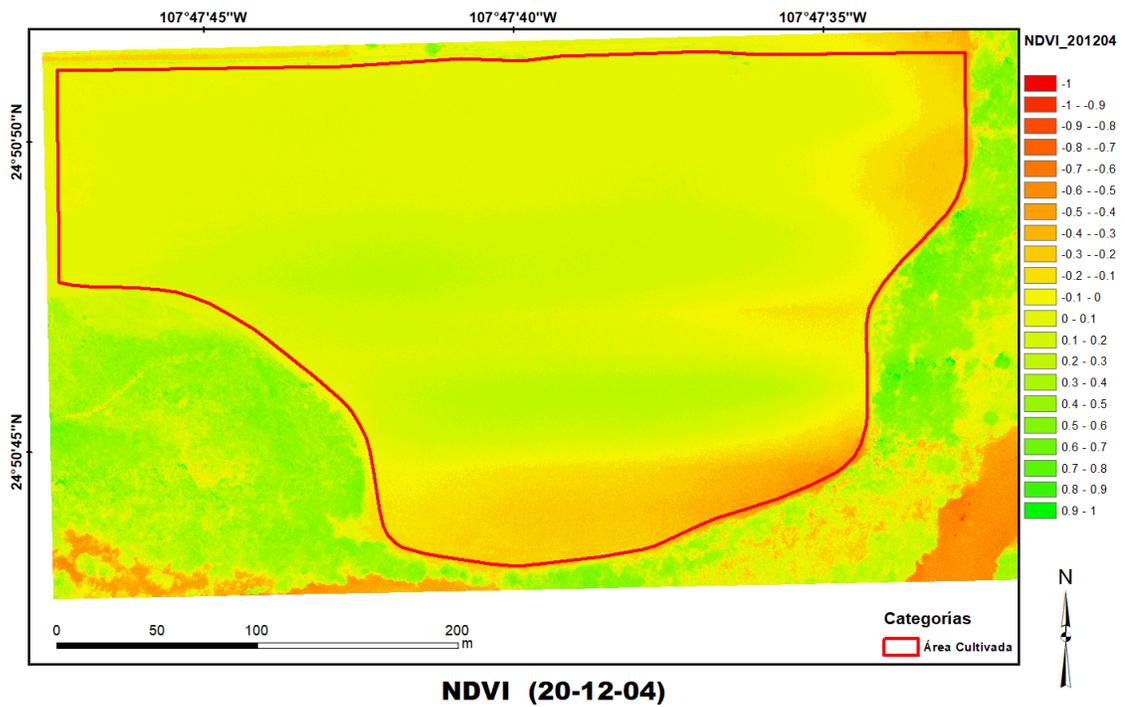
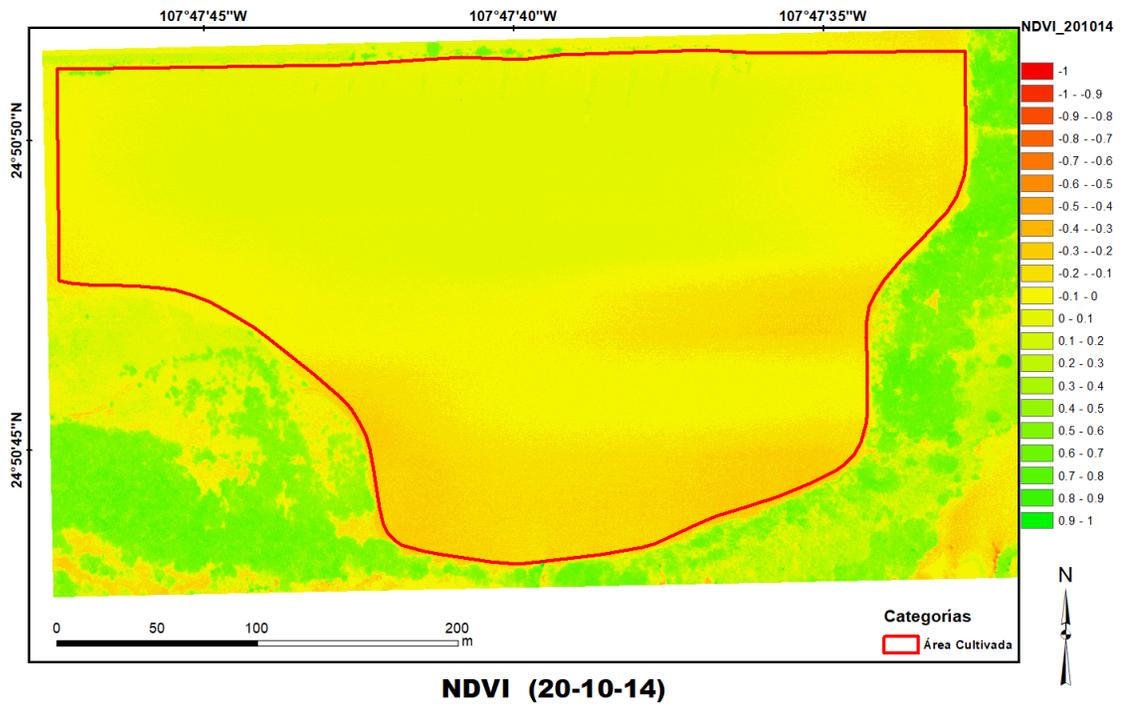
24 de abril de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.9072	0.9999	0.0190	0.9853
20	0.9275	0.9910	0.9005	0.9948
30	0.9929	0.9702	0.9848	0.9719
40	0.9336	0.7253	0.8112	0.2254
50	0.6015	0.2202	0.6433	0.1034
60	0.9100	0.7326	0.9888	0.7011
70	0.9894	0.7315	0.9880	0.5819
80	0.8677	0.6120	0.9085	0.7817
90	0.8715	0.8038	0.9679	0.9518
100	0.9811	0.6850	0.8370	0.8201
110	0.9203	0.5634	0.9696	0.7506
120	0.9263	0.9998	0.9864	0.9962
130	0.5419	0.9782	0.8198	0.8301
140	0.9311	0.9429	0.9982	0.4036
150	0.9996	0.5317	0.5646	0.6426
prom	0.8868	0.7658	0.8258	0.7160
devP	0.1301	0.2172	0.2503	0.2728
CV	0.1467	0.2836	0.3031	0.3810
CV%	14.6674	28.3585	30.3100	38.1008

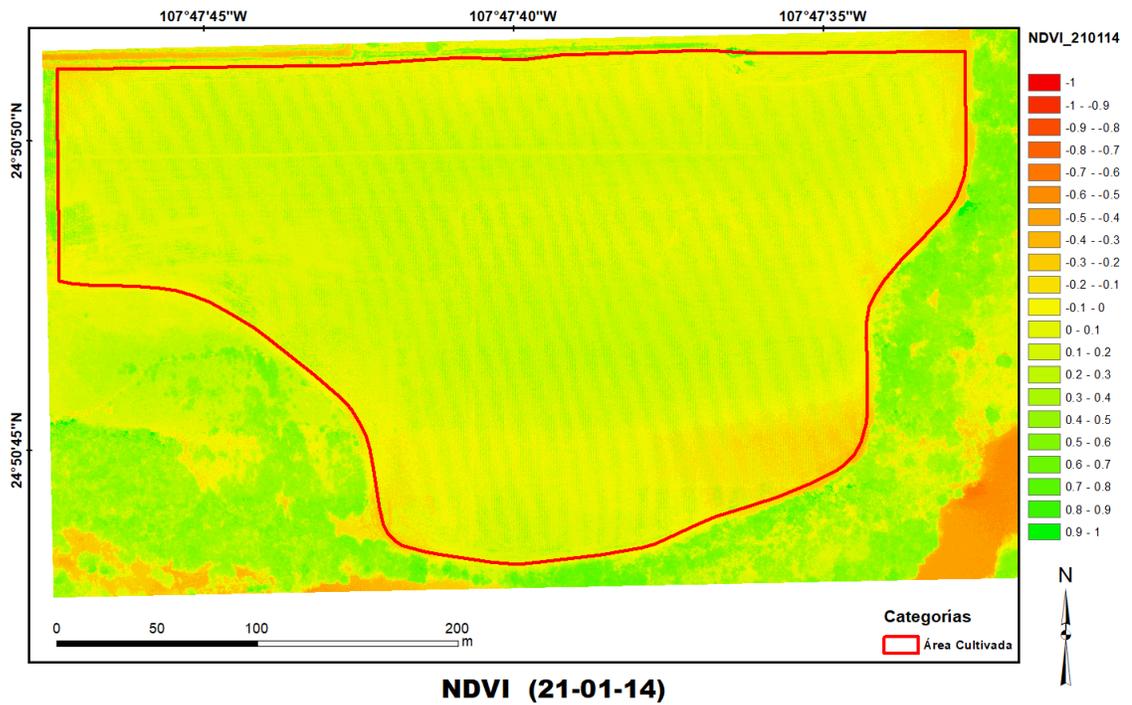
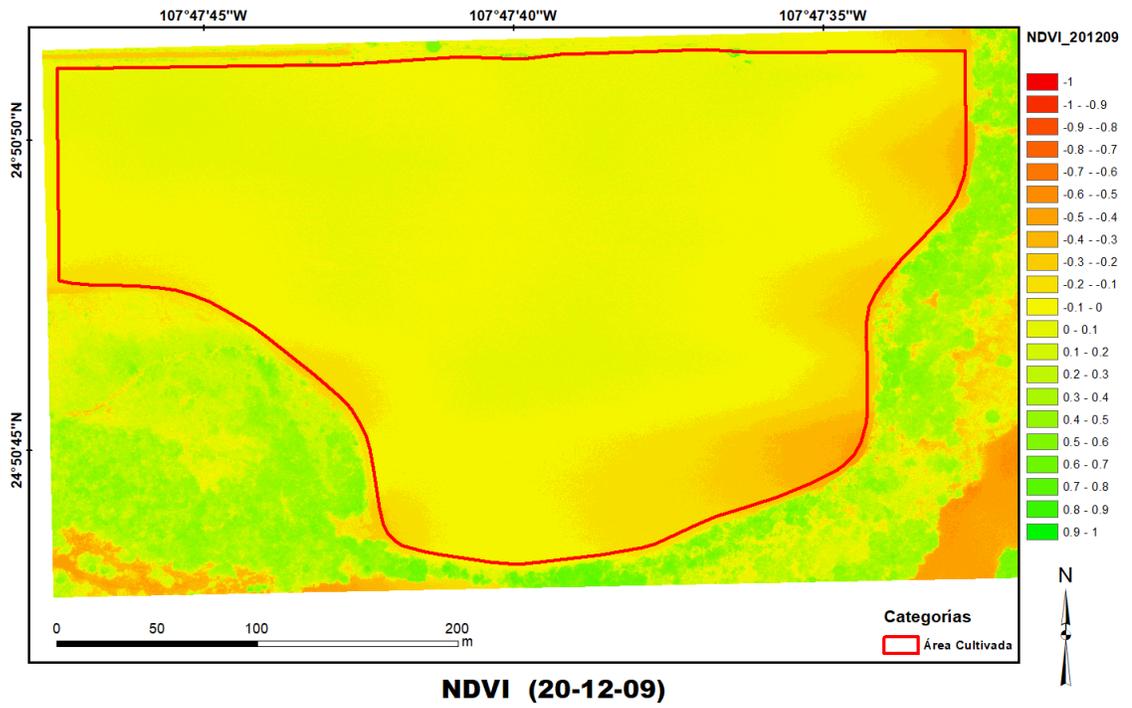
26 de abril de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.2477	0.0082	0.0008	0.0008
20	0.2303	0.4790	0.0118	0.0118
30	0.0930	0.1499	0.1594	0.1594
40	0.0665	0.0081	0.2178	0.2178
50	0.2604	0.0506	0.4034	0.4034
60	0.3420	0.0140	0.2494	0.2494
70	0.0204	0.0713	0.3364	0.3364
80	0.0351	0.0364	0.3588	0.3588
90	0.0001	0.0544	0.1447	0.1447
100	0.0133	0.1273	0.0406	0.0406
110	0.0189	0.3582	0.2989	0.2989
120	0.0542	0.2631	0.7014	0.7014
130	0.0001	0.2818	0.0234	0.0234
140	0.1544	0.9914	0.0401	0.0401
150	0.0208	0.0644	0.0098	0.0098
prom	0.1038	0.1972	0.1998	0.1998
devP	0.1095	0.2531	0.1910	0.1910
CV	1.0551	1.2834	0.9561	0.9561
CV%	105.5095	128.3402	95.6060	95.6060

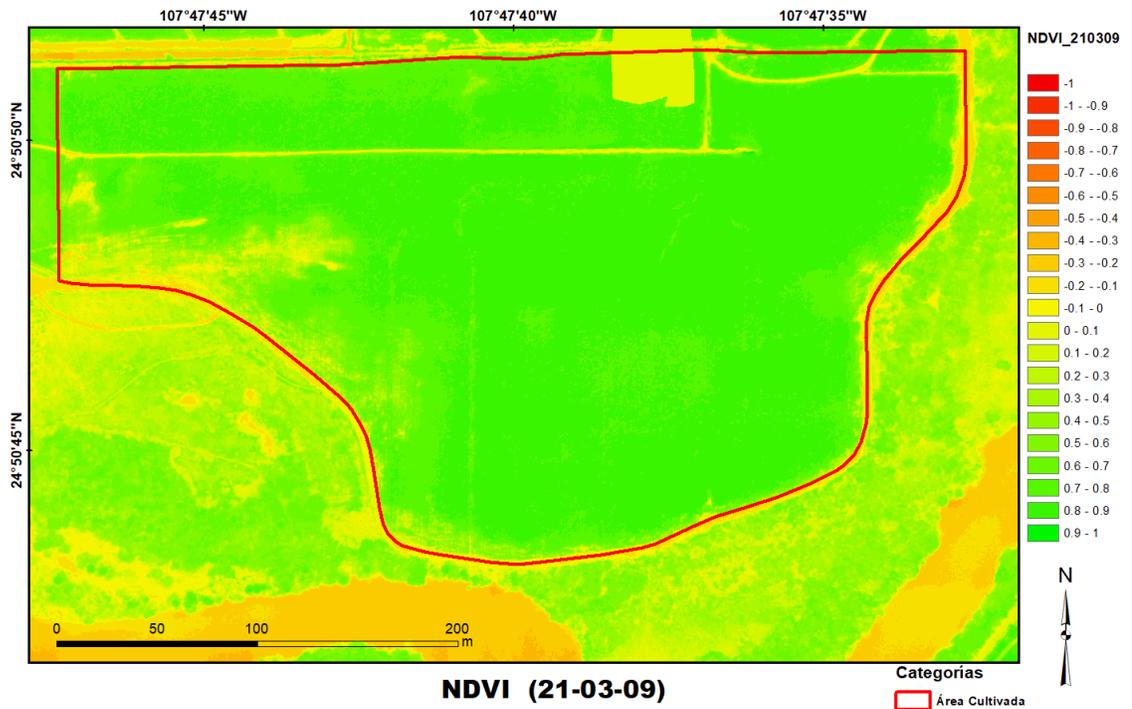
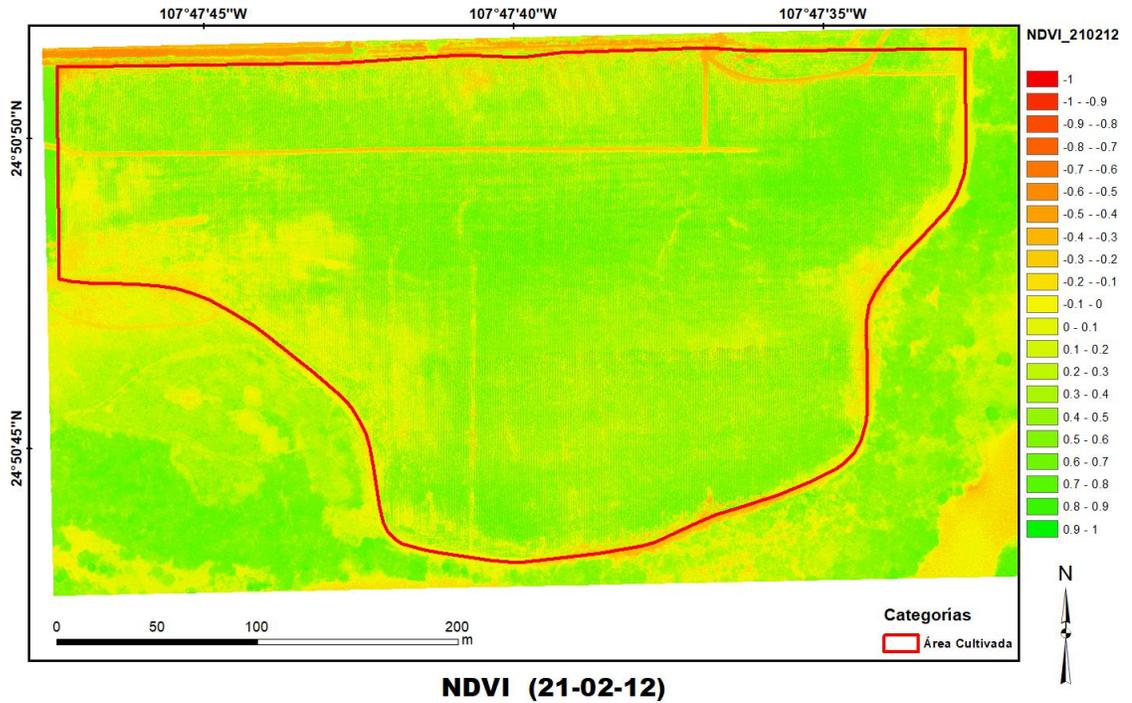
29 de abril de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.2868	0.5700	0.1190	0.2595
20	0.5505	0.7952	0.5237	0.6105
30	0.7730	0.9982	0.8923	0.4057
40	0.6664	0.8481	0.8384	0.5870
50	0.9996	0.8079	0.9946	0.5657
60	0.9013	0.9650	0.9539	0.8434
70	0.7999	0.9245	0.8467	0.8286
80	0.7943	0.7194	0.9909	0.6260
90	0.7058	0.9692	0.8355	0.8301
100	0.9734	0.9335	0.9941	0.8950
110	0.9973	0.9188	0.9791	0.8631
120	0.8173	0.9277	0.9994	0.6612
130	0.9293	0.8447	0.8805	0.9687
140	0.9664	0.9558	0.9477	0.5136
150	0.4188	0.9671	0.9665	0.8784
prom	0.7720	0.8763	0.8508	0.6891
devP	0.2082	0.1118	0.2278	0.1970
CV	0.2697	0.1276	0.2677	0.2859
CV%	26.9748	12.7551	26.7722	28.5879

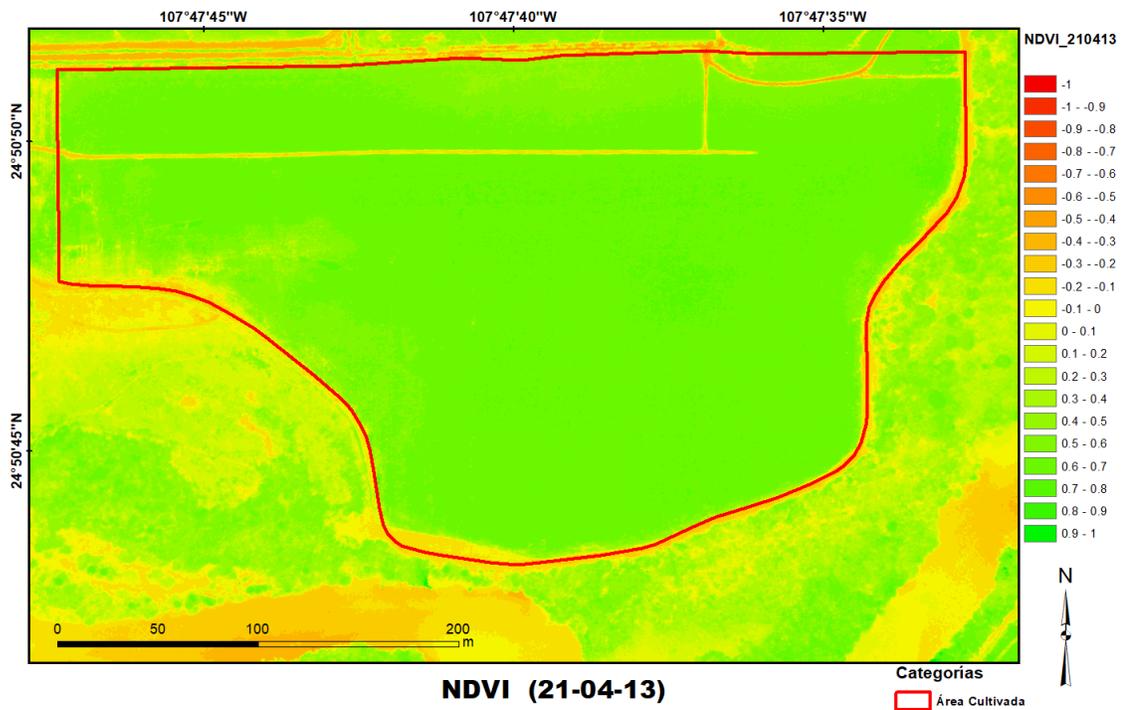
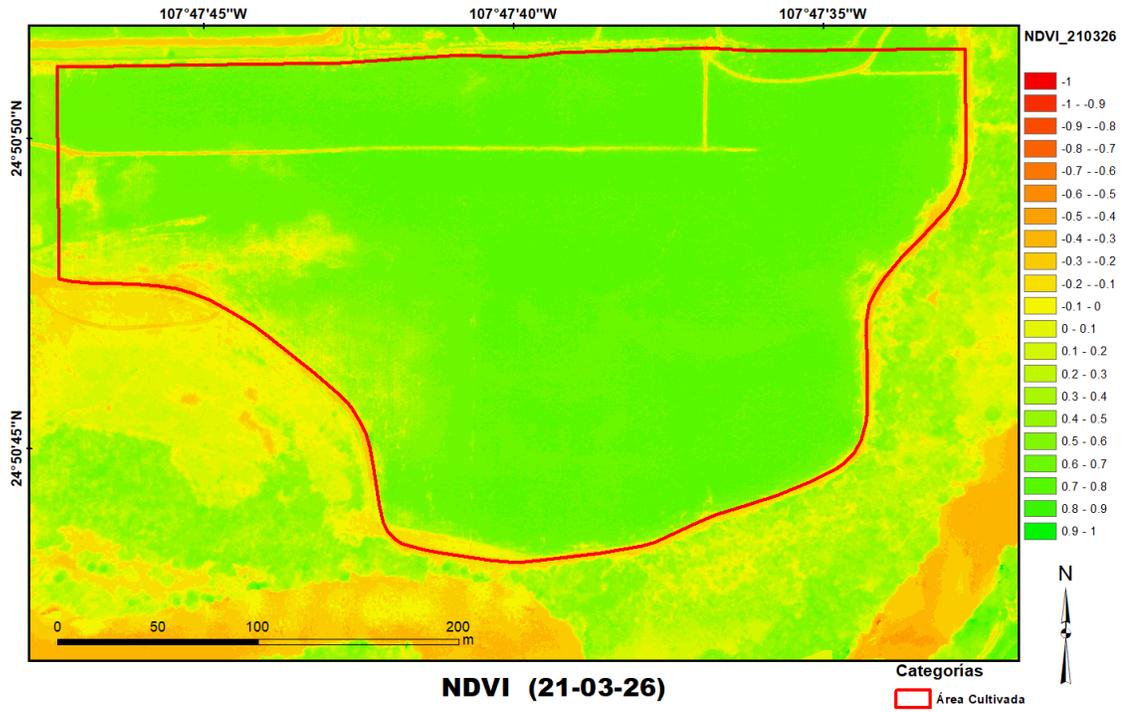
01 de mayo de 2021				
Altitud	green	red	red edge	nir
10	0.5842	0.5125	0.6592	0.4470
20	0.2365	0.0010	0.3051	0.2221
30	0.4477	0.2777	0.5060	0.1933
40	0.4087	0.1857	0.3273	0.0495
50	0.3778	0.3079	0.3477	0.3972
60	0.1541	0.0003	0.0978	0.0018
70	0.2429	0.0009	0.1100	0.0601
80	0.3581	0.2463	0.2905	0.3385
90	0.1508	0.0054	0.1087	0.1170
100	0.0057	0.0189	0.0571	0.0104
110	0.0576	0.5307	0.0819	0.0387
120	0.1689	0.3891	0.2577	0.0326
130	0.3380	0.7966	0.0079	0.1834
140	0.3884	0.7692	0.3983	0.1745
150	0.1681	0.1377	0.0698	0.0444
prom	0.2725	0.2787	0.2417	0.1540
devP	0.1533	0.2638	0.1814	0.1394
CV	0.5626	0.9466	0.7506	0.9050
CV%	56.2601	94.6570	75.0633	90.5006

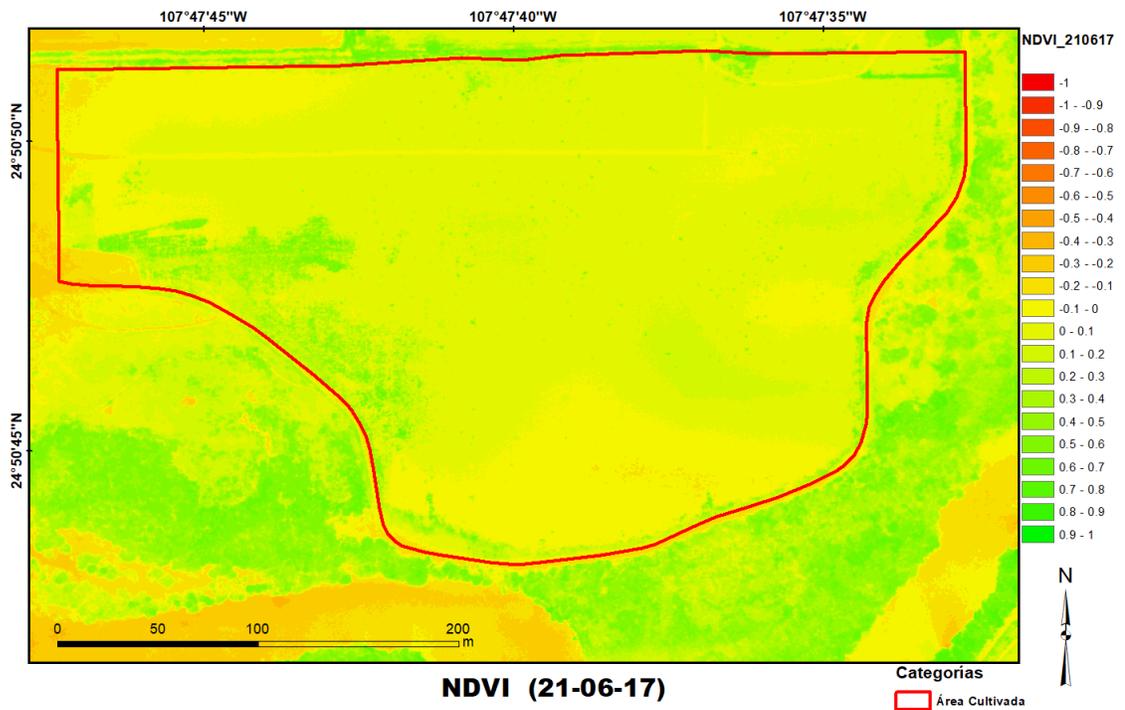
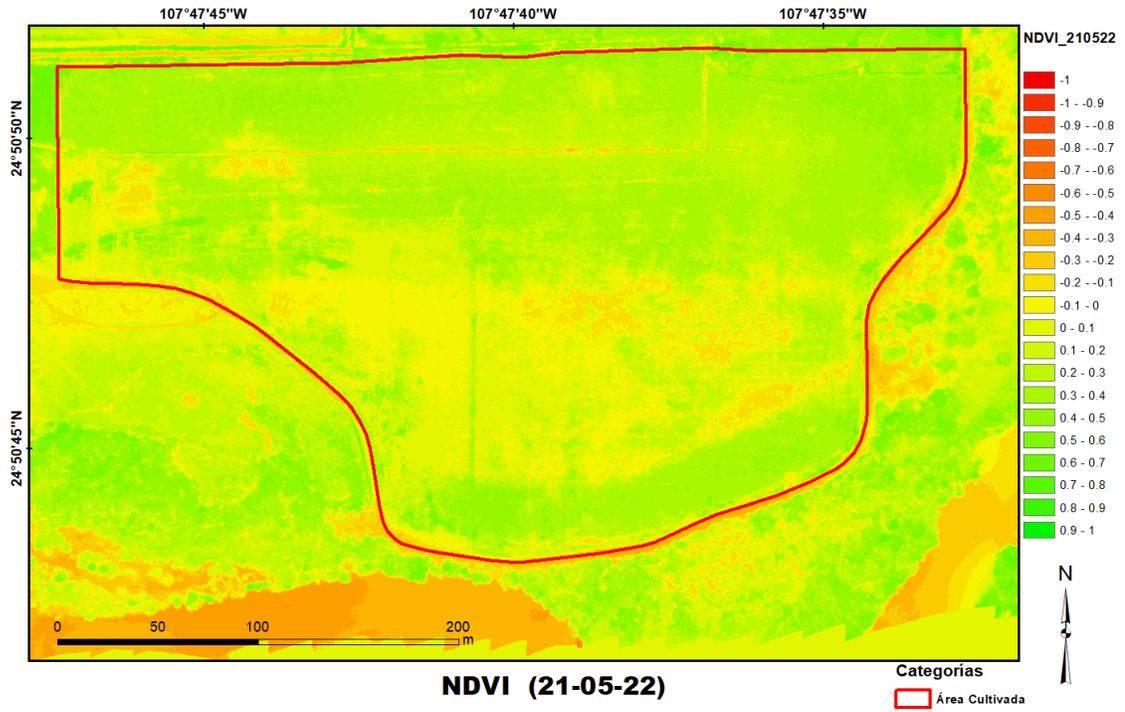
## 4.1 Mapas NDVI



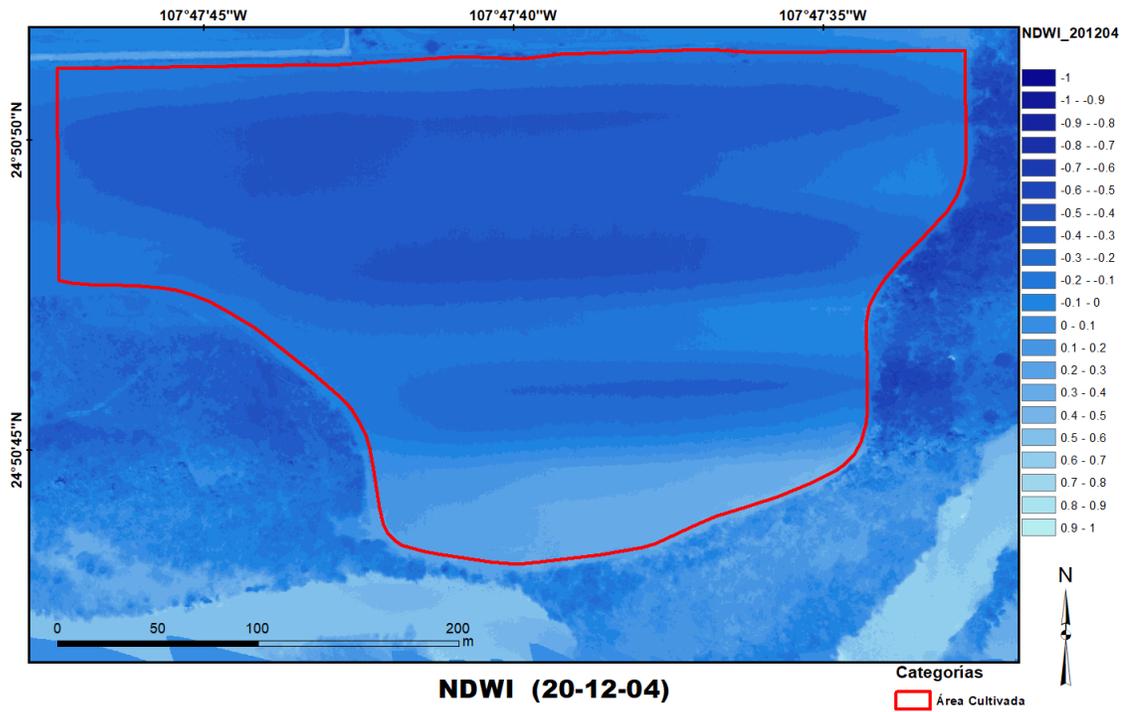
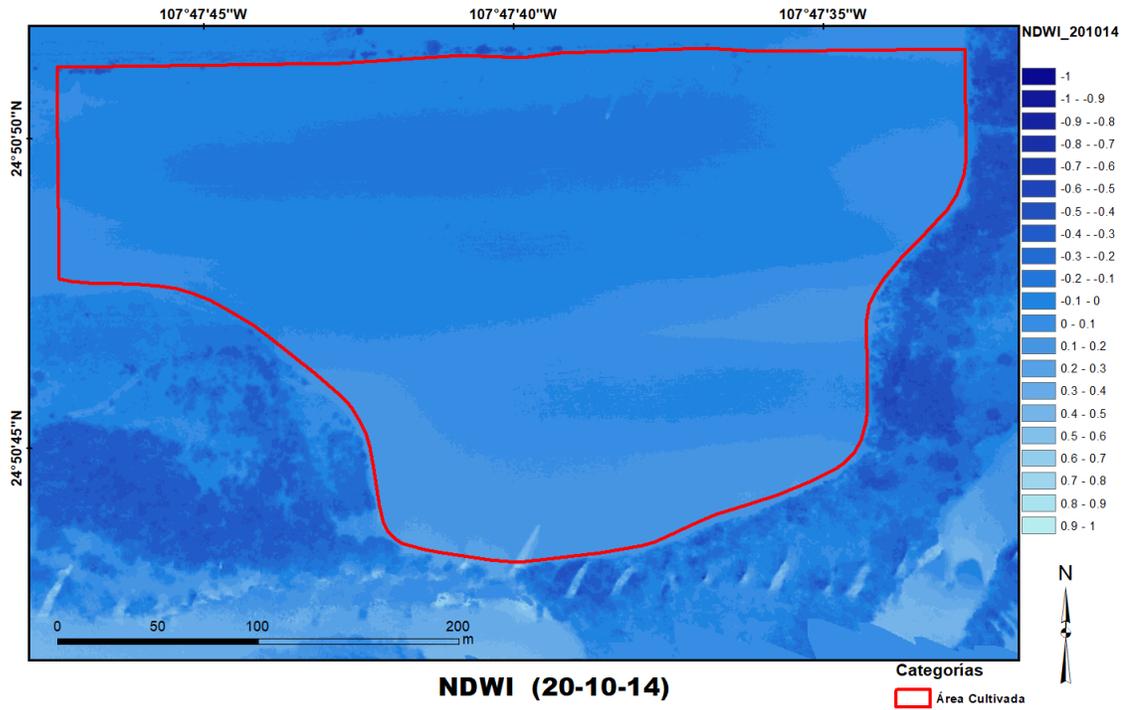


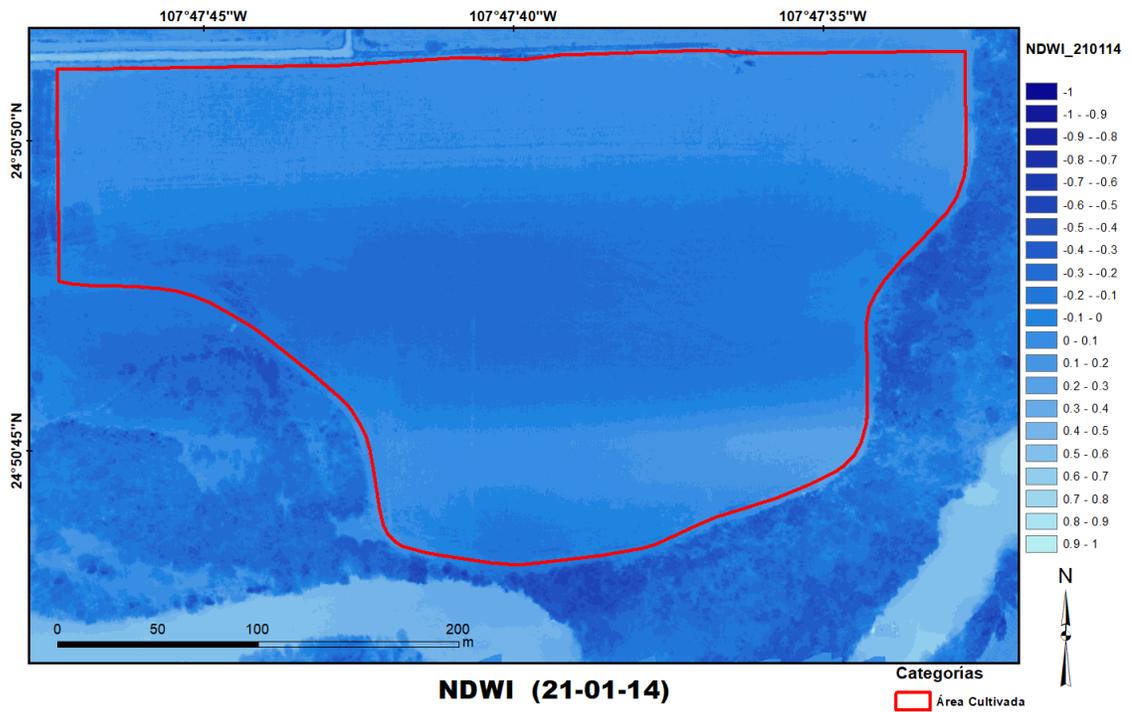
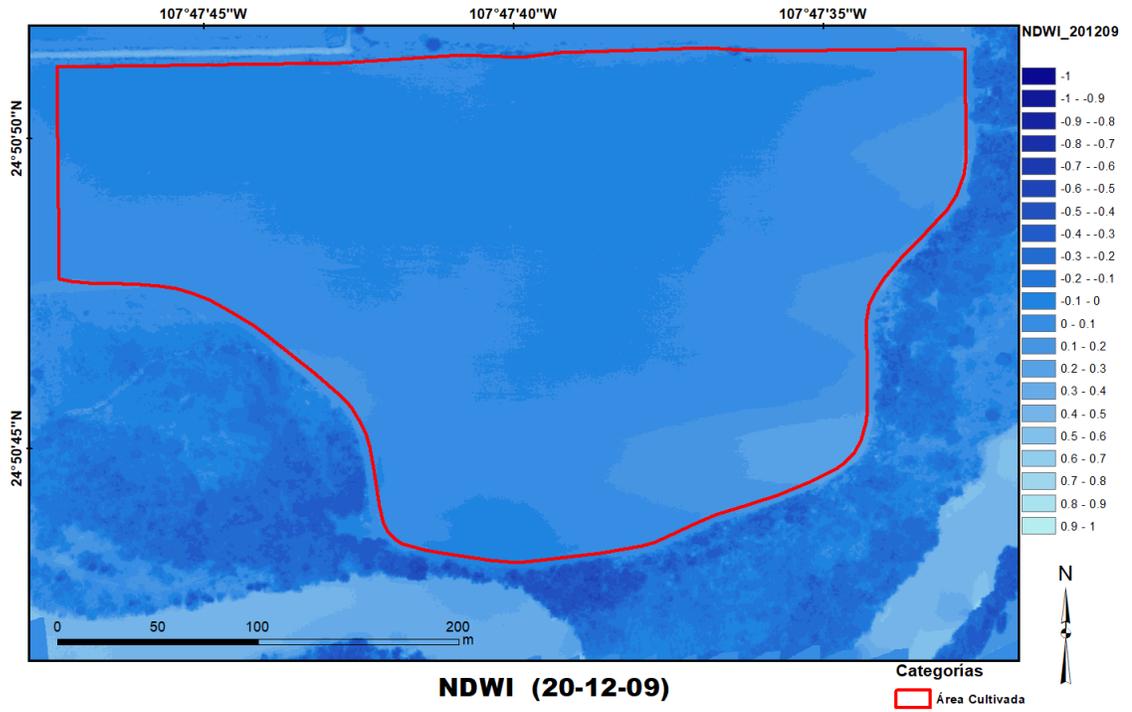


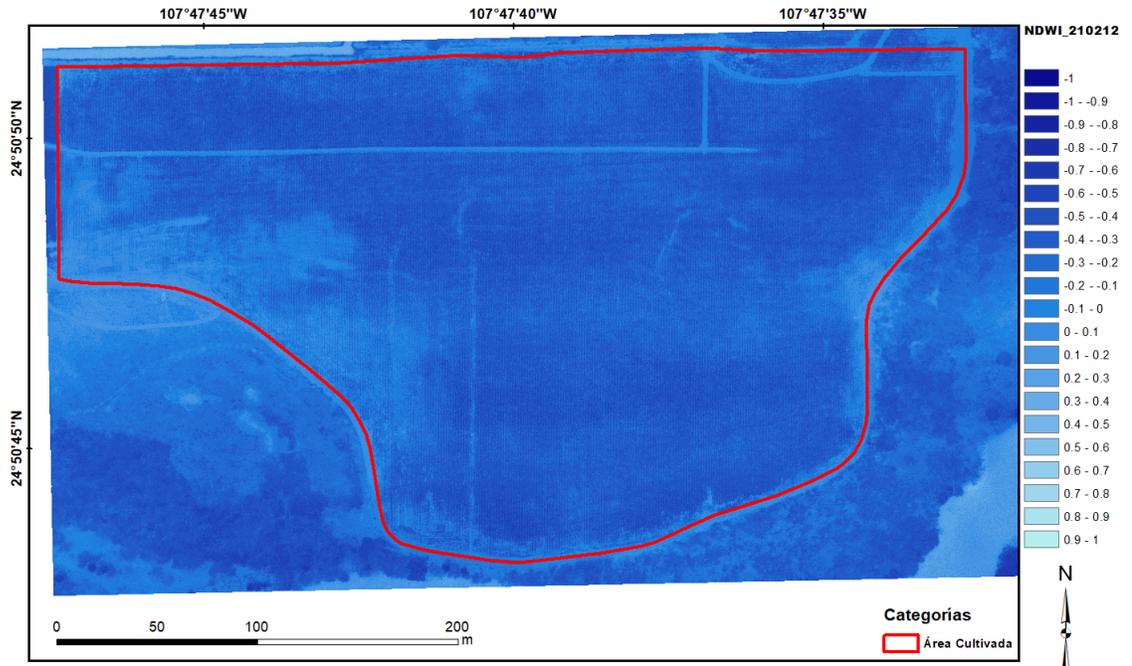




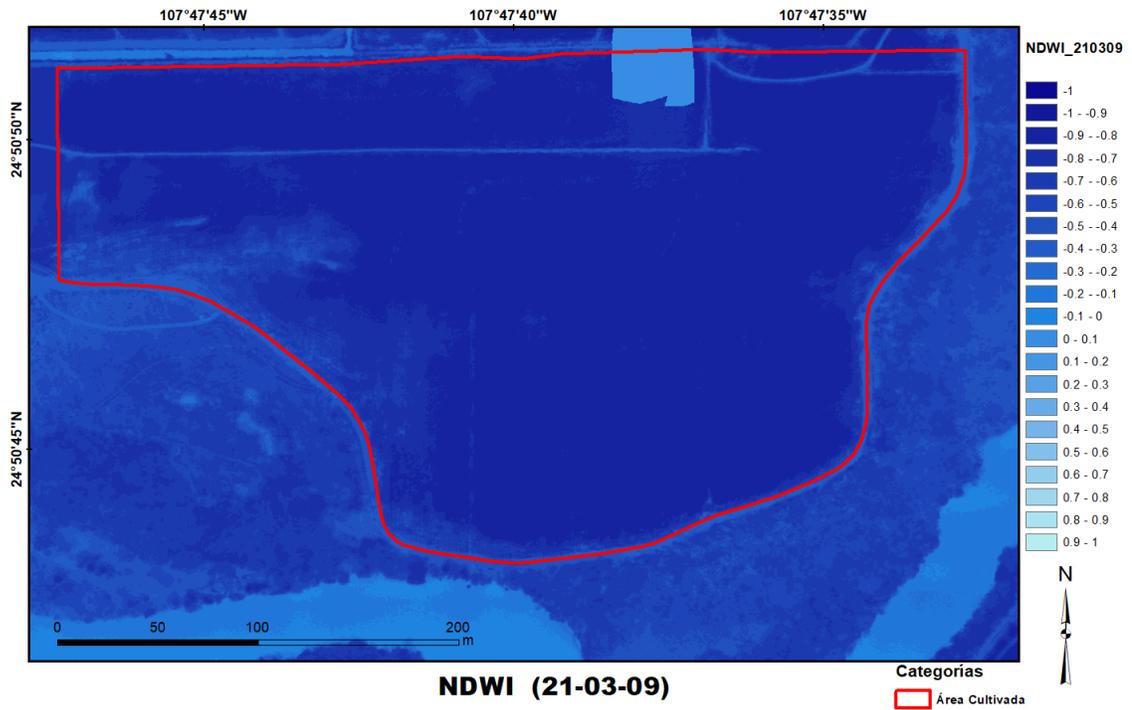
## 4.2 Mapas NDWI



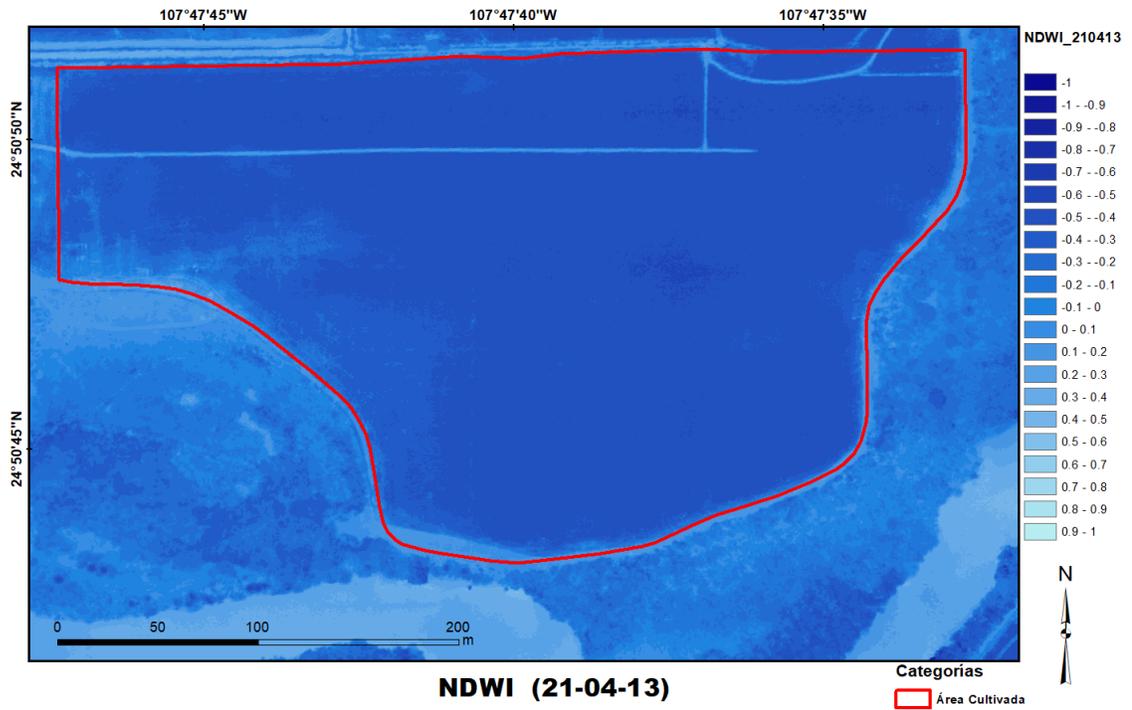
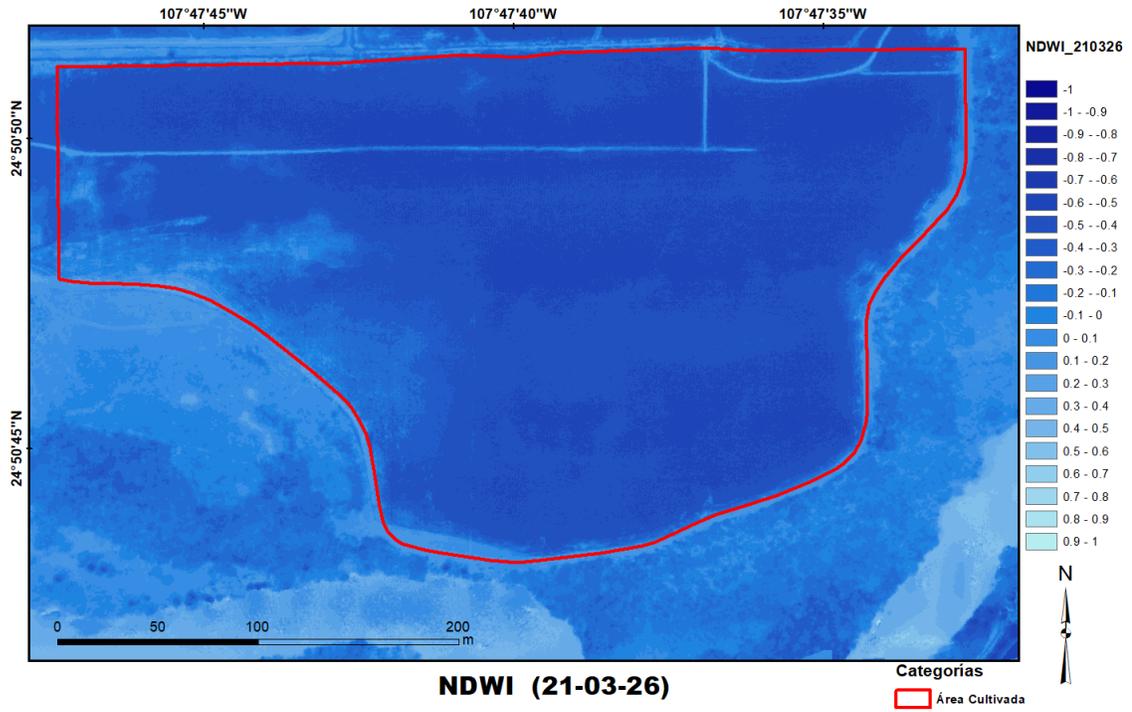


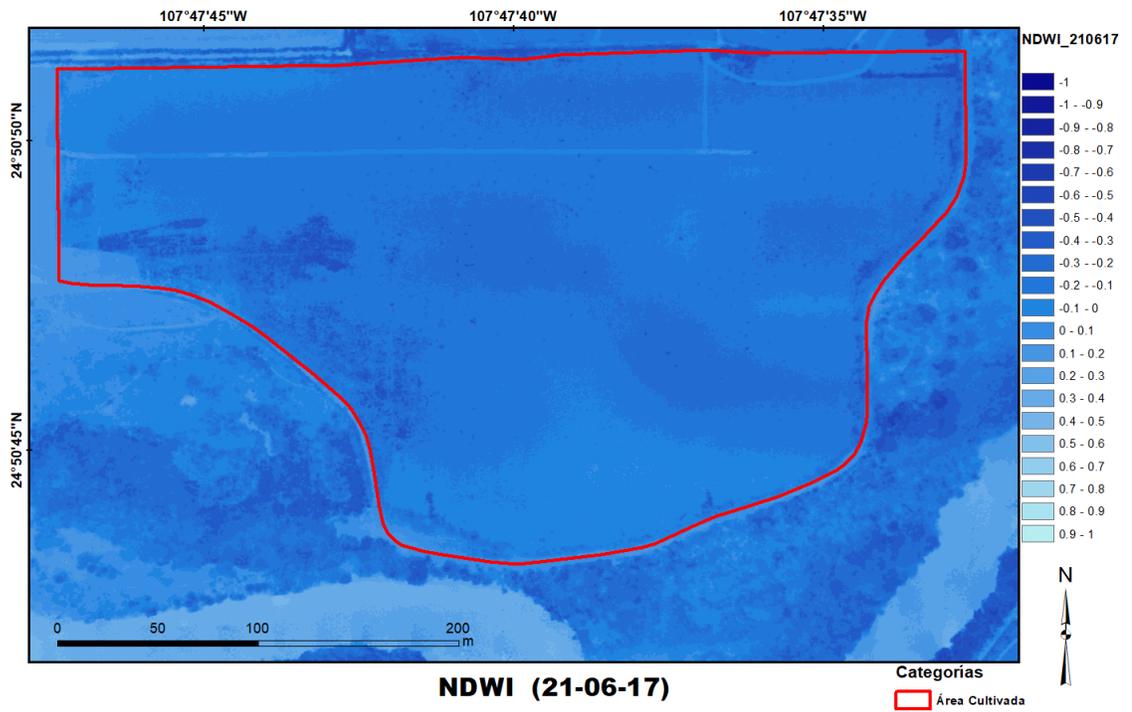
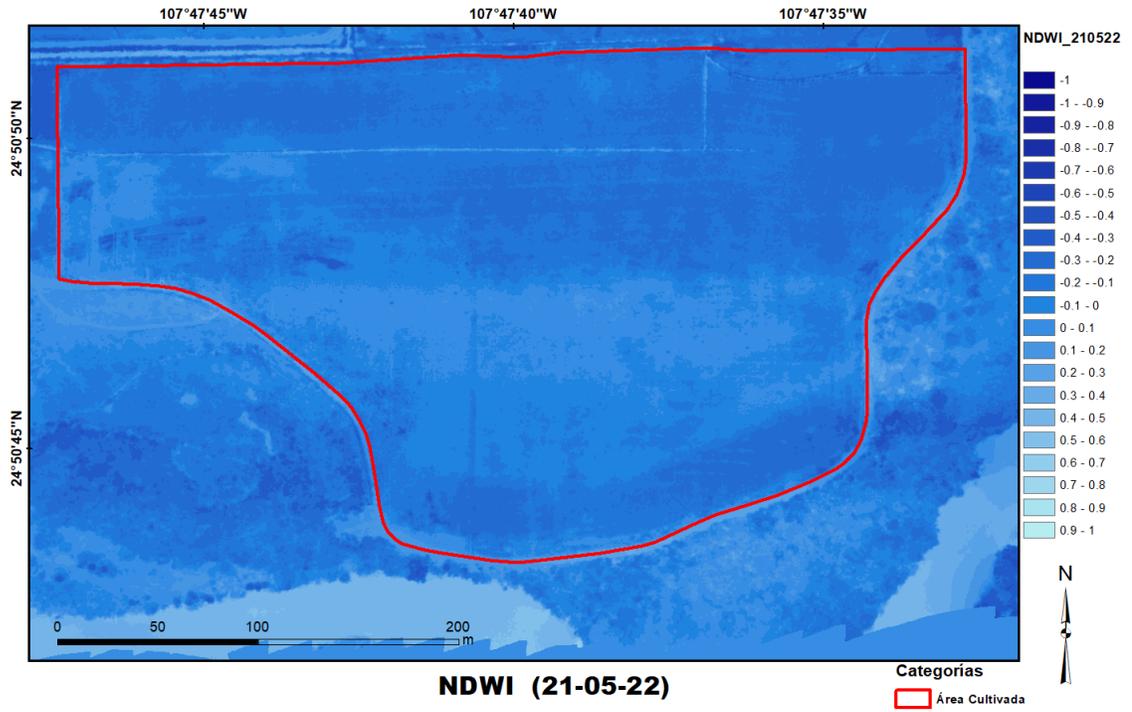


**NDWI (21-02-12)**

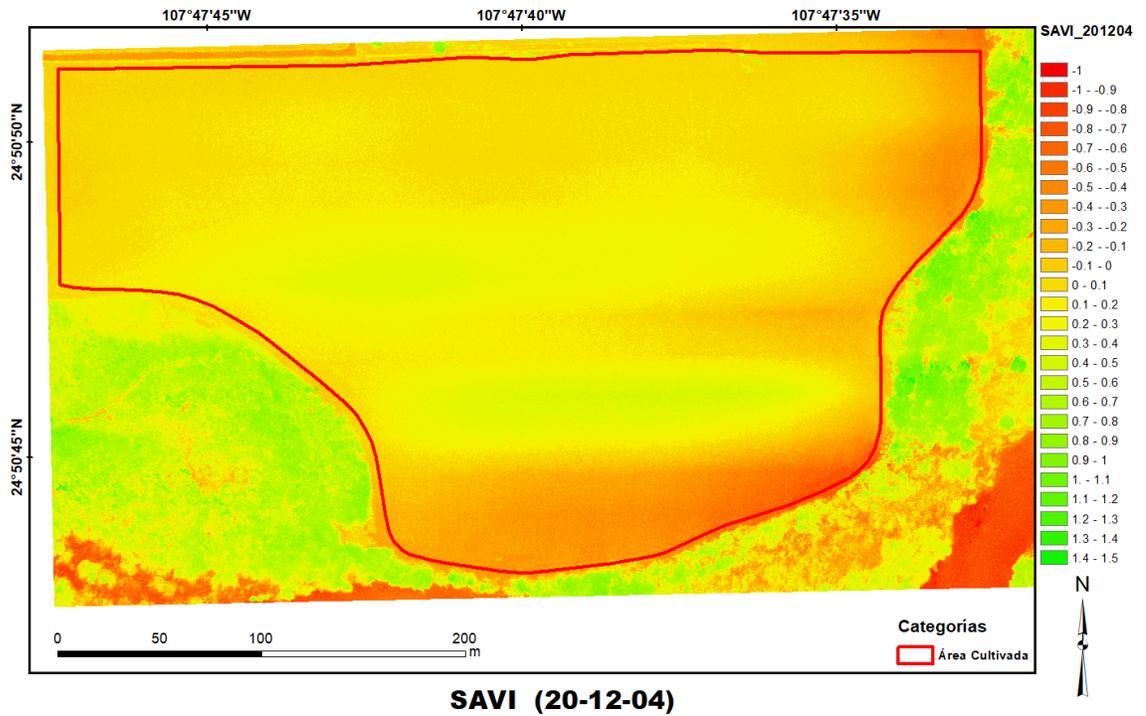
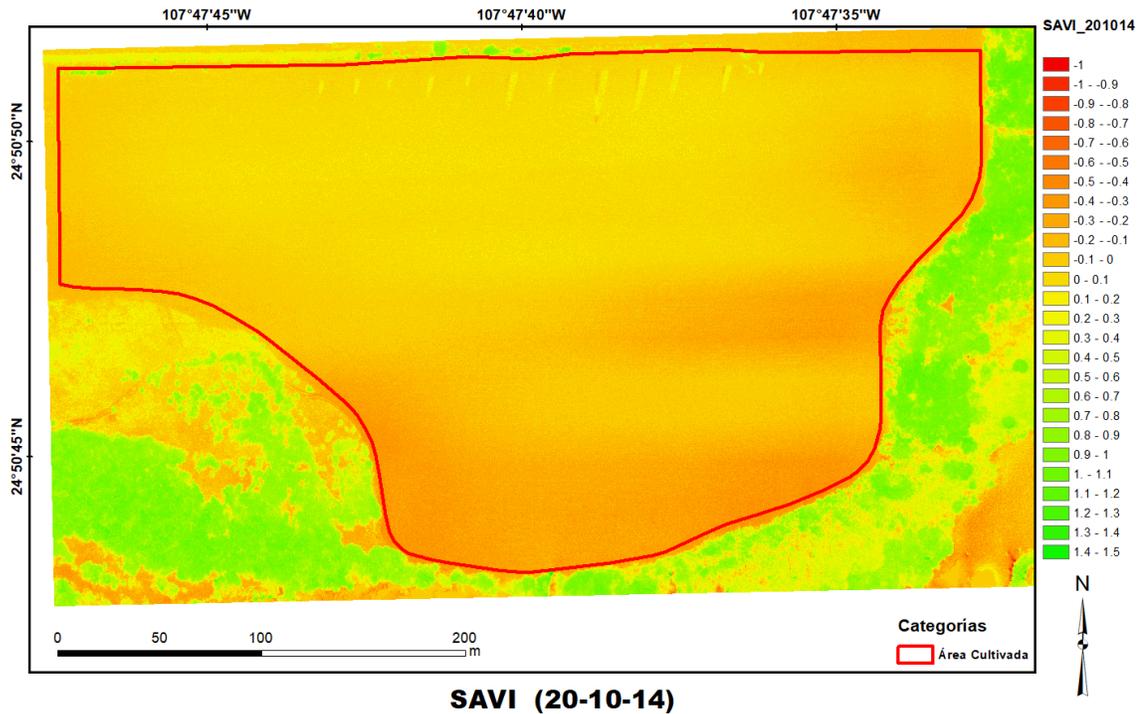


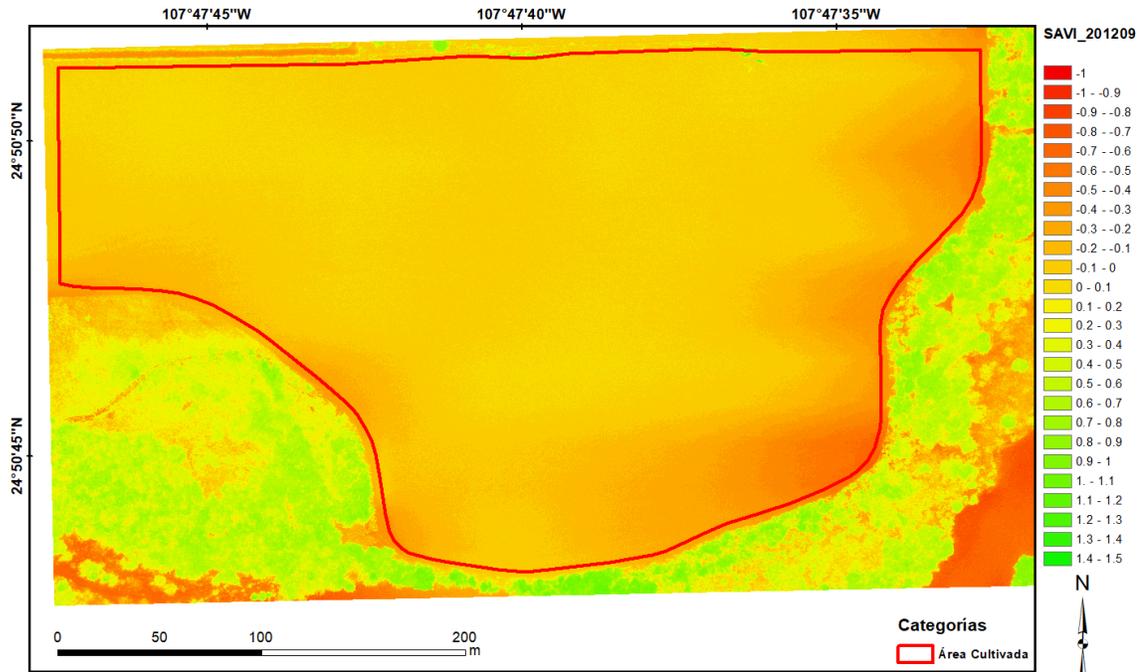
**NDWI (21-03-09)**

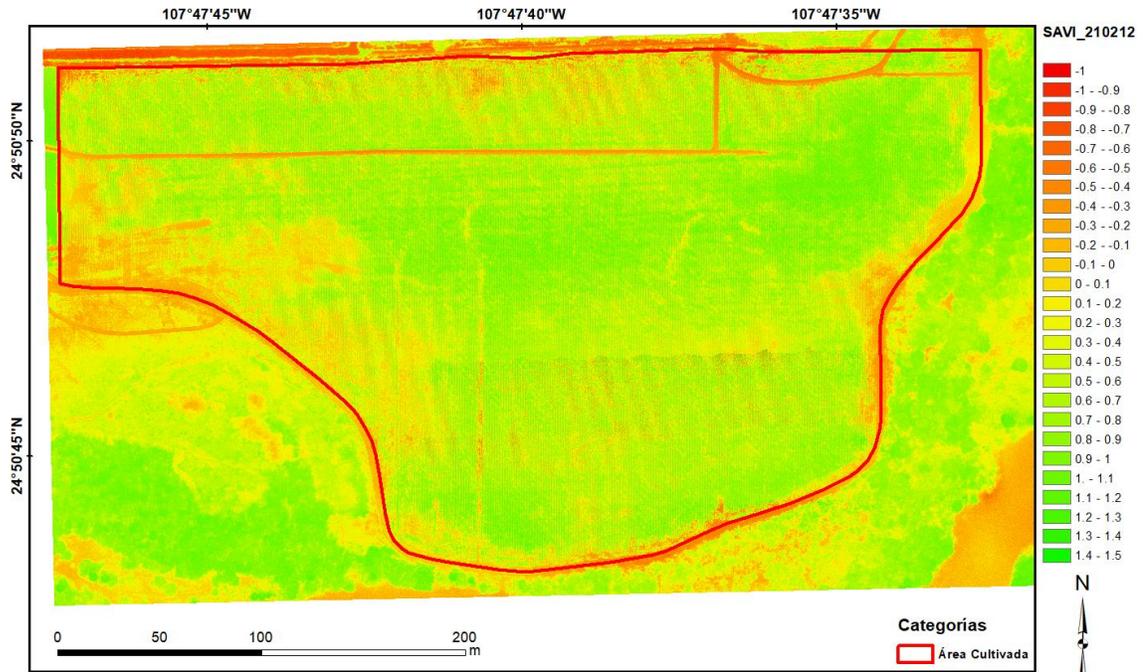




### 4.3 Mapa SAVI



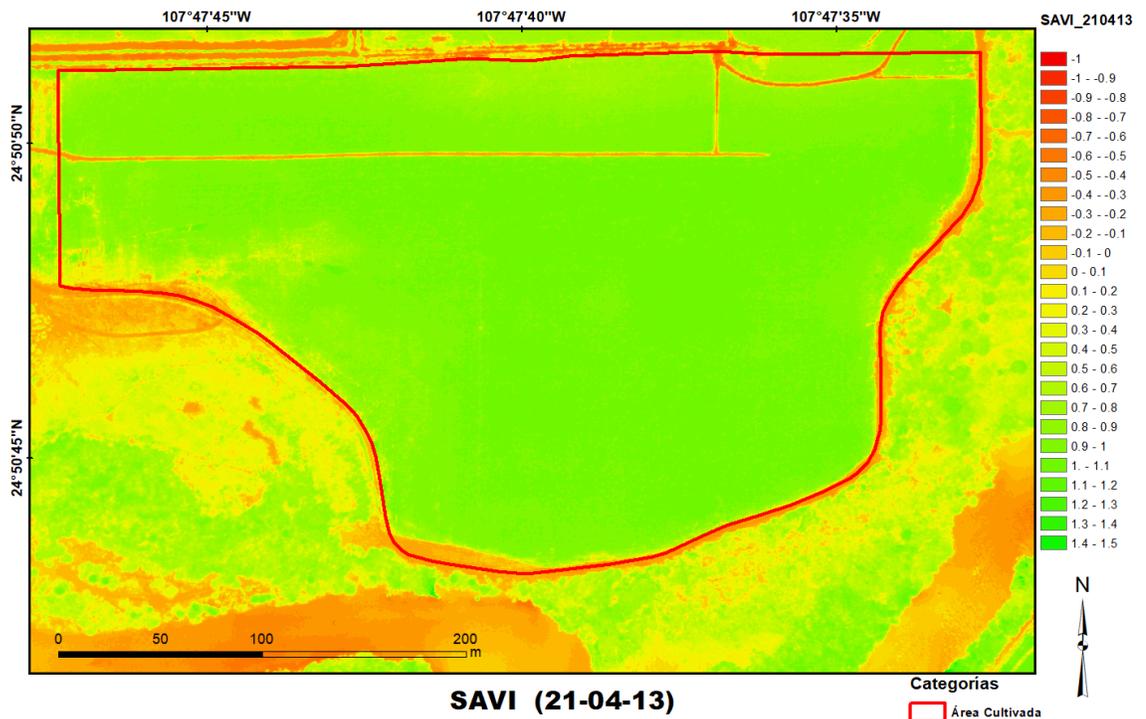
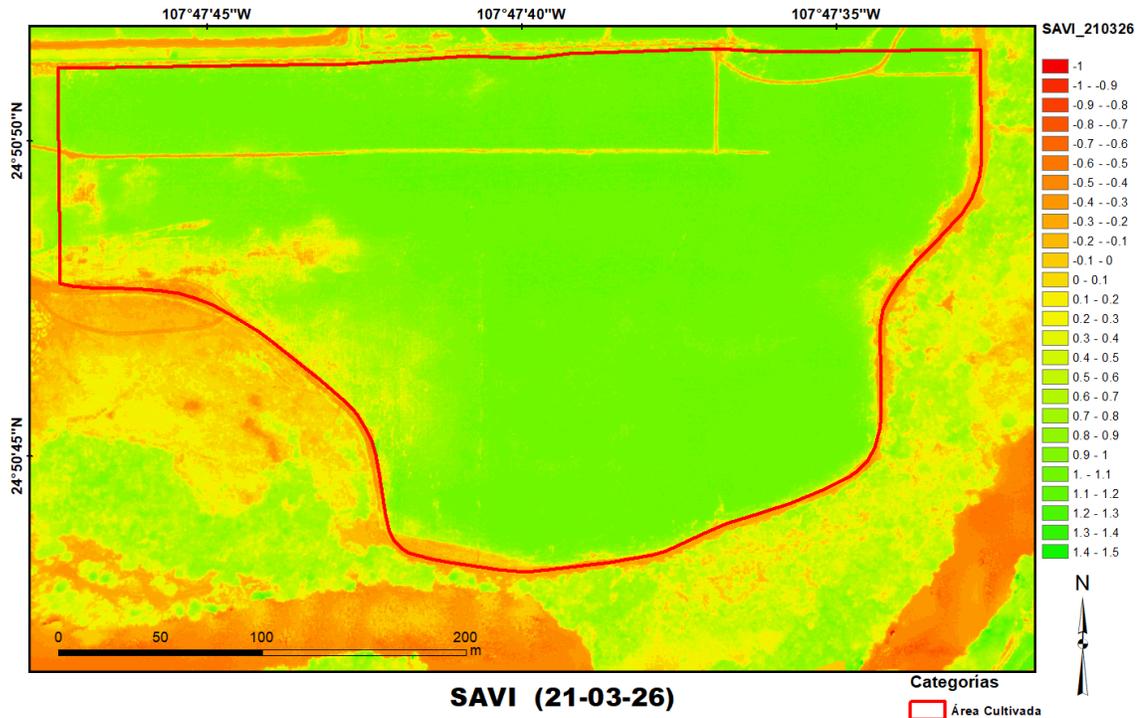


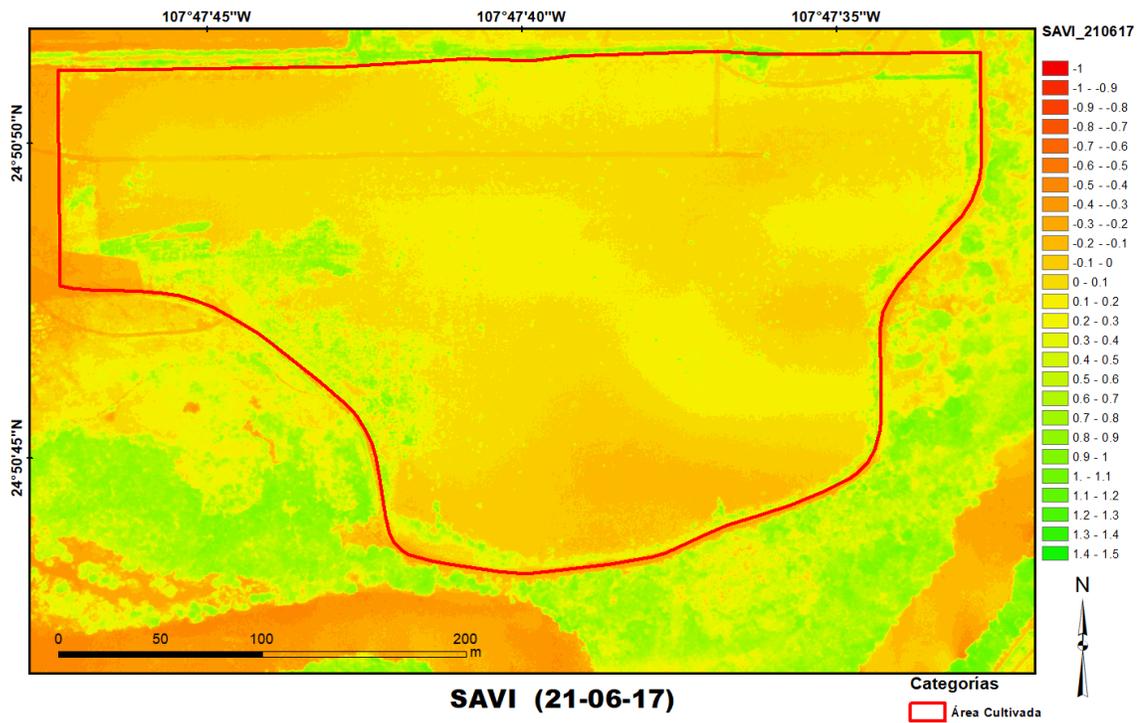
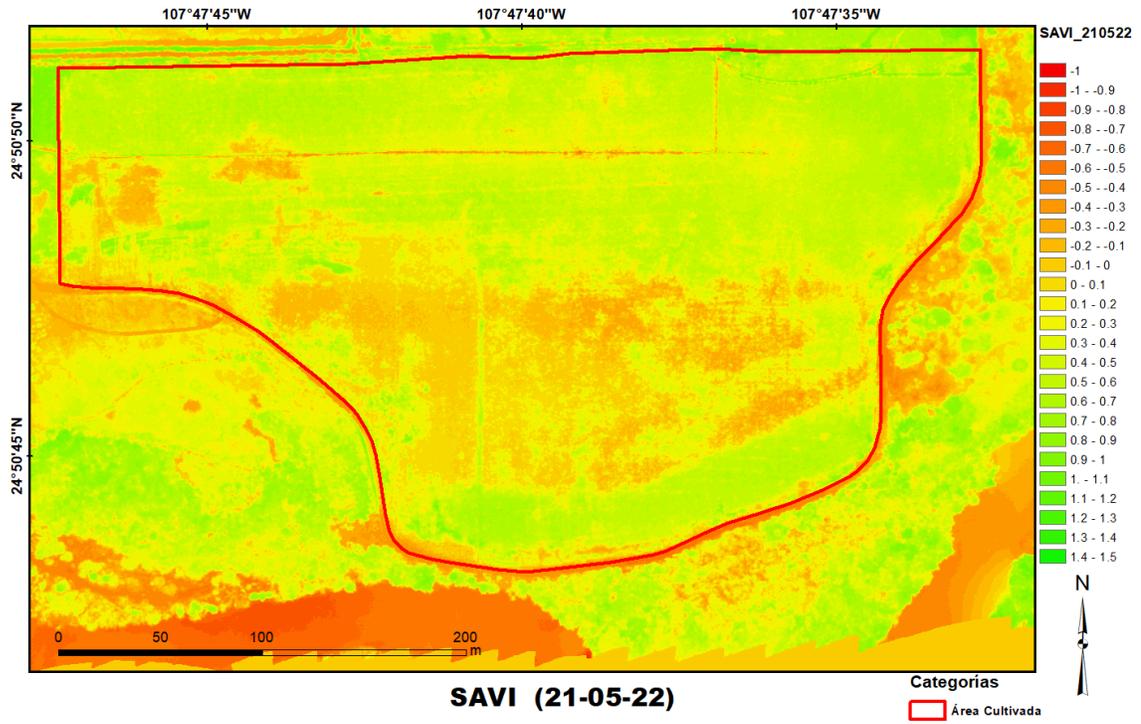


**SAVI (21-02-12)**

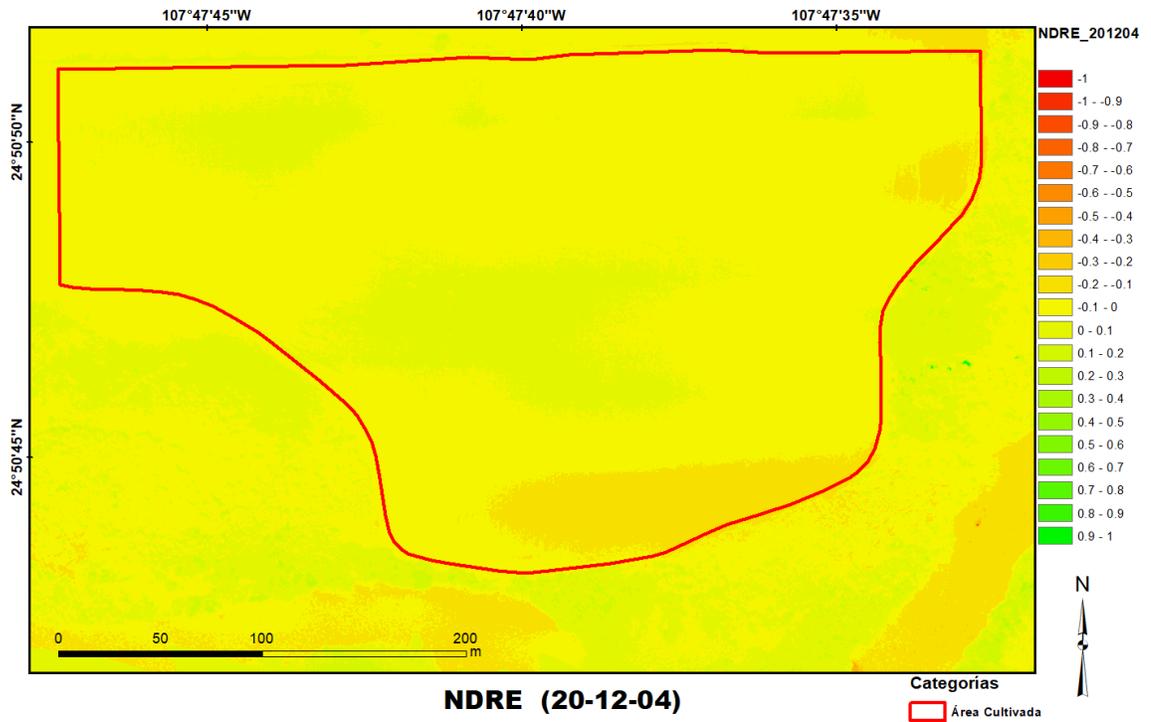
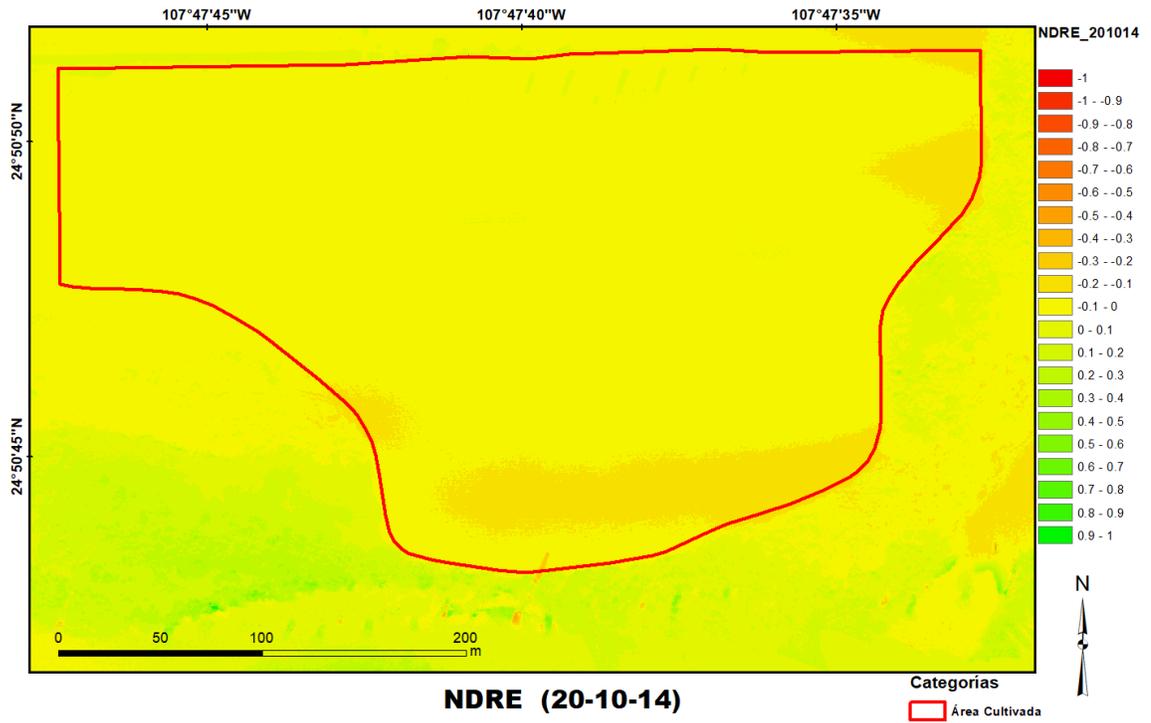


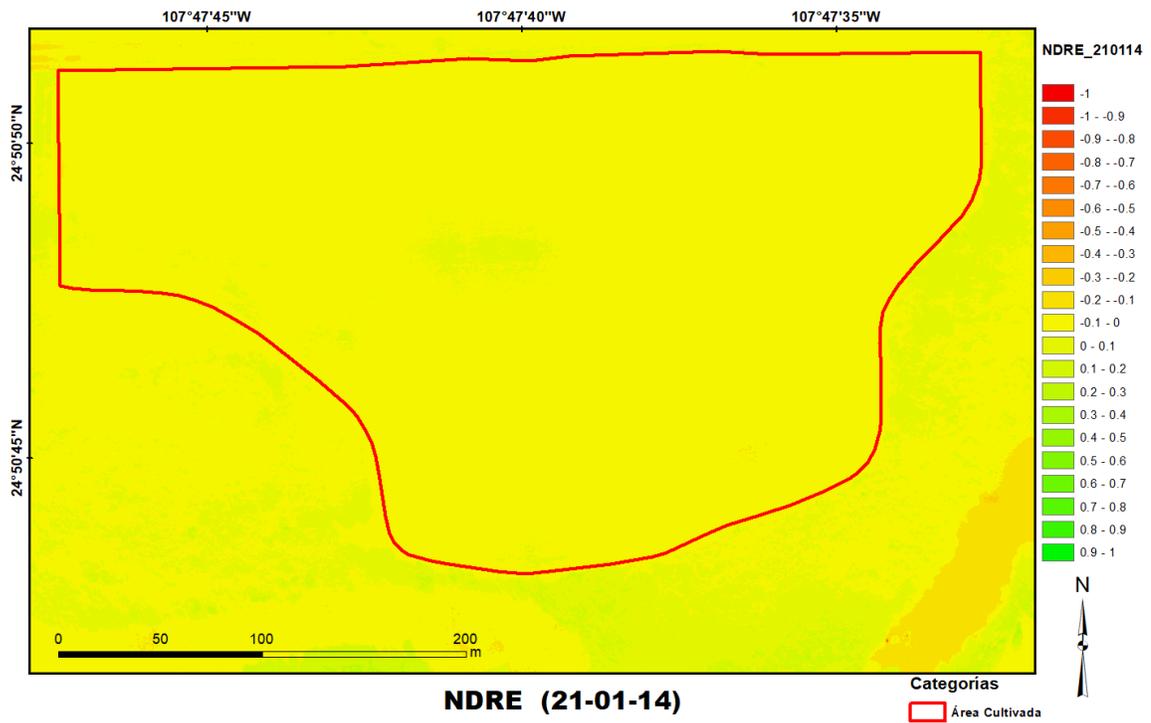
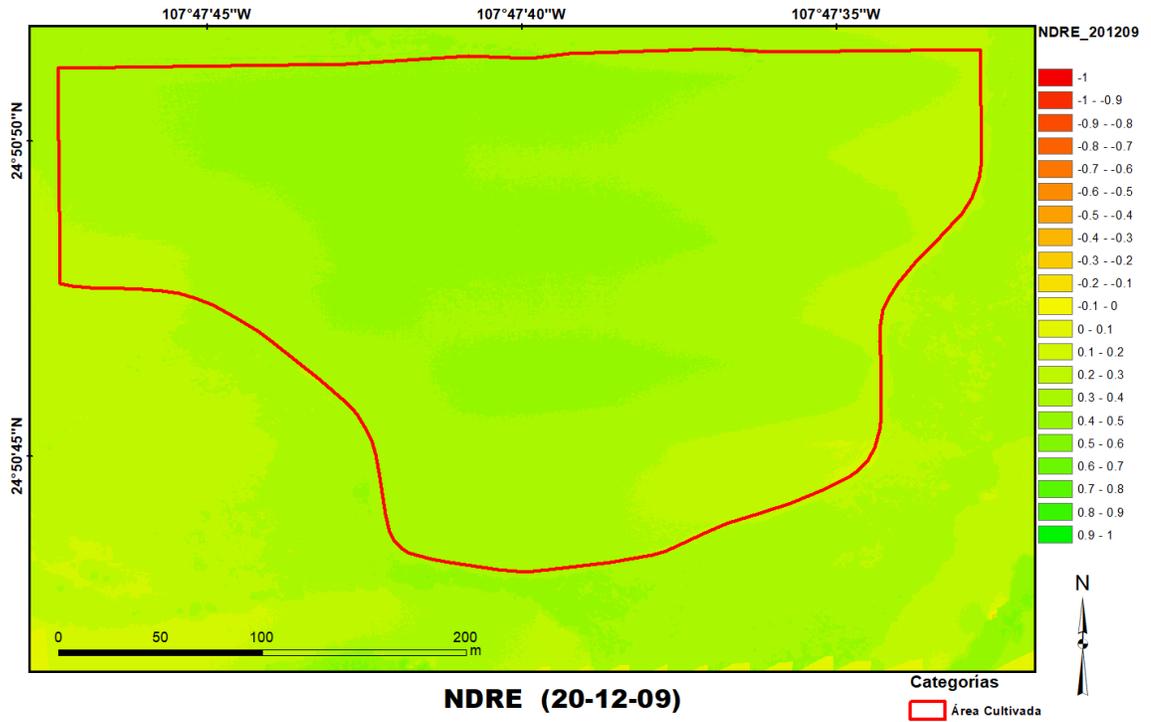
**SAVI (21-03-09)**

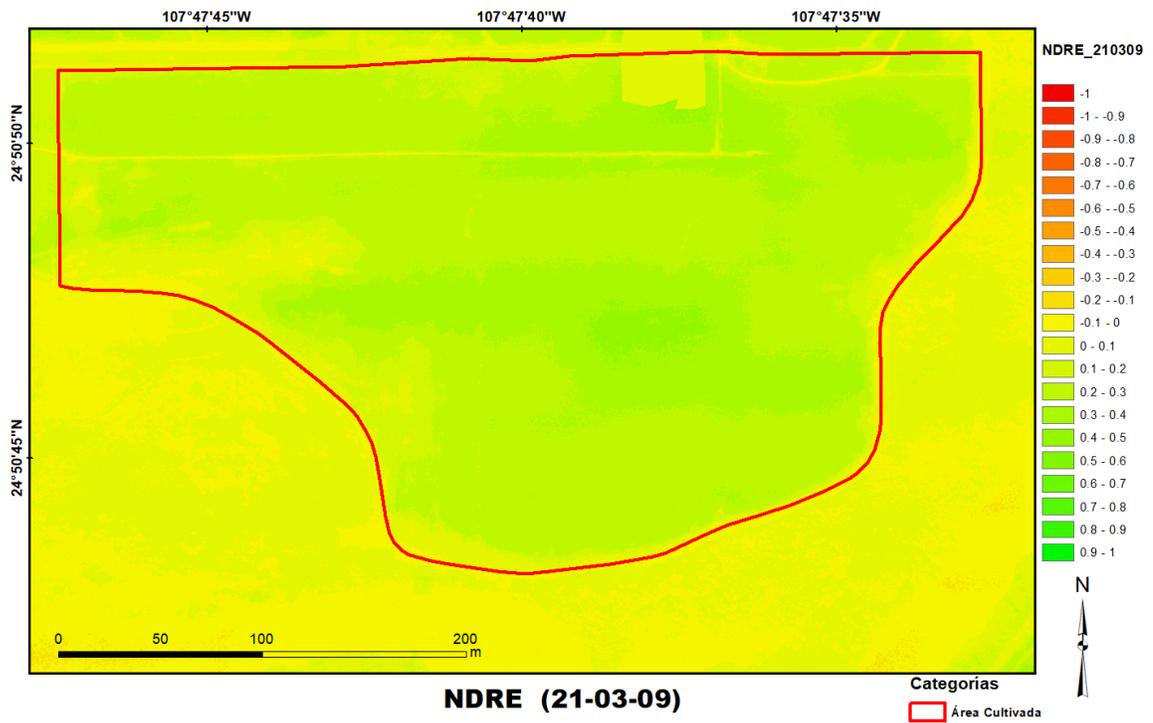
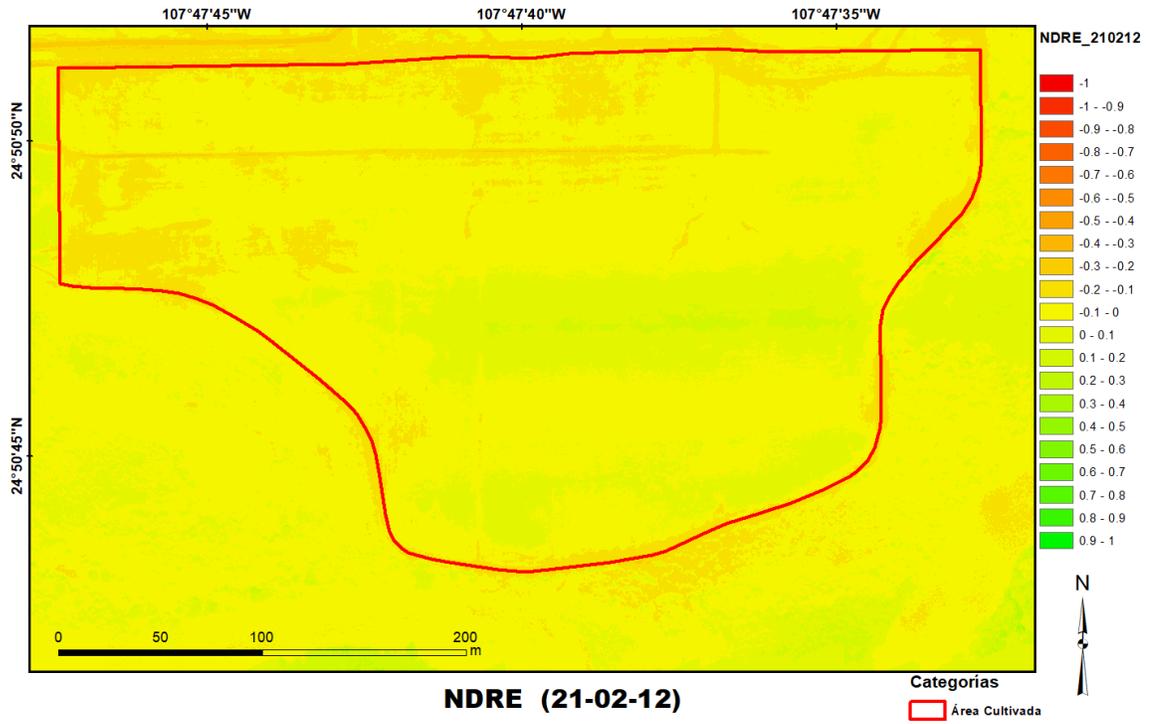


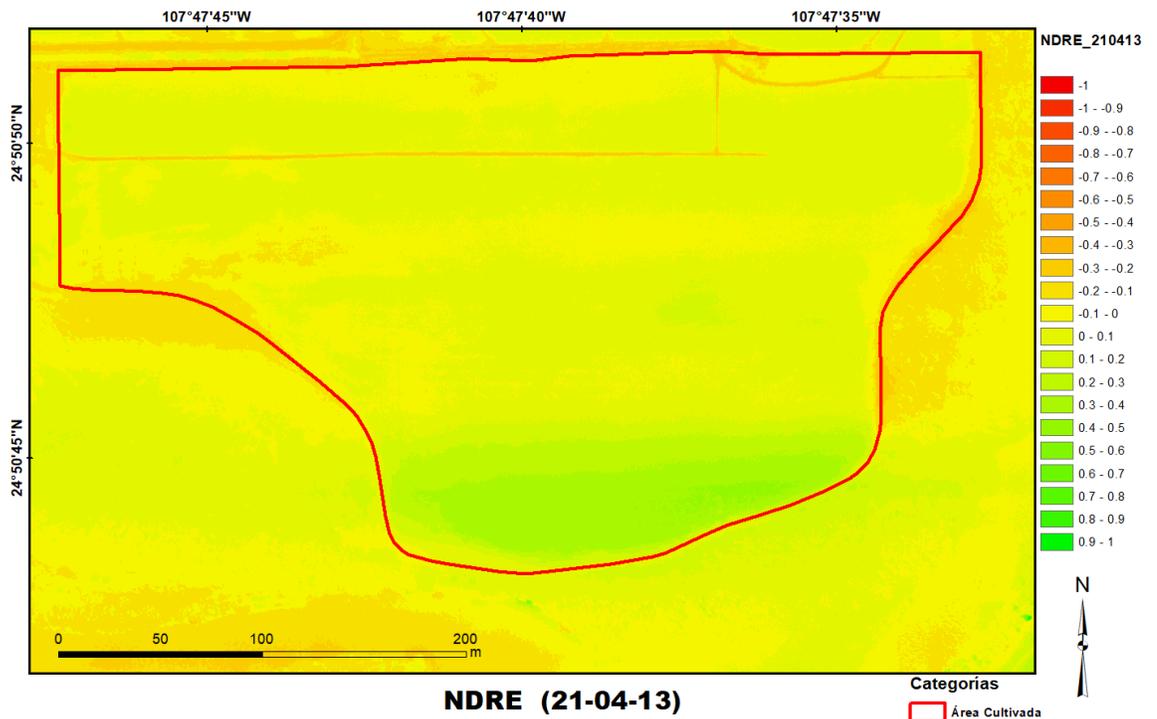
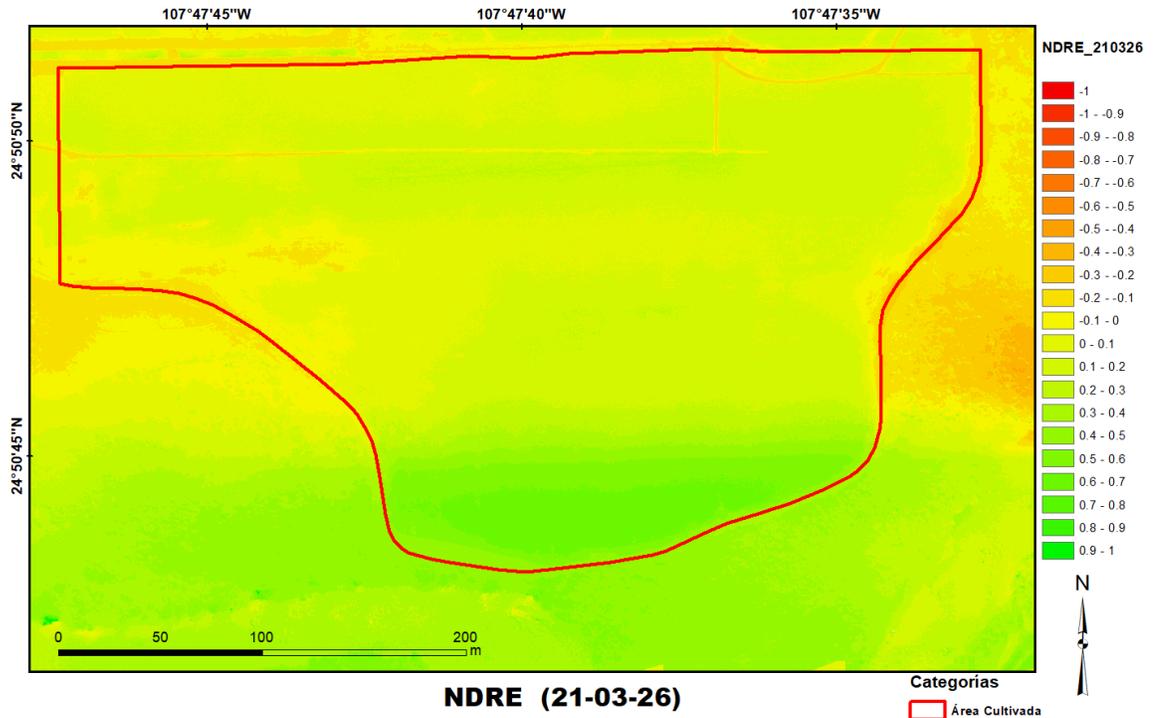


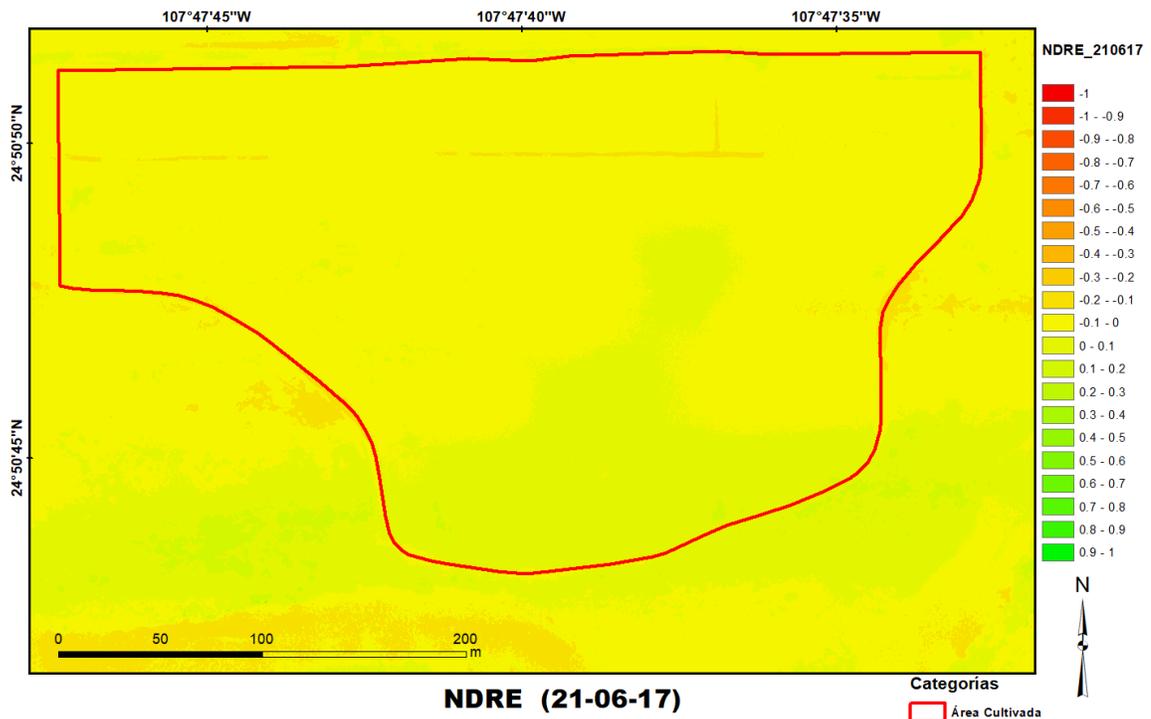
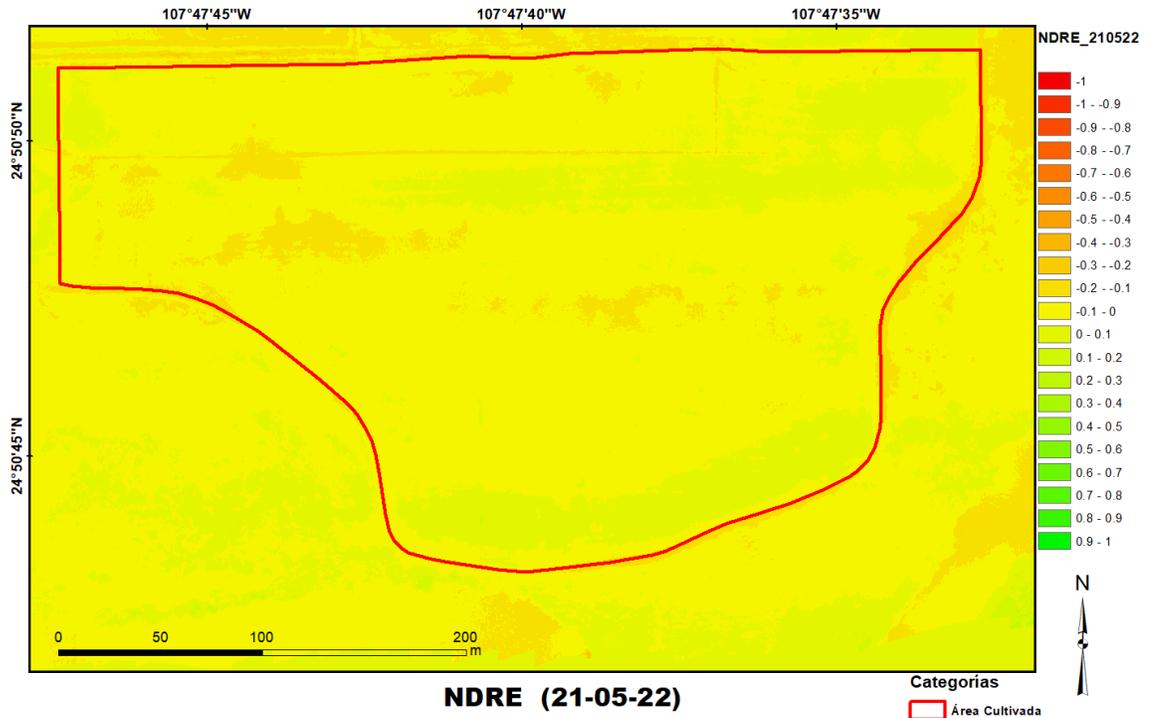
## 4.4 Mapas NDRE



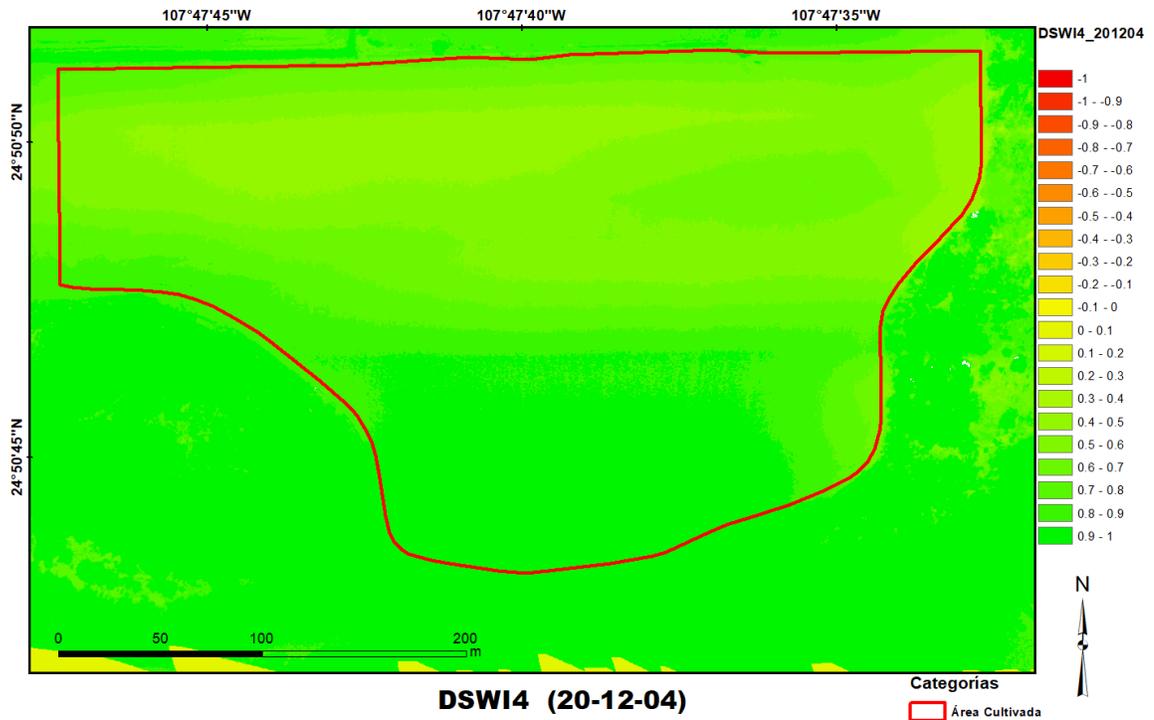
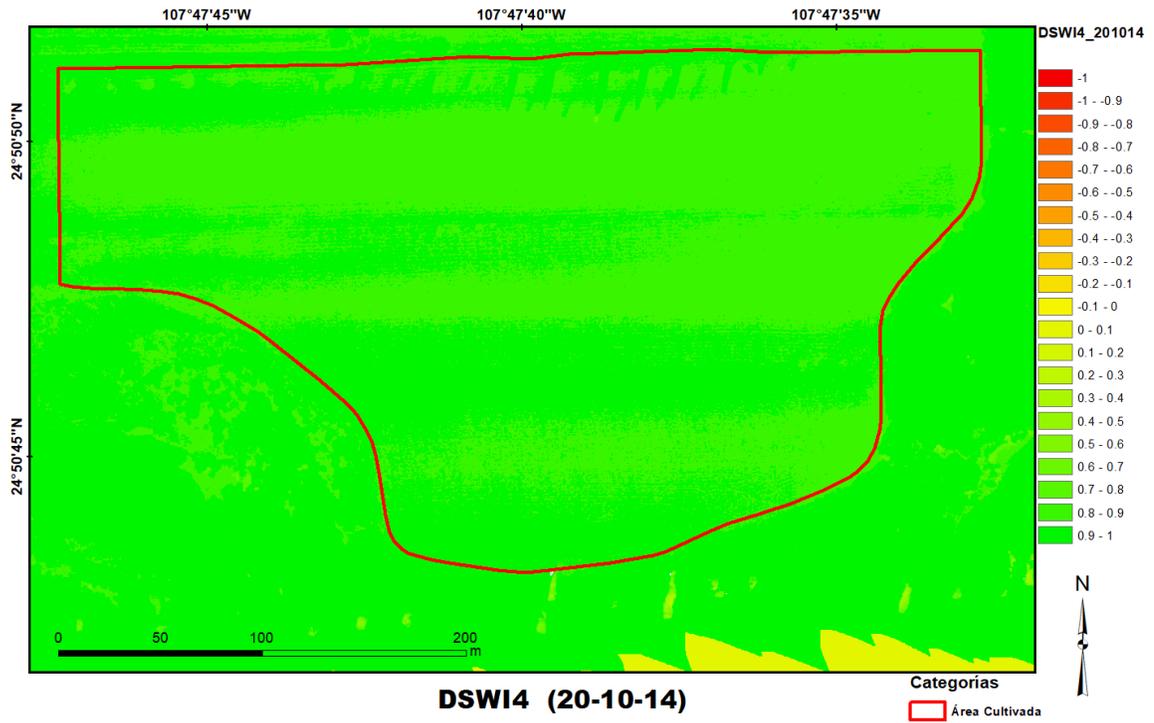


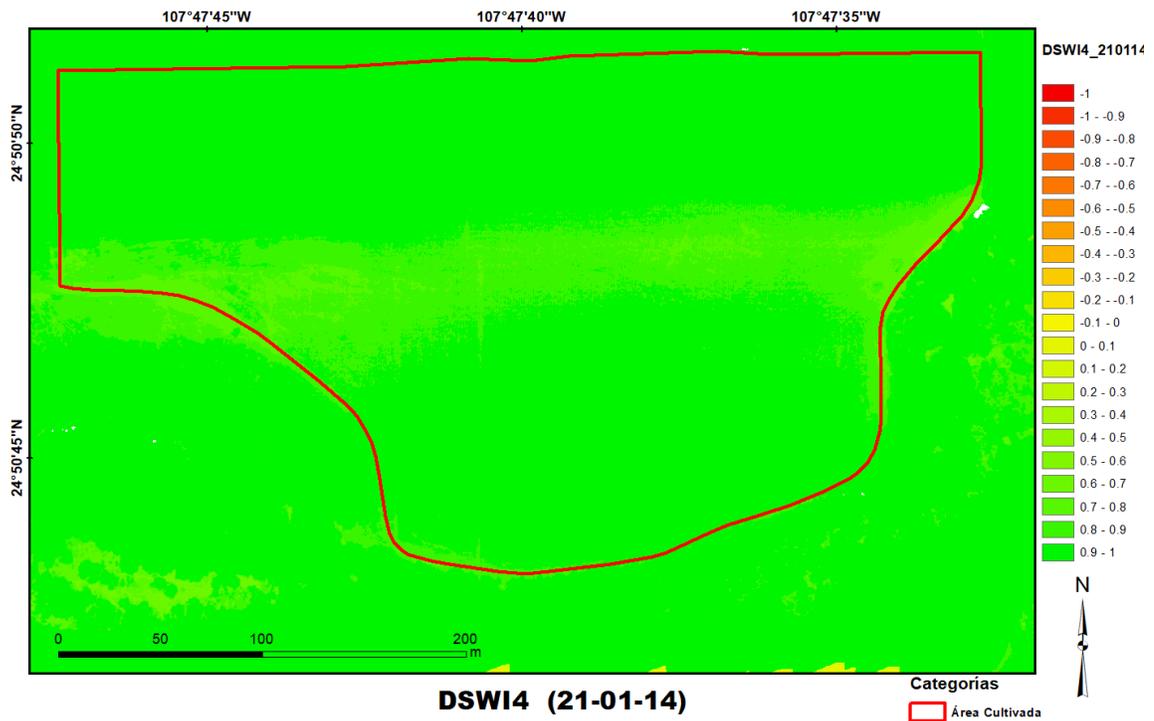
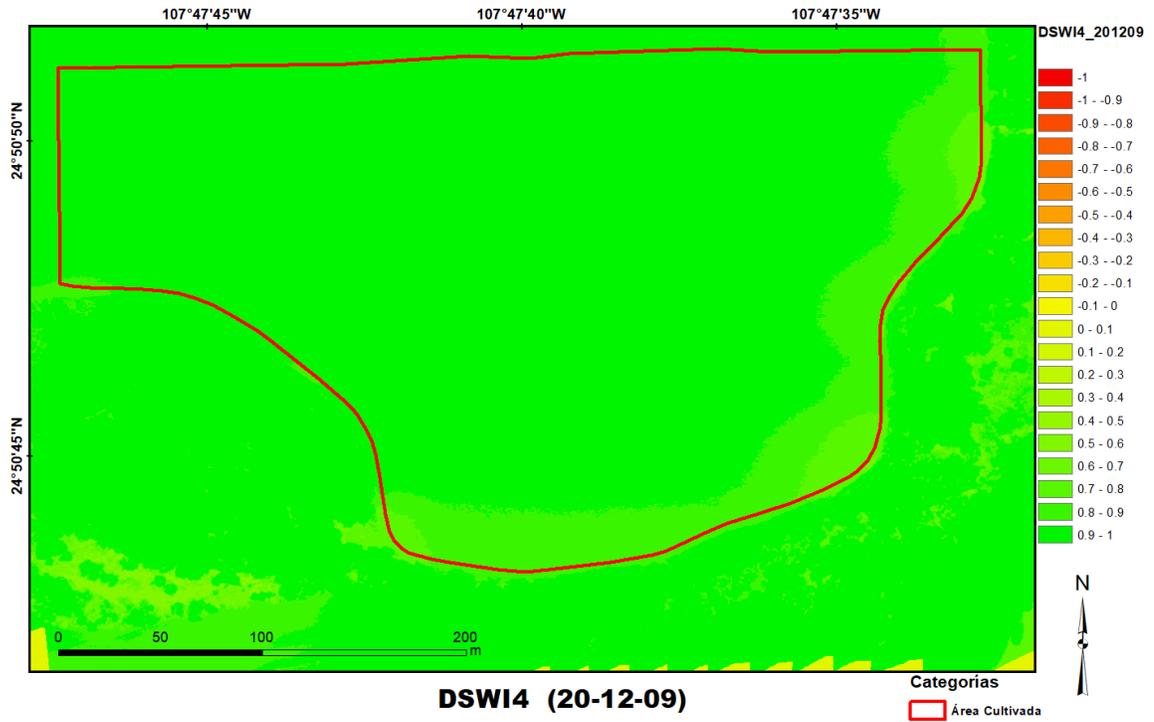


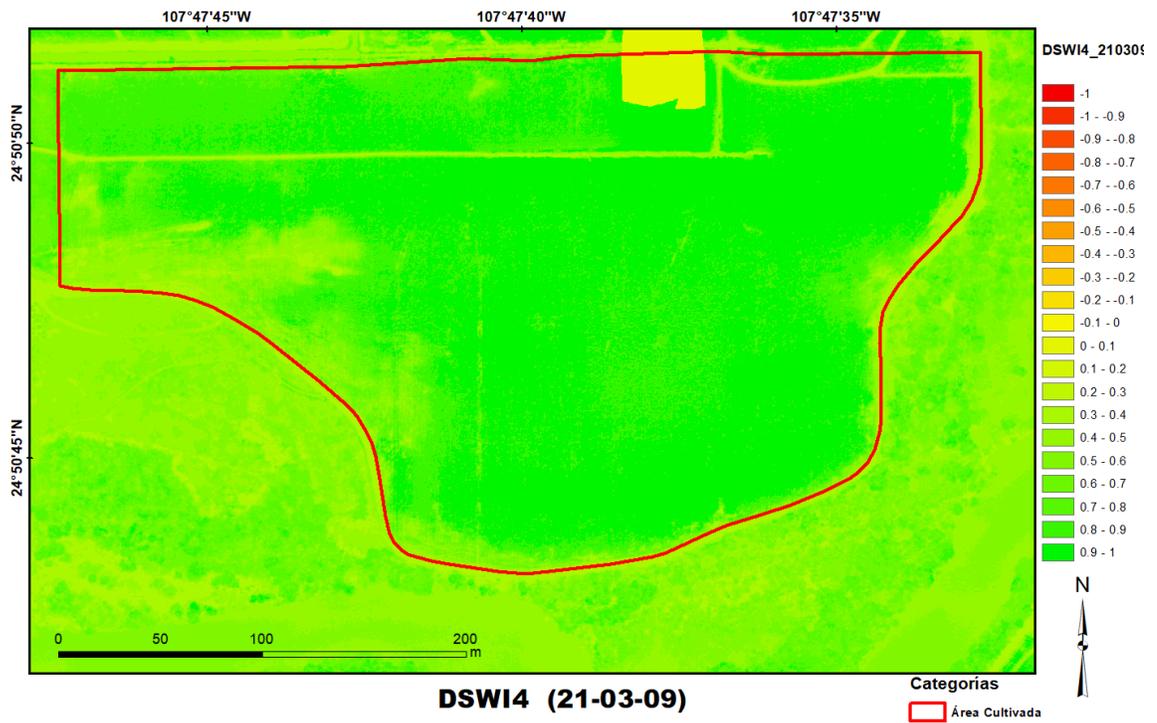




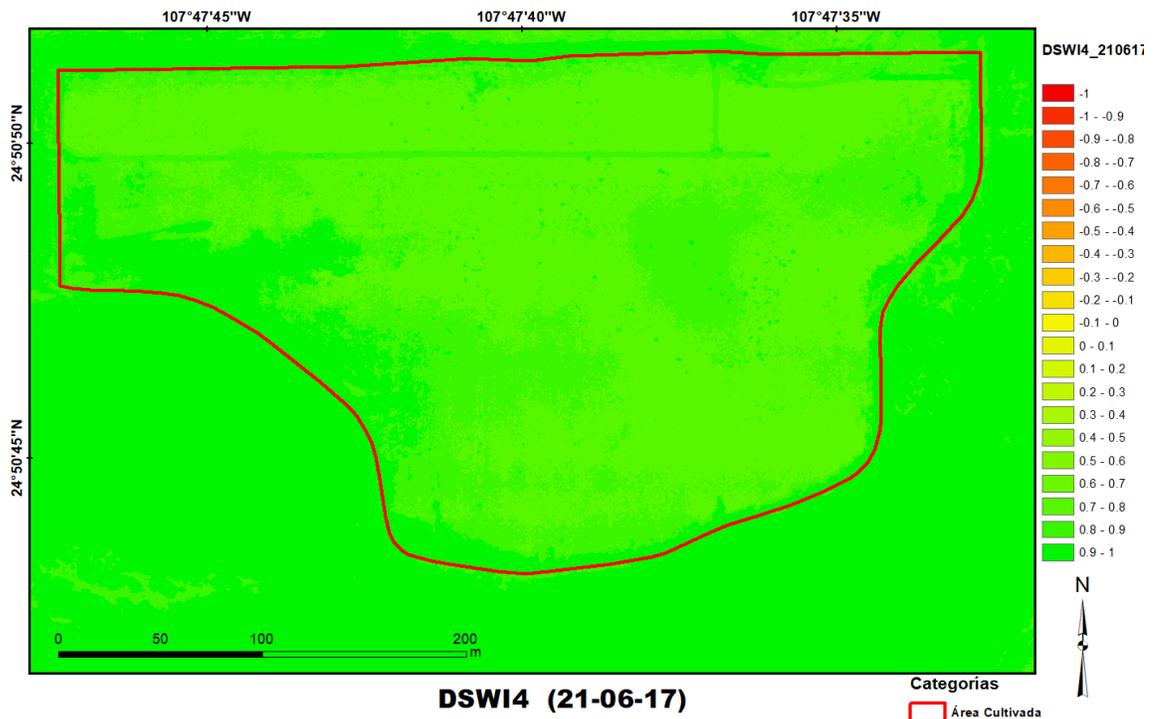
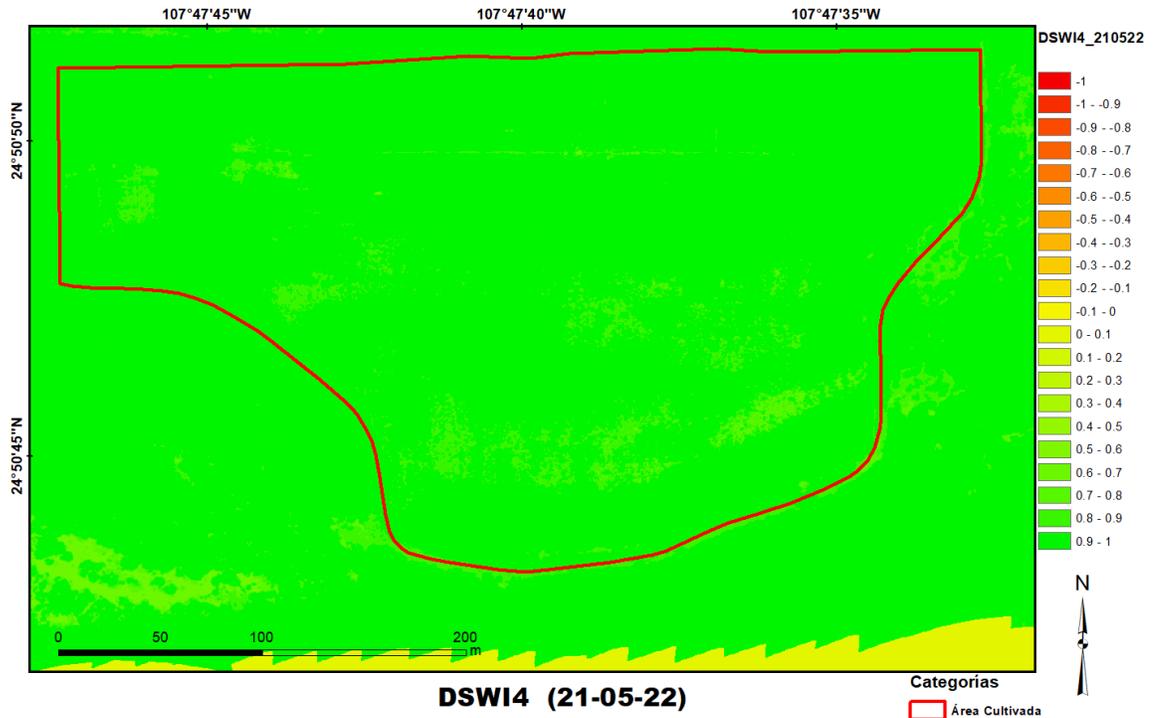
## 4.5 Mapas DSWI-4











## 4.6 Mapas GNDVI

