

Universidad Autónoma de Sinaloa
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio - Facultad de
Informática Culiacán



**Plataforma de mapeo multiespectral basada en
hardware-software abierto para aplicaciones en
agricultura de precisión.**

T E S I S

Como requisito para obtener el grado de:
Maestro en ciencias de la información

Presenta:

Lic. Karen Paola Romero Bringas

Directores:

Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz

Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra

Culiacán, Sinaloa. Enero del 2023



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

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



Dedicatoria

*Dedicada a la memoria de mi padre,
aunque ya no está aquí,
sus enseñanzas
me inspiran a seguir.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios, por sus bendiciones, por darme salud y sabiduría.

A mi madre, por su esfuerzo y enseñanzas, a mis hermanos y Emmanuel, por siempre creer en mí, cuidarme, estar conmigo siempre.

A mis directores de tesis Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz y Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra, por su apoyo y guía en este proceso de tesis, donde me proporcionaron tanto conocimiento científico y así como sus grandes consejos, agradeciendo su paciencia, así como su inspiración para nuevas metas. Al Dr. Carlos Alfonso López Orona por brindarme las instalaciones para realizar la parte experimental de mi estudio.

A mis maestros por sus grandes enseñanzas para desarrollarme profesionalmente y transmitirme su sabiduría, así como al personal administrativo, por dedicar parte de su tiempo para desarrollarme en mi formación profesional.

A mis compañeros de Posgrado, por los grandes momentos compartidos, por su apoyo, compañerismo y sin duda su enorme amistad, ya que sin ellos este camino no hubiera sido el mismo.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, en especial al departamento de Posgrado en Ciencias de la Información, por brindarme la oportunidad de ingresar y realizar los estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado.

Índice general

Índice en general	IV
Índice de figuras	v
Índice de tablas	VIII
Resumen	IX
Abstract	x
Estructura de Tesis	XI
1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivo General	3
1.3. Objetivos Específicos	3
1.4. Hipótesis	4
2. Antecedentes	5
2.1. Marco Teórico	5
2.1.1. Agricultura de precisión	5
2.1.2. Clorosis	6
2.1.3. Necrosis en plantas	8
2.1.4. Espectro electromagnético	8
2.1.5. Fotogrametría	9
2.1.6. Índices de vegetación	10
2.1.7. NDVI	10
2.1.8. NRBVI	13
2.1.9. NGBVI	13

2.1.10. VANT	13
2.1.11. GSD	15
2.1.12. Ortomosaico	16
2.1.13. Nube de puntos densa	17
2.1.14. Modelo digital de elevaciones	17
2.2. Estado del arte	18
3. Metodología	24
3.1. Diseño de hardware y software	25
3.1.1. Materiales	25
3.2. Adquisición de datos desde un VANT (Phantom 3SE)	32
3.2.1. Levantamiento fotogramétrico aéreo	32
3.2.2. Construcción de Ortomosaicos Mediante el Software Agisoft	33
3.3. Índices de vegetación	35
3.3.1. Aplicación de NDVI	37
3.3.2. Aplicación de NRBVI	41
3.3.3. Aplicación de NGBVI	44
3.4. Algoritmo de cuantificación	46
3.5. Análisis de costos	47
4. Resultados y Discusión	50
4.1. Cultivo de cebolla investigación de tratamientos (nitrógeno, nitrato, amonio y urea).	53
4.2. Cultivo de maíz	61
5. Conclusiones	77
Trabajo a futuro	78
Bibliografía	79
Anexos	84

Índice de figuras

2.1. Agricultura de precisión (Leonard, 2015)	6
2.2. Ejemplo de hojas cloróticas (Prasad, 2003)	7
2.3. Ejemplo de hojas con necrosis (Gunter, Egel, 2015).	7
2.4. Espectro Electromagnético (Moreno et al., 2018)	9
2.5. Ejemplo de imagen aérea (Collier, 2020)	10
2.6. Infrarrojo cercano (Toribio, 2020)	11
2.7. Ejemplo de variación del NDVI (Toribio, 2020)	12
2.8. Ejemplo vehículo aéreo no tripulado	15
2.9. Ejemplo de ortomosaico(Arc, 2021).	16
2.10. Ejemplo Nube de Puntos Densa (Lárrede de, 2020)	17
2.11. Ejemplo Mapa Digita de Elevaciones(Gis, 2016)	18
3.1. Diagrama de la metodología empleada	24
3.2. Ejemplo de VANT PHANTOM 3 SE	26
3.3. Ejemplo de una imagen obtenida con una cámara NoIR, Jardines de Ciudad universitaria.	27
3.4. Ejemplo de una imagen obtenida con la cámara FLIR, Jardines de ciudad universitaria.	28
3.5. Conexión de GPS a raspberry (Das, 2019)	29
3.6. Fuente externa de Alimentación	29
3.7. Diagrama utilizado para la adquisición de imágenes	30
3.8. Vistas del equipo montado sobre un Phantom 3SE	31
3.9. Ejemplo del programa DJI GS Pro (trayectoria de vuelo)	33
3.10. Imágenes del levantamiento fotogramétrico aéreo	34
3.11. Procesos en Agisoft	34
3.12. Ejemplos de ortomosaicos	35
3.13. Diagrama de índices de vegetación	36
3.14. Equivalencia de escalas de grises y escala JET	37

3.15. Imagen NoIR de la cancha de baseball en cu (UAS)	39
3.16. Imagen NDVI de la cancha de baseball en cu (UAS)	40
3.17. Imagen NDVI con paleta jet de la cancha de baseball en cu (UAS) . .	40
3.18. Imagen RGB de la cancha de baseball en cu (UAS)	42
3.19. Resultado NRBVI de cancha de baseball en cu (UAS)	43
3.20. NGBVI escala de grise de cancha de baseball en cu (UAS)	45
3.21. NGBVI JET de cancha de baseball en cu (UAS)	46
4.1. Separación de zonas	51
4.2. NRBVI JET Facultad de Agronomía (UAS)	52
4.3. NGBVI JET Facultad de Agronomía (UAS)	52
4.4. NDVI JET Facultad de Agronomía (UAS)	53
4.5. Ortomosaicos de Cultivo de cebolla	55
4.6. Índices de vegetación para cultivo de cebolla	56
4.7. Gráfica de repeticiones por tratamiento NDVI	58
4.8. Gráfica de repeticiones por tratamiento NGBVI	58
4.9. Gráfica de repeticiones por tratamiento NRBVI	59
4.10. Gráfica del promedio de repeticiones por tratamientos NDVI	59
4.11. Gráfica del promedio de repeticiones por tratamientos NGBVI	60
4.12. Gráfica del promedio de repeticiones por tratamientos NRBVI	60
4.13. Resultados 04 de mayo 2022	63
4.14. Resultados 03 de junio 2022	64
4.15. Gráficas por tratamientos de resultados para día 4 mayo 2022 con el índice de vegetación NDVI	65
4.16. Gráficas por promedio de tratamientos de resultados para día 4 mayo 2022 con el índice de vegetación NDVI	66
4.17. Gráficas de barra por promedio de tratamientos de resultados para día 4 mayo 2022 con el índice de vegetación NDVI	66
4.18. Tratamiento para día 04 mayo 2022 con NRBVI	67
4.19. Promedio por tratamiento para día 04 mayo 2022 con NRBVI	67
4.20. Gráfica de barra del promedio por tratamiento para día 04 mayo 2022 NRBVI	68
4.21. Tratamiento para día 04 mayo 2022 con NGBVI	68
4.22. Gráfica del promedio por tratamiento de resultados para día 04 mayo 2022 con el índice de vegetación NGBVI	69
4.23. Gráfica de barra del promedio por tratamiento de resultados para día 04 mayo 2022 con el índice de vegetación NGBVI	69
4.24. Tratamientos para día 3 de junio 2022 con NDVI	71

4.25. Promedio para día 3 de junio 2022 NDVI	71
4.26. Gráfica de barra por promedio de tratamiento para día 3 de junio 2022 NDVI	72
4.27. Tratamientos de resultados para día 3 de junio 2022 con NRBVI . . .	72
4.28. Promedio de tratamiento para día 3 de junio 2022 NRBVI	73
4.29. Gráfica de barra por promedio para día 3 de junio 2022 NRBVI . . .	73
4.30. Tratamientos de resultados para día 3 de junio 2022 con NGBVI . . .	74
4.31. Promedio de tratamiento para día 3 de junio 2022 NGBVI	74
4.32. Gráfica de barra por promedio de tratamiento para día 3 de junio 2022 NGBVI	75

Índice de tablas

3.1. Precios equipos en el mercado	47
3.2. Costos de Hardware Utilizado	48
4.1. Especificación de zonas del día 15 de marzo	50
4.2. Concentración de Tratamiento	54
4.3. Distribución Tratamientos	54
4.4. Resultados del Algoritmo de Cuantificación del Cultivo de Cebollas	57
4.5. Distribución de Nitrógeno	62
4.6. Resultados del Algoritmo de Cuantificación del Cultivo de Maíz	65
4.7. Resultados del Algoritmo de Cuantificación del Cultivo de Maíz del día 03 de junio 2022	70

Resumen

La agricultura de precisión es un tema que se encuentra en desarrollo y constante investigación. Las cámaras multiespectrales y los drones son herramientas que nos ayuda a saber el estado de los cultivos.

Es por ello, que el presente trabajo de investigación plantea el proceso para desarrollar e implementa una “Plataforma de mapeo multiespectral basada en hardware-software abierto para aplicaciones en agricultura de precisión”. El cual tiene como fin el desarrollo de una metodología para detección de patrones anormales en plantas a través de un dispositivo de hardware y software abierto con ayuda de un vehículo aéreo no tripulado.

Durante este trabajo de investigación se realizaron múltiples levantamientos para la adquisición de datos, resultando interesantes dos casos de estudio, uno es un cultivo de cebolla que fue tratado con nitrógeno, nitrato, amonio y urea. Mientras, el otro caso es un cultivo de maíz en el que se investiga el efecto de distintas concentraciones de nitrógeno. Para ambos casos se construyeron ortomosaicos en tres índices de vegetación que son el NDVI, NGBVI y NRBVI siendo los últimos dos índices de reciente creación desarrollados por el grupo de trabajo en el que me encuentro.

Abstract

Precision agriculture is a topic that is in constant development and research. Multispectral cameras and drones are tools that help us to know the state of the crops.

For this reason, this research paper outlines the process to develop and implement a "multispectral mapping platform based on open hardware-software for applications in precision agriculture". The purpose of which is the development of a methodology for the detection of abnormal patterns in plants through an open hardware and software device with the help of an unmanned aerial vehicle.

During this research work, multiple surveys were carried out for the acquisition of data, resulting in two interesting study cases, one is an onion crop that was treated with nitrogen, nitrate, ammonium and urea. Meanwhile, the other case is a corn crop in which the effect of different nitrogen concentrations is being investigated. For both cases, orthomosaics were built in three vegetation indices: NDVI, NGBVI and NRBVI, the last two indices being recently created, developed by the working group in which I am part of.

Estructura de Tesis

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción al tema de agricultura de precisión y de mapeo multiespectral, así como la justificación de esta investigación, se señalan los objetivos generales y particulares para el desarrollo de dicha investigación. Al final de este capítulo, se formula la hipótesis de este trabajo.

En el capítulo 2 se describen conceptos para entrar en contexto con el trabajo de investigación.

El capítulo 3 se describe de forma detallada la metodología seguida para realizar esta investigación, así como se describen las herramientas necesarias para cumplir con los objetivos.

El capítulo 4 describe dos casos de estudio y sus resultados, uno es un cultivo de cebolla tratado con nitrógeno, nitrato, amonio y urea y otro estudio en un campo de cebolla tratado con nitrógeno a distintas concentraciones.

Finalmente, en el capítulo 5 se encuentran las conclusiones a las que se llegó en este trabajo de investigación.

Capítulo 1

Introducción

La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de insumos, dependiendo del potencial y de la necesidad de cada punto de las áreas de manejo.

La agricultura de precisión es un tema que se encuentra en desarrollo y constante investigación. Las cámaras multiespectrales y los drones son herramientas que nos ayudan a saber el estado de los cultivos (Montes De Oca et al., 2018). Drones equipados con una serie de sensores, microcontroladores y cámaras multiespectrales, pueden ayudar a intervenir rápidamente y frustrar amenazas o daños en los productos agrícolas. El uso de estas herramientas puede dar una ayuda válida para intervenir rápidamente y frustrar las amenazas, evitando grandes daños a los productos agrícolas (Potrino et al., 2018).

Los sistemas de visión por computadora ya se emplean ampliamente en diferentes segmentos de la producción agrícola y la producción industrial de alimentos. El uso de tales sistemas proporciona un análisis objetivo de las muestras, produciendo datos descriptivos precisos. A través de estos sistemas es posible automatizar tareas laboriosas, en

una forma no destructiva, produciendo datos adecuados para futuros análisis (Patrício, Rieder, 2018).

Este trabajo se enfoca en el desarrollo de una plataforma de mapeo multiespectral, a partir de un VANT (vehículo aéreo no tripulado) comercial, adaptándole cámaras multiespectrales para lograr tener un equipo basado en hardware software abierto para tareas de agricultura de precisión, esto a través de la recopilación de imágenes aéreas multiespectrales para el cálculo de índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), NRBVI (Índice de Vegetación Rojo – Azul Normalizado) y el NGBVI (Índice de Vegetación Verde – Azul Normalizado). Gracias a este sistema podemos obtener información confiable de forma rápida de los campos de cultivo, y así poder monitorear y analizar el estado de las plantas.

Una de las ventajas de utilizar VANT con respecto a los satélites, es que los VANT pueden proporcionar una mejor resolución espacial, temporal, angular y espectral. Por ejemplo, mediante VANTs podemos obtener una resolución espacial de metros o centímetros y una resolución temporal a nivel de horas, mientras que con los satélites la resolución espectral es de 30 a 250m y la resolución temporal en semanas, además que estas fotografías aéreas son caras y no se pueden ajustar a escalas arbitrarias (Ganju, 2012).

1.1. Justificación

En la agricultura es muy importante detectar de forma rápida cualquier problema que se presente en las plantas, ya que esto puede significar una gran pérdida económica. Nos enfrentamos a problemas como la falta de nutrientes, detección de actividad de fotosíntesis, estrés hídri-

co, estrés climático y una gran cantidad de virus que afectan a las plantas. En el mercado existen algunas opciones de visión multispectral aplicadas a cultivos e invernaderos, pero sus costos son muy altos. Es por ello que nos enfocamos en el desarrollo de un dispositivo que nos permita realizar el monitoreo de las plantas de forma práctica, no invasiva y de bajo costo.

1.2. Objetivo General

Desarrollar una metodología para detección de patrones visuales en plantas basada en una plataforma de mapeo multispectral de hardware y software abierto realizado desde un vehículo aéreo no tripulado.

1.3. Objetivos Específicos

- Revisión del estado del arte en el tema de mapeo multispectral.
- Implementar hardware y software para adquisición de imágenes multispectrales montado en un VANT, para aplicaciones en agricultura de precisión.
- Obtener imágenes RGB y NoIR para realizar un procesamiento fotogramétrico digital para obtener los ortomosaicos y sus bandas espectrales.
- Analizar y validar los mapas generados.

1.4. Hipótesis

Es posible detectar patrones en plantas bajo condiciones de estrés, mediante el uso de visión por computadora tanto infrarrojo y utilizando nuevos índices de vegetación RGB de hardware y software abierto desde un vehículo aéreo no tripulado.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un sistema de manejo agrícola basado en información y tecnología para identificar, analizar y gestionar la variabilidad espacial y temporal del suelo dentro de los campos para una rentabilidad, sostenibilidad y rendimiento óptimos (Gomiero, 2019).

Según la definición formal de la sociedad internacional de agricultura de precisión, la Agricultura de Precisión se define como una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otra información para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola (ISPA, 2019).

En resumen, la agricultura de precisión es uno de los medios de producción de datos en el sitio para guiar la toma de decisiones, y así administrar el cultivo para un mejor rendimiento y calidad (Leonard, 2015).

La Figura 2.1 es un ejemplo de como funciona la agricultura de precisión gestionando los datos obtenidos.

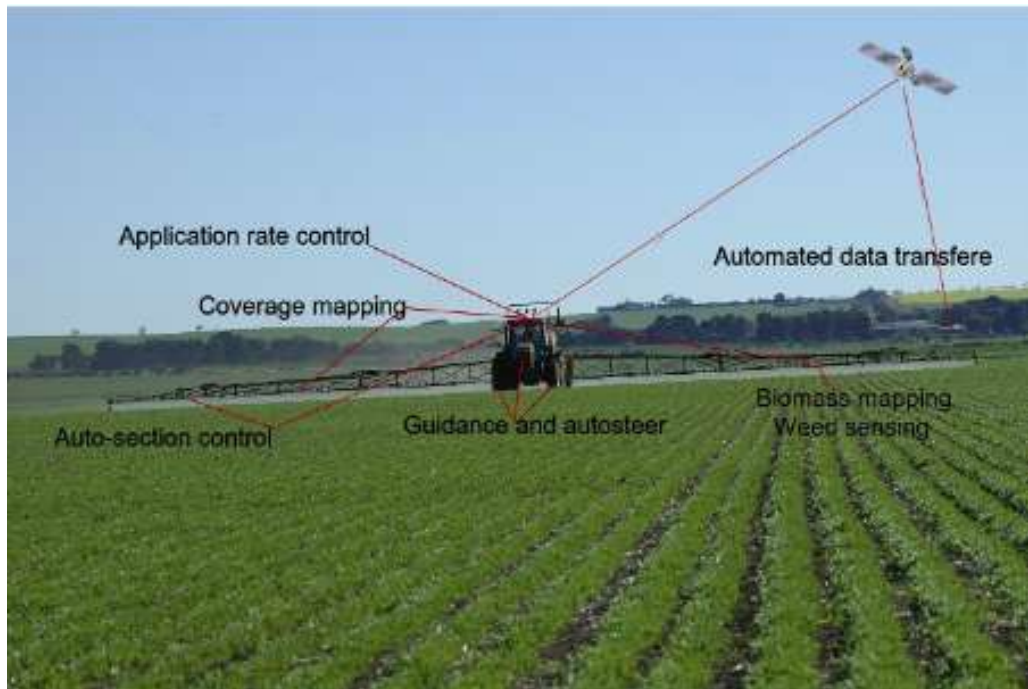


Figura 2.1: Agricultura de precisión (Leonard, 2015)

2.1.2. Clorosis

La clorosis es un amarillamiento de las hojas normalmente verdes debido a la falta de clorofila. Muchos factores, solos o combinados, contribuyen a la clorosis. Algunas de las causas más comunes son deficiencias de nutrientes relacionadas con la alcalinidad del suelo, sequía, drenaje deficiente, raíces dañadas, raíces compactadas (Arboretum, 2022), la Figura 2.2 muestra los síntomas de clorosis por falta de hierro en hojas de frijol de izquierda a derecha se muestra mayor daño en cada hoja (Prasad, 2003).



Figura 2.2: Ejemplo de hojas cloróticas (Prasad, 2003)



Figura 2.3: Ejemplo de hojas con necrosis (Gunter, Egel, 2015).

2.1.3. Necrosis en plantas

La necrosis se describe como la muerte del tejido por lesión o enfermedad, especialmente en un área localizada. Tal área se vuelve generalmente de color marrón o negro. la necrosis puede ocurrir en hojas, tallos, o raíces, puede estar en el margen de la hoja y puede ocurrir o no con clorosis, en la Figura 2.3 vemos un ejemplo de estas lesiones (Gunter, Egel, 2015).

2.1.4. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas.

- Espectro visible (0.4 a 0.7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que perciben nuestros ojos, siendo rojo, verde y azul los colores primarios que nuestros ojos perciben en las siguientes longitudes de onda.
 - Rojo (0.6 a 0.7 μm).
 - Verde (0.5 a 0.6 μm).
 - Azul (0.4 a 0.5 μm).
- Infrarrojo cercano (IRC: 0.7 a 1.3 μm).
- Infrarrojo medio (IRM: 1.3 a 8 μm).
- Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μm).
- microondas (por encima de 1mm) (Salinero, 2008).

La Figura 2.4 ilustra como se distribuye el espectro electromagnético.

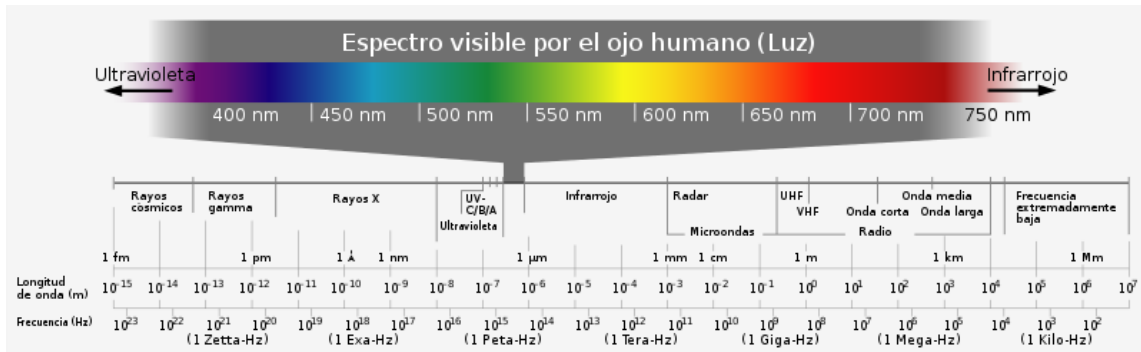


Figura 2.4: Espectro Electromagnético (Moreno et al., 2018)

2.1.5. Fotogrametría

Según Colwell (1997), la fotogrametría se define como la combinación de arte, ciencia y tecnología para obtener información confiable sobre objetos físicos y el medio ambiente, a través de procesos de registro, medición e interpretación, representados por imágenes digitales, derivados de sistemas de sensores sin contacto, la Figura 2.5 muestra un ejemplo de ello.

Horswell (2013) comenta que la fotogrametría es una técnica de medición de coordenadas tridimensionales que utiliza las fotografías como medio fundamental para la medición. Al tomar fotografías desde al menos dos lugares diferentes, se generan líneas de visión desde cada cámara hasta puntos del objeto. Estas líneas de visión, se cruzan matemáticamente para producir las coordenadas tridimensionales de los puntos de interés. La triangulación es la forma en que los dos ojos humanos trabajan juntos para medir la distancia, lo que se denomina percepción de profundidad.



Figura 2.5: Ejemplo de imagen aérea (Collier, 2020)

2.1.6. Índices de vegetación

Un Índice de Vegetación, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert et al, 1997).

2.1.7. NDVI

Rouse et al. (1973) buscaban documentar cuantitativamente los cambios en la vegetación, por lo tanto, desarrollo un modelo teórico para medir el verdor relativo de la vegetación natural, denominado Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

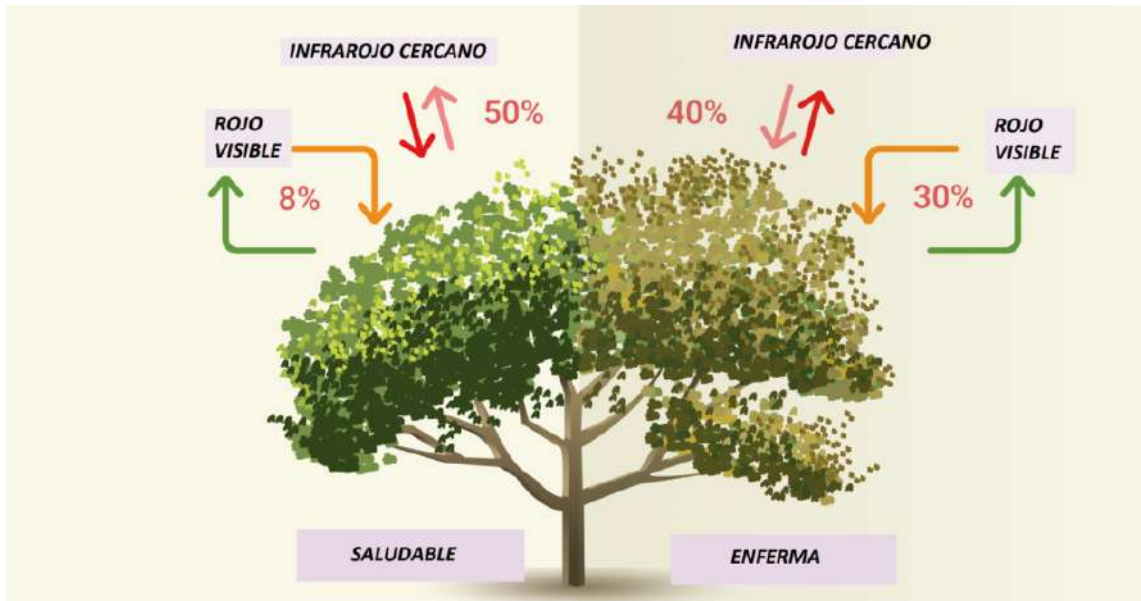


Figura 2.6: Infrarrojo cercano (Toribio, 2020)

El índice de vegetación de diferencia normalizada funciona así, la vegetación densa está asociada a una alta actividad fotosintética. En una planta sana el pigmento de clorofila absorbe la mayor parte de la luz roja visible, mientras que refleja la mayor parte de la luz infrarroja cercana, en la Figura 2.6 vemos un ejemplo de esto.

El NDVI se calcula de la siguiente manera, la diferencia en los valores de reflectancia de la Banda NIR y la Banda RED, sobre la suma de estos valores, como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2.1)$$

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado, es el índice de vegetación más conocido de todos y es el más utilizado para todo tipo

de aplicaciones. Debido a que es sencillo de calcular y sus resultados varían en un rango de -1 y $+1$, lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes.

En la Figura 2.7 Podemos observa una representación de la variación del NDVI donde:

- Valores muy bajos de NDVI, del -1 a 0 corresponden a vegetación muerta u objetos inanimados.
- valores de NDVI de 0 a 0.33 corresponden a plantas enfermas.
- valores de NDVI de 0.33 a 0.66 corresponden a plantas medianamente sanas.
- Valores muy altos de NDVI Corresponden a plantas sanas o árboles.

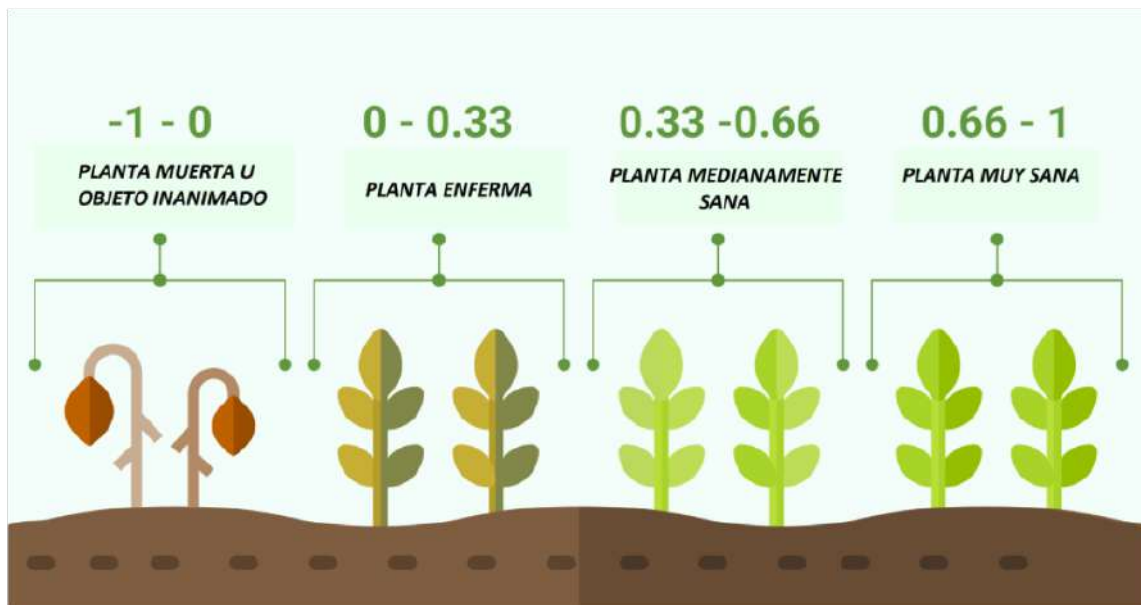


Figura 2.7: Ejemplo de variación del NDVI (Toribio, 2020)

2.1.8. NRBVI

El Índice de Vegetación Rojo – Azul Normalizado NRBVI (del inglés Normalized Red-Blue Vegetation Index) es un índice que busca resaltar áreas de clorosis y descartar píxeles donde no hay vegetación. Se estima a partir de imágenes RGB (Yee Rendon et al., 2021), como se puede observar en la Ecuación 2.2 se resta la máscara roja menos la azul y se divide por el resultado del pixel más alto de esta resta.

$$NRBVI = \frac{RED - BLUE}{max \cdot (RED - BLUE)} \quad (2.2)$$

2.1.9. NGBVI

El Índice de Vegetación Verde – Azul Normalizado NGBVI (del inglés Normalized Green-Blue Vegetation Index), se enfoca en resaltar la clorosis de las plantas, pero con el uso de la máscara verde y azul, como se puede observar en la Ecuación 2.3 se resta la máscara verde menos la azul y se divide por el resultado del pixel más alto de esta resta (Yee Rendon et al., 2021).

$$NGBVI = \frac{GREEN - BLUE}{max \cdot (GREEN - BLUE)} \quad (2.3)$$

2.1.10. VANT

Los VANT (vehículo aéreo no tripulado) o dron fueron utilizados por primera vez para la vigilancia militar a mediados de la década de

1960, los (UAV, por sus siglas en inglés) más pequeños se han adoptado para la fotografía aérea y una alternativa más económica al uso de aviones de ala fija (Collier, 2020).

El uso de los VANT ha generado situaciones críticas de seguridad, que hicieron necesaria la elaboración de normativas para su uso, en México estos son regulados por la norma oficial mexicana "NOM-107-SCT3-2019", que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano.

Existen muchos tipos de drones disponibles en la actualidad, que varían en tamaño, capacidad y precio. Pero dos de los tipos más comunes son cuadricópteros y de ala fija. Para estudios como el mapeo costero, por ejemplo, se utilizan VANT equipados con una cámara RGB para recolectar imágenes aéreas. Altitudes entre 60 y 120 m con un 75 % de superposición entre cada línea, se utilizan para medir áreas de 100 m² a varios km². La cámara de un dron suele estar apuntando directamente hacia abajo. Para mejor referencia se pueden utilizar como puntos de control terrestre (GCP), se colocan en el área encuestada y se toman puntos GPS en cada GCP. Los GCP deben ser lo suficientemente grandes y tener suficiente contraste en comparación con el suelo para ser claramente visibles en las fotos tomadas desde el dron (Trembanis et al., 2021) la Figura 2.8 muestra un vehículo aéreo no tripulado.



Figura 2.8: Ejemplo vehículo aéreo no tripulado

2.1.11. GSD

La distancia de la muestra del suelo GSD (del inglés Ground Sample Distance), es una métrica útil para la fotogrametría y para las mediciones en proyectos de cartografía y topografía con drones. La GSD se define como la distancia entre los centros de dos píxeles adyacentes medida sobre el terreno. Esta métrica está relacionada con la longitud focal de la cámara, la resolución del sensor de la cámara y la distancia de la cámara al sujeto. Se describe en centímetros por píxel (cm/px).

$$GSD = \frac{\textit{AltituddeVuelo} \times \textit{Alturadelsensor}}{\textit{DistanciaFocal} \times \textit{AlturayAnchuradelaimagen}} \quad (2.4)$$

2.1.12. Ortomosaico

Un ortomosaico u ortofoto es una colección de imágenes, organizadas como mosaicos, en una imagen fotogramétricamente ortorrectificada. Además, es corregida la distorsión geométrica y se realiza un balance de color de las imágenes (Arc, 2021).

En las Figuras 2.9a y 2.9b se muestran ejemplos de como a partir de muchas imágenes se crea una imagen más grande.

Para la generación de ortomosaicos es necesario primero generar una Nube de puntos densa y después un modelo digital de elevaciones, a continuación se explica a detalle en que consisten cada uno de ellos.



(a) Ejemplo de partes de imágenes para la construcción del ortomosaico.

(b) Ejemplo de ortomosaico completo.

Figura 2.9: Ejemplo de ortomosaico(Arc, 2021).

2.1.13. Nube de puntos densa

Una nube de puntos es el primer producto resultante del escaneo o la fotogrametría digital, como ejemplo la Figura 2.10. Se compone por millones de puntos posicionados tridimensionalmente en el espacio, formando con exactitud milimétrica una entidad física y representando su superficie externa. La nube de puntos contiene una amplia información métrica sobre las superficies escaneadas, así como la relativa a su color y reflectividad del material.



Figura 2.10: Ejemplo Nube de Puntos Densa (Lárrede de, 2020)

2.1.14. Modelo digital de elevaciones

Un modelo digital de elevaciones (DEM) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio

del mar.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados (INE, 2021). Ejemplo de un modelo digital de elevaciones es la Figura 2.11.

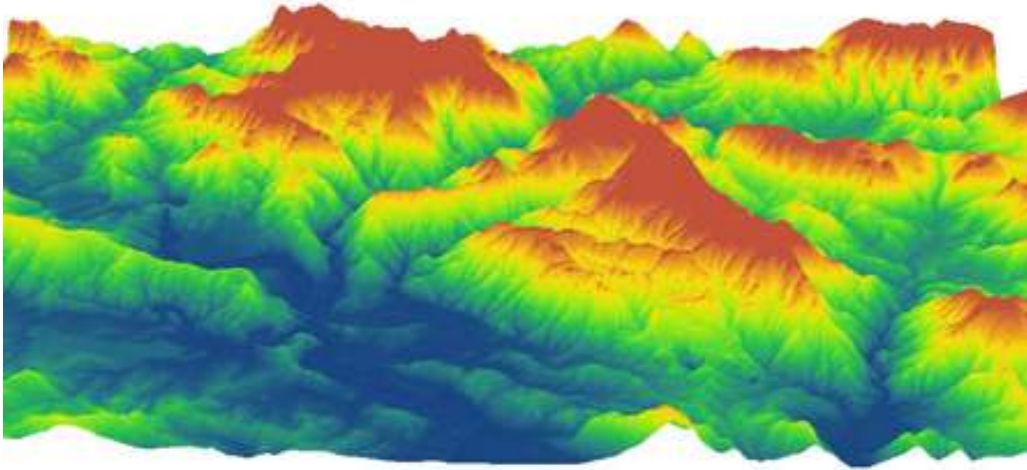


Figura 2.11: Ejemplo Mapa Digita de Elevaciones(Gis, 2016)

2.2. Estado del arte

La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de insumos, dependiendo del potencial y de la necesidad de cada punto de las áreas de manejo. Es un tema que se encuentra en desarrollo y constante investigación. Las cámaras multiespectrales y los VANT son herramientas que nos

ayudan a saber el estado de los cultivos. Proponen un sistema fácil de implementar y de bajo costo, con la finalidad de adquirir imágenes multiespectrales generando ortomosaicos para su posterior procesamiento (Montes De Oca et al., 2018).

Drones equipados con una serie de sensores, microcontroladores y cámaras multiespectrales, pueden ayudar a los agricultores durante su trabajo diario. El uso de esta herramienta puede dar una ayuda válida para los agricultores para intervenir rápidamente y frustrar la amenaza, evitando grandes daños a los productos agrícolas (Potrino et al., 2018).

Honrado et al. (2017) desarrollaron un VANT de ala fija, personalizado usando un fuselaje de espuma EPO y las alas de un VANT X-8, siendo capaz de transportar más carga útil y al mismo tiempo mantener un tiempo de vuelo de entre 45 y 80 minutos. Las imágenes son obtenidas a partir de cámaras RGB y NIR modificadas. Este equipo fue utilizado para el monitoreo de cultivos de arroz y maíz en Filipinas.

En el estudio de Moreno et al. (2018) utilizan NDVI y el índice VARI (Índice de Resistencia Atmosféricamente Visible), hacen un estudio de cómo complementar imágenes obtenidas por un VANT y por satélites. Explican que con los drones se puede obtener imágenes de mayor resolución que permita visualizar efectos que no se podrían obtener con imágenes de satélite. Explica cómo funciona el filtro de Bayer, como separa los colores de las imágenes.

Otro artículo habla sobre un estudio en el que usan termografía para identificar las relaciones cuantitativas entre CWSI/Índices y gs/RWC para sésamo. Los resultados mostraron que la termografía es un método rápido y preciso para la detección remota del estado del agua en las plantas de sésamo. La detección del estrés hídrico en sésamo utilizando

CWSI/Índices extraídos de las imágenes térmicas validó la eficacia del sistema de imágenes térmicas desarrollado. Se observó una diferencia de 1,5 °C entre las temperaturas del dosel previstas y medidas. Esto se debió a una sobreestimación de la temperatura medida por la cámara térmica. Este estudio reveló que la termografía sin contacto es capaz de detectar el estrés hídrico y estimar el RWC foliar en la planta de sésamo (Khorsandi et al., 2018).

Hsuan et al. (2018) en su estudio busca reconocer daño en cultivos de arroz, para ello utiliza un VANT para la obtención de datos sobre el cultivo, generando así ortomosaicos RGB para utilizar de referencia y ortomosaicos NDVI. Hacen una comparación de NDVI calculado a partir de imágenes y a partir del cálculo manual, sus resultados muestran más de un 90 % de similitud, demostrando que el cálculo del NDVI con imágenes es una técnica efectiva y que el uso de VANT ayuda a una inspección más rápida de los cultivos, permitiendo actuar de forma temprana.

En el estudio de Montes De Oca et al. (2018) desarrollan un sistema de imágenes para la obtención de información NDVI. Esto con un sistema de bajo costo que consiste en dos cámaras RGB, pero una de ellas es modificada para recopilar imágenes NIR, obtienen resultados favorables, pero solo es probado en pequeñas áreas.

Silva et al. (2018) su trabajo propone utilizar imágenes aéreas de cultivos captadas por un VANT, con el fin de conocer el estado de las plantas, esto se calcula utilizando NDVI, Proponen un algoritmo para clasificar zonas similares a partir de imágenes NDVI (K-means), lo que permite de forma más simple saber cómo actuar en cada zona de los cultivos. Para la toma de los datos se utilizó un VANT SX2 el cual es una aeronave de ala fija, mientras que para la captura de los datos se

utilizó una cámara canon S110 modificada. Además, argumentan que existe la necesidad de implementar técnicas de respuesta ante daños en plantas, ya que actualmente son los especialistas los que solucionan estos problemas.

Saura et al. (2019) buscan analizar el estado de un viñedo, a partir de un VANT y cámaras multiespectrales, en su estudio evalúan el estrés hídrico, el estado de las plantas y el estado del suelo con la finalidad de aumentar su producción, a partir de tecnologías como NDVI, NIRS y DEM.

Barbedo (2019) realizó una recopilación general sobre el estado del arte de la detección, cuantificación y clasificación de deficiencias de nutrientes vegetales utilizando imágenes digitales y aprendizaje automático.

Afriansyah et al. (2019) mapean una zona verde con un VANT y conectan todas las imágenes usando puntos de coincidencia, explica que entre mayor sea el número de imágenes que coincidan en un punto mayor será la calidad de la imagen final.

Kerkech et al. (2020) buscan detectar enfermedades en plantas, siguiendo tres pasos: 1 Alinear imágenes en el espectro visible e infrarrojo. 2 Segmentación de imágenes infrarrojas y visibles en cuatro categorías sombra, suelo, plantas sanas y plantas sintomáticas. 3 Reconstruir un mapa de plantas enfermas.

Un estudio realizado en china se enfoca en índices de crecimiento a través de una cámara multiespectral y un VANT. Este estudio ha demostrado que el índice WDRVI se puede utilizar para monitorear y evaluar el crecimiento de la remolacha azucarera en la etapa inicial

(Cao et al., 2020).

Patón (2020) explica que es posible determinar el índice NDVI modificando una cámara comercial. Al quitar el filtro Hot Mirror de las cámaras digitales se logra tener un espectro completo, UV, B, G, R y NIR, logrando tener 5 longitudes de onda para tres canales, el procedimiento consta de pasos que se pueden adaptar a cualquier cámara como la extracción del filtro de espejo caliente, uso del balance de blancos, calibración con carta de colores, normalización de imágenes y uso de las ecuaciones de predicción. El beneficio de esto es que al ser la resolución superior a cualquier imagen de satélite se puede determinar cambios de especies a escalas muy pequeñas.

Meivel, Maheswari (2020) En su estudio explica el desarrollo de un sistema de riego y fertilización con un VANT, con el fin de reducir el trabajo manual. Una cámara es controlada desde la computadora de la aeronave y los datos recopilados son analizados con el método VARI (Índice de resistencia atmosféricamente visible) y NDVI para el monitoreo de los cultivos, reportan resultados obtenidos en un lapso de tiempo.

Una investigación reciente de Yee Rendon et al. (2021), propone nuevos índices de vegetación RGB y modelos de clasificación de aprendizaje profundo, con esta metodología pueden identificar síntomas visuales del Virus del Mosaico del Tabaco (TMV) y del Virus de la Veta Amarilla del Chile Huasteco (PHYVV) en hojas de chile jalapeño. Los nuevos índices propuestos son el Índice de Vegetación Rojo – Azul Normalizado y el Índice de Vegetación Verde – Azul Normalizado, índices que se explicaron anteriormente.

Por otra parte, Solano Alvarez et al. (2022) realizaron un estudio donde el objetivo fue comparar los índices de vegetación NDVI y NGB-

VI para determinar la salud de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) que fueron tratadas con la bacteria *Bacillus cereus*-Amazcala como protector a la infección de *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* (Cmm) sus resultados muestran que los índices de vegetación NDVI Y NGBVI pueden usarse para medir el estado de las plantas.

Capítulo 3

Metodología

La metodología empleada en este trabajo de investigación es la siguiente, la primera parte es el equipamiento de hardware y software, después la adquisición de datos desde un VANT, con los datos obtenidos se construyen los ortomosaicos, después se aplican los índices de vegetación a los ortomosaicos y finalmente se utiliza el algoritmo de cuantificación para analizar los resultados obtenidos, en la Figura 3.1 se muestra el diagrama de la metodología empleada.



Figura 3.1: Diagrama de la metodología empleada

3.1. Diseño de hardware y software

De forma general se hace una descripción de las características de cada dispositivo utilizado para la construcción de la plataforma para la adquisición de imágenes.

3.1.1. Materiales

El VANT utilizado en el proceso de adquisición de datos fue un Phantom 3 SE de la compañía DJI en la Figura 3.2 podemos ver un ejemplo. Este VANT incorpora un sensor 1/2.3" CMOS de cámara que cuenta con 12 megapíxeles permitiendo la captura de fotos o videos con dimensiones de 1280 x 720 hasta 4000 x 3000.



Figura 3.2: Ejemplo de VANT PHANTOM 3 SE

Para la obtención de imágenes NoIR se cuenta con la Pi camera NoIR V2, el cual es un sensor que no tiene el filtro infrarrojo, cuenta con tres bandas NIR, azul y verde, para el cálculo del NDVI se utilizan la banda NIR y la banda azul. La cámara tiene una resolución es de 8 megapíxeles hasta (1280x720) y su resolución espectral es de alrededor de $0.88\mu\text{m}$ (longitud de onda corta), la Figura 3.3 es un producto de dicha cámara, tomado en los jardines de ciudad universitaria de la UAS. Esta cámara requiere de un pequeño filtro, que es un cuadro azul que se coloca en el lente de la cámara.



Figura 3.3: Ejemplo de una imagen obtenida con una cámara NoIR, Jardines de Ciudad universitaria.

Para la obtención de las imágenes térmicas se utilizó una cámara LEPTON 2.5 FLIR, Con un tamaño de 80x60, y una resolución espectral de $8\mu\text{m}$ a $14\mu\text{m}$, Infrarrojos de onda larga. La Figura 3.4 que es una imagen FLIR tomada en los jardines de ciudad universitaria de la UAS.



Figura 3.4: Ejemplo de una imagen obtenida con la cámara FLIR, Jardines de ciudad universitaria.

Raspberry pi 3B en una microcomputadora, se encarga de controlar la plataforma, con ella se controla las capturas de imágenes FLIR Y NoIR además de la obtención de las coordenadas correspondientes de las imágenes, a partir de un GPS GY-GPS6MV2, con una precisión que fluctúa entre 2.5m y 5m la Figura 3.5 ilustra la conectividad entre la Raspberry y el GPS.

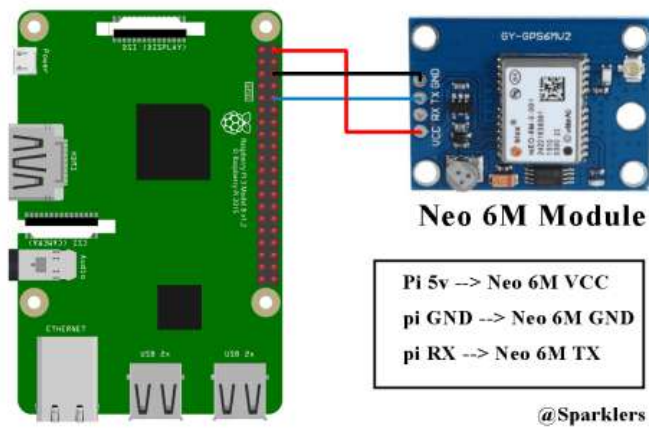


Figura 3.5: Conexión de GPS a raspberry (Das, 2019)

La microcomputadora y las cámaras FLIR y NoIR son alimentadas por un módulo de batería Hat externa de polímero de litio de 5V y 3000mAh, en la Figura 3.6 se muestra una imagen de ella.



Figura 3.6: Fuente externa de Alimentación

Los elementos descritos anteriormente incorporan una plataforma de mapeo multiespectral, se utiliza el PHANTOM 3SE que es un VANT comercial como vehículo de transporte, y se aprovecha su cámara RGB así como sus sistemas de navegación para la generación de las trayectorias. Adicionalmente, se monta al VANT una Raspberry que actúa como controlador de las cámaras FLIR, NoIR y el GPS, alimentados con una batería externa. Las cámaras se colocaron en el porte inferior de la aeronave y el GPS en la parte superior y a los laterales la batería y raspberry para mantener el equilibrio, en la Figura 3.7 se ilustra un diagrama de lo anterior.

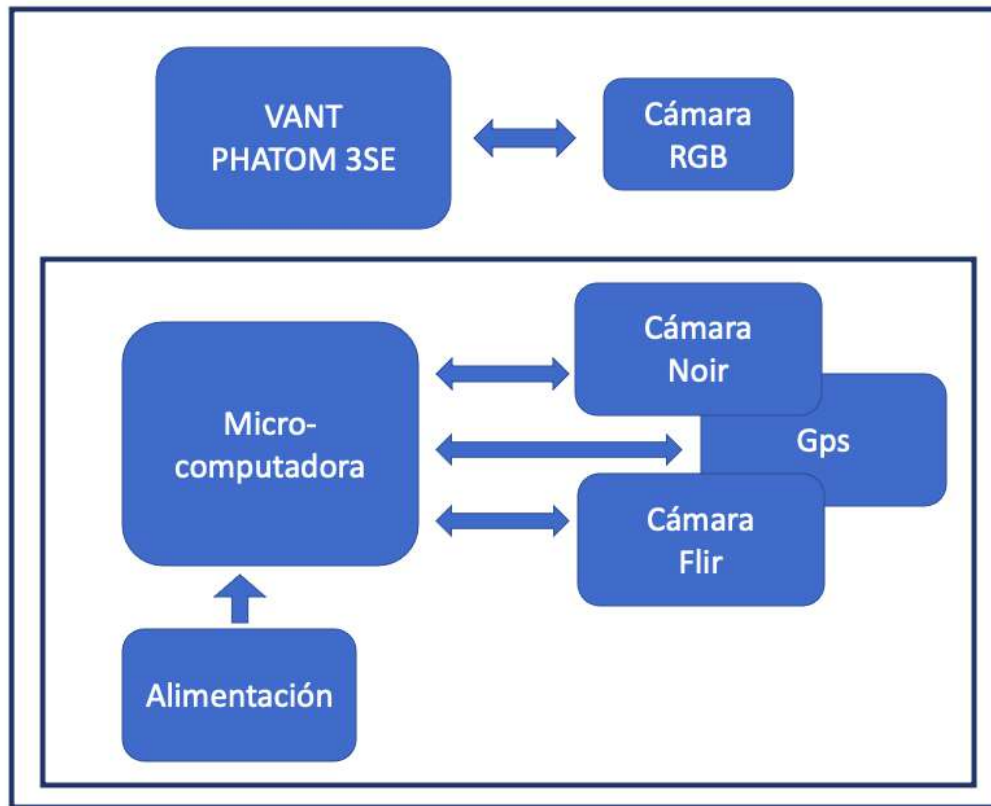


Figura 3.7: Diagrama utilizado para la adquisición de imágenes

En la Figura 3.8 se ilustran todas las caras del equipo, la Figura 3.8a es la cara frontal del equipo, en ella resalta la cámara RGB y el GPS en la parte superior. La Figura 3.8b es la cara trasera de la aeronave, en esta sección el elemento más importante a mencionar sería la batería de la aeronave. En la parte inferior del VANT que está representada en la Figura 3.8c se encuentra al lado derecho la cámara FLIR y al izquierdo la cámara NoIR. En la Figura 3.8d es la vista lateral izquierda del VANT en este se encuentra el microcontrolador Raspberry y por último la Figura 3.8e es la vista lateral derecha en ella se encuentra la batería que alimenta el microcontrolador.

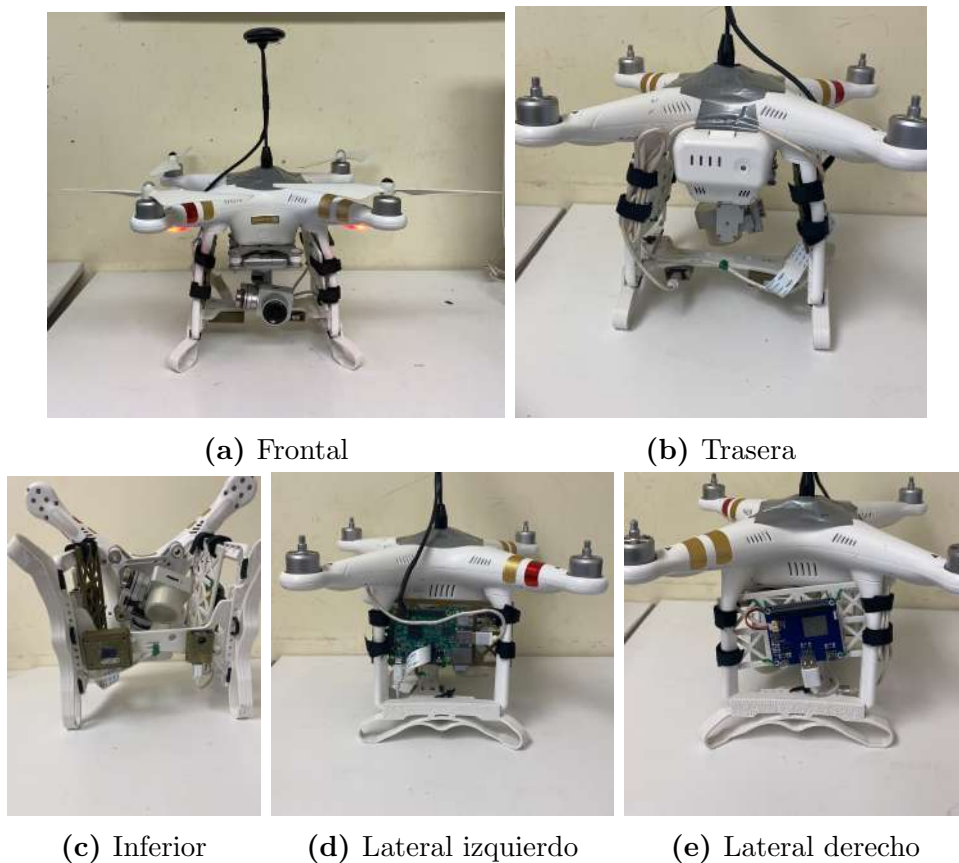


Figura 3.8: Vistas del equipo montado sobre un Phantom 3SE

3.2. Adquisición de datos desde un VANT (Phantom 3SE)

3.2.1. Levantamiento fotogramétrico aéreo

Para hacer el levantamiento fotogramétrico se tomaron en cuenta parámetros de vuelo como son la ruta de vuelo, la altura a la que va a volar el VANT la velocidad y el traslape longitudinal y transversal que se quiere obtener entre cada imagen, se recomienda que sea entre 80 % y 70 %. Para la configuración de las cámaras se tomó en cuenta el tamaño de la imagen, el GSD que es el tamaño de pixel en el terreno y el tiempo entre capturas.

El VANT y la cámara RGB se controlan con el programa DJI GS Pro, la Figura 3.9 muestra la interfaz de la aplicación. Con la ayuda de la aplicación trazamos la ruta de vuelo, la altura de vuelo es 40m, la velocidad 2.1m/s, traslape longitudinal 80 % y traslape transversal de 70 % y un GSD de 1.3cm, los datos anteriores son los parámetros de vuelo de la cámara RGB.

Mientras que las cámaras FLIR y NoIR son controladas de forma externa a la aplicación, manteniendo la ruta, altura y velocidad programada para el vuelo, para las imágenes NoIR se tiene un GSD de 5.54cm.

3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS DESDE UN VANT (PHANTOM 3SE)

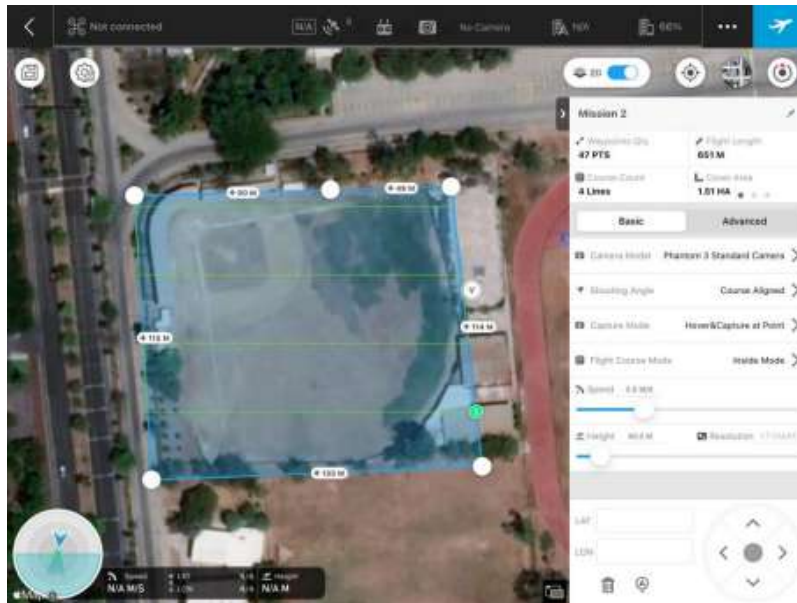


Figura 3.9: Ejemplo del programa DJI GS Pro (trayectoria de vuelo)

3.2.2. Construcción de Ortomosaicos Mediante el Software Agisoft

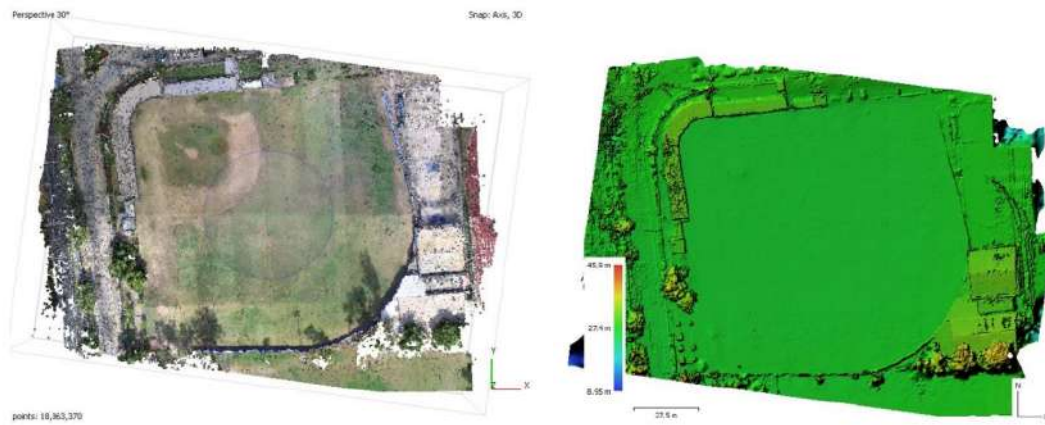
Para la construcción de los ortomosaicos se utilizó el software Agisoft Metasheape, el cual es herramienta fotogramétrica que nos permite genera ortomosaicos a partir de imágenes fotogramétricas.

La generación de los ortomosaicos se realizó de la siguiente manera, ingresamos las imágenes obtenidas del levantamiento fotogramétrico con el VANT, en la Figura 3.10 podemos observar las imágenes de las zonas mapeadas por separado.

3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS DESDE UN VANT (PHANTOM 3SE)



Figura 3.10: Imágenes del levantamiento fotogramétrico aéreo



(a) Nube de puntos densa

(b) Modelo Digital de Elevaciones

Figura 3.11: Procesos en Agisoft

Las imágenes de la Figura 3.10 son alineadas y sometidas a un balance de color, se genera una nube de puntos densa como la Figura 3.11a, después se hace el modelo digital de elevaciones como la Figura 3.11b y finalmente se obtiene el ortomosaico de la Figura 3.12a para imágenes RGB o en el caso de imágenes NoIR se obtiene ortomosaico

como el de la Figura 3.12.

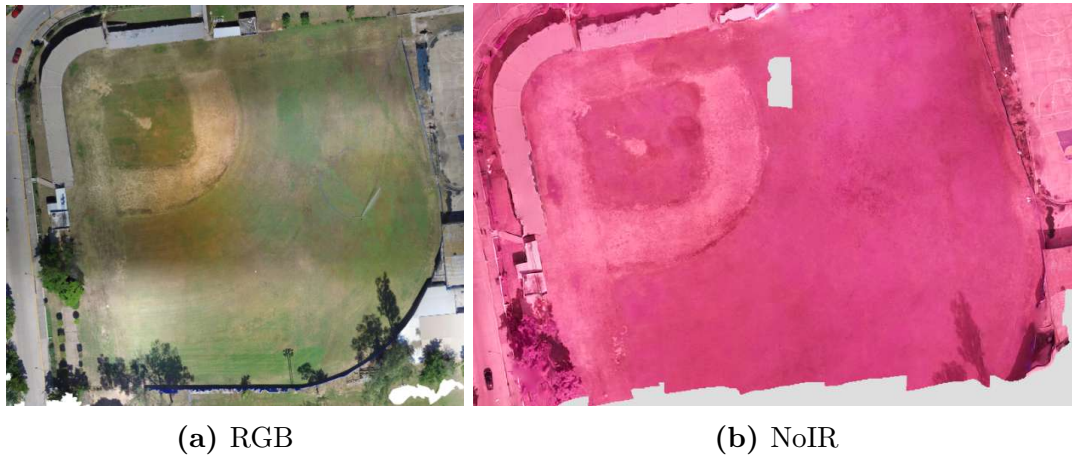


Figura 3.12: Ejemplos de ortomosaicos

3.3. Índices de vegetación

Para esta investigación se trabajó con los siguientes índices de vegetación:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation index) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- NRBVI (Normalized Red-Blue Vegetation Index) Índice de Vegetación Rojo – Azul Normalizado.
- NGBVI (Normalized Green-Blue Vegetation Index) Índice de Vegetación Verde – Azul Normalizado.

Las imágenes RGB y NoIR obtenidas después de generar los ortomosaicos son sometidas a un conjunto de algoritmos para obtener los índices de vegetación deseados, con las imágenes RGB podemos obtener los índices NRBVI y NRGVI, a si como de la imagen NoIR

obtenemos el índice NDVI, en la Figura 3.13 se ilustra lo anterior.

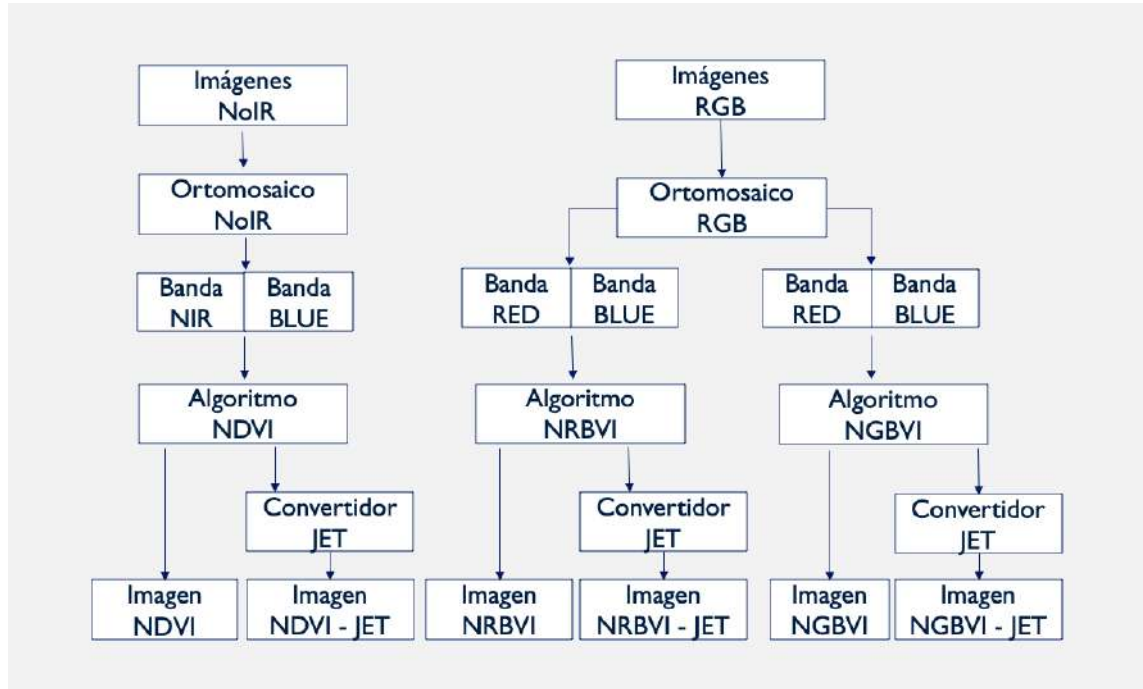


Figura 3.13: Diagrama de índices de vegetación

Para esta investigación se recurre a utilizar la paleta de color jet para ver de forma clara los resultados obtenidos, siendo esta una herramienta útil para representar pequeñas diferencias en las imágenes, donde los píxeles de más baja intensidad son representados por el color azul y los píxeles más alta intensidad se representan por el color rojo, para ilustrar lo anterior de forma clara se presenta la Figura 3.14.



Figura 3.14: Equivalencia de escalas de grises y escala JET

3.3.1. Aplicación de NDVI

Para la obtención de las imágenes NoIR se utilizó una cámara Pi camera NoIR V2, cuyas características ya fueron mencionadas anteriormente, como también se mencionó, esta cámara emplea un filtro azul externo, lo cual implica que las radiaciones luminosas reflejadas por la planta pertenecientes a las regiones espectrales infrarroja y azul (componente visible), que captadas por la cámara, es por esto el NDVI se calcula como indica la Ecuación 3.1.

$$NDVI_B = \frac{NIR - BLUE}{NIR + BLUE} \quad (3.1)$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3.2)$$

La ecuación original del NDVI es la Ecuación 3.2 es por eso que en el Código 3.1 se reemplaza BLUE por RED, a dicho código se da como entrada los ortomosaicos NoIR, de él se toman la banda NIR y la banda BLUE, obteniendo así imágenes NDVI e imágenes NDVI JET.

```
1 import cv2
2 nom = 'nombre_Noir'
3 imag = nom+'.png'
4
5 A=1100
6 A1= float(A)
7
8 RCH = cv2.imread(imag)
9 BCH = cv2.imread(imag)
10
11 RED = RCH[:, :, 2]
12 BLUE = BCH[:, :, 0]
13
14 NIR = RED + 0.0
15 RED = BLUE + 0.0
16 q=[]
17
18 for i in (NIR):
19     q.append(max(i))
20
21 nir_m=max(q)
22
23 r=[]
24 for i in (RED):
25     r.append(max(i))
26
27 red_m=max(r)
28 num = NIR - RED
29 den = NIR +RED + 1.0
30
31 NDVI = ((num*A1)/(den))
32
33 g = cv2.imwrite(nom+'_NDVI.jpg', NDVI)
34 im_g = cv2.imread(nom+'_NDVI.jpg', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
35 cv2.imshow(nom+'_NDVIgris', im_g)
36 im_c = cv2.applyColorMap(im_g, cv2.COLORMAP_JET)
37 c = cv2.imwrite(nom+'_NDVI-JET.jpg', im_c)
38 cv2.imshow(nom+'_NDVI-JET', im_c)
39
40 cv2.waitKey(0)
41 cv2.destroyAllWindows()
```

Código 3.1: NDVI

Siguiendo con el ejemplo de la cancha de baseball de ciudad universitaria de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Damos como entrada al Código 3.1 el ortomosaico NoIR, que sería la Figura 3.15.



Figura 3.15: Imagen NoIR de la cancha de baseball en cu (UAS)

Las Figuras 3.16 y 3.17 son los resultados del script. La Figura 3.16 es el resultado del algoritmo NDVI a escala de grises, mientras que la Figura 3.17 es NDVI con la paleta JET, esto nos permite hacer una evacuación más simple, gracias a la paleta JET vemos en color rojo intenso las zonas con mayor vegetación y en tonos amarillos zonas donde no hay vegetación, como lo es la cancha de baseball.

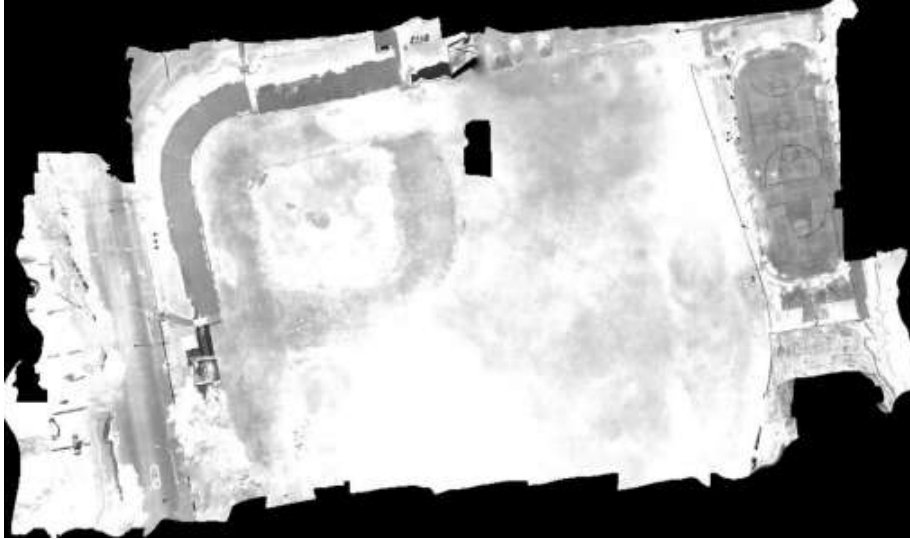


Figura 3.16: Imagen NDVI de la cancha de baseball en cu (UAS)

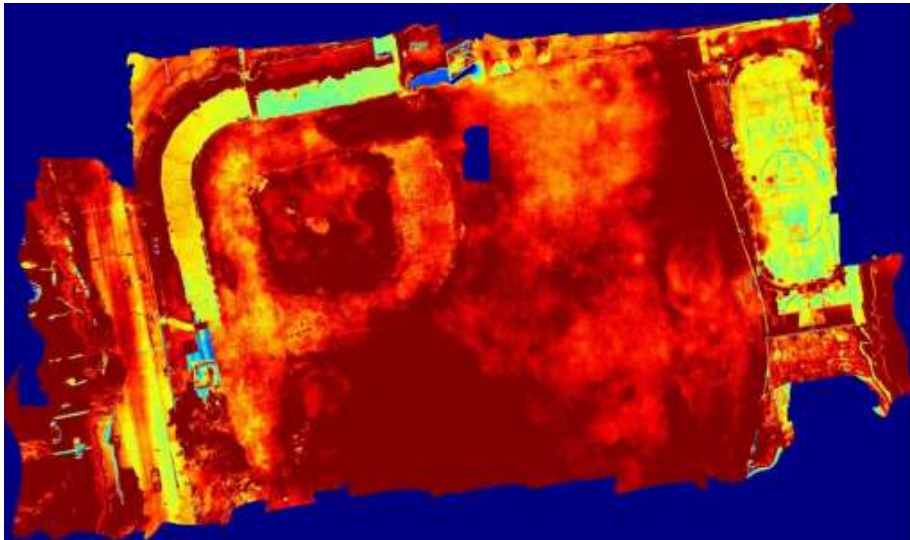


Figura 3.17: Imagen NDVI con paleta jet de la cancha de baseball en cu (UAS)

3.3.2. Aplicación de NRBVI

Con el Código 3.2 se obtienen imágenes NRBVI, a partir de imágenes RGB u ortomosaicos RGB. La Ecuación 3.3 describe la forma de calcular el índice de vegetación.

$$NRBVI = \frac{RED - BLUE}{max \cdot (RED - BLUE)} \quad (3.3)$$

```

1 import cv2
2 import numpy as np
3
4 nombre = '020622RGB'
5 bgr = cv2.imread(nombre + '.png')
6
7 blue = bgr[:, :, 0]
8 green = bgr[:, :, 1]
9 red = bgr[:, :, 2]
10
11 blue = blue + 0.0
12 red = red + 0.0
13 rb = red - blue
14
15 max_value = np.amax(rb)
16 NRBVI = (rb/max_value)
17
18 g = cv2.imwrite('NRBVI.jpg', NRBVI)
19 im_g = cv2.imread('NRBVI.jpg', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
20 cv2.imshow('NRBVI_GRAYSCALE', im_g)
21
22 resultimage = np.zeros((1500, 1500))
23 norm_img = cv2.normalize(NRBVI, resultimage, 0, 255, cv2.NORM_MINMAX)
24 gg = cv2.imwrite(nombre + '_NRBVI.jpg', norm_img)
25
26 im_gray = cv2.imread(nombre + '_NRBVI.jpg', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
27 cv2.imshow('NRBVI', im_gray)
28
29 im_color = cv2.applyColorMap(im_gray, cv2.COLORMAP_JET)
30 im_colors = cv2.imwrite(nombre + '_NRBVI_JET.jpg', im_color)
31 cv2.imshow(nombre + '_NRBVI_JET', im_color)

```

```
32  
33 cv2.waitKey(0)  
34 cv2.destroyAllWindows()
```

Código 3.2: NRBVI

Utilizando de entrada la Figura 3.18, que es un ortomosaico RGB de ejemplo de la cancha de baseball de ciudad universitaria de la Universidad Autónoma de Sinaloa para el Código 3.2.

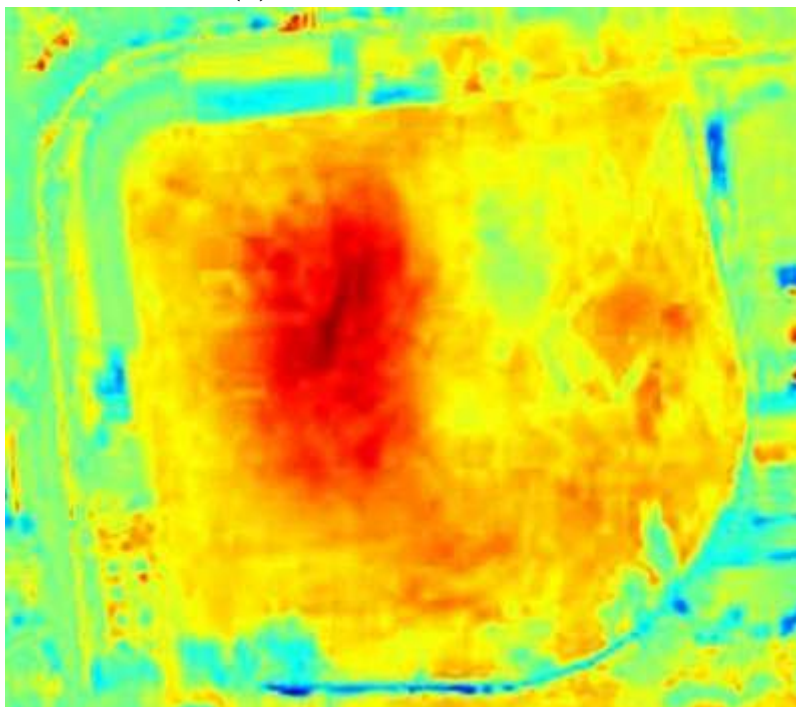


Figura 3.18: Imagen RGB de la cancha de baseball en cu (UAS)

Se obtiene como resultado de la aplicacion del indice NRBVI se tiene la Figura 3.19a y aplicando la paleta JET se obtiene la Figura 3.19b.



(a) NRBVI escala de grises



(b) NRBVI JET

Figura 3.19: Resultado NRBVI de cancha de baseball en cu (UAS)

3.3.3. Aplicación de NGBVI

Los ortomosaicos obtenidos son evaluados con el algoritmo NRBVI al igual que con NGBVI buscando cuál muestra mejor desempeño o si muestran distintos resultados, ambos algoritmos requieren imágenes RGB como entrada. Para el Código 3.3 se utilizó la Figura 3.18.

La Ecuación 3.4 muestra como obtener el NRBVI donde RED es la parte roja de la imagen y BLUE la parte azul.

$$NGBVI = \frac{GREEN - BLUE}{max \cdot (GREEN - BLUE)} \quad (3.4)$$

```

1 import cv2
2 import numpy as np
3 nombre = '020622RGB'
4 bgr = cv2.imread(nombre + '.png')
5
6 blue = bgr[:, :, 0]
7 green = bgr[:, :, 1]
8 blue = blue + 0.0
9 green = green + 0.0
10
11 gb = green - blue
12 max_gb = np.amax(gb)
13 NGBVI = (gb/max_gb)
14
15 g = cv2.imwrite('_NGBVI.jpg', NGBVI)
16 im_g = cv2.imread('_NGBVI.jpg', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
17
18 resultimage = np.zeros((1500, 1500))
19 norm_img = cv2.normalize(NGBVI, resultimage, 0, 255, cv2.NORM_MINMAX)
20
21 gg = cv2.imwrite(nombre + '_NGBVI.jpg', norm_img)
22 im_gray = cv2.imread(nombre + '_NGBVI.jpg', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
23
24 im_color = cv2.applyColorMap(im_gray, cv2.COLORMAP_JET)
25 im_colors = cv2.imwrite(nombre + '_NGBVI_JET.jpg', im_color)

```

```
26  
27 cv2.waitKey(0)  
28 cv2.destroyAllWindows()
```

Código 3.3: NGBVI



Figura 3.20: NGBVI escala de grise de cancha de baseball en cu (UAS)

Aplicando el algoritmos NGBVI con el Cogigo 3.3 se obtiene la Figura 3.20 y aplicando la paleta JET se obtiene la Figura 3.21.

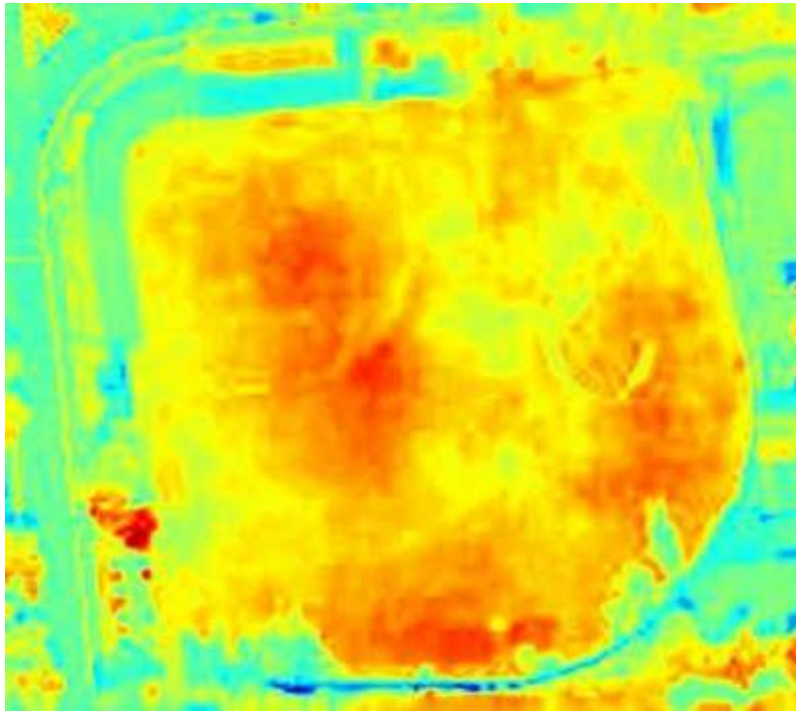


Figura 3.21: NGBVI JET de cancha de baseball en cu (UAS)

3.4. Algoritmo de cuantificación

El algoritmo de cuantificación se calculó de acuerdo con la Ecuación 3.5, en donde NBP es el número de píxeles no negros, N es el tamaño X , M es el tamaño Y , y todos los valores de píxeles de IMG son acumulados para obtener un resultado cuantificado de Q .

$$Q = \frac{1}{NBP} \sum_{X=1}^N \times \sum_{Y=1}^M \times IMG(X, Y) \quad (3.5)$$

3.5. Análisis de costos

Actualmente, en el mercado ya existen equipos que nos pueden ayudar a realizar estas tareas, pero algunos tienen costos muy elevados. A continuación se muestra la Tabla 3.1 donde se muestran los precios y las características de interés de equipos existentes en el mercado actual, mientras que la Tabla 3.2 muestra los componentes utilizados para el desarrollo del equipo utilizado en este trabajo de tesis.

Tabla 3.1: Precios equipos en el mercado

EQUIPOS EN EL MERCADO		
Equipo	Precio	Características
Dji Phantom 4 Multi-espectral rtk	\$198,900	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Red Edge (RE): 730 nm \pm 16 nm ▪ Infrarrojo cercano (NIR): 840 nm \pm 26 nm ▪ Verde (G): 560 nm \pm 16 nm ▪ Rojo: 650 nm \pm 16 nm ▪ Azul (B): 450 nm \pm 16 nm ▪ Luz visible (RGB)
Cámara Térmica Dji Zenmuse Xt FLIR 9 Hz	\$185,000	El lente de 6.8, 9, 13 o 19 mm de 9 Hz Frame Rates. Drones compatibles: Matrice 100, Matrice 200, Matrice 600, Matrice 600 Pro, Inspire 1.
Dji Matrice 600 Pro	\$165,000	UAV para montar cámara térmica DJI.

Con un VANT multiespectral como el Phantom 4 Multiespectral con rtk, tiene la capacidad de obtener imágenes RGB e imágenes NoIR que son el tipo de imágenes que nos interesan en este proyecto, pero este equipo no cuenta con una cámara térmica, para poder obtener imágenes térmicas en un VANT se necesita una cámara Térmica como Dji Zenmuse Xt, pero esta cámara necesita de un VANT especial como lo es el matrice 600 Pro.

Tabla 3.2: Costos de Hardware Utilizado

Costos de Hardware Utilizado		
Equipo	Precio	Características
Raspberry pi 3b	\$1,1065	*Página oficial Raspberry
Cámara Raspberry Pi NoIR V2	\$1,284	8mp 1080p Infrarrojo. *Página oficial Raspberry
Módulo lepton FLIR	\$8,580	Sensor LWIR, longitud de onda 8 a 14 $m\mu$. 51 grados HFOV, 63.5 grados. 80(h) \times 60(v) píxeles efectivos. *Aliexpress
Módulo de Batería	\$832	*Mercado libre
Módulo Gps Neo-6m	\$185	*Mercado libre
Phantom 4 pro	48,990 \$	*Amazon
Total		\$60,936

Por otro lado, el equipo propio cuenta con tres cámaras, una cámara Raspberry Pi NoIR V2, un módulo lepton FLIR (Cámara térmica), y la cámara RGB del VANT, para este trabajo de tesis se utilizó un VANT Phantom 3SE, pero en la Tabla 3.2 se incluye el precio de un Phantom 4 pro, porque el Phantom 3SE ya no está disponible en el mercado.

Comparando los precios del equipo propietario con los equipos del mercado tenemos, con menos de la mitad del costo se consiguió obtener un equipo funcional para las necesidades de este trabajo.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

El día 15 de marzo de 2022 se realizó un levantamiento fotogramétrico en el área que guarda el campo experimental de la Facultad de Agronomía, de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Cabe señalar, que en este espacio se desarrollan los procesos de diversos cultivos, que son utilizados por los estudiantes y profesores para el estudio y análisis.

Por lo que este trabajo de investigación, aprovecho tales instalaciones para la realización de la parte experimental, mediante vuelos para la adquisición de datos en forma de imágenes.

El área se dividió en 6 secciones, los cuales se ilustran en la Figura 4.1 y son descritos en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Especificación de zonas del día 15 de marzo

1	Cebolla con tratamiento en acolchado	4.40675m ²
2	Tomate, chile, calabaza y soja	
3	Maíz (insecticida)	1.68112m ²
4	Cultivo de maíz para semilla	1.4168m ²
5	Maleza	5.1183m ²
6	Maleza	4.2431m ²



Figura 4.1: Separación de zonas

Se realizó el procesamiento del levantamiento fotogramétrico del área completa, incluyendo las 6 zonas comentadas en la Tabla 4.1, de esto se obtuvieron los siguientes resultados; la Figura 4.2 es la imagen NRBVI JET, La Figura 4.3 es la imagen NGBVI JET, como se explica anteriormente para el cálculo del NRBVI y NGBVI partimos de las imágenes RGB en este caso sería la Figura 4.1. La Figura 4.3 es la imagen NDVI de la misma zona, para esta se parte de una imagen NoIR.

En la Figura 4.2, la Figura 4.3 y la Figura 4.4 no hay resultados notables debido a que estos algoritmos normalizan las imágenes. Por esta razón se procesaron las zonas por separado encontrando resultados interesantes en la Zona 1, en la siguiente sección se describen los resultados.

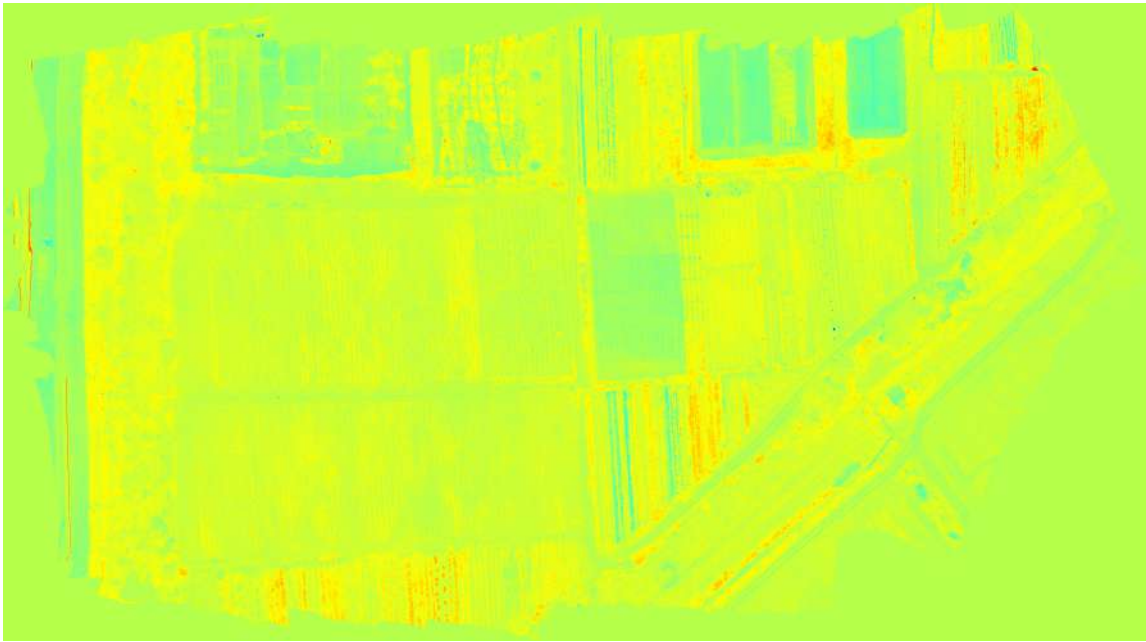


Figura 4.2: NRBVI JET Facultad de Agronomía (UAS)

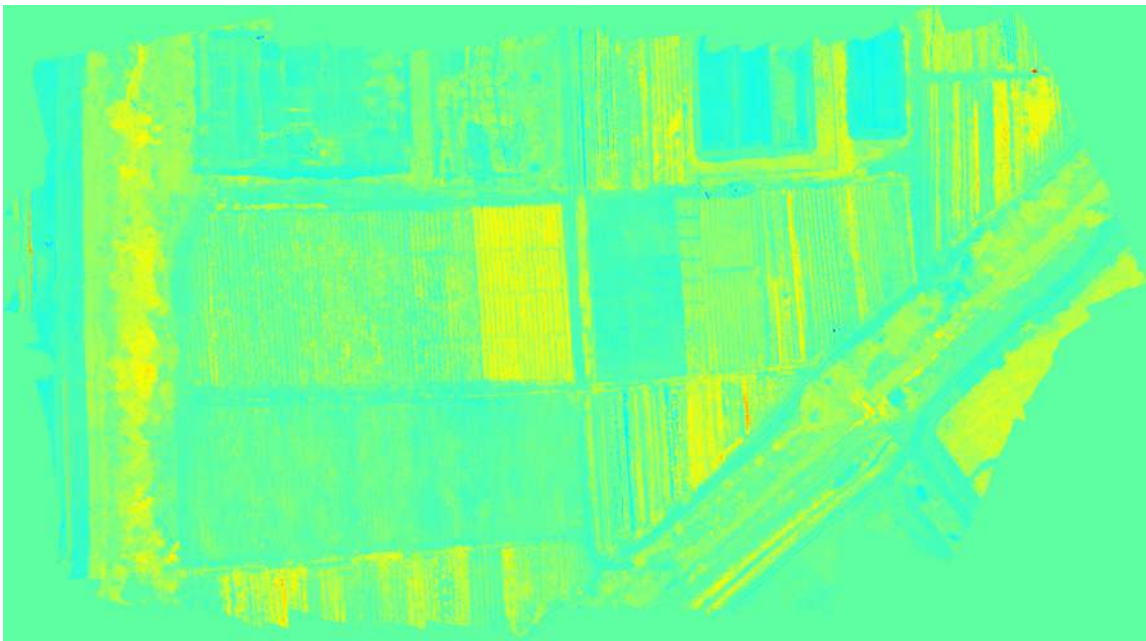


Figura 4.3: NGBVI JET Facultad de Agronomía (UAS)

4.1. CULTIVO DE CEBOLLA INVESTIGACIÓN DE TRATAMIENTOS (NITRÓGENO, NITRATO, AMONIO Y UREA).

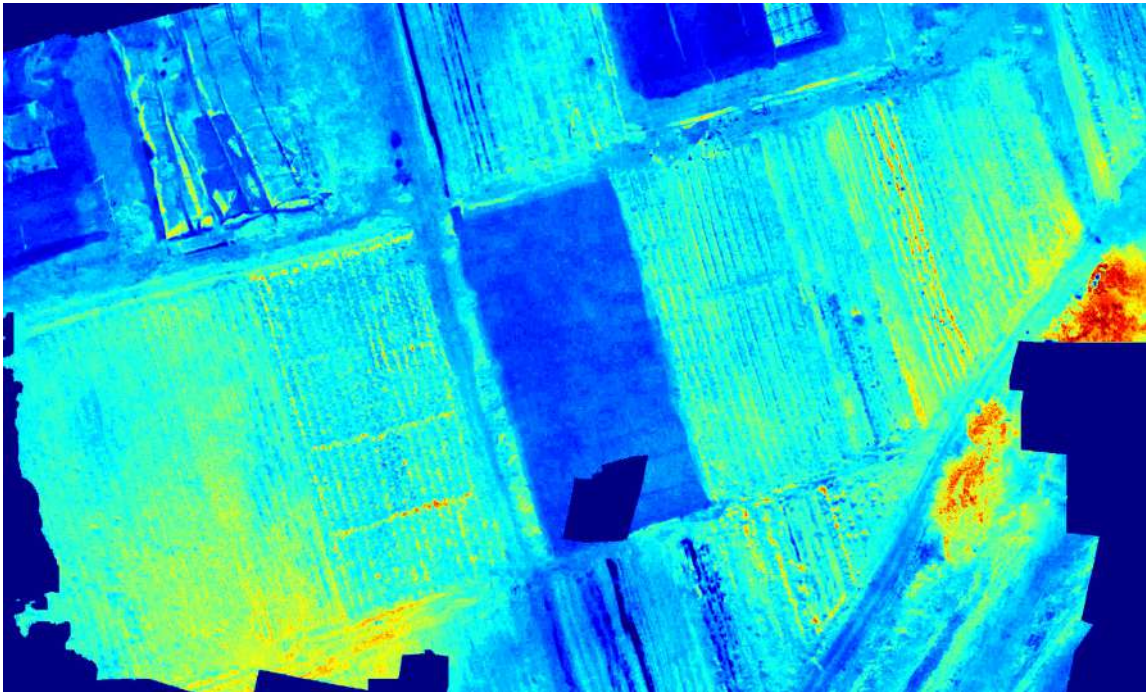


Figura 4.4: NDVI JET Facultad de Agronomía (UAS)

4.1. Cultivo de cebolla investigación de tratamientos (nitrógeno, nitrato, amonio y urea).

Del levantamiento fotogramétrico realizado el día 15 de marzo del 2022 se tomaron los datos obtenidos de la Zona 1 de la Figura 4.1, en esta zona se encontraba un sembradío de cebollas el cual estaba en investigación de distintos tratamientos de concentraciones de nitrógeno, nitrato, amonio y urea.

4.1. CULTIVO DE CEBOLLA INVESTIGACIÓN DE TRATAMIENTOS
(NITRÓGENO, NITRATO, AMONIO Y UREA).

Tabla 4.2: Concentración de Tratamiento

Concentración de Tratamiento	
T1	250kg Nitrato
T2	200kg Nitrato 50kg de amonio
T3	150kg Nitrato 100kg de amonio
T4	100kg Nitrato 150kg de amonio
T5	50kg Nitrato 200kg de amonio
T6	250kg de amonio
T7	250kg Urea
T8	Sin nitrógeno

Tabla 4.3: Distribución Tratamientos

	1	2	3	4
1	T1 R3	T2 R3	T5 R3	T6 R3
2	T8 R3	T4 R3	T7 R3	T3 R3
3	T6 R2	T7 R2	T1 R2	T2 R2
4	T4 R2	T3 R2	T5 R2	T8 R2
5	T3 R1	T5 R1	T7 R1	T1 R1
6	T8 R1	T2 R1	T4 R1	T6 R1

La Tabla 4.2 muestra las concentraciones de los tratamientos, teniendo un total de 8, los cuales son representados por “T1” al “T8”. La Tabla 4.3 muestra como están distribuidos cada uno de los tratamientos en los sembradíos, es importante mencionar que cada tratamiento se repite tres veces, en la Tabla 4.3 están representados como “R1”, “R2” y “R3”.

Como resultado del levantamiento fotogramétrico y después del procesamiento para generar ortomosaicos, tenemos como resultado la Figura 4.5a siendo el ortomosaico RGB y la Figura 4.5b el ortomosaico NoIR. En estas figuras se muestra el cultivo se divide en 4 surcos y 6

4.1. CULTIVO DE CEBOLLA INVESTIGACIÓN DE TRATAMIENTOS
(NITRÓGENO, NITRATO, AMONIO Y UREA).

filas, así como la distribución de los tratamientos y tres repeticiones de cada uno.

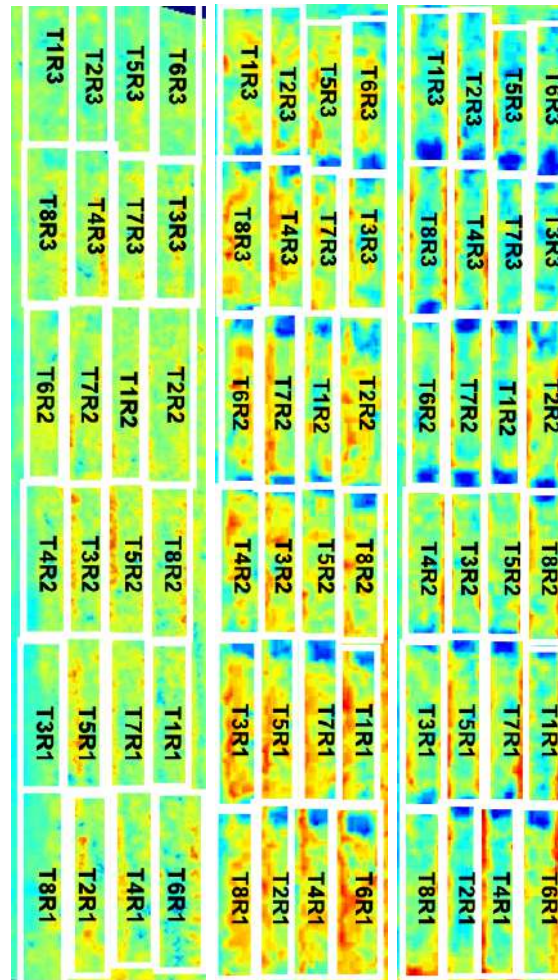


Figura 4.5: Ortomosaicos de Cultivo de cebolla

Lo ortomosaicos mencionados anteriormente son sometidos a los algoritmos de índices de vegetación para obtener la Figura 4.6a, la Figura 4.6b y la Figura 4.6c. Para NDVI a simple vista no notamos gran diferencia en los tratamientos y sus repeticiones, para NGBVI y NRBVI en ambas imágenes se descartan áreas inorgánicas (áreas azul marino),

4.1. CULTIVO DE CEBOLLA INVESTIGACIÓN DE TRATAMIENTOS
(NITRÓGENO, NITRATO, AMONIO Y UREA).

para NGBVI resaltan algunas zonas de clorosis. Para obtener resultados de forma cuantitativa se utilizó el algoritmo de cuantificación, para este se utilizan imágenes en su versión a escala de grises, los resultados se muestran en la tabla 4.4 datos que posteriormente son graficados para mostrar de forma clara los resultados.



(a) NDVI (b) NGBVI (c) NRBNI

Figura 4.6: Índices de vegetación para cultivo de cebolla

4.1. CULTIVO DE CEBOLLA INVESTIGACIÓN DE TRATAMIENTOS
(NITRÓGENO, NITRATO, AMONIO Y UREA).

Tabla 4.4: Resultados del Algoritmo de Cuantificación del Cultivo de Cebollas

R_T	NRBVI	NGBVI	NDVI
1_1	1,998,008	2,667,435	236,698
2_1	1,108,114	2,636,267	217,608
3_1	1,497,429	2,832,243	151,121
4_1	1,445,514	2,831,064	127,115
5_1	1,590,654	1,703,003	153,081
6_1	1,267,482	1,570,140	164,280
1_2	1,024,550	2,909,360	172,296
2_2	1,116,245	2,217,307	210,835
3_2	1,438,531	2,304,449	202,920
4_2	1,129,598	2,230,536	136,228
5_2	1,429,753	1,891,587	116,012
6_2	712,520	1,338,458	205,347
1_3	950,404	2,346,351	218,181
2_3	1,153,635	2,239,445	241,732
3_3	907,849	2,105,179	142,866
4_3	1,361,787	2,222,336	167,417
5_3	1,456,770	1,619,145	193,264
6_3	972,658	1,220,368	107,385
1_4	857,711	1,970,672	196,912
2_4	1,090,098	2,061,823	170,204
3_4	1,197,039	2,166,459	178,793
4_4	1,092,422	2,181,480	236,953
5_4	1,073,763	1,534,351	153,462
6_4	1,167,636	2,221,267	110,590

Los resultados de la cuantificación de los píxeles no negros son mostrados en forma de gráficas para cada uno de los índices de vegetación, se representan los 8 tratamientos con sus tres repeticiones. La Figura 4.7 son los tratamientos y repeticiones NDVI, Figura 4.8 tratamientos y repeticiones NGBVI y Figura 4.9 son tratamientos y repeticiones NRBVI.

4.1. CULTIVO DE CEBOLLA INVESTIGACIÓN DE TRATAMIENTOS (NITRÓGENO, NITRATO, AMONIO Y UREA).

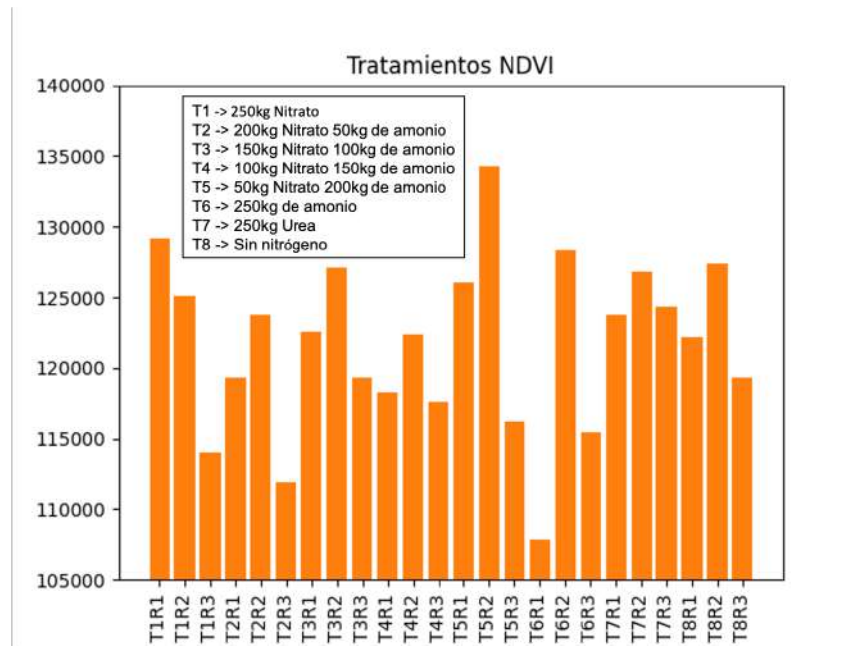


Figura 4.7: Gráfica de repeticiones por tratamiento NDVI

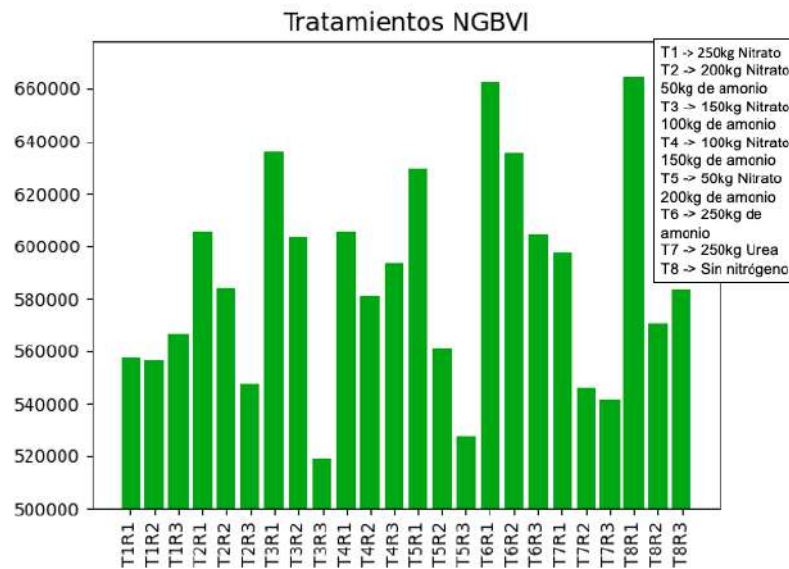


Figura 4.8: Gráfica de repeticiones por tratamiento NGBVI

4.1. CULTIVO DE CEBOLLA INVESTIGACIÓN DE TRATAMIENTOS (NITRÓGENO, NITRATO, AMONIO Y UREA).

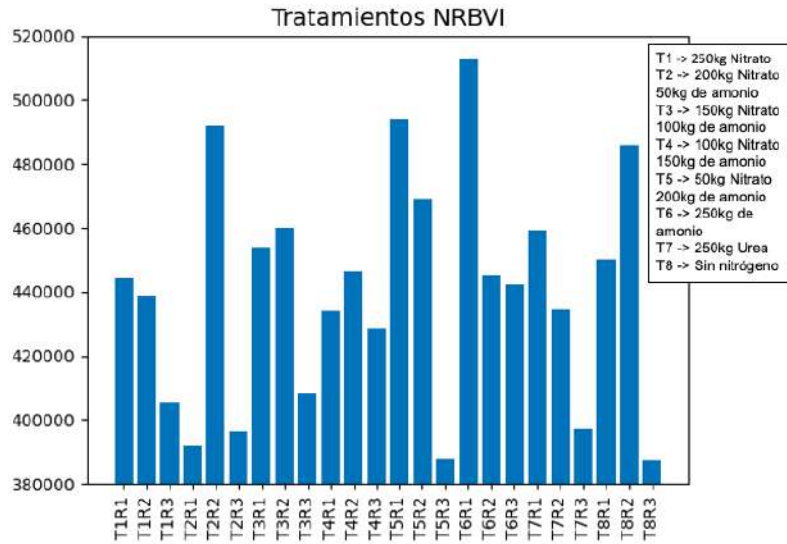


Figura 4.9: Gráfica de repeticiones por tratamiento NRBVI

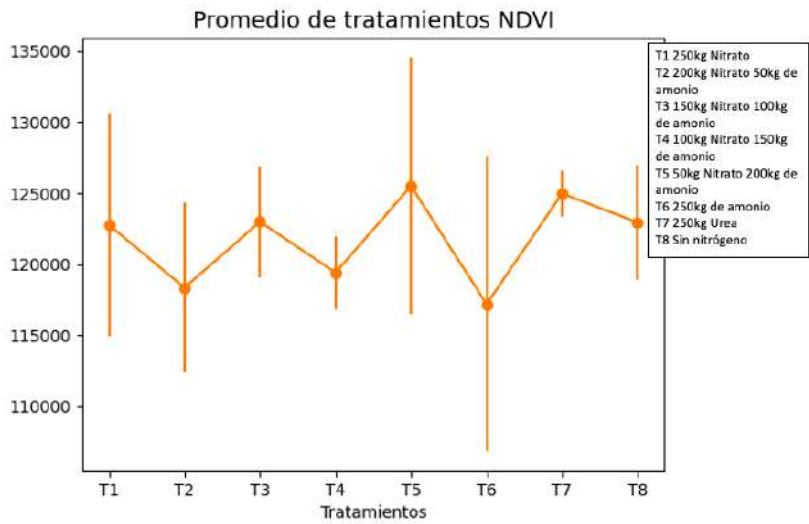


Figura 4.10: Gráfica del promedio de repeticiones por tratamientos NDVI

4.1. CULTIVO DE CEBOLLA INVESTIGACIÓN DE TRATAMIENTOS (NITRÓGENO, NITRATO, AMONIO Y UREA).

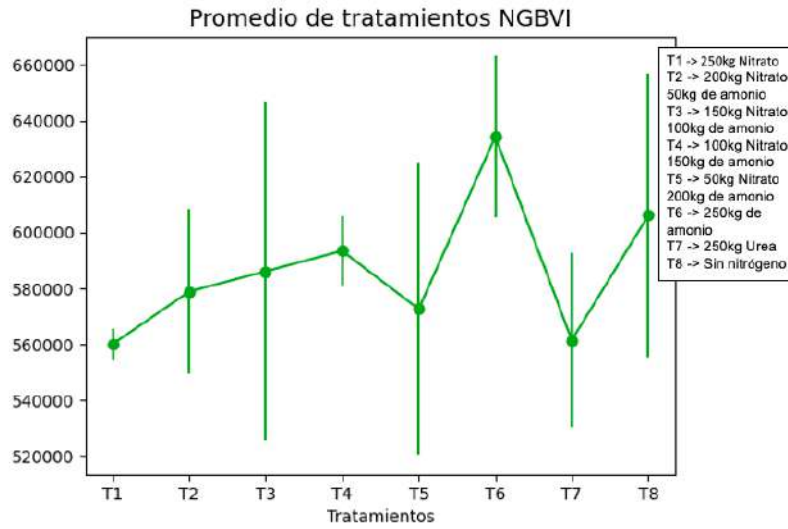


Figura 4.11: Gráfica del promedio de repeticiones por tratamientos NGBVI

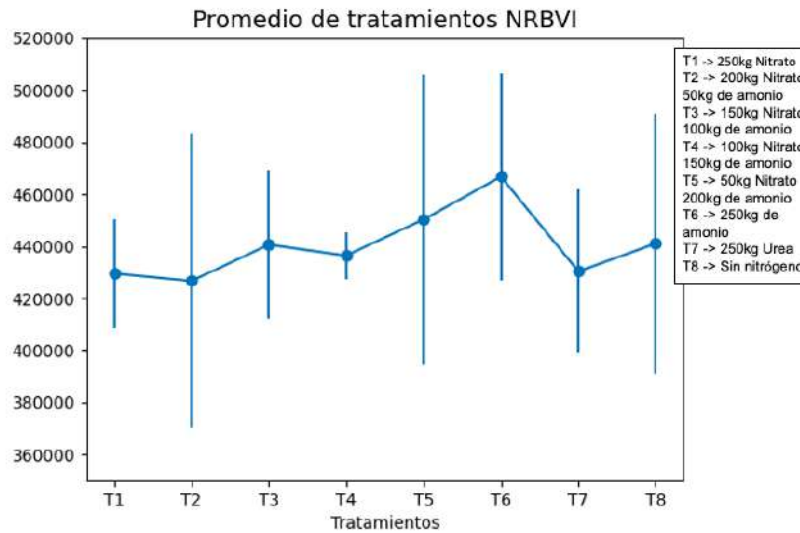


Figura 4.12: Gráfica del promedio de repeticiones por tratamientos NRBVI

También se analizó el promedio de las repeticiones por tratamientos para cada índice de vegetación. la Figura 4.10 es el promedio del algoritmo de cuantificación para el índice NDVI, la Figura 4.11 es el promedio del algoritmo de cuantificación para el índice NGBVI y la Figura 4.12 es el promedio del algoritmo de cuantificación para el índice NRBVI.

En NDVI el T8 tiene el valor más alto. El T6 que es 250kg de amonio en NDVI marca el valor más bajo de promedios de todos los tratamientos, mientras que para NGBVI y NRBVI es el valor más alto, esto se puede interpretar que es una zona donde las plantas están estresadas.

En NGBVI el promedio de T1, tiene el valor más bajo, este tratamiento consta de 250kg de nitrato. Este mismo tratamiento en NDVI es un valor alto y en NRBVI se puede decir que es un valor medio.

Para NRBVI T2 y T7 son los valores más bajos y T6 el valor más alto en el promedio de los tratamientos.

Se encontró que los resultados en promedio de NDVI y NGBVI tienen cierta relación a la inversa.

4.2. Cultivo de maíz

Se monitoreó otro estudio de concentración de nitrógeno sobre maíz, desarrollado también por profesores y alumnos en el campo experimental de la Facultad de Agronomía, de la Universidad Autónoma de Sinaloa, la información fue brindada por el Dr. Carlos Alfonso López Orona. El presente trabajo de investigación aprovecho tal experimento para monitorear dicho estudio, teniendo así 2 vuelos para el monitoreo de los tratamientos. Los vuelos para la recolección de datos se llevaron

a cabo los días 4 de mayo del 2022 y el 3 de junio del mismo año.

En la tabla 4.5 se muestra la distribución del experimento, “T1” al “T7” representan los tratamientos por la cantidad por unidades de nitrógeno, van desde 0 UN para el T1 a 400 UN para el T7. cada uno de estos tratamientos tuvo tres repeticiones “R1”, “R2” y “R3”.

Tabla 4.5: Distribución de Nitrógeno

4 Surcos de bordos									
	30m	30m	30m	10m	30m	30m	30m	30m	TOTAL
TRAT	R1	R2	R3		TRAT	R1	R2	R3	SURCOS
T1 0UN	5	3	2	C	T1 0UN	3	2	7	4
T2 150UN	2	4	7	A	T2 150UN	5	4	3	4
T3 200UN	1	2	4	N	T3 200UN	7	6	5	4
T4 250UN	4	5	6	A	T4 250UN	2	1	4	4
T5 300UN	6	1	3	L	T5 300UN	4	3	2	4
T6 350UN	7	6	5		T6 350UN	6	7	1	4
T7 400UN	3	7	1		T7 400UN	1	5	6	4

En el campo cada tratamiento comprende de 4 surcos de 30m, al inicio quedan 4 surcos de bordos, después siguen los surcos con los tratamientos dando un total de 32 surcos, los tratamientos fueron distribuidos al azar para cada una de las repeticiones.

El día 4 de mayo del 2022 se realizó la adquisición de imágenes con el VANT y obtuvieron dos ortomosaicos, uno RGB (Figura 4.14a) y un ortomosaico NoIR, a estos se les aplicó los índices de vegetación NDVI, NGBVI y NRBVI, dando como resultado la Figura 4.13b, la Figura 4.13c y la Figura 4.13d. Como se mencionó anteriormente, este experimento consta de 7 tratamientos distintos, cada uno se repite 3 veces, debido a las condiciones climatológicas y la capacidad del equipo de adquisición solo se obtuvieron resultados de las repeticiones R1 y R2.

En cada una de las imágenes se señaló cada uno de los tratamientos.

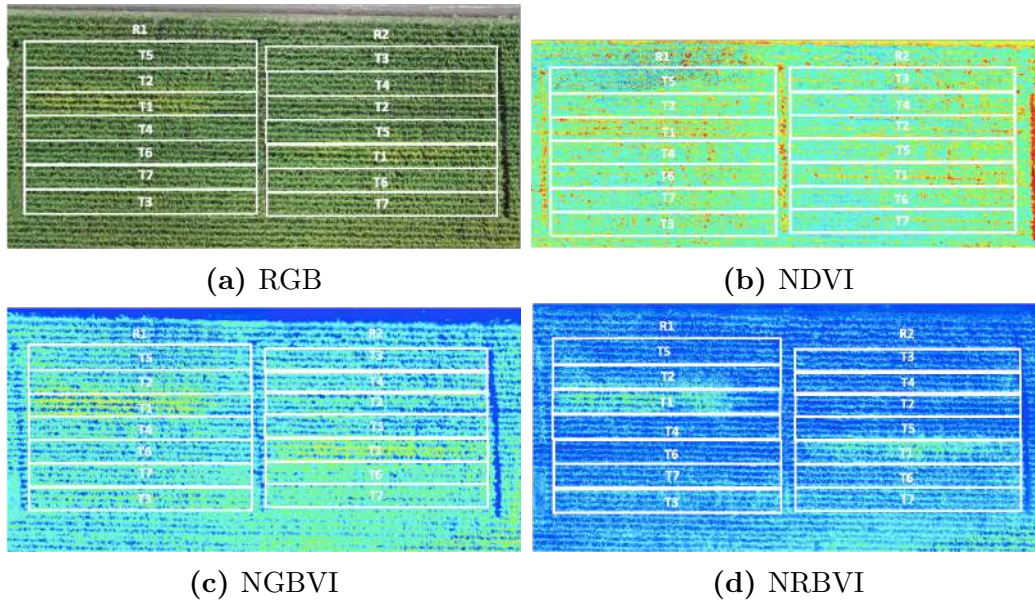


Figura 4.13: Resultados 04 de mayo 2022

Para el día 3 de junio del 2022 se realizó el mismo procedimiento, dando como resultado la Figura 4.14b, la Figura 4.14c y la Figura 4.14d.

Las imágenes resultantes de la aplicación de los índices en escala de grises fueron divididas por cada uno de los tratamientos para así someterlos al algoritmo de cuantificación, para cuantificar el número de píxeles por tratamiento, la Tabla 4.6 muestra los resultados obtenidos.

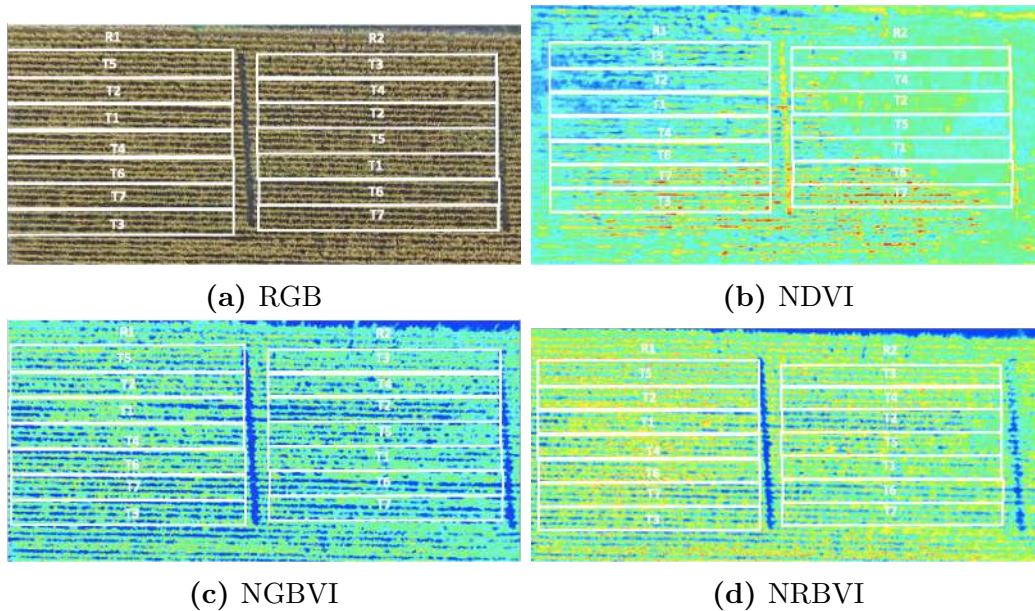
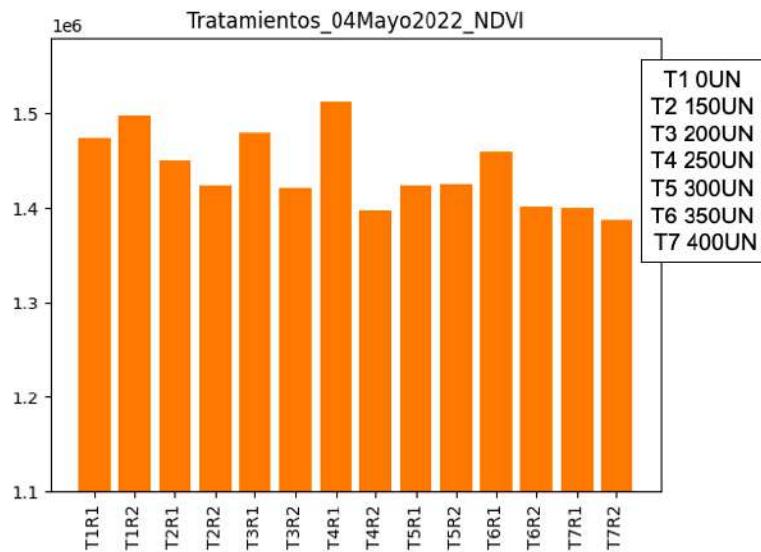


Figura 4.14: Resultados 03 de junio 2022

Los datos de la Tabla 4.6 son resultado de aplicar el algoritmo de cuantificación a los datos obtenidos el día 4 de mayo del 2022, los cuales se grafican en las siguientes figuras. La Figura 4.15 se muestran los resultados NDVI organizados por repetición de cada tratamiento, la Figura 4.16 muestra el promedio de los tratamientos con el índice NDVI al igual que la Figura 4.17 con la excepción de que se muestra en gráfica de barras. Con el mismo orden para NRBVI la Figura 4.18, la Figura 4.19, la Figura 4.20 y con el mismo orden para NGBVI la Figura 4.21, la Figura 4.22, la Figura 4.23.

Tabla 4.6: Resultados del Algoritmo de Cuantificación del Cultivo de Maíz

Tratamientos	Repetición	NDVI	NRBVI	NGBVI
T1	R1	1473233	3296992	5360164
	R2	1497485	3717463	5284962
T2	R1	1449050	3433902	4758834
	R2	1423729	3447246	4685613
T3	R1	1479598	3593759	4570571
	R2	1421424	3054043	4473582
T4	R1	1511735	3137960	4652082
	R2	1397111	3268387	4659777
T5	R1	1424072	3287652	4716580
	R2	1425487	4463871	5274299
T6	R1	1459048	3408446	4741212
	R2	1401889	3894454	5323605
T7	R1	1400874	3739575	4905755
	R2	1387846	4274927	5164175

**Figura 4.15:** Gráficas por tratamientos de resultados para día 4 mayo 2022 con el índice de vegetación NDVI

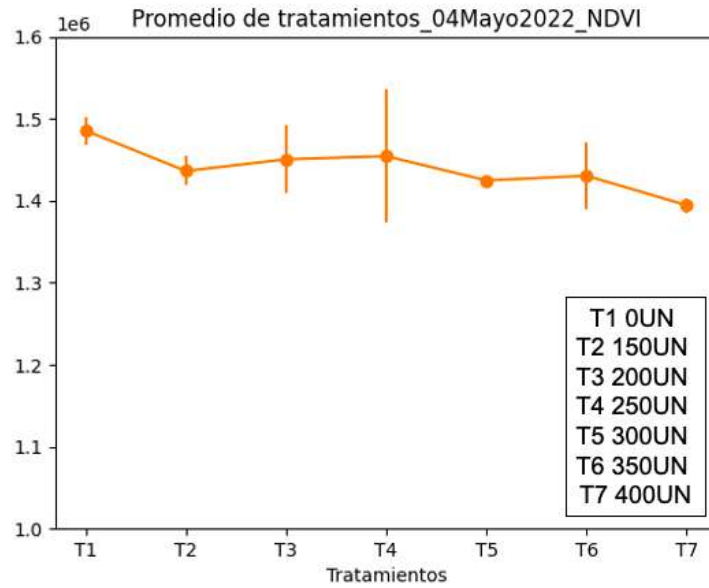


Figura 4.16: Gráficas por promedio de tratamientos de resultados para día 4 mayo 2022 con el índice de vegetación NDVI

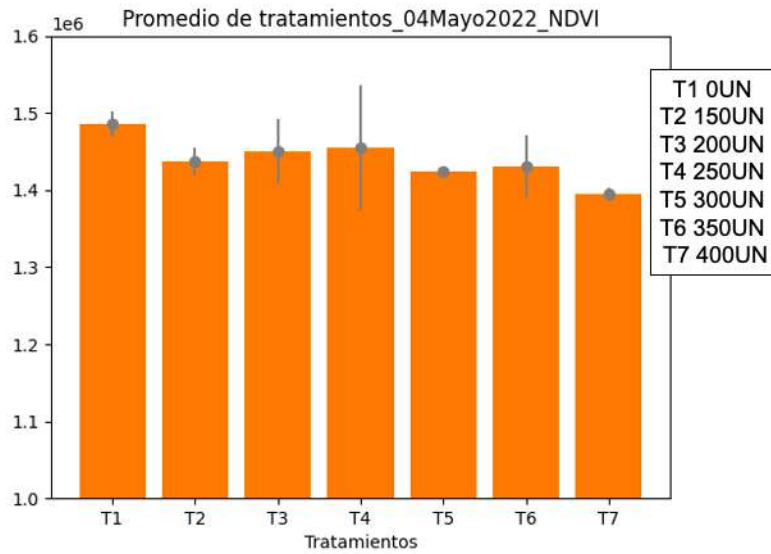


Figura 4.17: Gráficas de barra por promedio de tratamientos de resultados para día 4 mayo 2022 con el índice de vegetación NDVI

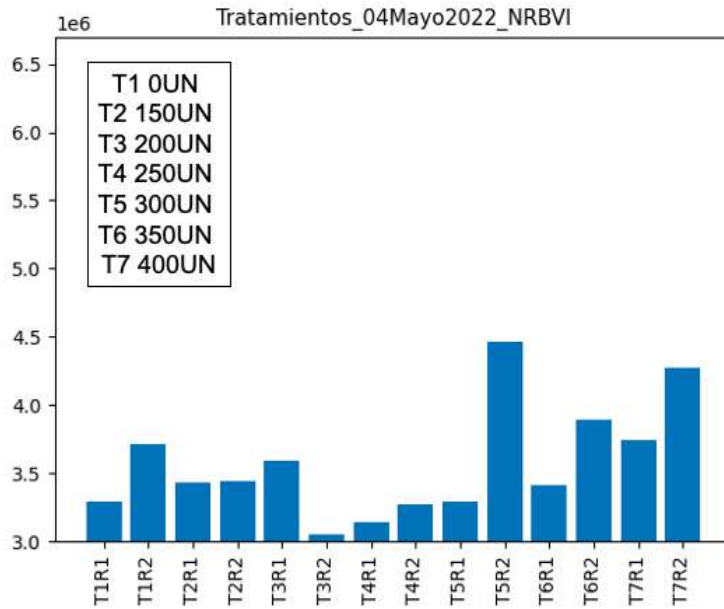


Figura 4.18: Tratamiento para día 04 mayo 2022 con NRBVI

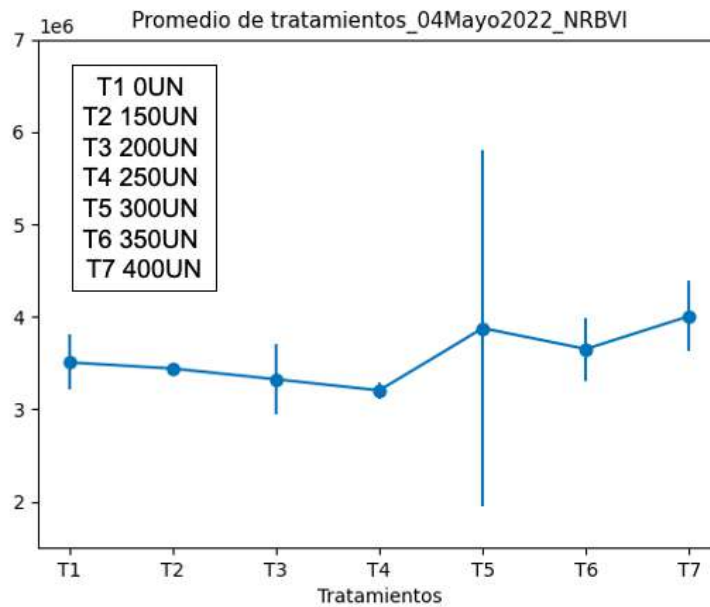


Figura 4.19: Promedio por tratamiento para día 04 mayo 2022 con NRBVI

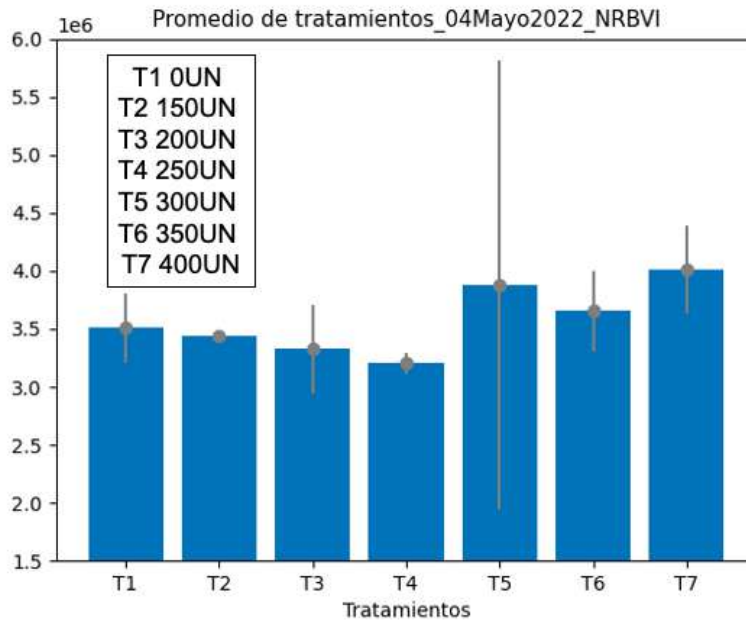


Figura 4.20: Gráfica de barra del promedio por tratamiento para día 04 mayo 2022 NRBVI

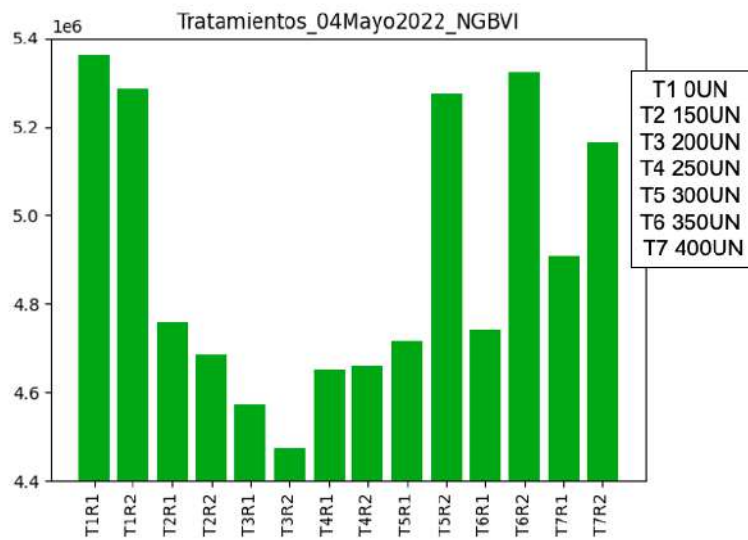


Figura 4.21: Tratamiento para día 04 mayo 2022 con NGBVI

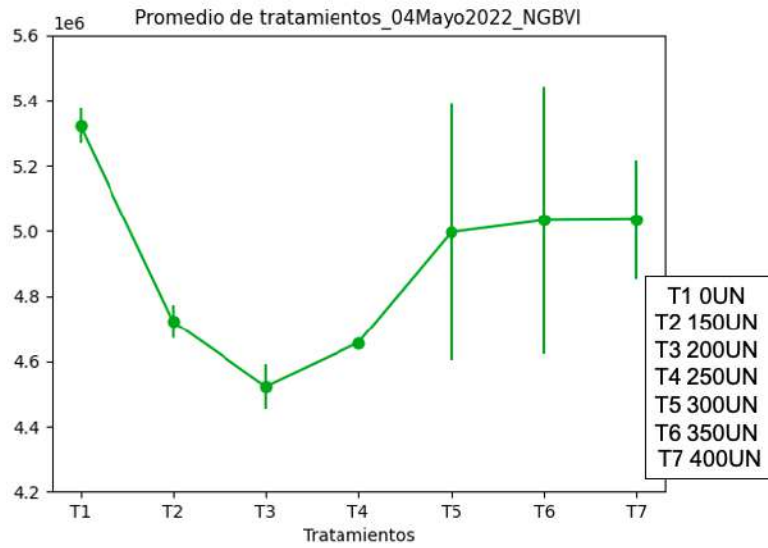


Figura 4.22: Gráfica del promedio por tratamiento de resultados para día 04 mayo 2022 con el índice de vegetación NGBVI

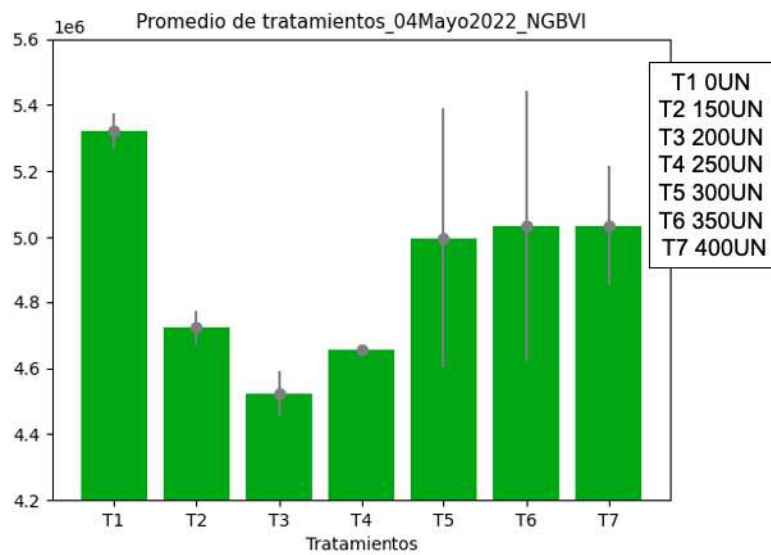


Figura 4.23: Gráfica de barra del promedio por tratamiento de resultados para día 04 mayo 2022 con el índice de vegetación NGBVI

Tabla 4.7: Resultados del Algoritmo de Cuantificación del Cultivo de Maíz del día 03 de junio 2022

Tratamientos	Repetición	NDVI	NRBVI	NGBVI
T1	R1	1122581	6586192	5348090
	R2	1308018	6304541	5022774
T2	R1	1190189	6269192	5013087
	R2	1504277	5539541	4829045
T3	R1	1507063	5935613	4670337
	R2	1353521	6203615	5198815
T4	R1	1237891	6399136	5300516
	R2	1380258	6236083	4961958
T5	R1	1183098	6364234	5129907
	R2	1366940	6133033	4816803
T6	R1	1342407	5962904	5093179
	R2	1520558	5631928	4602973
T7	R1	1482110	6124130	5070728
	R2	1550395	5880842	4832828

Los datos de la Tabla 4.7 son resultado de aplicar el algoritmo de cuantificación a los datos obtenidos el día 3 de junio del 2022, los cuales se grafican en las siguientes figuras. La Figura 4.24 se muestran los resultados NDVI organizados por repetición de cada tratamiento, la Figura 4.25 muestra el promedio de los tratamientos con el índice NDVI al igual que la Figura 4.26 con la excepción de que se muestra en gráfica de barras. Con el mismo orden para NRBVI la Figura 4.27, la Figura 4.28, la Figura 4.32 y con el mismo orden para NGBVI la Figura 4.30, la Figura 4.31, la Figura 4.32.

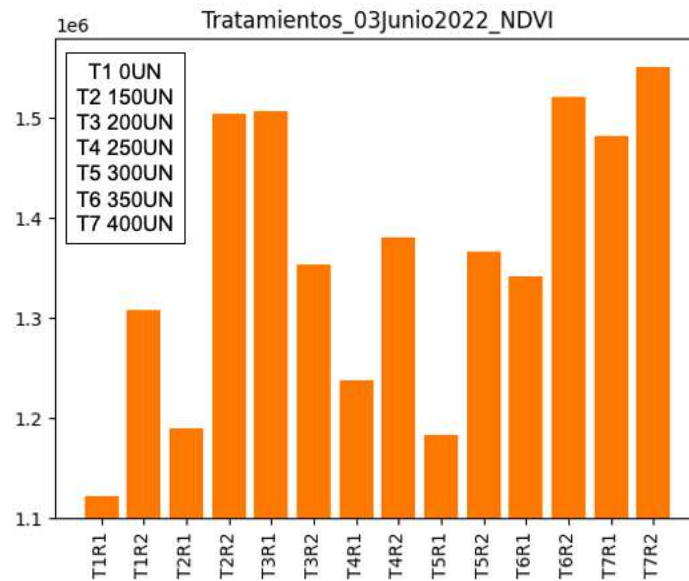


Figura 4.24: Tratamientos para día 3 de junio 2022 con NDVI

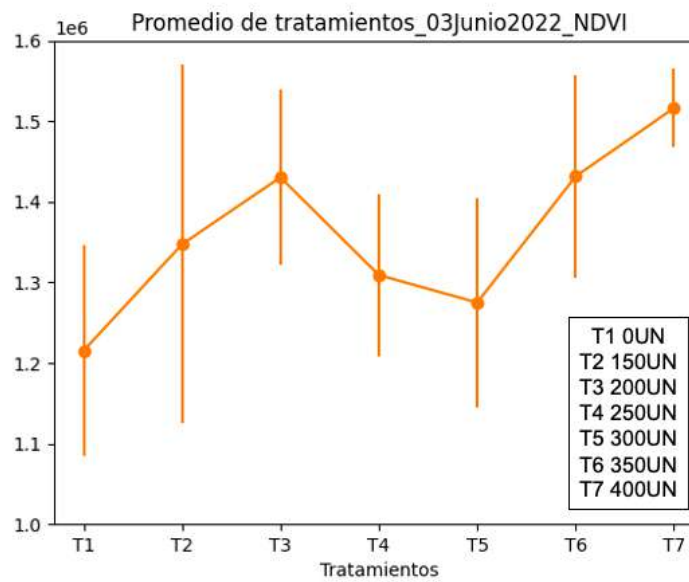


Figura 4.25: Promedio para día 3 de junio 2022 NDVI

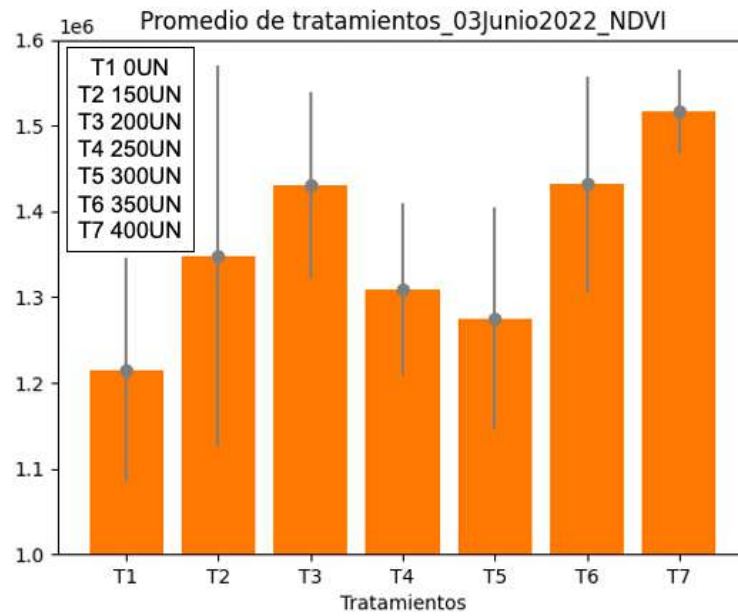


Figura 4.26: Gráfica de barra por promedio de tratamiento para día 3 de junio 2022 NDVI

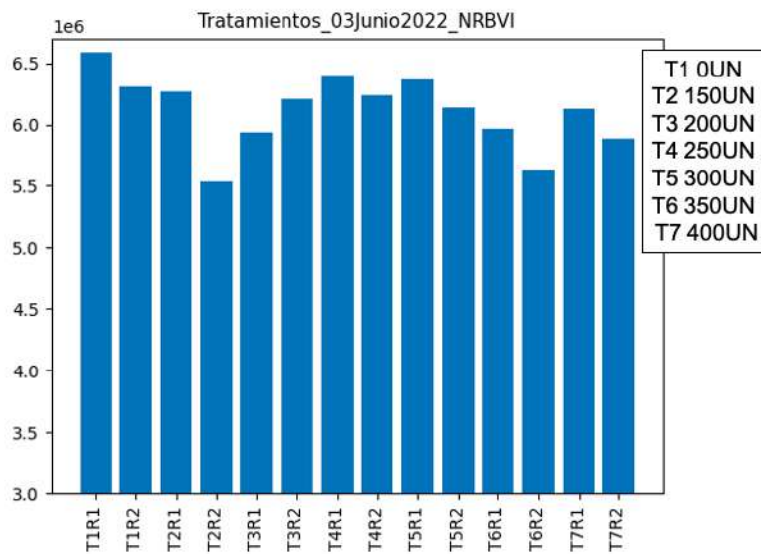


Figura 4.27: Tratamientos de resultados para día 3 de junio 2022 con NRBVI

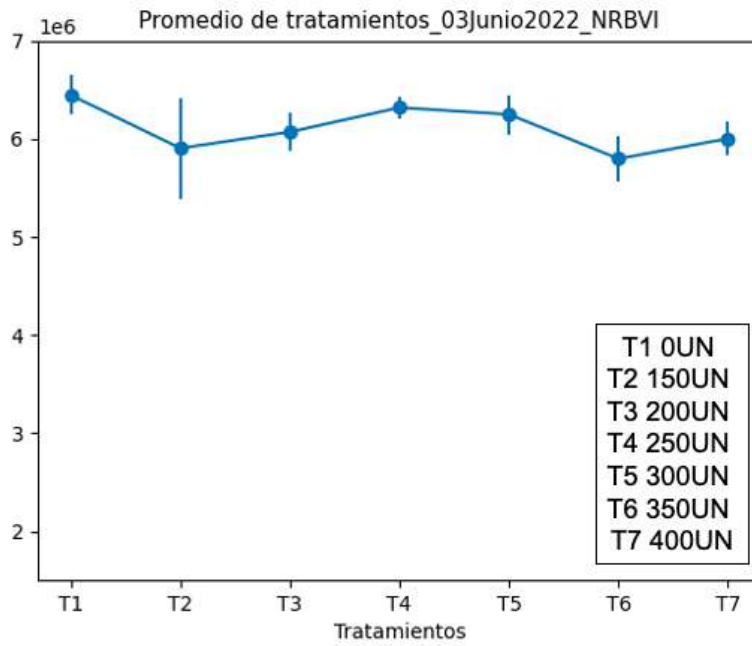


Figura 4.28: Promedio de tratamiento para día 3 de junio 2022 NRBVI

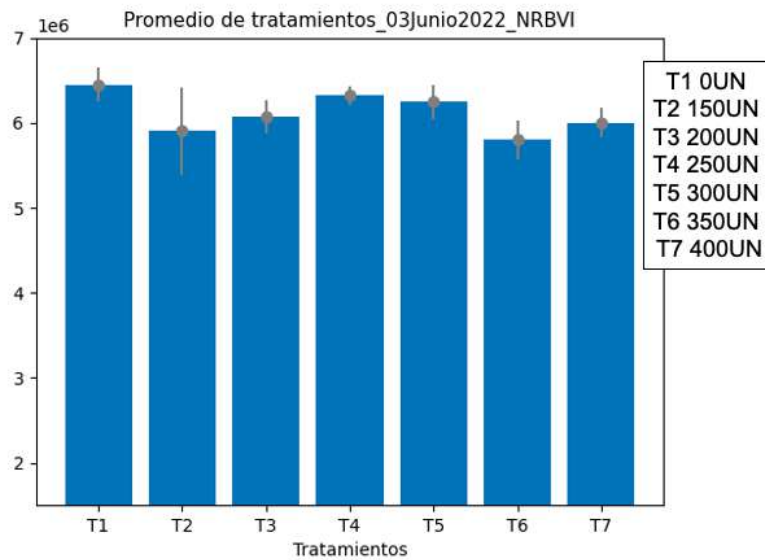


Figura 4.29: Gráfica de barra por promedio para día 3 de junio 2022 NRBVI

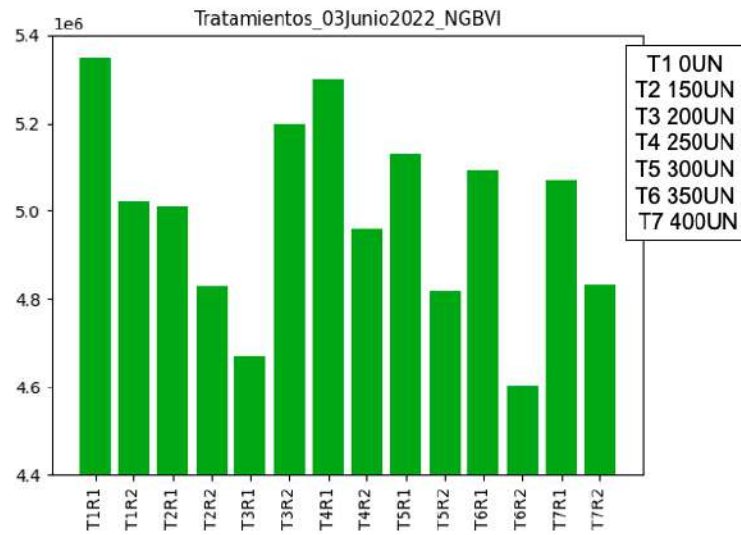


Figura 4.30: Tratamientos de resultados para día 3 de junio 2022 con NGBVI

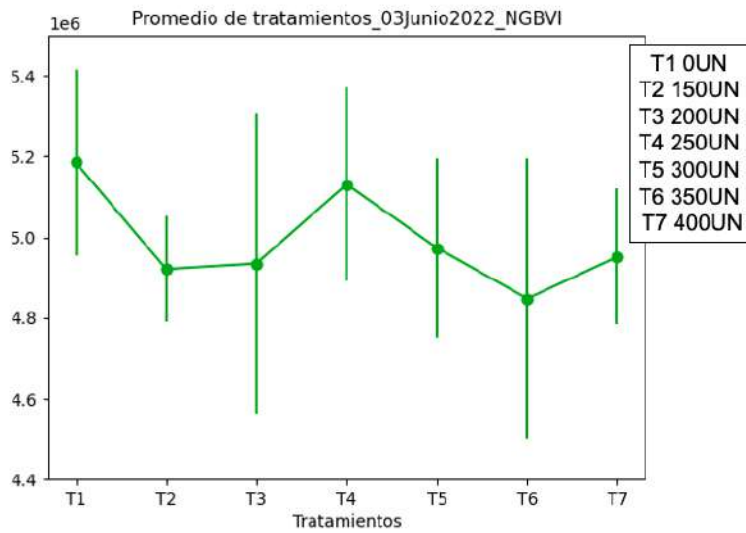


Figura 4.31: Promedio de tratamiento para día 3 de junio 2022 NGBVI

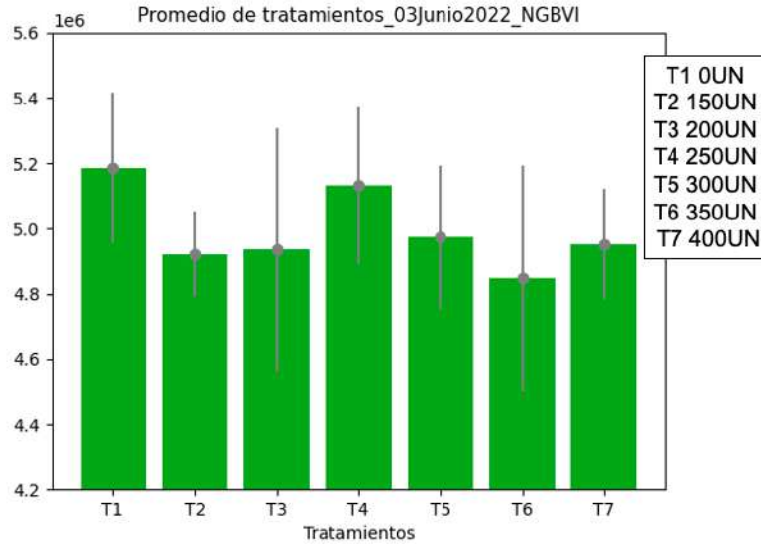


Figura 4.32: Gráfica de barra por promedio de tratamiento para día 3 de junio 2022 NGBVI

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos el día 4 de mayo del 2022, se observó que para el T1, el cual consiste en cero nitrógeno, desde la Figura 4.13a es clara la clorosis y corresponde con las Figuras Figura 4.13b, Figura 4.13c y Figura 4.13d, donde en el NDVI alto (color rojo) representa una alta actividad fotosintética, mientras que para el NGBVI y el NRBVI alto (color rojo) representa clorosis. Con base en lo anterior, se observa una alta tasa fotosintética y clorosis en el tratamiento 1 del cultivo de Maíz, que no se le aplicó nitrógeno, lo cual explica la clorosis, sin embargo, se observó de acuerdo a los resultados una alta tasa fotosintética, lo cual puede ser por un estrés en la planta ocasionado por esta deficiencia en la planta. Con lo anterior nos indica, que no por tener mayor verdor se va a observar una mayor tasa fotosintética, la planta activa rutas metabólicas para eficientizar esta parte y poder sobrevivir.

El T3 y el T4 con 200 y 250 unidades de Nitrógeno lo puede inter-

pretar como que el cultivo está en buen estado, a partir del T5, T6 y T7, según los resultados mostrados de los promedios en los tratamientos se observa una baja e incluso puede llegar a ser tóxico.

Para los resultados del 03 de junio no se encuentran datos interesantes debido a que las plantas se encontraban marchitas, provocando así datos no confiables y una alta variabilidad.

NGBVI y NRBVI son índices desarrollados dentro de la Universidad Autónoma de Sinaloa con el fin de detectar síntomas visuales ocasionados por virus en plantas (Yee Rendon et al., 2021). El presente trabajo de investigación se encontró que dichos índices de vegetación son una herramienta útil para la detección de deficiencias nutricionales en cultivos, como es el caso de deficiencia de nitrógeno en un cultivo de maíz. Tal deficiencia también es detectada con NDVI con la diferencia que en necesario el uso de una cámara especial, como es el caso de la cámara NoIR para la toma de datos y con NGBVI y NRBVI se genera a partir de cualquier cámara RGB.

En cuanto al cálculo del NDVI a diferencia de estudios mencionados en el estado del arte donde pueden calcular el índice de vegetación a partir de ortomosaicos, para este trabajo de investigación se desarrolló el software y hardware para el funcionamiento de la cámara NoIR a demás que sé probó su funcionamiento tanto en vuelos de prueba como en cultivos en campo.

Capítulo 5

Conclusiones

Se logró equipar una plataforma de mapeo multiespectral de hardware-software de bajo costo, capaz de adquirir imágenes RGB e imágenes NoIR, siendo controladas por un microcontrolador y siendo referenciadas a través de un GPS. Esta plataforma fue capaz de realizar levantamientos aplicados en agricultura de precisión para su posterior procesamiento, obteniendo así ortomosaicos y aplicando los índices de vegetación NDVI, NRBVI, NGBVI.

En cuanto a los resultados del estudio de maíz, podemos concluir que la cantidad de nitrógeno aplicada tiene un límite de mejora y cuando la planta ya está seca, los resultados no son confiables.

De los resultados en forma de promedio de ambos casos de estudio se encontró una correlación a la inversa entre los índices NDVI y NGBVI, de ser cierto esto sería muy útil, ya que podríamos eliminar la cámara NoIR y solo utilizar cámaras RGB para futuras investigaciones.

El uso de NGBVI y NRBVI son útiles para la detección de deficiencia de nutrientes, con la ventaja sobre otros índices de vegetación que ambos parten de imágenes RGB.

Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se plantean los siguientes puntos:

- Seguir un cultivo en todas sus etapas de crecimiento con NDVI, NRBVI y NGBVI. Para comparar los resultados en cada índice de vegetación.
- Profundizar en la comparación de NDVI contra NGBVI.
- Generar ortomosaicos FLIR con una cámara de mayor resolución.
- Utilizar un sistema multisensor para la corrección de sombras.

Bibliografía

Generar un ortomosaico usando el asistente Ortomosaico. 2021.

Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción. 2021.

Afriansyah Faisal Lutfi, Muna Niyalatul, Widiastuti Ika, Fanani Nurul Zainal, Purnomo Fendik Eko. Image Mapping Detection of Green Areas Using Speed Up Robust Features // Proceedings - 2019 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering, ICOMITEE 2019. 2019. 1. 165–168.

Arboretum The Morton. chlorosis. 2022.

Barbedo Jayme Garcia Arnal. Detection of nutrition deficiencies in plants using proximal images and machine learning: A review // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. 162. 482–492.

Cao Yang, Li Guo Long, Luo Yuan Kai, Pan Qi, Zhang Shao Ying. Monitoring of sugar beet growth indicators using wide-dynamic-range vegetation index (WDRVI) derived from UAV multispectral images // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. 171. 105331.

Collier Peter. Photogrammetry and Aerial Photography. 2020. 91–98.

Colwell Robert N. History and place of photographic interpretation, in Manual of photographic interpretation. 1997.

- Das Arijit.* Use Neo 6M GPS Module with Raspberry Pi and Python. 7 2019.
- Ganju B L.* Remote Sensing Using Single Unmanned Aerial Vehicle. 2012.
- Gis . MDE.* 2016.
- Gomiero Tiziano.* Soil and crop management to save food and enhance food security. 1 2019. 33–87.
- Gunter Christopher C, Egel Daniel S.* Illustrated Definitions of Plant Problems EXTENSION AGRICULTURE. 2015.
- Honrado J. L.E., Solpico D. B., Favila C. M., Tongson E., Tangonan G. L., Libatique N. J.C.* UAV imaging with low-cost multispectral imaging system for precision agriculture applications // GHTC 2017 - IEEE Global Humanitarian Technology Conference, Proceedings. 2017. 2017-Janua. 1–7.
- Horswell J.* Recording. 2013. Second Edition. 368–371.
- Hsuan Wu Ching, Hao Liang Sheng, Kuo Yeh Ching.* Recognition of rice damage area on UAV ortho-images // Proceedings of 4th IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018, ICASI 2018. 2018. 1092–1094.
- ISPA International Society of Precision Agriculture.* Precision Ag Definition — International Society of Precision Agriculture. 2019.
- Kerkech Mohamed, Hafiane Adel, Canals Raphael.* Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach // Computers and Electronics in Agriculture. 7 2020. 174.

- Khorsandi Azar, Hemmat Abbas, Mireei Seyed Ahmad, Amirfattahi Rasoul, Ehsanzadeh Parviz.* Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions // *Agricultural Water Management*. 2018. 204. 222–233.
- Leonard E. C.* Precision Agriculture. 4-4. 12 2015. 162–167.
- Lárrede S. Pedro de.* NPD. 2020.
- Meivel S., Maheswari S.* Optimization of Agricultural Smart System using Remote Sensible NDVI and NIR Thermal Image Analysis Techniques // *2020 International Conference for Emerging Technology, INCET 2020*. 2020. 1–10.
- Montes De Oca Andrés, Arreola Luis, Flores Alejandro, Sanchez J., Flores Gerardo.* Low-cost multispectral imaging system for crop monitoring // *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2018*. 2018. 443–451.
- Moreno L., Ramos V., Pohl M., Huguet F.* Comparative study of multispectral - satellite images and RGB images taken from drones for vegetation cover estimation // *Proceedings of the 2018 IEEE 38th Central America and Panama Convention, CONCAPAN 2018*. 2018. 1–8.
- Patrício Diego Inácio, Rieder Rafael.* Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. 153. 69–81.
- Patón Daniel.* Normalized Difference Vegetation Index Determination in Urban Areas by Full-Spectrum Photography // *Ecologies*. 2020. 1. 22–35.

Potrino Giuseppe, Palmieri Nunzia, Antonello Venturino, Serianni Abdon. Drones Support in Precision Agriculture for Fighting Against Parasites // 2018 26th Telecommunications Forum, TELFOR 2018 - Proceedings. 2018. 1–4.

NUTRITION — Iron Chlorosis. // . 2003. 649–656.

Rouse J W, Haas R H, Schell J A, Deering D W. Type II Report for the Period. 1973.

Salinero Emilio Chuvieco. Teledeteccion Ambiental. 2008.

Saura Jose Ramon, Reyes-Menendez Ana, Palos-Sanchez Pedro. Mapping multispectral Digital Images using a Cloud Computing software: applications from UAV images // Heliyon. 2019. 5. e01277.

Silva Gustavo Rezende, Escarpinati Mauricio Cunha, Abdala Daniel Duarte, Souza Iuri Rezende. Definition of management zones through image processing for precision agriculture // Proceedings - 13th Workshop of Computer Vision, WVC 2017. 2018. 2018-Janua. 150–154.

Solano Alvarez Nallely, Valencia Hernández Juan Antonio, Pineda Santiago Vergara, Millán-Almaraz Jesús Roberto, Torres-Pacheco Irineo, Guevara-González Ramón Gerardo. Comparative Analysis of the NDVI and NGBVI as Indicators of the Protective Effect of Beneficial Bacteria in Conditions of Biotic Stress // Plants. 4 2022. 11.

Toribio Gladys. NDVI, Cursos de Teledetección, Drones y LIDAR. 2020.

Trembanis Arthur, Lundine Mark, McPherran Kaitlyn. Coastal Mapping and Monitoring. 2021. 251–266.

Yee Rendon Arturo, Torres Pacheco Irineo, Trujillo Lopez Angelica Sarahy, Romero Bringas Karen Paola, Millan Almaraz Jesus Roberto. Analysis of new rgb vegetation indices for phyvv and tmv identification in jalapeño pepper (*Capsicum annuum*) leaves using cnns-based model // Plants. 10 2021. 10.

Anexos

Anexo 1

```
1 import os
2 import cv2
3 from picamera import PiCamera
4 import serial
5 import string
6 import pynmea2
7 import time
8 from time import sleep
9 from datetime import datetime
10 import csv
11
12 datos=[]
13 print(datetime.today().strftime('%Y-%m-%d-%H%M%S'))
14
15 port="/dev/ttyAMA0"
16 ser=serial.Serial(port, baudrate=9600, timeout=0.5)
17
18 def gps(ser):
19     while True:
20         #for i in range(10):
21             dataout = pynmea2.NMEAStreamReader()
22             newdata=ser.readline()
23             #print(newdata)
24
25             if newdata[0:6] == b"$GNRMC":
26                 newmsg=pynmea2.parse(newdata.decode("utf-8"))
27                 lat=newmsg.latitude
28                 lng=newmsg.longitude
29                 #gpss = str(lat) + "," +str(lng)
30                 return str(lat),str(lng)
31
32 camNOIR = PiCamera()
```

```
33 #camNOIR.rotation = 180
34 camNOIR.start_preview()
35 camFLIR = cv2.VideoCapture(0)
36
37 tiempo1= datetime.today().strftime('%Y-%m-%d-%H%M%S')
38
39 for i in range(500):
40     inicio = time.time()
41     file = open('alista'+ str(tiempo1) +'.csv', "a+")
42     spamreader = csv.writer(file)
43
44     tiempo= datetime.today().strftime('%H%M%S')
45     noir = 'NOIR_'+ str(tiempo) +'.jpg'
46     camNOIR.capture('NOIR_'+ str(tiempo) +'.jpg')
47     datos.append(noir)
48
49     return_value , image = camFLIR.read()
50     flir= 'FLIR_'+ str(tiempo) +'.png'
51     cv2.imwrite(flir , image)
52     datos.append(flir)
53
54     G=gps(ser)
55     datos.append(G)
56     print(G, flir , noir)
57     datos.append("\t")
58
59     spamreader.writerow(datos)
60     datos=[]
61
62     file.close()
63
64     fin = time.time()
65     diftiempo=fin-inicio
66     #print(diftiempo)
67
68     time.sleep(5 - diftiempo)
69     fin2 = time.time()
70     #print(fin2-inicio)
71
72 camNOIR.stop_preview()
73 del(camFLIR)
```

Código 5.1: Código para la captura de imágenes NoIR y FLIR con referencia GPS.