

**DINAMICA DE LOS INDICES DE VEGETACION NDVI, GNDVI Y GVI EN UN
CULTIVO DE ARROZ A PARTIR DE IMÁGENES AEREAS
MULTIESPECTRALES TOMADAS POR DRONES**



DIEGO ALEJANDRO GARCIA CARDENAS

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
DIRECCIÓN ADMINISTRATIVA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
NORTE DE SANTANDER**

2018

**DINAMICA DE LOS INDICES DE VEGETACION NDVI, GNDVI Y GVI EN UN
CULTIVO DE ARROZ A PARTIR DE IMÁGENES AEREAS
MULTIESPECTRALES TOMADAS POR DRONES**



DIEGO ALEJANDRO GARCIA CARDENAS

Trabajo de grado para optar al Título de Maestría en Ingeniería Ambiental

DIRECTOR EXTERNO

Msc. DIEGO FERNANDO ALZATE VELASQUEZ

DIRECTOR INTERNO

Phd. JACIPT ALEXANDER RAMON VALENCIA

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
DIRECCIÓN ADMINISTRATIVA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
NORTE DE SANTANDER**

2018

Tabla de Contenido

Resumen	
Abstract	
Introducción	
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
1. Fundamentación teórica, técnica y normativa	6
1.1. Estado del Arte.....	6
1.1.1. A nivel internacional	6
1.1.2. A nivel nacional:	9
1.2. Aspectos teóricos	12
1.2.1. El arroz	12
1.2.2. Vehículos aéreos no tripulados	21
1.2.3. Teledeteccion	25
1.2.4. La agricultura de precisión (AP)	37
1.3. Normatividad colombiana relacionada con el uso de drones.....	43
1.3.1. Circular reglamentaria N° 002	44
2. Estructuración y desarrollo procedimental	51
2.1. Enfoque de la investigación	51
2.2. Materiales.....	52
2.2.1. Dron Iris+ 3DR	52
2.2.2. Cámara canon S100.....	53
2.2.3. Espectroradiómetro Apogeo ps-100.....	54
2.3. Metodología	55
2.3.1. Fase 1.....	57
2.3.2. Fase 2.....	58

2.3.3.	Fase 3.....	66
2.3.4.	Fase 4.....	69
2.3.5.	Fase 5.....	72
3.	Resultados obtenidos	74
3.1.	Análisis e interpretación de resultados	74
3.1.1.	Clasificación NDVI.....	74
3.1.2.	Análisis espacio temporal.....	75
3.1.3.	Series temporales del índice NDVI.....	84
3.1.4.	Análisis estadístico NDVI – GNVI – GVI.....	93
4.	Protocolo para la agricultura de precisión	106
4.1.	Protocolo para el análisis de cultivos agrícolas a partir de imágenes aéreas captadas por drones.....	106
4.1.1.	Definición del cultivo.....	106
4.1.2.	Establecimiento del área de estudio	106
4.1.3.	Identificación de los problemas asociados con el cultivo	107
4.1.4.	Determinación de las variables que influyen en la problemática.....	107
4.1.5.	Establecimiento de los equipos y métodos.....	107
4.1.6.	Ejecución de la relación costo beneficio	107
4.1.7.	Diseño de la ruta de vuelo	108
4.1.8.	Realización de los vuelos	109
4.1.9.	Recolección de los datos de campo.....	109
4.1.10.	Procesamiento de la información	109
4.1.11.	Análisis e interpretación de resultados	110
4.1.12.	Solución	110
4.2.	Dron Iris +3DR	111
4.2.1.	Planificación de una misión de vuelo con el dron Iris + 3DR	111
4.2.2.	Lista de chequeo del dron Iris+ 3DR para antes de salir a campo	112

4.3.	Phantom 3 advanced	114
4.3.1.	Planificación de una misión de vuelo con el dron phantom 3 advanced.....	114
4.3.2.	Lista de verificación para el phantom 3 advanced	115
5.	Conclusiones	116

Índice de figuras

- Figura 1. Sistema radicular adventicio. Fuente: (Moquete, 2010, p.13)
- Figura 2. Tallo, nudo, entrenudo. Fuente: (Moquete, 2010, p.13)
- Figura 3. Vaina de la hoja (izquierda) y lígulas y aurículas (derechas) Fuente: (Moquete, 2010, p.13)
- Figura 4. Estructura de una espiguilla (izquierda) y órganos de una espiguilla (derecha). Fuente: (Moquete, 2010, p.13)
- Figura 5. Dron de ala fija. Fuente: (Addati y Pérez, 2014, p.6)
- Figura 6. Dron de ala rotatoria. Fuente: (Autor)
- Figura 7. Espectro electromagnético. Fuente: Muñoz y Pérez (Almeida, 2015)
- Figura 8. Reflectividad de una hoja. Fuente: (Chuvienco, 2008)
- Figura 9. NDVI procesada a partir de una imagen NGB (izquierda) e imagen NRG (derecha). Fuente: (Berrio, 2015)
- Figura 10. Respuesta espectral de las hojas de las plantas en el visible e infrarrojo cercano para una hoja muerta (izquierda), estresada (centro) y saludable (derecha). Fuente: agribotix (2014, como se citó en Berrio, 2015)
- Figura 11. Reflectancia de la planta de arroz en la etapa de floración. Fuente (Ortega, 2015)
- Figura 12. Formula del NDVI. Fuente: (Díaz, 2015)
- Figura 13. Formula del GNDVI. Fuente: (Díaz, 2015)
- Figura 14. Formula del GVI. Fuente (Díaz, 2015)
- Figura 15. Tecnologías agricultura de precisión. Fuente: Chartuni et al., (como es anunciado en Díaz, 2013)
- Figura 16. Representación de información geográfica. Fuente: (Puerta, Trigozo y Bravo, 2011)
- Figura 17. Representación de un raster. Fuente: (Esri, 2015)
- Figura 18. Frente y posterior del dron Iris+ 3DR. Fuente: IRIS+ Operation Manual
- Figura 19. Cámara canon s100. Fuente: Autor
- Figura 20. Espectroradiómetro Apogeo ps-100
- Figura 21. Ubicación del cultivo. Fuente: Autor. Imagen satelital obtenida a través de google earth.
- Figura 22. Dron Iris+ de 3DR. Fuente: Autor

Figura 23. Sección 1 del vuelo. Fuente: Autor Figura 24. Sección 2 del vuelo. Fuente: Autor

Figura 25. Despegue del dron Iris+. Fuente: autor

Figura 26. Inicio de la ruta de vuelo del dron Iris+ 3DR. Fuente: autor

Figura 27. Baterías para el dron Iris+ 3DR. Fuente: Autor.

Figura 28. IRIS+ con la cámara instalada. Fuente: Autor.

Figura 29. Soporte de la cámara S100. Fuente: Autor.

Figura 30. Foami blanco cerca al cultivo. Fuente: Autor

Figura 31. Dron en el cultivo de arroz. Fuente: Autor

Figura 32. Aterrizaje del dron Iris + 3DR. Fuente. Autor

Figura 33. Filtro de transmisión de datos de una cámara canon s100. Fuente: (Alzate, 2017)

Figura 34. Puntos de control. Fuente: Autor

Figura 35. Perímetro del cultivo. Fuente: Autor Figura 36. Corte del cultivo. Fuente: Autor.

Figura 37. Zonas representativas del cultivo. Fuente: Autor

Figura 38. Primer vuelo (17/07/2016)

Figura 39. Segundo vuelo (24/07/2016)

Figura 40. Tercer vuelo (14/08/2016)

Figura 41. Cuarto vuelo (21/08/2016)

Figura 42. Quinto vuelo (04/09/2016)

Figura 43. Sexto vuelo (18/09/2016)

Figura 44. Séptimo vuelo (25/09/2016)

Figura 45. Octavo vuelo (08/10/2016)

Figura 46. Noveno vuelo (16/10/2016)

Figura 47. Décimo vuelo (22/10/2016)

Figura 48. Undécimo vuelo (30/10/2016)

Figura 49. Duodécimo vuelo (07/11/2016)

Figura 50. Hoja de arroz afectada por Pyricularia grisea. Fuente: (Fedearroz, 2008)

Figura 51. Área de la muestra 3 de fecha (28/08/2016). Fuente: autor

Figura 52. Zonas afectadas por Pyricularia grisea fecha 25/09/2016. Fuente: Autor

Figura 53. NDVI multitemporal de las 14 muestras zonales. Fuente: Autor.

Figura 54. Etapas de crecimiento del cultivo de arroz. Fuente (Mendoza, 2012)

Figura 55. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (24/07/2016). Fuente: Autor

Figura 56. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (14/08/2016). Fuente: Autor

Figura 57. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (04/09/2016). Fuente: Autor

Figura 58. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (18/09/2016). Fuente: Autor

Figura 59. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (25/09/2016). Fuente: Autor

Figura 60. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (08/10/2016). Fuente: Autor

Figura 61. Panícula desarrollada de la planta de arroz en la fecha (08/10/2016). Fuente:
Autor

Figura 62. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (16/10/2016). Fuente: Autor

Figura 63. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (07/11/2016). Fuente: Autor

Figura 64. Regresiones temporales NDVI-GNDVI de las muestras zonales. Fuente: Autor.

Figura 65. Mosaico GNDVI (17/07/16)

Figura 66. Mosaico GNDVI (24/07/16)

Figura 67. Mosaico GNDVI (14/08/16)

Figura 68. Mosaico GNDVI (21/08/16)

Figura 69. Mosaico GNDVI (04/09/16)

Figura 70. Mosaico GNDVI (18/09/16)

Figura 71. Mosaico GNDVI (25/09/16)

Figura 72. Mosaico GNDVI (08/10/16)

Figura 73. Mosaico GNDVI (16/10/16)

Figura 74. Mosaico GNDVI (22/10/16)

Figura 75. Mosaico GNDVI (30/10/16)

Figura 76. Mosaico GNDVI (07/10/16)

Figura 77. Regresiones temporales NDVI-GVI de las muestras zonales. Fuente: Autor.

Figura 78. Mosaico GVI (17/07/16)

Figura 79. Mosaico GVI (24/07/16)

Figura 80. Mosaico GVI (14/08/16)

Figura 81. Mosaico GVI (21/08/16)

Figura 82. Mosaico GVI (04/09/16)

Figura 83. Mosaico GVI (18/09/16)

Figura 84. Mosaico GVI (25/09/16)

Figura 85. Mosaico GVI (08/10/16)

Figura 86. Mosaico GVI (16/10/16)

Figura 87. Mosaico GVI (22/10/16)

Figura 88. Mosaico GVI (30/10/16)

Figura 89. Mosaico GVI (07/11/16)

Índice de tablas

Tabla 1. Sensores y bandas espectrales. Fuente: (Díaz, 2015)

Tabla 2. Sección 1 de vuelo. Fuente: Autor.

Tabla 3. Sección 2 de vuelo. Fuente: Autor.

Tabla 4. Vuelos en las fases de crecimiento. Fuente: Autor.

Tabla 5. Clasificación NDVI de los ortofotomosaicos. Fuente: Autor.

Tabla 6. Regresión NDVI-GNDVI. Fuente: Autor

Tabla 7. Regresión NDVI-GVI. Fuente: Autor

DEDICATORIA

Esta tesis es dedica a mi querida abuela **Alicia Durán**, a mi tía **Isabel Durán** y a mi madre **Martha Cárdenas** porque su amor y apoyo incondicional me motivaron a culminar tan importante proyecto de vida.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a el director **Jacipt Ramón**, por su gestión para el desarrollo y culminación del trabajo y por los aportes para el crecimiento personal y profesional.

A mi director externo **Diego Alzate**, por compartir los conocimientos y experiencia en el tema de investigación. Su ejemplo motiva a seguir en el camino de nuevos retos académicos.

A mi compañera de vida **Carolina Higuera** por su apoyo incondicional y acompañamiento en el trabajo de campo de este proyecto.

A mi familia (**Eparquio, Alex, Milena, Claudia y Silvana**) porque el sentimiento y apoyo familiar motiva a seguir luchando para generar bienestar y alegría en los seres más cercanos.

A mis compañeros de maestría, porque se pasaron momentos agradables y son personas que por su calidad ayudan al crecimiento profesional y personal.

RESUMEN

En este trabajo se analiza la dinámica de los índices de vegetación; el índice vegetativo diferencial normalizado (NDVI), la variante del NDVI que utiliza la banda del verde (GNDVI) y el índice de vegetación verde (GVI) en un cultivo de arroz de la variedad fedearroz 2000 durante su desarrollo fenológico. Estos índices se calcularon a través del geoprocesamiento de imágenes aéreas multiespectrales tomadas desde drones o UAV's, con el fin de identificar que zonas del cultivo se encuentran estresadas o poco desarrolladas, saludables y densas, y para demostrar la utilidad de la cámara canon S100. El cultivo de arroz tenía un área de aproximadamente 4,1 hectáreas y su ubicación corresponde a la finca El Faro en la vereda Campo Hermoso del municipio de San José de Cúcuta - Norte de Santander. Para este estudio se realizaron 12 vuelos, estos se ejecutaron durante las fases de crecimiento y desarrollo del cultivo de arroz, el primer vuelo se efectuó al inicio de la fase vegetativa (17 de julio de 2016) y el último en la fase de maduración (07 de noviembre de 2016). Como resultados se muestra un análisis cualitativo espacio temporal de los mosaicos NDVI, en el que se identificó que el cultivo fue atacado por *Pycularia grisasea*; la caracterización del comportamiento del NDVI a través de un análisis multitemporal; la correlación entre NDVI y GNDVI arrojó valores mayores a 0,90 lo que indica que hay una relación positiva y fuerte, la correlación entre el NDVI y GVI mostró una correlación negativa e indirecta perfecta y finalmente se estableció un protocolo sobre el análisis de cultivos agrícolas con el uso de drones como aporte de nuevas tecnologías en agricultura de precisión a la comunidad académica, empresas o entidades agrícolas y productores de arroz.

Palabras claves: Agricultura de precisión, Drones, Geoprocesamiento, Imágenes Multiespectrales.

ABSTRACT

In this study, the of the dynamic of the vegetation indexes, the normalized differential vegetative index (NDVI), the variant of the NDVI that uses the green band (GNDVI) and the green vegetation index (GVI) in a rice crop of the variety *Fedearroz 2000* during its phonological development are analyzed. These indexes were calculated through the geoprocessing of multispectral aerial images taken from drones or UAVs, aiming at identifying which zones of the crop were under stress or underdeveloped, healthy and dense, and demonstrating the utility of the Canon S100 camera. The rice crop had an area of approximately 4.1 hectares and its location corresponds to the farm El Faro in the footpath Campo Hermoso in the district of San Jose de Cucuta – Norte de Santander. For this project, 12 flight were undertaken; these ones were executed during the growth and development phases of the rice crop, the first flight was carried out at the beginning of the vegetative phase (July 17th 2016) and the last one was during the maturation phase (November 07th 2016). As a result, a space-time qualitative analysis of the NDVI mosaic is shown, in which it was identified that the crop was attacked by *Pycularia grisasea*; the characterization of the NDVI's behavior through a multitemporal analysis; the correlation between the NDVI and the GNDVI led to values above 0.90, which indicates that there is a strong and positive relation, the correlation between the NDVI and the GVI showed a negative and perfect indirect correlation , and finally, a protocol about the analysis of agricultural crops with the use of drones as a contribution of new technologies in precision farming to the academic community, enterprises or farming entities and rice producers was established.

Palabras claves: Agricultura de precisión, Drones, Geoprociamiento, Imágenes Multiespectrales.

INTRODUCCION

En el Departamento Norte de Santander el cultivo del arroz, es el principal renglón de la economía agrícola, con un área de siembra anual aproximada de 25.000 hectáreas, generando 400.000 jornales y una producción promedio de 112.500 toneladas de arroz paddy para suplir la demanda de la industria molinera local y comercializar los excedentes de producción en otras regiones del país. Fedearroz (como se citó en Canal et al., 2009)

La variabilidad y cambio climático son fenómenos que han afectado el desarrollo del cultivo de arroz en Norte de Santander, en el año 2011 los promedios de humedad relativa superaron el 80%, las lluvias fueron más intensas de febrero a mayo y de noviembre a diciembre. La evaluación fitosanitaria de cerca de 90 fincas dentro y fuera del distrito de riego del río Zulia, mostró alta incidencia de enfermedades como helmintosporiosis, sarocladium y mancha café; estas enfermedades están asociadas con el estrés de la planta. Helmintosporiosis se relaciona con planes inadecuados de nutrición, desbalance nutricional, deficiencia de nutrientes, toxicidad y aplicación de fertilizantes fuera de época. (Cuevas, 2012)

En la actualidad la agricultura de precisión se torna como una alternativa para disminuir los efectos negativos descritos anteriormente. Es una técnica que consiste en el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento de la variabilidad existente en una explotación agrícola. Según Fountas et al. (2003), la agricultura de precisión se define como el “manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel de subparcela de campo, para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental”. Para caracterizar esta variabilidad se utilizan herramientas tecnológicas como los Sistemas de Posicionamiento Global, conocidos popularmente como GPS, sensores planta-clima-suelo e imágenes multiespectrales obtenidas a partir de satélites, aviones o UAS/RPAS. (Díaz, 2015)

En Norte de Santander, hay una gran cantidad de pequeños cultivos, con terrenos complejos que no pueden ser estudiados a partir de imágenes de satélites porque su resolución espacial, temporal y espectral no lo permite. (Berni et al., 2009), enuncia que los satélites actuales tiene algunas limitaciones para el manejo de cultivos, como la falta de imágenes con resoluciones espaciales y espectrales óptimas y tiempos de visita desfavorables para detectar el estrés en los cultivos, además menciona que las plataformas aéreas tripuladas

tienen costos operativos altos. Los sensores de detección remota colocados en vehículos aéreos no tripulados pueden llenar este vacío, proporcionando enfoques de bajo costo para cumplir con los requisitos críticos de resoluciones espaciales, espectrales y temporales. (Diaz, 2015) indica que las imágenes multiespectrales de drones capturan datos de los espectros infrarrojo cercano y visible, y a partir de ellas se pueden crear imágenes del cultivo que diferencia entre las plantas sanas y enfermas. Además a través de los drones es posible obtener información semanal, diaria e incluso en tiempo real, lo que permite crear una serie temporal para observar cambios y tomar decisiones adecuadas sobre el cultivo.

En este trabajo se analiza la dinámica de los índices de vegetación; el índice vegetativo diferencial normalizado (NDVI), la variante del NDVI que utiliza la banda del verde (GNDVI) y el índice de vegetación verde (GVI) en un cultivo de arroz de la variedad fedearroz 2000 durante su desarrollo fenológico, el NDVI fue calculado gracias al geoprocesamiento de imágenes aéreas multiespectrales tomadas desde drones con el fin de identificar que zonas del cultivo de arroz se encuentran densas, saludables o estresadas.

A diferencia de otros estudios en los cuales se emplean satélites para analizar índices de vegetación o drones con cámaras multiespectrales e hiperespectrales de alto valor, este trabajo usó dos equipos de bajo costo, la cámara canon S100 convertida a NDVI a través de un filtro NGB y el dron Iris+ de la marca 3DR. El filtro bloquea parcialmente la banda roja (600-675nm) y permite la entrada de una porción de luz roja e infrarroja cercana (676-773 nm), la cámara también captura información de las bandas verde (441-565 nm) y azul (384-537 nm). Con esta capacidad para la captura de información espectral, es posible estimar varios índices de vegetación entre ellos el NDVI, GNDVI y GVI.

Para este estudio se realizaron 12 vuelos, estos se ejecutaron aproximadamente cada semana durante las fases de crecimiento y desarrollo del cultivo de arroz, el primer vuelo se efectuó al inicio de la fase vegetativa (17 de julio de 2016) y el último en la fase de maduración (07 de noviembre de 2016). Como resultados se muestra un análisis cualitativo espacio temporal de los mosaicos NDVI, en el que se identificó que el cultivo fue atacado por *Pycularia grisasea*; la caracterización del comportamiento del NDVI a través de un análisis multitemporal; la correlación entre NDVI y GNDVI arrojó valores mayores a 0,90 lo que indica que hay una relación positiva y fuerte, la correlación entre el NDVI y GVI mostró una correlación negativa e indirecta perfecta y finalmente se estableció un protocolo sobre el

análisis de cultivos agrícolas con el uso de drones como aporte de nuevas tecnologías en agricultura de precisión a la comunidad académica, empresas o entidades agrícolas y productores de arroz.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Analizar la dinámica de los índices vegetativos NDVI, GNDVI y GVI en las diferentes fases de crecimiento de un cultivo de arroz a partir del geoprocesamiento de imágenes aéreas multiespectrales capturadas por la cámara canon S100 instalada en el dron Iris+ 3DR, para diagnosticar e identificar problemas de desarrollo del cultivo y mostrar la utilidad del sensor.

Objetivos específicos

- Desarrollar la metodología para la calibración radiométrica de las imágenes NGB (NIR-GREEN-BLUE) obtenidas por la cámara canon S100 en el dron Iris+ 3DR.
- Generar ortofotomosaicos NDVI durante las 3 fases fenológicas del cultivo de arroz de variedad fedearroz 2000, para analizar la variabilidad espacio temporal del índice y diagnosticar el estado del cultivo de arroz.
- Generar series temporales del índice vegetativo diferencial normalizado (NDVI) y caracterizar la fenología del cultivo de arroz de variedad fedearroz 2000.
- Calcular los índices de vegetación GNDVI y GVI y correlacionarlos con el NDVI, para mostrar la utilidad de la resolución espectral de la cámara canon S100 en el análisis de vegetación.
- Establecer un protocolo sobre el análisis de cultivos agrícolas a partir de imágenes aéreas multiespectrales obtenidas desde drones como aporte de nuevas tecnologías en agricultura de precisión a la comunidad académica, empresas o entidades agrícolas y productores de arroz.

CAPÍTULO I
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA, TÉCNICA
Y NORMATIVA

1. Fundamentación teórica, técnica y normativa

1.1. Estado del Arte

Las investigaciones en el planeta con respecto al uso de drones en agricultura de precisión son escasas debido a que es un tema de actualidad. A nivel internacional existen investigaciones más avanzadas que a nivel nacional, estas tienen un carácter experimental y sus resultados dan soporte y son consistentes, mientras que las investigaciones nacionales se centran en aportar conocimientos y teoría sobre el tema. A nivel regional el tema es prácticamente nulo, esta investigación es pionera en la región Norte de Santander y se espera tenga gran impacto a nivel nacional e internacional.

A continuación se presentan algunas investigaciones relacionadas con drones, agricultura de precisión y sistemas de información geográfica:

1.1.1. A nivel internacional

Hay estudios de drones e imágenes aéreas multiespectrales que se han realizado con éxito en la agricultura de precisión sobre todo en países practicantes de tecnología avanzada, como China y Alemania. Malasia al ser un productor de arroz relevante también ha efectuado estudios importantes. Las siguientes investigaciones apoyan el trabajo a nivel internacional:

1.1.1.1. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery

En la ciudad de Rugao, provincia de Jiangsu, China, (Zhou et al., 2017) adquirieron imágenes multiespectrales y digitales en etapas críticas de crecimiento de diferentes variedades de arroz, calcularon varios índices de vegetación, entre ellos el índice vegetativo diferencial normalizado (NDVI) y los correlacionaron con el rendimiento del grano y el índice de área foliar (LAI), los resultados mostraron que la mejor etapa para la predicción del rendimiento es la de inicio de la panícula (perteneciente a la fase de reproducción), el índice de vegetación con mejores resultados fue el NDVI [800,720] el cual mostró una relación lineal con el rendimiento del grano y un valor de R^2 de 0,75.

1.1.1.2. Rice Yield Estimation using Below Cloud Remote Sensing Images Acquired by Unmanned Airborne Vehicle System

En Kampung Setia Jaya, Yan, Kedah, (Teoh et al., 2016) desarrollaron un método que utilizó vehículos aéreos no tripulados (UAV's) y la técnica de procesamiento de imágenes con el objetivo de estimar el rendimiento de arroz. El experimento usó una cámara digital Tetracam en un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para adquirir imágenes de la banda roja (R), verde (G) e infrarrojo cercano (NIR) de cultivos de arroz a una altura de 300 m sobre el suelo.

Los valores NIR y R se usaron para calcular el valor del índice de vegetación de diferencial normalizada (NDVI). Se analizaron las relaciones entre el rendimiento frente a los valores R, G, NIR y NDVI. Los resultados mostraron que la relación más alta se encontró en NDVI seguido por R, G y NIR con valores de coeficiente de determinación (R^2) de 0.748, 0.727, 0.395 y 0.014 respectivamente. Esto permitió establecer un modelo de regresión para la estimación del rendimiento de arroz a partir de valores NDVI. Los resultados mostraron que el modelo era capaz de estimar el rendimiento de arroz con un valor de precisión promedio de 80.3%.

1.1.1.3. Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging

En el campus Klein-Altendorf, 40 km al sur de Cologne, Alemania, (Bendig et al., 2014) ejecutaron un estudio en cebada para evaluar si los modelos digitales de superficie del cultivo (CSM) obtenidos a partir de imágenes RGB tomadas desde UAV's podían predecir la biomasa; los CSM de muy alta resolución espacial y temporal (1 cm / pixel) se derivaron de imágenes rojas, verdes, azules (RGB) capturadas de un pequeño vehículo aéreo no tripulado (UAV). La comparación entre la altura de la planta en campo (PHref) con los CSM arrojaron un R^2 de 0,92; también obtuvieron una alta correlación entre los CSM y la biomasa fresca ($R^2= 0.81$) y biomasa seca ($R^2 = 0.82$)

1.1.1.4. An airborne imaging system for mapping spatial variability in sugarcane

Esta investigación desarrollo una solución técnica de fácil implementación y bajo costo para mapificar la variabilidad espacial del NDVI dentro del campo y para explorar su relación con las condiciones de nutrición y agua del cultivo de la caña de azúcar, se realizó un experimento basado en el empleo de un avión ultraligero, equipado con cámaras de espectro visible, infrarrojo cercano y detección térmica infrarroja. Se obtuvieron imágenes de muy alta resolución sobre un campo experimental en el que se controlaron y midieron la irrigación y el tratamiento con nitrógeno para tres diferentes variedades de caña de azúcar. Se calculó el Índice de la Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI, en inglés) y la temperatura superficial de los lotes experimentales, los que se usaron para interpretar la variabilidad espacial en el campo, en términos de respuesta a los tratamientos con nitrógeno y agua. Los resultados experimentales indicaron que la técnica empleada puede producir mapas cuantitativos que muestran áreas de condiciones de crecimiento cañero variable como influidas por nutrientes y humedad en campos cañeros. El siguiente paso incluirá la combinación de las propiedades de cubierta termal y las espectrales para obtener mapas de la situación de nutrición y humedad del cultivo, con el fin de gerenciar zonas dentro de los campos y como una herramienta de respaldo a las decisiones para el ajuste de las aplicaciones de nitrógeno y agua en correspondencia a las reales necesidades de cada zona administrada. (Lebourgeois et al., 2007)

1.1.1.5. Evaluación del índice vegetativo normalizado (NDVI) para la definición de unidades de manejo diferenciado del viñedo en la Roja Alaviesa

El objetivo de este trabajo fue el de evaluar el interés del NDVI para la definición de unidades de manejo diferenciado en el viñedo. El trabajo consistió en dos ensayos. El primero de ellos se centró en el estudio de la evolución del estado hídrico dentro del viñedo, comparando zonas que difieran en su valor de NDVI. Para ello, se establecieron en tres parcelas puntos de medición del potencial hídrico (puntos de seguimiento hídrico, PSH) en los que se realizó un seguimiento del estado hídrico utilizando medidas de potencial xilematico a las 9 y a las 12 (horas solar). Los resultados obtenidos han demostrado que el NDVI no permite, en las condiciones de estudio, delimitar zonas del viñedo con un comportamiento hídrico diferente.

El segundo ensayo consistió en comparar características de las cepas medidas in situ, como son el crecimiento, la carga, el número de hojas secas y las características espectrales de la hoja, con las clases establecidas de NDVI. Para ello se estableció una red de puntos de zonificación (PZ) que permitieron hacer una caracterización detallada de la parcela. El estudio realizado determinó que el empleo del NDVI permite diferenciar zonas del viñedo en lo relativo a su crecimiento vegetativo, carga y características espectrales de la hoja, gracias a esto, este parámetro podría contribuir a racionalizar prácticas de cultivo tales como el abonado, el aclareo de racimos, el deshojado, etc., ajustando la intensidad de las mismas a la necesidades de cada zona del viñedo. (Echevarría, 2010)

1.1.2. A nivel nacional:

A nivel nacional los trabajos aportan conocimientos y conclusiones que permiten avanzar en el tema de agricultura de precisión en cultivos de papa y uchuvas. La obtención de imágenes aéreas en el cultivo de arroz desde drones es un trabajo pionero a nivel regional y nacional. Los siguientes son las investigaciones encontradas en Colombia:

1.1.2.1. Uso de drones como herramienta de planificación en agricultura de precisión para la detección temprana de problemas en cultivos de papa

Esta es una investigación de tesis de maestría que presenta un análisis del estado de un cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad R12, implementando el uso de drones o UAV's (aeronaves no tripuladas). La importancia de este estudio radica en el poder demostrar que con la aplicación de este tipo de herramientas tecnológicas se pueden lograr un mejor desarrollo en los sistemas productivos y tomar decisiones anticipadas que permitan el óptimo desarrollo del cultivo.

De la misma manera se busca la viabilidad de esta herramienta a nivel económico para proporcionar una alternativa a los pequeños y grandes agricultores. Los resultados mostraron que la respuesta espectral si permite identificar problemas en el cultivo, tonalidades cafés y rojizas indicaron un índice NDVI bajo y se asociaban o con suelo desnudo o con problemas de crecimiento y/o presencia de plantas invasoras. Tonalidades amarillas representaron zonas de menor desarrollo del cultivo y las tonalidades verdes expresaron las zonas con el mejor

desarrollo del cultivo y cuyo crecimiento se caracterizaba por la presencia de 8 a 9 entrenudos. De esta forma, las respuestas espectrales reflejaron zonas con vegetación saludable y vigorosa, zonas con vegetación estresada, zonas con vegetación no saludable y zonas suelo desnudo.

A partir de la imagen NDVI clasificadas, la autora verifico en campo lo sucedido y seleccionó 3 zonas con posibles problemas para el cultivo de papa bajo estudio: la zona 1 encontró un exceso de agua en cada uno de los surcos de esta área del cultivo y el suelo con una evidencia una saturación hídrica que genera un aspecto fangoso, además la plantas presentaban un crecimiento tardío de 2 a 3 entrenudos y mínima cobertura de follaje. La zona 2 mostró especies que presentaban un desarrollo menor que el resto del cultivo, con un crecimiento de las plantas de 3-4 entrenudos en promedio y finalmente la zona 3 identifico un canal de desagüe del predio, que genera una zona de exceso hídrico con encharcamiento, afectando el desarrollo y calidad del cultivo de papa. (Berrio, 2015)

1.1.2.2. Apoyo a la agricultura de precisión en Colombia a partir de imágenes adquiridas desde vehículos aéreos no tripulados (UAV's)

Esta tesis muestra un aporte a la Agricultura de Precisión (AP) mediante la formulación de un método matemático que permite realizar el dimensionamiento de áreas de cultivos a partir de fotografías aéreas tomadas desde un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV), a través de dicho dimensionamiento el autor considera que es posible tomar decisiones sobre el cultivo así como estimar su producción. La validación del método formulado se dio dentro un cultivo de uchuvas en la Sabana de Bogotá, Colombia. Dentro de los resultados obtenidos por esta investigación, se detalla la prueba V (vuelo sobre un cultivo), el cual arrojó los siguientes datos:

Levantamiento del plano del cultivo (con cinta métrica y recorriendo el cultivo)

- Área cultivo: 2.491m²
- Perímetro cultivo: 238.5m

Análisis de los cinco casos de estudio estimando el ECM

- Área cultivo: $2.498,5 \pm 3.6m^2$
- Perímetro cultivo: $242,1 \pm 0.35m$

El autor concluyo que el método formulado para el dimensionamiento de áreas de cultivos a partir de fotografías aéreas tomadas desde UAV's junto a la aplicación de software desarrollada, son procesos acertados para la fotogrametría sobre terrenos agrícolas y presentaron medidas válidas para la toma de decisiones desde el enfoque de la Agricultura de Precisión. (Fajardo, 2014)

1.1.2.3. Especialización del estrés biótico en los frailejones debido al cambio climático en el parque natural Chingaza mediante UAV's

Satoque y Gutierrez (2016) realizaron un estudio con el objetivo de “desarrollar una metodología de teledetección cuantitativa para identificar, localizar y diferenciar los frailejones que presenten estrés biótico de los sanos, en la zona de estudio ubicada en el Parque Natural Nacional Chingaza, mediante imágenes multiespectrales capturadas desde una plataforma UAV”.

El estudio uso un vehículo aéreo no tripulado TAROT 680PRO y dos cámaras Canon A2300, una obtenía información del espectro visible y la otra de las bandas Infrarrojo cercano, verde y azul. La metodología consistió en obtener firmas espectrales de los frailejones sanos y enfermo y validar diferentes índices de vegetación (G, GNDVI, GOSAVI, GBNDVI, TVI y GLI) con el fin de determinar el que mejor muestre y resalte el estrés biótico en los individuos. Los autores tuvieron problemas en el geoprocesamiento de las imágenes y sus resultados con los índices de vegetación calculados no fueron relevantes puesto que estos tuvieron una clasificación insuficiente y no permitieron discriminar frailejones sanos de enfermos.

1.2. Aspectos teóricos

1.2.1. El arroz

1.2.1.1. Origen del arroz

De Candolle y Watt (como se menciona en Degiovanni, Berrío y Charry, 2010) afirman que *Oryza sativa* L. fue cultivada originalmente en India, más exactamente al sur de este subcontinente, donde hay condiciones favorables para su cultivo. La literatura hindú (cuyas obras datan de 1300 y 1000 AC) describe ya con precisión algunas prácticas de cultivos, como el trasplante, y hace una clasificación del arroz según sus características agronómicas y alimenticias.

Se admite que el arroz se propago desde el sudeste asiático y al sur de India hasta la China, en una época aun no establecida pero que se calcula transcurrió mas de 3000 años AC. Este cereal fue llevado de China a Corea y de este país, o desde China, fue introducido en Japón, al parecer en el siglo I AC. Cheaney (como se cita en Degiovanni et al., 2010)

Los árabes fueron muy eficientes en expandir el cultivo del arroz. En el siglo IV AC lo introdujeron en Egipto, y entre el siglo VIII y el X llevaron el arroz asiático de grano largo a África oriental, al noreste de Madagascar, luego a Marruecos y poco después a España cuando invadieron la península ibérica. Angladette (como se cita en Degiovanni et al., 2010)

¿De dónde vino y cuando llegó el arroz al hemisferio occidental? No hay aún una respuesta exacta. Algunos autores afirman que Cristóbal Colon, en su segundo viaje en 1493, trajo semillas de arroz al nuevo mundo, pero no germinaron Cheaney (como se cita en Degiovanni et al., 2010). El historiador Simón (como se menciona en Degiovanni et al., 2010) afirman que en el valle del río Magdalena, en Colombia, hubo siembras de arroz en 1580.

1.2.1.2. Características de la planta de arroz

El arroz es una planta de suelos húmedos e inundados, cuyo sistema radicular principal es adventicio (figura 1). Tanto el crecimiento como el desarrollo de las raíces son características varietales, afectadas por el medio de cultivo y los niveles de fertilización. La longitud de las raíces decrece cuando se incrementa el nivel de nitrógeno en el medio de cultivo. (Moquete, 2010)

La siguiente figura se observa el sistema radicular de la planta de arroz:



Figura 1. Sistema radicular adventicio. Fuente: (Moquete, 2010, p.13)

El tallo es erecto y cilíndrico, formado por la alternación de nudos y entrenudos (figura 2). Normalmente hay de 4-6 entrenudos alargados, con más de 1 cm, al momento de la cosecha. Vergara (como se citó en Moquete, 2010). En cada nudo se forma una yema y una hoja. Los hijos, que son tallos verdaderos, se van desarrollando en orden alterno en el tallo principal. González, Rosero y Arregocés (como se citó en Moquete, 2010).

Esta figura detalla el tallo, los nudos y entrenudos de una planta de arroz

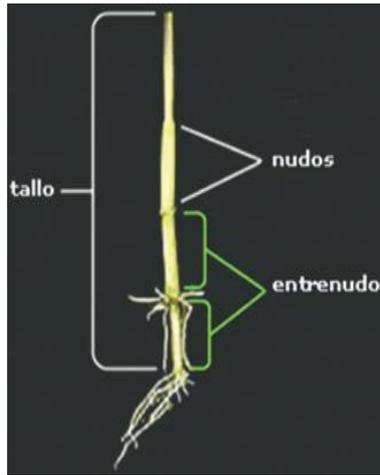


Figura 2. Tallo, nudo, entrenudo. Fuente: (Moquete, 2010, p.13)

Las hojas son de lámina larga, compuestas de dos partes: una lámina y una vaina hendida longitudinalmente que abraza una porción del tallo, rodeando un entrenudo completo (figura 3). Cada hoja, en el punto de unión de la lámina con la vaina, presenta una estructura triangular y transparente conocida como lígula y un par de apéndices verduzcos llamados aurículas. Estas últimas estructuras no están presentes en las malezas gramíneas, con las cuales el arroz puede confundirse en las etapas previas a la floración (figura 3). (Moquete, 2010, p.13)

La vaina y la lígula y aurículas se observan a continuación:



Figura 3. Vaina de la hoja (izquierda) y lígulas y aurículas (derechas) Fuente: (Moquete, 2010, p.13)

La altura de la planta es una función del número y la longitud de los entrenudos, que aunque son características varietales definidas, pueden variar por efectos ambientales. Después de la cosecha la planta produce nuevos rebrotes, que pueden dar origen a una segunda cosecha conocida como retoño.

Las flores poseen color verde, dispuestas en espiguillas y cuyo conjunto constituye una panícula. La flor consta de 6 estambres y un pistilo (figura 4). Los estambres contienen las anteras y éstas a su vez a los granos de polen. En el pistilo se distinguen el ovario, el estilo y el estigma. Según la variedad el estigma presenta diferentes colores, como blanco, amarillo, verde pálido o púrpura. La espiguilla es la unidad de la inflorescencia y encierra una sola flor que lleva la lema y la palea. (Moquete, 2010, p.13)

La posterior imagen muestra la estructura de una espiguilla:



Figura 4. Estructura de una espiguilla (izquierda) y órganos de una espiguilla (derecha).
Fuente: (Moquete, 2010, p.13)

Las inflorescencias o panículas corresponden a prolongaciones de los tallos a partir del último nudo. Las panículas permanecen erectas durante la floración y a medida que los granos van llenando se doblan sobre sus propios ejes, fruto del peso que éstos van adquiriendo. El peso de 1,000 granos de arroz varía de 23 a 32 gramos.

El grano de arroz es el ovario fecundado y maduro, mientras que el grano descascarado con el pericarpio pardo se conoce como arroz integral, cuyo pulimento da origen al arroz blanco. Los granos de arroz difieren tanto en forma como en tamaño; hay ovalados, finos,

largos y cortos, variando la preferencia de acuerdo con parámetros étnicos. (Moquete, 2010, p.14)

1.2.1.3. Taxonomía del arroz

El arroz pertenece a las fanerógamas, tipo Espermatofitas, subtipo Angiospermas, clase Monocotiledóneas, orden Glumifloras, familia Gramíneas, subfamilia Panicoideas, tribu Oryzae, subtribu oryzíneas, genero Oryza. Angladette, González y Porter (como se cita en Degiovanni et al., 2010)

1.2.1.4. Metodos de siembra del cultivo de arroz

La Secretaria de Agricultura y Ganadería (SAG) (2003), enuncia en el cultivo del arroz se utilizan varios métodos de siembra, cuya aplicación depende de las facilidades que tenga el productor y del área a sembrar. Se diferencian dos sistemas de siembra en el cultivo de arroz; siembra directa (con semilla seca en suelos secos o fangueados o pre-germinada en suelos fangueados) y siembra indirecta o por trasplante. Es muy importante que el productor siempre se asegure de la germinación de la semilla, efectuando antes de la siembra una prueba de germinación de la semilla a utilizar, esto debe de observarse para evitar bajas densidades de siembra al sembrar semillas con bajo porcentaje de germinación.

Los siguientes son metodos de siembra establecidos en el manual de la SAG Honduras:

1.2.1.4.1. Métodos de siembra directa:

Siembra con chuzo o con barreta: Es un método utilizado en terrenos donde la mecanización o la utilización de bueyes es difícil o no es factible. En este método de siembra, la semilla de arroz se coloca en posturas o agujeros individuales y se recomienda depositar entre 5 a 10 granos de semilla por postura a una distancia de 30 centímetros en cuadro.

Siembra en surcos con tracción animal. La siembra de arroz en surcos utilizando bueyes se practica en varias zonas del país, principalmente por pequeños productores. La siembra con este método tiene tan buenos resultados como la siembra mecanizada, ya que muchos productores han logrado disminuir la distancia entre los surcos de siembra.

Siembra al voleo con semilla seca. La siembra al voleo se puede hacer a mano, con voleadoras manuales o con voleadoras acopladas al tractor o con avión. Una vez distribuida la semilla en el suelo, se da un pase de rastra para tapar la semilla y reducir así el daño de aves y otros animales.

Siembra mecanizada en surcos. Para este método de siembra se utilizan sembradoras para arroz, que son implementos halados por un tractor, las cuales depositan la semilla a chorro corrido a distancias que pueden variar de 15 a 30 centímetros, según el implemento o sembradora utilizada.

Métodos de siembra en suelos fangueados. En la siembra de arroz en suelos fangueados, se distinguen dos procedimientos: la siembra al voleo utilizando semilla seca y la siembra al voleo utilizando semilla pregerminada.

Siembra con semilla seca: Cuando las melgas se encuentran fangueadas y listas para la siembra, se pesa la semilla de acuerdo al área de la melga y a la densidad de siembra a utilizar, seguidamente la semilla seca se esparce al voleo. En la siembra al voleo, la distribución de la semilla debe de ser lo mas uniforme posible, para lo cual se recomienda que la persona que riega o esparce la semilla pase de ida y vuelta por el mismo lugar. Una vez tirada la semilla se drenan las melgas, evitando dejar charcos.

Siembra al voleo con semilla pregerminada. En este método la semilla pregerminada, previamente pesada de acuerdo al área de las melgas, se riega al voleo dentro de las melgas ya sea a mano o con avión. Después de esparcir la semilla se saca el agua de la melga, supervisando que no queden charcos donde la semilla puede recalentarse o se propicie el daño el daño de aves acuáticas, principalmente “pichiches” que son aves nocturnas, para lo cual el productor debe de tomar la previsiones del caso.

Pregerminación de la semilla de arroz. Para la pregerminación de la semilla de arroz se utiliza el siguiente método: La semilla se coloca en bultos de 50 libras en sacos de polietileno o de yute, los cuales se amarran y sumergen en agua limpia en una pila o barril por un período de 24 horas. Después los bultos conteniendo la semilla húmeda se colocan para su respectiva incubación en un piso de cemento o tablas en la sombra y se arropan con una lona o manteado por otras 24-36 horas (dependiendo de la temperatura ambiente), al cabo de lo cual

la semilla esta lista para esparcirla o regarla en el campo, ya sea al voleo o en surcos marcados con cabuya.

1.2.1.4.2. Métodos de siembra indirecta

La siembra por trasplante. Es un método de siembra indirecto, en el cual se trasplantan plántulas que han crecido inicialmente en semilleros o almácigos para luego trasplantarlas al campo definitivo. Las plántulas deben arrancarse cuidadosamente del almácigo o del semillero, tratando de no ocasionar daño ni al follaje ni a las raíces. Generalmente el trasplante se realiza cuando las plántulas tienen de 20 a 30 días de crecimiento.

1.2.1.5. Fases de crecimiento y desarrollo del arroz

El crecimiento de la planta de arroz es un proceso fisiológico continuo que comprende un ciclo completo desde la germinación hasta la madurez del grano. El desarrollo de la planta es un proceso de cambios fisiológicos y morfológicos que tienen lugar en la misma y modifican su funcionamiento. Tanto los cambios cuantitativos y cualitativos están relacionados con la edad de la planta y dependen, en mayor o menor grado, de la interacción de la planta con el ambiente, Zamalloa (como se citó en Moquete, 2010). Como norma general, la planta de arroz tiene tres fases de crecimiento bien diferenciadas, dentro de las cuales ocurren a su vez 10 etapas de desarrollo.

1.2.1.5.1. Fase vegetativa

La fase vegetativa comienza con la germinación de la semilla y sigue hasta la diferenciación del primordio floral (Fernández et al, 1985). Cuando las semillas germinan en terreno encharcado, el coleóptilo que contiene las hojas embrionarias emerge primero que la coleorriza, mientras que si germinan en un ambiente aireado, como el de los suelos con buen drenaje, primero surge la coleorriza, CIAT (como se citó en Moquete, 2010). Esta fase vegetativa es la única etapa cuya duración es variable, pero la misma determina el ciclo de las variedades. Por ejemplo, si una variedad tiene un ciclo de 120 días, esta etapa tendría 55 días de duración. Pero si el ciclo es de 130 días, la duración sería de 65 días. En esta etapa se determina el número total de hijos que producirá la planta.

1.2.1.5.2. *Fase reproductiva*

Esta fase va desde la iniciación de la panícula hasta la floración, es decir que empieza cuando termina la fase vegetativa. Se caracteriza por la aparición de los órganos reproductivos de la planta. La duración de la misma es constante en todas las variedades y en promedio dura 35 días. En esta fase se determina el número de espiguillas/panícula, por tanto es muy aconsejable que al inicio de la misma el cultivo reciba todo el Nitrógeno pendiente de aplicar. (Moquete, 2010)

1.2.1.5.3. *Fase de maduración*

A lo largo de estas tres fases se presentan 10 etapas de desarrollo, fácilmente identificables. Dentro de ellas ocurren fenómenos que se relacionan estrechamente con operaciones de campo y que cualquier acontecimiento afecta el rendimiento del cultivo. Zamalloa (como se citó en Moquete, 2010). Dichas etapas y su relación con las fases son las siguientes:

1.2.1.5.4. *Etapas ocurren en la fase vegetativa*

Etapa 0. Germinación o emergencia; desde la siembra hasta la aparición de la primera hoja a través del coleóptilo. Su duración promedio es de 5 a 10 días.

Etapa 1. Plántula; desde la emergencia de la plántula hasta inmediatamente antes de aparecer el primer hijo, lo cual tarda de 15 a 20 días.

Etapa 2. Macollamiento; desde la aparición del primer hijo hasta cuando la planta alcanza el número de hijos máximo. Su duración depende del ciclo de la variedad.

Etapa 3. Elongación del tallo; desde el momento en que el cuarto entrenudo del tallo principal empieza a destacarse por su longitud, hasta el comienzo de la siguiente etapa. Varía de 5 a 7 días.

1.2.1.5.5. Etapas ocurren en la fase reproductiva

Etapa 4. Iniciación de la panícula o primordio; desde cuando se inicia el primordio de la panícula en el punto de crecimiento hasta cuando la panícula diferenciada es visible como punto de algodón. Tiene un lapso de 10 a 11 días.

Etapa 5. Desarrollo de la panícula; desde cuando la panícula es visible como una estructura algodonosa hasta cuando la punta de ella está inmediatamente debajo del cuello de la hoja bandera. Esta etapa demora entre 15 y 16 días.

Etapa 6. Floración; desde la salida de la panícula de la vaina de la hoja bandera, hasta cuando se completa la antesis en toda la panícula. Tiene un lapso de 7 a 10 días.

1.2.1.5.6. Etapas ocurren en la fase de madurez

Etapa 7. Grano lechoso; desde la fecundación de las flores hasta cuando las espiguillas estén llenas de un líquido lechoso.

Etapa 8. Grano pastoso; desde cuando el líquido que contienen las espiguillas tiene una consistencia lechosa, hasta cuando es pastosa dura. Su período es de 10 a 13 días.

Etapa 9. Grano maduro; desde cuando los granos tengan una consistencia pastosa dura, hasta cuando estén completamente maduros. Su tiempo es de 6 a 7 días. (Moquete, 2010)

1.2.1.6. El cultivo de arroz en Colombia

El cultivo de arroz en Colombia es un renglón básico en la economía, ocupa el 10% del área total sembrada en el país, que contribuye con el 8,5% de la producción agrícola (Hernández, 1991). En el Departamento Norte de Santander el cultivo del arroz, es el principal renglón de la economía agrícola, con un área de siembra anual aproximada de 25.000 hectáreas, generando 400.000 jornales y una producción promedio de 112.500 toneladas de arroz paddy para suplir la demanda de la industria molinera local y comercializar los excedentes de producción, en otras regiones del país. Fedearroz (como se citó en Canal et al., 2009)

El 90% del área sembrada se localiza en el Distrito de riego del Zulia a 36 kilómetros de la ciudad de Cúcuta; comprende las áreas planas del valle del río Zulia, en un área adecuada de aproximadamente 8.000 hectáreas, que se caracterizan por tener alturas alrededor de 90 m sobre el nivel del mar, temperatura promedio de 30 grados, precipitación anual promedio de 2.000 mm y alta radiación solar durante la mayor parte del año; estas condiciones agroclimáticas son favorables al desarrollo del cultivo del arroz. Fedearroz (como se citó en Canal et al., 2009)

1.2.2. Vehículos aéreos no tripulados

Los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV's) son sistemas de vuelo sin piloto abordo, con la capacidad de poder ser controlados desde tierra o volar en modo automático a partir de un plan de vuelo georeferenciado por GPS. Tienen la capacidad de volar a baja altura y mantener una comunicación en tiempo real con la estación en tierra. Austin (como se citó en Fajardo, 2014).

Los UAV's pueden contar con un sensor para teledetección, este puede ser una cámara fotográfica de alta resolución, este vehículo por ser una estación de vuelo cuenta con sistema de estabilización de imagen, para que las imágenes aéreas queden tomadas de manera adecuada independientemente del movimiento o turbulencia que surja. Los UAV's tiene un grupo de sensores que apoyan la teledetección de la fotografía aérea tales como: GPS (brinda coordenadas geográficas, altura y hora), barómetro (mide la presión atmosférica), brújula electrónica (indica la cardinalidad), acelerómetros (mide la aceleración en los ejes X, Y, Z), giroscopios (mide el giro en X, Y, Z), higrómetro (mide la humedad) y altímetro (mide la altura con respeto al suelo), todos estos sensores recaudan datos que se convierten en variables para el sistema de información geográfica y permiten georeferenciar de manera más precisa la fotografía aérea captada. Austin (como se citó en Fajardo, 2014)

Los UAV's presentan otras ventajas como el bajo costo en la obtención de imágenes aéreas, obtención de imágenes de alta definición (esto gracias a la baja altura de vuelo y a la alta definición de las cámaras digitales que se encuentran en el mercado), vehículos

fácilmente transportables, la captura de imágenes es inmediata, la recolección de la información es casi en tiempo real, entre otros. (Díaz, 2013)

García y Vasquez (como se citó en Díaz, 2013) exponen, la tecnología UAV es un complemento a los sistemas tradicionales para la captura de información del territorio, con un alto nivel de detalle a bajo costo, hoy en día estos vehículos se están usando como herramienta de captura de información en la AP, entre sus aplicaciones encontramos: la toma de imágenes aéreas las cuales permiten a los productores tomar decisiones fundamentadas que pueden mejorar el ahorro de insumos, dinero y afectando menos el ambiente natural. Captura de imágenes aéreas con sensores infrarrojos, luz visible, térmicas, entre otros; imágenes que se combinan con gráficos los cuales muestran como los cultivos están creciendo e identificación de las zonas de deterioro; las imágenes capturadas también se utilizan para medir los niveles de humedad en el suelo; los problemas causados por la sobre fertilización, los animales de pastoreo o las plagas; entre otros.

1.2.2.1. TIPOS DE DRONES O UAV/RPAS

Existen básicamente dos tipos de drones a saber:

- Dron de ala fija
- Dron de ala rotativa

Dependiendo el tipo de misión u objetivo que se pretende realizar, uno de estos modelos se impondrá sobre el otro.

Por ejemplo, en aquellos casos donde se requiera que el dispositivo realice maniobras en forma estacionaria y/o a baja velocidad, el dron más adecuado sería el de ala rotativa. En cambio, si se desea utilizar estos dispositivos para realizar vuelos a velocidades y alturas superiores, por ejemplo para recolectar datos cartográficos, la opción más prudente sería optar por los drones de ala fija. (Addati y Pérez, 2014)

Las siguientes dos imágenes muestran drones de ala fija y rotatoria:



Figura 5. Dron de ala fija. Fuente: (Addati y Pérez, 2014, p.6)



Figura 6. Dron de ala rotatoria. Fuente: (Autor)

1.2.2.2. Ventajas y desventajas de los drones

A continuación presentamos algunas ventajas y desventajas de los UAV's

1.2.2.2.1. Ventajas de los UAVs

- No se arriesgan vidas humanas.
- Útil para aquellas zonas de difícil acceso geográfico, orden público, volcanes, incendios, concentración de radioactividad, entre otros.
- Disponibilidad de las fotografías aéreas en tiempo real.
- No presenta problemas por las condiciones atmosféricas (nubosidad), ya que la altura de vuelo puede ser por debajo de las nubes.
- Bajo costo en la adquisición de imágenes aéreas.
- Adquisición de imágenes aéreas en cualquier momento lo cual permite la realización de estudios multitemporales. (Díaz, 2013)
- Incremento de la producción respecto a otros métodos tradicionales de trabajo, ya sea por topografía clásica o fotogrametría.

- Capacidad de volar a poca altura permitiendo capturar imágenes con una gran resolución (pocos centímetros por pixel).
- Reducción de riesgo e impacto ambiental, al trabajar con aeronaves sin tripulación. (Díaz, 2015)

1.2.2.2.2. *Desventajas de los UAVs*

- Dependen de una estación en tierra.
- Vulnerabilidad.
- Limitaciones de peso de carga.
- Dificultad de integración en el espacio aéreo. (Díaz, 2013)
- Imposibilidad de trabajar en condiciones meteorológicas desfavorables: vientos superiores a 30m/s, lluvia o nieve.
- Imposibilidad de realizar vuelos en zonas urbana o con proximidad de población.
- Imposibilidad de realizar vuelos nocturnos.
- Poca autonomía de los UAS/RPAS; Multirrotores: 15-20 minutos y Ala fija: 45 minutos.
- Superficie recubierta en los vuelos mediante estas plataformas, son menores que los que se pueden obtener a partir de teledetección o aviones tripulados.
- Falta de adecuación de una normativa clara, estando actualmente una normativa en vigencia temporal. (Díaz, 2015)

1.2.2.3. *Aplicaciones de los drones en la agricultura*

Berni et al. (2009), considera que los UAS/RPAS vienen a cubrir las limitaciones que tienen actualmente el uso de satélites y aviones en el manejo de cultivos en tiempo real, como son la falta de imágenes con resolución espacial y espectral óptimas y una mejora de la capacidad de revisita necesaria para detectar determinados problemas que afectan al desarrollo de los cultivos.

- Detección del estado hídrico de las plantas y manejo eficiente del agua.
- Tratamiento localizado de herbicidas.

- Uso óptimo de fertilizantes a partir de chequeos de vegetación mediante la determinación de los principales índices de calidad de un cultivo.
- Conteo de planta.
- Supervisión de áreas fumigadas.
- Detección temprana de plagas y enfermedades en cultivos.
- Detección de estrés nutricional en cultivos
- Información agrometeorológica en tiempo real: generando mapas con la distribución de las principales variables meteorológicas, como temperatura, humedad, precipitación, insolación, etc. (Díaz, 2015)

1.2.3. Teledeteccion

La teledetección consiste en la observación y obtención de información de objetos de la superficie terrestre desde sensores a bordo de satélites, los cuales miden la energía electromagnética proveniente de dichos objetos. Esta herramienta se ha desarrollado notablemente en las últimas décadas debido a que no es necesario estar en contacto físico con la superficie a estudiar Holzman (como se citó en Almeida, 2015).

1.2.3.1. Espectro electromagnético

Hace referencia a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) un objeto. Dicha radiación sirve para identificar el objeto como la huella dactilar permite identificar a las personas. Frank (como se citó en Berrio, 2015)

La figura 7 es la representación del espectro electromagnético:

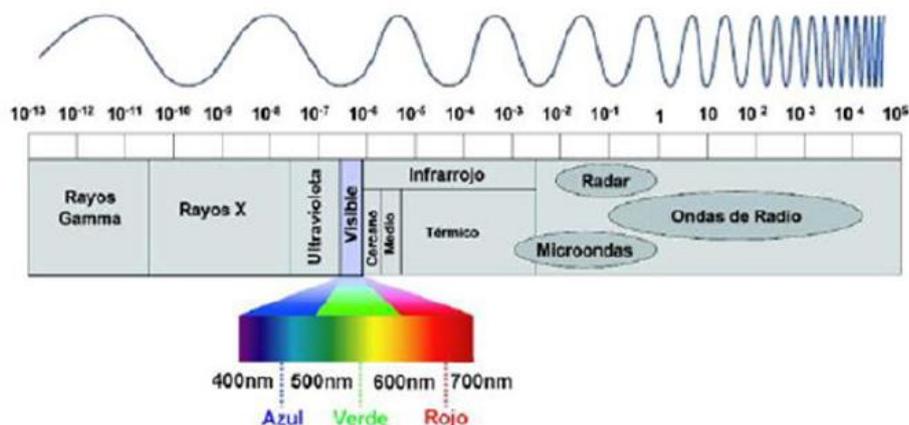


Figura 7. Espectro electromagnético. Fuente: Muñoz y Pérez (Almeida, 2015)

Según (Chuvieco, 2010), desde el punto de vista de la teledetección las bandas espectrales más frecuentes empleadas son las siguientes:

Espectro visible (0,4 a 0,7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que puede percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0,4-0,5 μm), verde (V: 0,5-0,6 μm), y rojo (R: 0,6-0,7 μm), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.

Infrarrojo cercano (IRC: 0,7 a 1,2 μm). También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio. En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso, infrarrojo de onda corta (short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1,2 y 2,5 μm y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda banda de interés, está comprendida entre 2,5 y 8 μm , y suele denominarse como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o Volcanes activos), así como la estimación de algunos gases atmosféricos.

Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μ m), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

Micro-ondas (M, por encima de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

1.2.3.2. Espectroradiometría de campo

La espectro-radiometría es la técnica de medición del comportamiento espectral de la radiación emitida por una fuente, ésta adquisición de firmas de reflectancia espectral en el terreno o en el laboratorio ha permitido profundizar en el conocimiento de la respuesta espectral de materiales y superficies (Fonnegra, 2014). También facilita enormemente la calibración, validación de imágenes y productos de misiones desde satélite o aeroportadas; de manera muy concreta ha ayudado al desarrollo de la teledetección hiperespectral que es, a día de hoy, una de las técnicas con mayor capacidad de estudio y seguimiento de la superficie y atmósfera terrestre (Bonilla y Ramírez, 2016) en (Satoque y Gutierrez, 2016)

Las propiedades ópticas de las hojas dependen de las condiciones de radiación, la especie vegetal, el grosor de las hojas, la estructura de la superficie foliar, los niveles de contenido de clorofila y carotenoides, y la estructura interna de la hoja. La absorción de la luz por los pigmentos de plantas en el espectro visible produce una firma espectral única de la luz reflejada captada por el espectroradiómetro. (Fonnegra, 2014)

En la siguiente grafica se observa la reflectividad típica de una hoja:

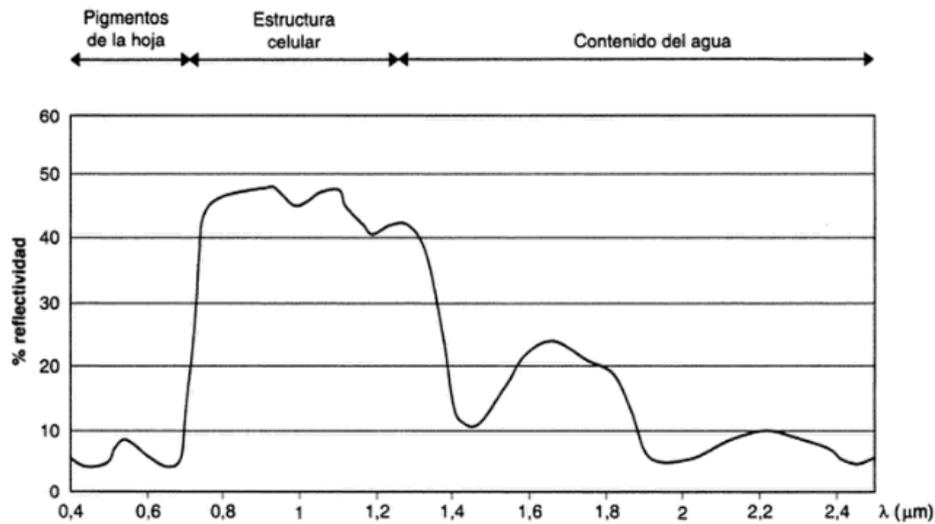


Figura 8. Reflectividad de una hoja. Fuente: (Chuvieco, 2008)

1.2.3.3. Sensores

Los efectos de la interacción entre la radiación solar y el suelo o la vegetación son de gran interés en la agricultura, gracias a la posibilidad de recopilar información con instrumentación sin contacto. Específicamente, los sensores remotos pueden recoger radiación electromagnética reflejada de una superficie determinada, que típicamente depende de la radiación incidente y es inversamente proporcional a la absorbida por la misma superficie (por ejemplo, plantas o suelo). (Sofia et al., 2016; Mavrakakis et al., 2014) (como se menciona en Dubbini et al., 2017)

La medición sin contacto ha sido una de las fuerzas impulsoras detrás de los estudios sobre radiaciones electromagnéticas en el suelo y las plantas (Karimi et al., 2015). Los sensores pueden establecerse a diferentes distancias de la superficie de interés, variando desde algunos cientos de kilómetros (como en el caso de los satélites) a algunos cientos o decenas de metros (como en el caso de vehículos aéreos tripulados o no tripulados), hasta menos de un metro (detección con plataformas basadas en tierra).con una frecuencia de retorno casi ilimitada. (Dubbini, et al., 2017)

En los últimos años se ha producido un gran avance en el desarrollo de nuevos sensores de imágenes de alta resolución, promovido especialmente por la electrónica de consumo. A su vez se ha desarrollado sensores multispectrales e hiperspectrales miniaturizados que pueden ser embarcados en UAS/RPAS. (Diaz, 2015)

La siguiente tabla muestra diferentes sensores y los rangos de las bandas del espectro electromagnético que pueden capturar:

Tabla 1. Sensores y bandas espectrales. Fuente: (Díaz, 2015)

SENSOR	BANDA ESPECTRAL
Visible – RGB (cámara fotográfica)	380 – 780 Nanómetros
Visible (cámara de video)	380 – 780 Nanómetros
Infrarrojo cercano	3 Bandas 500 – 950 Nanómetros
Multiespectral	18 Bandas 500 – 950 Nanómetros
Hiperespectral	400 Bandas 450 – 950 Nanómetros
Térmico	8 – 12 Micrómetros

1.2.3.3.1. *Sensor multiespectral.*

Existen sensores multiespectrales miniaturizados para embarcar en vehículos aéreos no tripulados. Estos sensores pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas espectrales, siendo posible seleccionar diferentes bandas mediante el empleo de filtros. Por regla general, estos sensores están diseñados para el estudio de parámetros relativos a la vegetación, por lo que las bandas están seleccionadas en los rangos del verde, rojo e infrarrojo cercano, donde la vegetación presenta su mayor respuesta de absorbancia y reflectancia. (Díaz, 2015)

Las siguientes cámaras están siendo usadas como sensores multiespectrales en agricultura de precisión:

1.2.3.3.2. *Cámaras RGB y NIR*

Para aplicaciones agrícolas se ha difundido el uso de cámaras RGB (Visible) y NIR (Infrarrojo cercano) a través de las cuales y utilizando combinaciones e índices, como el NDVI, se pueden apreciar características de los cultivos que permitirían tomar decisiones para su manejo. A continuación se mencionan los usos en la agricultura:

RGB (Rojo, Verde, Azul): inspección visual, modelos de elevación del terreno, conteo de plantas.

NIR (Infrarrojo cercano): propiedades de los suelos y análisis de humedad, análisis de salud/estrés de los cultivos, manejo del agua (balance hídrico), análisis de erosión y conteo de plantas. (Berrio, 2015)

Dentro de las cámaras NIR se pueden destacar las siguientes opciones:

NGB: este tipo de cámaras incluyen un filtro especial que bloquea la luz roja y a cambio permite el paso del infrarrojo cercano por encima de los 700 nm. Adicionalmente permite el paso de las ondas del Verde (G) y Azul (B) con lo cual tiene 2 bandas del visible y una del infrarrojo cercano. Esto permite realizar análisis básicos del estado fitosanitario de los cultivos, lo cual se puede complementar con inspecciones en campo y muestras de suelos. En las imágenes NGB, entre más oscuro e intenso el color verde, más densa y saludable la vegetación.

NRG: en esta cámara, el infrarrojo cercano, el rojo y el verde se usan para componer una imagen en vez del usual R (rojo), G (Verde) y B (Azul). En las imágenes NRG, entre más oscuro e intenso el color rojo, más densa y saludable la vegetación. (Berrio, 2015)

Imágenes NGB y NGR son detalladas a continuación:

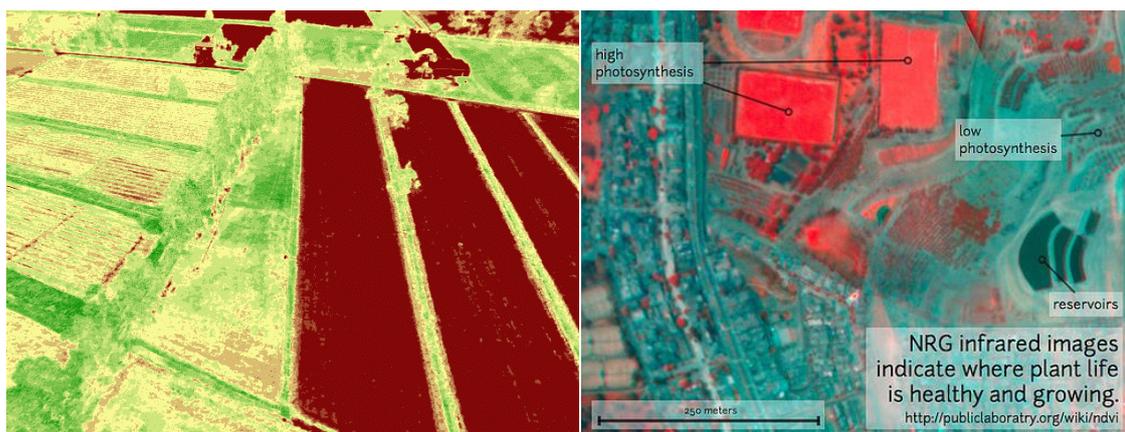


Figura 9. NDVI procesada a partir de una imagen NGB (izquierda) e imagen NRG (derecha). Fuente: (Berrio, 2015)

1.2.3.3.3. *Sensor hiperespectral*

Es el sensor más avanzado en la toma de datos espectrales. En los últimos años se han desarrollado sensores con un peso inferior a 1 kg, lo cual ha permitido su empleo mediante UAS. La mayoría de las soluciones existentes capturan la información comprendida entre 400 nm y 1.000 nm, tomando datos de hasta 300 bandas. Con ello, se consigue la máxima información espectral en el rango correspondiente a la vegetación. Al igual que en el sensor multiespectral, es precisa la corrección geométrica, calibración radiométrica y corrección atmosférica. Como resultado, se obtiene el denominado “cubo hiperespectral”, donde cada píxel de la imagen cuenta con tantos datos como bandas se han recogido. En el caso óptimo, cada píxel cuenta con 300 valores correspondientes a las bandas de 2 nm de ancho en el rango (400 – 1000) nm.

1.2.3.3.4. *Sensor térmico*

El sensor térmico captura la información correspondiente al infrarrojo lejano, en el rango de 8-14 μm , donde se observa la temperatura emitida por los elementos presentes en el área de estudio.

Esta información puede advertir sobre situaciones de estrés hídrico en las plantas, permitiendo detectar ciertos problemas fitosanitarios, y facilita la detección de otro tipo de situaciones de interés a nivel forestal, tales como localización de fauna, detección de vertidos en cauces, etc. (Díaz, 2015)

1.2.3.4. *Respuesta espectral de las plantas*

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa, la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Las células vegetales han evolucionado para dispersar la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano, la cual lleva aproximadamente la mitad del total de la energía solar, debido a que el nivel de energía por fotón en ese dominio (de longitud de onda mayor a los 700 nm) no es suficiente para sintetizar las moléculas orgánicas: una fuerte absorción en este punto sólo causaría un sobrecalentamiento de la planta que dañaría los tejidos. Por lo tanto, la vegetación aparece relativamente oscura en la región de radiación fotosintética activa y relativamente brillante en el infrarrojo cercano. En contraste, las nubes y la nieve

tienden a ser bastante brillantes en el rojo así como también en otras longitudes de onda visibles, y bastante oscura en el infrarrojo cercano. Martínez y Cebrian (2012, como se mencionó en Berrio)

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI Normalized Difference Vegetation Index). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse et al., 1974). Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta.

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR).

Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben; en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas. (Díaz, 2015)

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de las bandas en una planta muestra, enferma y saludable:

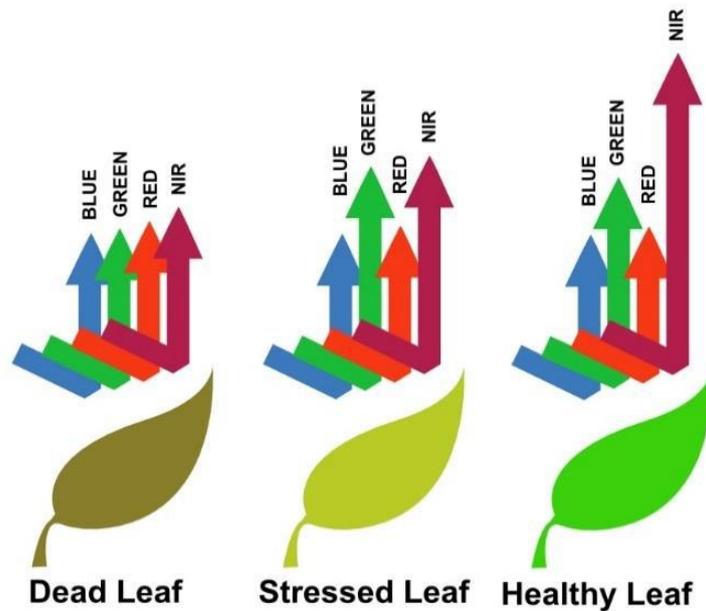


Figura 10. Respuesta espectral de las hojas de las plantas en el visible e infrarrojo cercano para una hoja muerta (izquierda), estresada (centro) y saludable (derecha). Fuente: agribotix (2014, como se citó en Berrio, 2015)

La firma espectral de la vegetación es condicionada por la presencia de pigmentos, la estructura de la hoja y su contenido en agua, que variará en función de la especie, su estado fenológico y otros factores. En el espectro visible (400-700 nm), los pigmentos fotosintéticos son los que condicionan la respuesta espectral de la vegetación, mientras que en la región del infrarrojo cercano (700-1.350 nm), es la estructura interna de la hoja el factor condicionante.

La representación del comportamiento de reflectancia en una planta de arroz en etapa de floración es la siguiente:

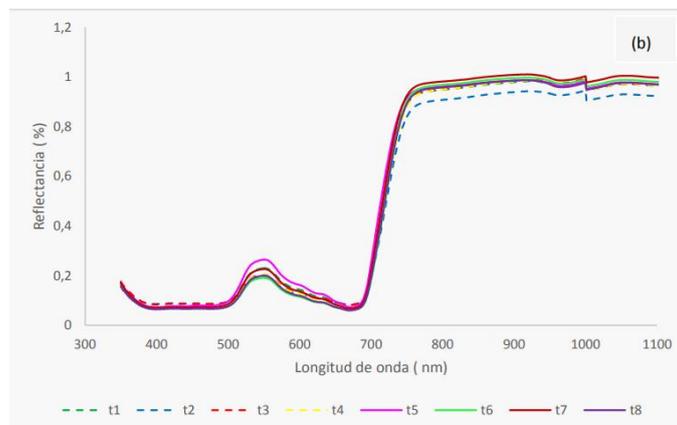


Figura 11. Reflectancia de la planta de arroz en la etapa de floración. Fuente (Ortega, 2015)

1.2.3.5. *Índices vegetativos*

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Permittiéndonos estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. (Díaz, 2015)

Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable. Existe una variedad de índices de vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo.

A continuación se detallan los índices de vegetación utilizados en el proyecto:

1.2.3.5.1. *Índice vegetativo diferencial normalizado*

El NDVI es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Verdin (como se citó en Oliveros, 2015)

El principio básico de NDVI se basa en el hecho de que, debido a las capas esponjosas de las hojas, reflejan mucha luz en el infrarrojo cercano, en marcado contraste con la mayoría de objetos no vegetales. Cuando la planta se deshidrata o estresa, la capa esponjosa colapsa y las hojas reflejan menos luz NIR, pero la misma cantidad en el rango visible. Por lo tanto, la combinación matemática de estas dos señales pueden ayudar a diferenciar las plantas de lo no vegetal y plantas saludables de plantas enfermas.

Best et al. (como se citó en Echevarria, 2010, p. 29) aporta, si se considera la reflectancia de las hojas de las plantas o canopy en comparación al suelo, estas presentan una mayor refracción de la energía en el espectro infrarrojo comparado con el rojo, el cual es absorbido en gran medida por las hojas. La reflectancia de estas regiones del espectro forma la base para la determinación de los índices vegetativos. Existen multitud de índices que indican tanto condiciones hídricas como vegetativas de los cultivos. Uno de los índices más empleados en viticultura de precisión corresponde al “índice vegetativo diferencial normalizado” o “NDVI” el cual es asociado a distintas categorías de vigor. Arkun (como se citó en Echeverría, 2010) plantea: “por ejemplo, las imágenes del índice de vegetación diferencia normalizada (NDVI) son creadas por la transformación de cada pixel de la imagen multiespectral de acuerdo a esta relación:

$$\text{NDVI} = \frac{\varphi_{\text{NIR}} - \varphi_{\text{RED}}}{\varphi_{\text{NIR}} + \varphi_{\text{RED}}}$$

Figura 12. Formula del NDVI. Fuente: (Díaz, 2015)

Desde el infrarrojo cercano y el rojo son respectivamente las reflectancias en cada banda. El NDVI, un número entre -1 y 1, cuantifica la diferencia relativa entre la cima de la reflectancia del infrarrojo cercano y la depresión de la reflectancia del rojo en la señal espectral, y es el indicador del vigor vegetativo o relativo a la biomasa más empleado. Los valores negativos del NDVI raramente se presentan en el medio natural. (Echevarría, 2010, p. 29)

Los valores positivos indican un aumento del verdor y los valores negativos indican características no vegetadas, como agua, áreas estériles, hielo, nieve o nubes. El rango común para la vegetación verde es 0.2-0.9. Los valores moderados representan arbustos y praderas (0.2-0.3), mientras que los valores más altos indican bosques y cultivos (0.4-0.9). (Candiago et al., 2015)

1.2.3.5.2. GNDVI

Éste es, una variante del NDVI que utiliza la banda del verde en lugar de la del rojo (Kemerer, 2007). Su fórmula es la siguiente:

$$\text{GNDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{GREEN}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{GREEN}}}$$

Figura 13. Formula del GNDVI. Fuente: (Díaz, 2015)

El GNDVI (Green Normalized Difference vegetation index) se calcula de manera similar a la NDVI, pero la banda verde se utiliza en lugar de la banda roja. Se relaciona con la proporción de radiación absorbida fotosintéticamente y está linealmente correlacionado con Índice de área foliar (LAI) y la biomasa; por lo tanto GNDVI es más sensible a la concentración de clorofila de NDVI y varía de 0 a 1,0 (Candiago et al., 2015).

1.2.3.5.3. GVI

(Green Vegetation Index) Índice de vegetación verde o como también se le conoce GRVI (Green Ratio Vegetation Index), como su nombre indica, es el cociente entre la reflectividad de la banda del verde y la reflectividad en el infrarrojo cercano, busca mostrar una medida absoluta de la cantidad de verde de la vegetación presente en sus campos (Hunt Jr. et al., 2013). La siguiente ilustración visualiza la fórmula del GVI:

$$\text{GVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{GREEN}}}$$

Figura 14. Formula del GVI. Fuente (Díaz, 2015)

1.2.4. La agricultura de precisión (AP)

Blackmore, Wheelwe, Morris, Morris, Jones (como se citó en Díaz, 2013) aseguran, la AP busca la optimización del proceso productivo a partir del manejo de la variabilidad del agro ecosistema, esta nace del pobre entendimiento del proceso de producción que da el manejo tradicional de la agricultura el cual se basa en la generalización y en los promedios, esto resulta costoso y es causante de impactos ambientales negativos.

La agricultura de precisión es el manejo diferenciado de los cultivos utilizando para ello diferentes herramientas tecnológicas (GPS, Sensores planta-clima-suelo e imágenes multiespectrales provenientes tanto de satélites como de UAS/RPAS), a partir de este manejo diferenciado del cultivo podremos detectar la variabilidad que tiene una determinada explotación agrícola, así como realizar una gestión integral de dicha explotación. (Díaz., 2015)

Godwin et al. (Como se cita en Díaz, 2013) afirma:

La AP está fundamentada en la variabilidad que se encuentra en todo el proceso productivo, la variabilidad se clasifica en:

Natural: Se debe a procesos de la naturaleza, como en el caso de los diferentes tipos de suelos, clima, topografía, especies vegetales y especies animales.

Inducida: se debe a prácticas antrópicas, como en el caso de los diferentes niveles de conservación de los suelos, la microtopografía de un terreno agrícola, los tipos e intensidades de compactación. En algunas ocasiones esta diferenciación no es muy clara y la variabilidad ocurre debido a interacciones complejas entre procesos naturales y antrópicos.

Espacial: puede ocurrir dentro de una finca o dentro de un mismo lote, un ejemplo de ello es diferentes contenidos de un nutriente en el suelo genera diferentes rendimientos en un cultivo.

Temporal: se pueden presentar cambios temporales los cuales pueden afectar la producción, ejemplo de ello es el clima, la humedad del suelo, entre otros.

La AP pretende dar respuesta a los problemas importantes de la agricultura extensiva de hoy en día, como son la competitividad y el medio ambiente. De igual manera disponer de datos precisos tanto ecológicos, biológicos, tecnológicos y económicos que representen un agrosistema, posteriormente integrarlos en un marco conceptual que los formalice y relacione, con modelos conceptuales, para poderlos procesar mediante modelos de simulación y sistemas de información, para seleccionar las mejores alternativas de manejo, organización o comercialización a partir de datos, que aprueban transmitir la información de manera adecuada y que permita tomar decisiones en busca de la productividad y competitividad del sector agropecuario. En pocas palabras tener un conocimiento y control de procesos empresariales mucho más ajustados a las necesidades reales del productor. Segura et al. (como se citó en Díaz, 2013)

Los agentes involucrados en el desarrollo y adopción de las prácticas de la agricultura de precisión suelen dividir este conjunto de tecnologías en tres etapas diferentes, que son: 1) recolección de datos, 2) procesamiento e interpretación de la información y 3) aplicación de insumos. Chartuni, de Assis, Marcal, Ruz (como es anunciado en Díaz, 2013)

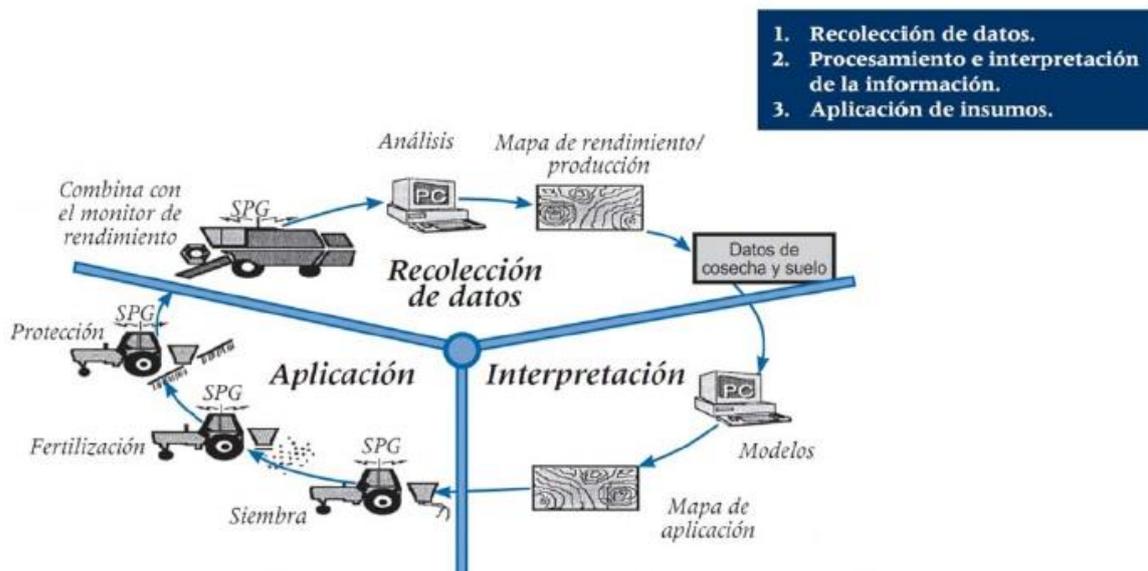


Figura 15. Tecnologías agricultura de precisión. Fuente: Chartuni et al., (como es anunciado en Díaz, 2013)

Los vehículos aéreos no tripulados (UAS/ RPAS), se han desarrollado en los últimos años como una nueva plataforma tremendamente versátil para la adquisición de imágenes remotas con multitud de aplicaciones en Agricultura de Precisión. Este sistema agrícola persigue utilizar los inputs (ej.: herbicidas, fertilizantes, riego) en el sitio y momento adecuados.

En términos generales se puede considerar que la gestión localizada de un cultivo está definida por un ciclo de cuatro fases:

1) **Monitorización**, es decir, detección y mapeo de las variables que interesan en cada momento (ej.: Infestaciones de las malas hierbas o presencia de zonas infectadas por hongos);

2) **Toma de decisiones** y elaboración del mapa de tratamientos en función del mapa obtenido de la variable de interés (fase denominada también **planificación de la actuación**: que aplicar, como, cuando y donde);

3) **Actuación** en campo o ejecución del manejo localizado que se ha decidido;

4) **Evaluación** de la rentabilidad (económica y medioambiental) de las operaciones realizadas en el cultivo para programar acciones el año siguiente.

La finalidad de todo esto es la obtención de mayores rendimientos (económicos, medioambientales, sociales...etc.). (Díaz, 2015)

1.2.4.1. Los sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG), son un conjunto de “hardware”, “software”, datos geográficos y personal capacitado, organizados para capturar, almacenar, consultar, analizar y presentar todo tipo de información que pueda tener una referencia geográfica. Un SIG es una base de datos espacial. (Puerta, Trigozo y Bravo, 2011)

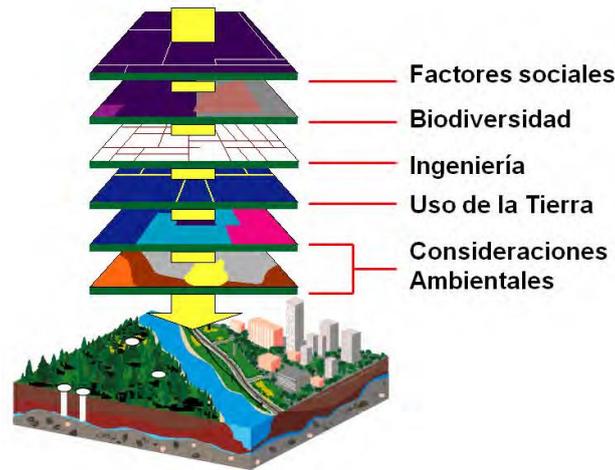


Figura 16. Representación de información geográfica. Fuente: (Puerta, Trigozo y Bravo, 2011)

Marote (como se citó en Fajardo, 2014) establece, la Agricultura de Precisión (AP) es un concepto agronómico de gestión de tierras, apoyado en el flujo de información proveniente de los Sistemas de Información Geográficos (GIS). Los datos capturados por medio de sistemas de sensores permiten dentro del GIS generar, formular, estimar y producir decisiones sobre los terrenos sembrados.

Wang (como se citó en Fajardo, 2014) afirma:

Los GIS se apoyan en una serie de sistemas tales como:

GIS es un sistema que captura, almacena, analiza y gestiona información geográfica con referencia a la localización de los objetos en el espacio.

GPS (Sistema de Posicionamiento Global) es un sistema en tiempo real que brinda los datos de posicionamiento de un objeto en la tierra. El objeto debe llevar consigo un receptor y mediante triangulación se obtienen datos como la latitud, longitud, altura, velocidad del viento, humedad, hora.

RS (Sensado Remoto) es un método de captura de datos mediante el uso de diversos sensores, este método permite alimentar los GIS.

SDDS (Sistema de Soporte de Decisiones Espaciales) es un sistema de apoyo a los usuarios que permite tomar decisiones sobre los objetos de acuerdo a su ubicación en el espacio.

ES (Sistema Experto) es un sistema que tiene conocimiento de base humano para ayudar en la solución de problemas, de acuerdo a tendencias y patrones en los GIS.

En consecuencia, las decisiones que se toman mediante la implementación de AP definen los patrones de la siembra, los fertilizantes, pesticidas necesarios y la producción esperada del cultivo. El apoyo de estas decisiones al cultivo permite automatizar los procesos de siembra, cosecha y recolección.

1.2.4.1.1. Archivos raster

Los archivos raster representan características geográficas al dividir el espacio en celdas cuadradas o rectangulares discretas distribuidas en una cuadrícula, es decir es un conjunto de celdas ordenadas en filas y columnas y es comúnmente utilizado en SIG. Los raster se usan comúnmente para representar y administrar imágenes, modelos digitales de elevación y muchos otros fenómenos. . Cada celda tiene un valor que se usa para representar alguna característica de esa ubicación, como la temperatura, la elevación o un valor espectral.

Los conjuntos de datos ráster tienen una forma especial de definir la ubicación geográfica. Una vez que las celdas o los píxeles se pueden georeferenciar con precisión, es fácil tener una lista ordenada de todos los valores de celda en un ráster. Esto significa que cada ráster tiene típicamente un registro de encabezado que contiene sus propiedades geográficas, y el cuerpo del contenido es simplemente una lista ordenada de valores de celda.

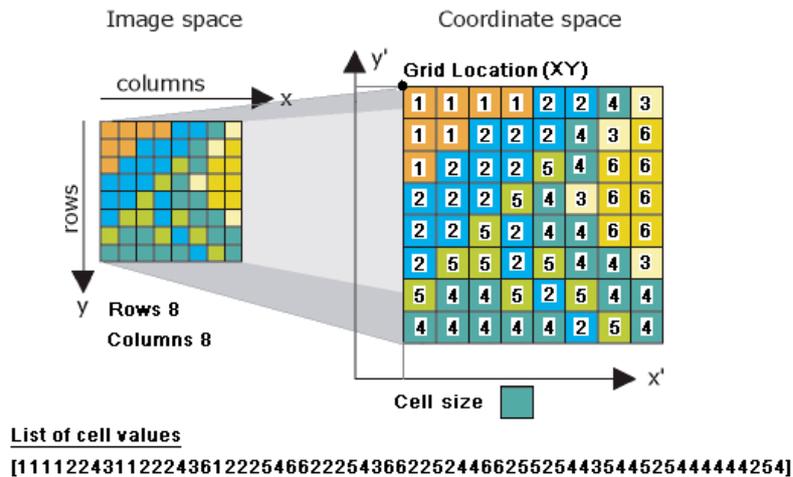


Figura 17. Representación de un raster. Fuente: (Esri, 2015)

1.2.4.1.2. Resolución espacial, espectral y temporal

Algunas características fundamentales de las imágenes que hay que tener en cuenta a la hora de realizar un trabajo a partir de fotogramas aéreos son las siguientes:

- Resolución espacial.
- Resolución espectral.
- Frecuencia de cobertura.
- Resolución radiométrica

La primer medida, resolución espacial, se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen producida por un sensor remoto. Si las imágenes remotas van a ser usadas para identificar y tratar problemas de cultivo en el campo, el productor debe considerar como de afinada debe ser una imagen para que le permita discernir qué es lo que está pasando en el lote. ¿Es necesario distinguir una planta de la otra, un surco del otro, un lote del otro? Hengl (2006) determinó que son necesarios al menos 4 píxeles, para detectar el objeto más pequeño. Por tanto, si por ejemplo el objeto más pequeño en un rodal de malas hierbas de 2m², deberíamos utilizar una imagen con una resolución espacial menor de 0.5. (Díaz, 2015)

La resolución espectral indica el ancho y número de las bandas espectrales que posee una imagen. Una imagen multiespectral se caracteriza por ser más idónea si cuenta con mayor número de bandas, ya que facilita la caracterización espectral de los distintos objetos de la tierra. A la vez es conveniente que estas bandas sean estrechas, ya que las bandas muy amplias registran un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre los objetos de interés. (Posada, Ramirez y Espejo, 2012)

En cuanto a la frecuencia de cobertura (a veces llamada resolución temporal), es una medida acerca de cada cuanto tiempo, está disponible un sistema de percepción remota, para recoger información de un punto específico en la tierra. Para la mayoría de los satélites, la frecuencia de cobertura para cualquier sitio particular es igual al ciclo de repetición, o la duración en tiempo que le toma dar la vuelta a la tierra. (Díaz, 2015)

Finalmente la resolución radiométrica representa la capacidad del sensor para detectar las variaciones en la radiación espectral que recibe. El rango con que se codifica la radiación varía para distintos sensores, sin embargo, los de 256 niveles de codificación o 8 bits son las comunes en el mercado actual de las imágenes de sensores óptico-electrónicos.

1.3. Normatividad colombiana relacionada con el uso de drones

En Colombia la normatividad legal asociada al uso de drones es impartida por la Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil (UAEAC), esta entidad tiene como finalidad vigilar y controlar el espacio aéreo colombiano y establecer políticas que permitan garantizar el correcto funcionamiento de la aviación civil bajo principios de seguridad, oportunidad y eficiencia. Como reglamentación para uso de drones la UAEAC estableció la circular reglamentaria N° 002, la cual contiene las condiciones a seguir para la operación de vehículos aéreos no tripulados en Colombia, en el siguiente apartado hacemos énfasis en la circular y sus ítems a tener en cuenta:

1.3.1. Circular reglamentaria N° 002

1.3.1.1. Propósito

La Circular Reglamentaria No. 002, tiene como propósito ampliar la información e impartir instrucciones de cumplimiento en referencia a los requisitos de aeronavegabilidad y operaciones necesarios para solicitar permiso de acuerdo a lo establecido en el numeral 4.25.8.2 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC), en lo relacionado con la realización de operaciones de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia - RPAS en Colombia.

1.3.1.2. Aplicabilidad

Esta circular aplica a cualquier persona (natural o jurídica) u organizaciones gubernamentales civiles interesadas en efectuar operaciones en el espacio aéreo colombiano con aeronaves pilotadas a distancia RPA, con fines diferentes a los de recreación y deporte.

Las instrucciones establecidas en esta circular tienen por finalidad proteger a las aeronaves tripuladas de eventuales riesgos de colisión con una aeronave no tripulada, así como evitar daños a la integridad física, vida y bienes de terceros en la superficie.

Las operaciones autónomas, en el ambiente civil, haciendo uso de Vehículos Aéreos Autónomos de cualquier peso están prohibidas, independiente de cual sea su finalidad. Las realizaciones de operaciones RPAS de recreación y deporte deberán obtener una autorización expresa de la UAEAC, sólo cuando el explotador de RPAS requiera una desviación de cualquiera de las limitaciones o de las reglas de operación establecida en los RAC numerales 4.25.8 y siguientes.

Nota: “Es de aclarar que en el país las operaciones RPAS relacionadas con recreación y deporte, están sometidas a lo establecido en los numerales de 4.25.8 y siguientes de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia - RAC y no les aplica lo establecido en esta circular, siempre y cuando se mantengan dentro de las condiciones establecidas para este tipo de operaciones”.

1.3.1.3. Materia

Para dar cumplimiento de una manera aceptable y segura con los requisitos del RAC 4.25.8.2, en operaciones con RPAS diferentes a las relacionadas con recreación y deporte, se referencian a continuación los tópicos que requiere evaluar y presentar un solicitante:

De acuerdo al numeral 4.25.8.2 y a la limitación establecida en el numeral 4.25.8 literal e), se aclara que la operación de un RPAS (“Cualquier otro equipo de vuelo”) para actividades con fines no deportivos que requiera portar un peso útil diferente a los habitualmente requeridos en la práctica del deporte de aeromodelismo, deberá contar con un permiso especial de la DSN para su operación.

1.3.1.4. Aeronave Pilotada a Distancia (RPA)

Las aeronaves pilotadas a distancia (RPA) deben utilizarse de modo que se reduzca al mínimo el peligro para las personas, bienes u otras aeronaves, y de conformidad con las condiciones establecidas en esta circular y el permiso que se otorgue para cada caso particular. Su operación se autorizará exclusivamente en horario diurno y en Condiciones meteorológicas de vuelo visual (VMC).

1.3.1.5. Condiciones de aeronavegabilidad

Ninguna persona operará en Colombia una RPA a menos que, reúna las siguientes condiciones de aptitud técnica:

(a) Sus hélices o rotores no podrán ser metálicas.

(b) Deben estar equipados con al menos:

(1) Sistema de Piloto automático (No para vuelo autónomo, sino para asistir al operador, facilitar la estabilización o efectuar la recuperación del aparato en caso de ser necesario)

(2) Sistema GPS.

(3) Sistema de lanzamiento y recuperación en condiciones normales de operación (ej. tren de aterrizaje, airbag, paracaídas, red, etc.)

(4) Sistemas para la Seguridad en vuelo (ej. Recuperación con capacidad de programación de operación autónoma – Return to Home en caso de emergencia, falla del motor o la hélice - Fail-safe function, etc).

(c) Su estación de pilotaje a distancia, permite el control (vía radio) del aparato en todas sus fases de vuelo y provee información sobre sus condiciones de operación (Altitud, rumbo, velocidad, actitud de vuelo, distancia al operador, capacidad de Seguimiento del vuelo, monitoreo de batería y estado del enlace etc.). Se deberá tener un radio receptor para escucha de frecuencias aeronáuticas de comunicaciones. (Para aeronaves pequeñas entiéndase la Estación como la maleta, consola o sistema de control de radio de la RPA)

(d) Sus sistemas de radio control, de transmisión y recepción de datos o imagen no deberán causar ningún tipo de interferencia a otros tipos de sistemas o actividades aeronáuticas o no aeronáuticas.

(e) Su sistema moto propulsor no debe generar ruido excesivo o contaminación.

(f) Contar con instructivos o manuales técnicos y de operación.

(g) Los colores exteriores de la RPA la hacen claramente visible y detectable a distancia. Adicionalmente es importante que la aeronave tenga adherido un placard con el nombre del explotador de la RPA y datos de contacto para identificar la aeronave y el responsable en caso de accidente, incidente o violación a la norma.

1.3.1.6. Clasificación

Las RPA se clasifican en Colombia en las siguientes dos (2) categorías:

- (a) Pequeños, aeronaves con un peso máximo de despegue (MTOW) menor o igual a 25 Kg (55 Lb).
- (b) Grandes, aeronaves con un peso máximo de despegue (MTOW) mayor a 25 Kg (55 lb). En Colombia por ahora queda prohibida la operación civil para esta categoría.

1.3.1.7. Limitaciones de la operación RPAS en Colombia

No se permitirá operación RPAS en Colombia para:

- (a) Volar sobre área congestionada, edificaciones o directamente sobre público o aglomeraciones de personas.
- (b) Volar de modo que se pueda crear un riesgo para las personas o propiedades en la superficie, particularmente, cuando el viento fuerte o cualquier otro factor meteorológico, así como desperfectos mecánicos del aparato o del equipo de control, o falta de pericia del operador, que puedan ocasionar que se pierda el control total sobre el mismo.
- (c) Aeronaves pilotadas a distancia con un peso máximo de despegue superior a 25 Kg (Grandes).
- (d) Aeronaves pilotadas a distancia que portan pesos útiles diferentes a los elementos que sean aprobados por la DSNA para el vuelo a ser realizado.
- (e) Volar desde un aeródromo o en sus proximidades dentro de un radio de 2.7 NM - Millas Náuticas (5 Km) a la redonda.
- (f) Volar a una altura superior a 500 pies (152 metros aproximadamente) sobre el terreno (AGL) o sobre el agua.

(g) Volar de modo que se aleje más de 750 metros de distancia del operador o del lugar de su lanzamiento o despegue.

(h) Volar en operación nocturna o diurna bajo reglas de vuelo por instrumentos.

(i) Volar al interior de una zona prohibida o restringida del espacio aéreo, publicada por la UAEAC

1.3.1.8. Competencia del personal

El explotador de RPA debe asegurar que su personal esté debidamente calificado, que son competentes para llevar a cabo las tareas asignadas y cumplir con sus responsabilidades. Este personal debe tener el conjunto necesario de competencias y conocimientos relacionados, habilidades y actitudes, tales como: conocimientos teóricos, habilidades prácticas y actitudes acordes con el alcance de sus funciones en relación con las operaciones RPAS. La combinación e integración de estos tres elementos constituyen el nivel de competencia que el personal debe demostrar como individuos y como miembros del equipo. Un explotador de RPAS debería establecer la formación inicial y recurrente para asegurar la competencia continua de su personal. Estos programas deben dirigirse a todo el personal asignado o que participe directamente en las operaciones de tierra y de vuelo, asegurando que todo el personal que ha demostrado su competencia en sus funciones particulares, conozca sus responsabilidades y la relación de sus obligaciones con la operación.

1.3.1.9. Responsabilidad del explotador de RPAS

El explotador de RPAS, es responsable por:

a) Soportar adecuadamente la propiedad y explotación sobre el mismo, cumpliendo además los requisitos aduaneros pertinentes, en caso de ser importado.

b) La custodia de la aeronave RPA

c) El control sobre sus operaciones y mantenimiento de la RPAS.

d) En los términos previstos en el código de comercio, (Arts. 1827 y 1842) por los daños y/o perjuicios que cause, derivados de colisión o interferencia a otras aeronaves o a terceros en la superficie.

e) Por la designación del piloto a distancia, a cargo de su operación.

f) Mantener vigentes los seguros o cauciones de responsabilidad que sean requeridos.

g) Tramitar y obtener los permisos y/o autorizaciones que trate esta circular para efectuar la operación RPAS.

h) Definir y documentar los procedimientos requeridos para efectuar una operación segura de RPAS (Instructivo o manual RPAS). Para efectos de facilitar el desarrollo del manual para las operaciones RPAS, el solicitante puede guiarse con el apéndice C - tabla de generalidades para efectuar manual de operaciones de RPAS.

CAPITULO II

**ESTRUCTURACION Y DESARROLLO
PROCEDIMENTAL**

2. Estructuración y desarrollo procedimental

2.1. Enfoque de la investigación

La metodología es de tipo mixta ya que comparte características tanto cualitativas como cuantitativas. Gómez y Roquet (2012) enuncian las aproximaciones metodológicas mixtas permiten, entre otros beneficios, neutralizar o eliminar sesgos de determinados métodos cuando éstos se utilizan de forma aislada; que los resultados de un método contribuyan al desarrollo de otros; o que puedan convertirse en una especie de subproceso de otro método, proporcionándole datos sobre diferentes niveles o unidades de análisis.

Las características cuantitativas se dan al recolectar imágenes del cultivo de arroz a través de la cámara canon S100 instalada en el dron Iris+ 3DR, estas imágenes al ser cosidas y formar los ortofotomosaicos generan miles o millones de valores espectrales NDVI, gracias a la resolución espacial del sensor. Estos mosaicos fueron procesados en el software Arcgis 10.3.1 para obtener tablas estadísticas con medias de 14 zonas establecidas en el cultivo.

El análisis cualitativo consistió en clasificar los ortofotomosaicos obtenidos del cultivo de arroz en zonas estresadas, saludables y densas, al hacer una comparación de lo observado en campo y la literatura existente con los datos NDVI calculados sobre el mosaico. También se puede deducir que el trabajo adquiere características de tipo longitudinal ya que los datos se recolectaron durante el desarrollo fenológico del cultivo de arroz.

Finalmente el estudio realizó estadísticas descriptivas (gráficos de dispersión) y correlacionales (regresión lineal y coeficiente de Pearson) para relacionar el comportamiento de los índices NDVI, GNDVI y GDVI del cultivo de arroz.

En conclusión, esta investigación realiza procedimientos concurrentes, es decir utiliza de forma simultánea o convergente metodologías cuantitativas y cualitativas, consiguiendo así una mejor comprensión del objeto de estudio. Creswell (como se cita en Gómez y Roquet, 2012)

2.2. Materiales

2.2.1. Dron Iris+ 3DR

IRIS es una plataforma para la obtención de imágenes aéreas impulsada por código abierto hardware, software y firmware. IRIS + incluye el avanzado sistema de piloto automático Pixhawk, una batería de vuelo de alta capacidad, un cargador de batería, una estación de radio terrestre y un control remoto.

La siguiente ilustración muestra el frente y posterior de un dron Iris+ 3DR:

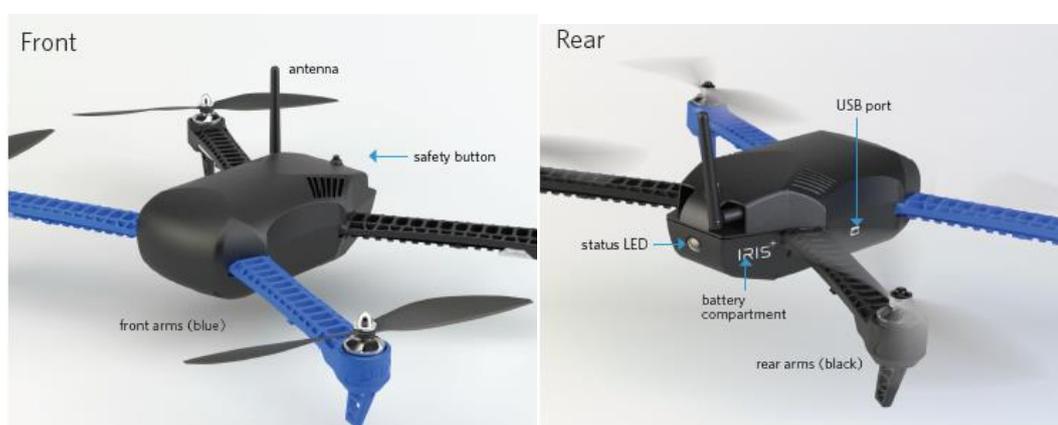


Figura 18. Frente y posterior del dron Iris+ 3DR. Fuente: IRIS+ Operation Manual

2.2.1.1. Especificaciones

Las siguientes son las características técnicas del dron Iris+ de 3DR:

- Tiempo de vuelo promedio: 16 - 22 minutos con 1 batería 3S LiPO de 5.1 Ah 8C
- Resistencia de vientos hasta de 22 km/h
- Alcance radio: hasta 1 km
- Motores: 950 Kv
- 550 de motor a motor
- Capacidad de carga: 400 g
- Altura: 100 mm
- Autopiloto Pixhawk con Firmware Arducopter (Open Source Software): GPS, IMU, Sensor de presión y Data Log de vuelo.
- Radio de telemetría: 3DR radio telemetría v2 (915 MHz o 433 MHz)

- Emisora/Radio Control 3DR con telemetría en pantalla
- Hélices: 9.5 x 4.5 T-Motor multirotor auto-apriete en sentido antihorario (2) - 9.5 x 4.5 T-Motor multirotor auto-apriete las agujas del reloj (2)
- Batería: polímero de litio 3S 5,1 Ah LiPo
- Peso de la batería: 320 g
- Peso del dron con la batería: 1282 g
- Cargador para baterías LiPo
- Soporte para 1 cámara (RGB – NGB)
- Micro USB cable
- Android OTG cable
- Set de soportes largos IRIS+

2.2.2. Cámara canon S100

La cámara canon s100 convertida a NDVI a través de un filtro NGB (Infrarrojo cercano – Verde y Azul) es el sensor de captura de imágenes NIR (infrarrojo cercano) utilizado, tiene una resolución de 12.1MP, GPS incorporado y con sistema de disparo inteligente – SDI.

Las imágenes NIR (Infrarrojo cercano), que proporciona esta cámara permite analizar propiedades de suelos, humedad y salud/estrés de los cultivos, manejo del agua (balance hídrico), análisis de erosión y conteo de plantas.

Los camara canon S100 usada es la siguiente:



Figura 19. Cámara canon s100. Fuente: Autor

2.2.3. Espectroradiómetro Apogee ps-100

El PS-100 mide un rango de longitud de onda de 350 a 1000 nm. Las aplicaciones típicas incluyen la medición de la salida espectral (densidad de flujo de energía, densidad de flujo de fotones o iluminación) de diferentes fuentes de radiación (a menudo para iluminación vegetal o humana) y mediciones de reflectancia y transmitancia de superficies y materiales naturales y sintéticos (a menudo hojas y toldos).

En la siguiente imagen se muestra el equipo mencionado:



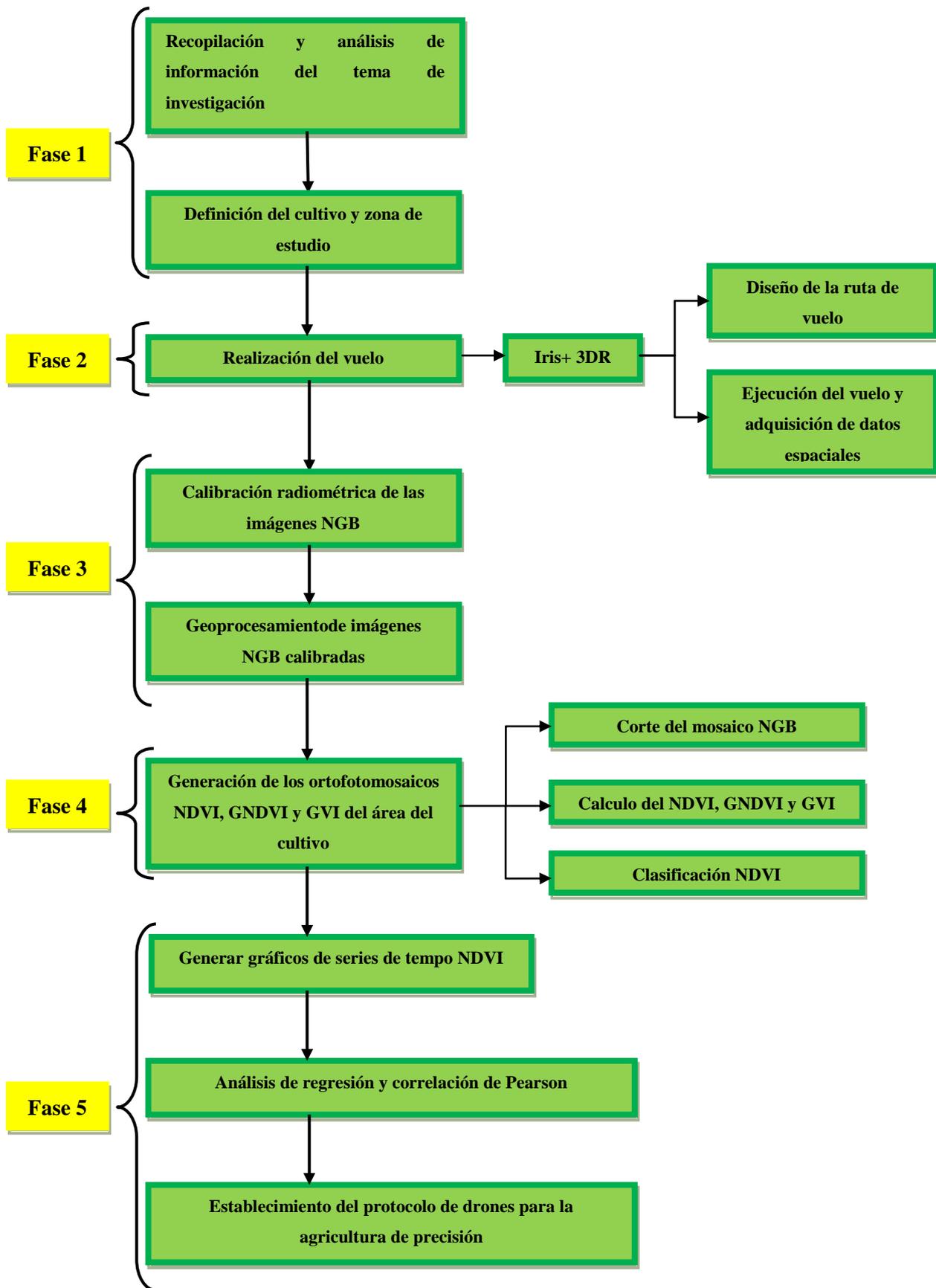
Figura 20. Espectroradiómetro Apogee ps-100

2.3. Metodología

El trabajo se realizó en 5 fases, la primera consta de la recopilación y análisis de información del tema de investigación y la definición del cultivo y zona de estudio; la segunda fase hace referencia al diseño de la ruta y la ejecución de los 12 vuelos durante la fenología del cultivo; la tercera es la fase destinada para la calibración de imágenes NGB (a través de un código R) y la obtención de ortofotomosaicos NGB con el uso del software agisoft photoscan; la cuarta fase comprende el geoprocesamiento de los mosaicos NGB en Arcgis 10.3.1 para la generación de los mosaicos NDVI, GNDVI y GVI; y finalmente en la quinta fase se generaron gráficos de series de tiempo NDVI, las regresiones y correlaciones de Pearson entre los índices GNDVI y GVI con el NDVI y el protocolo acerca de los drones en la agricultura de precisión.

En el siguiente diagrama de flujo se muestran las fases y sus respectivas actividades para el desarrollo del trabajo:

ESQUEMA METODOLOGICO



La metodología empleada comprende las siguientes 5 fases:

2.3.1. Fase 1

En la primera fase se realizó la revisión de los documentos relacionados con el tema de investigación y posteriormente se definió el cultivo y la zona de estudio

2.3.1.1. Recopilación y análisis de información del tema de investigación:

Esta etapa trató de la recopilación y análisis de información del tema de investigación (sistemas de información geográfica, drones, imágenes aéreas y mutiespectrales, análisis dinámico, agricultura de precisión, índices de vegetación, NDVI), mediante consulta de libros, tesis y artículos científicos relacionados.

2.3.1.2. Definición del cultivo y zona de estudio:

Se seleccionó un cultivo de arroz de aproximadamente 4,1 hectáreas ubicado en la finca El Faro en la vereda Campo Hermoso del municipio de San José de Cúcuta - Norte de Santander, su localización geográfica es -72.583857, 8.029046 grados decimales en el sistema de coordenadas geográfico WGS_1984..

En la siguiente imagen se muestra la ubicación geográfica del cultivo de arroz estudiado:



Figura 21. Ubicación del cultivo. Fuente: Autor. Imagen satelital obtenida a través de google earth.

2.3.2. Fase 2

Esta fase trata de la realización del vuelo, en primer lugar se determinó la ruta de vuelo que el dron debería seguir y luego se ejecutaron los vuelos en las diferentes fechas enunciadas anteriormente.

Con el dron Iris+ se efectuó el trabajo principal el cual era obtener imágenes multiespectrales del cultivo de arroz. La cámara canon S100 fue elegida debido a que es de bajo costo y permite obtener información de las bandas verde, azul y del infrarrojo cercano, calcular el índice NDVI y analizar el estado fitosanitario del cultivo de arroz. Para poder adaptar esta cámara al Iris+ fue necesario del diseño de un soporte especial.

El dron Iris+ 3DR es mostrado en la siguiente figura:



Figura 22. Dron Iris+ de 3DR. Fuente: Autor

Las fase 2 consta de las siguientes actividades:

2.3.2.1. *Diseño de la ruta de vuelo*

Se diseñó la ruta de vuelo del dron Iris+ 3DR, para ello se usó la aplicación tower. Se tuvieron en cuenta parámetros como la altura, tiempo de vuelo y la distancia recorrida. Debido al área del cultivo (aproximadamente 5 hectáreas) y a la autonomía de vuelo del IRIS+ 3DR (16 a 22 minutos) fue necesario dividir el vuelo en 2 partes, para evitar posibles complicaciones:

En las siguientes tablas e imágenes se muestran las características de las secciones de vuelo establecidas:

Tabla 2. Sección 1 de vuelo. Fuente: Autor.

Sección 1	
Altura de vuelo	50 m
Distancia	1,4 km
Tiempo de vuelo	4:59 minutos

Tabla 3. Sección 2 de vuelo. Fuente: Autor.

Sección 2	
Altura de vuelo	50 m
Distancia	1,9 km
Tiempo de vuelo	6:46 minutos



Figura 23. Sección 1 del vuelo. Fuente: Autor



Figura 24. Sección 2 del vuelo. Fuente: Autor

2.3.2.2. Ejecución de vuelos y adquisición de datos espaciales

Para este estudio se realizaron 12 vuelos, estos se ejecutaron aproximadamente cada semana durante las fases de crecimiento y desarrollo del cultivo de arroz, el primer vuelo se efectuó al inicio de la fase vegetativa (17 de julio de 2016) y el ultimo en la fase de maduración (07 de noviembre de 2016). En la siguiente tabla se muestran la fecha y hora en que fueron ejecutados los vuelos y se denotan las fases de desarrollo del cultivo de arroz de acuerdo con las fechas de captura.

Tabla 4. Vuelos en las fases de crecimiento. Fuente: Autor.

VUELO	FECHA DE CAPTURA DE DATOS	HORA DE CAPTURA DE DATOS	FASES DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE ARROZ
PRIMERO	17/07/2016	12:11 - 13:14	FASE VEGETATIVA
SEGUNDO	24/07/2016	09:11 - 10:10	
TERCERO	14/08/2016	09:50 - 10:50	
CUARTO	21/08/2016	10:04 - 11:09	
QUINTO	04/09/2016	10:01 - 11:05	FASE REPRODUCTIVA
SEXTO	18/09/2016	10:00 - 11:28	
SEPTIMO	25/09/2016	09:22 - 10:06	
OCTAVO	08/10/2016	09:24 - 10:07	
NOVENO	16/10/2016	09:17 - 10:58	FASE DE MADURACION
DECIMO	22/10/2016	09:20 - 10:08	
UNDECIMO	30/10/2016	09:33 - 10:03	
DUODECIMO	07/11/2016	09:35 - 10:36	

Los vuelos para obtener imágenes NIR se ejecutaron con el dron Iris+ 3DR, se usó como sensor de captura de imágenes la cámara canon S100 convertida a NDVI a través de un filtro NGB, anteriormente descrita. Este filtro especial bloquea la luz roja y a cambio permite el paso del infrarrojo cercano por encima de los 700 nm. Adicionalmente, permite el paso de las ondas del Verde (G) y Azul (B) con lo cual tiene dos bandas del visible y una del infrarrojo cercano, que permiten realizar análisis básicos del estado fitosanitario de los cultivos. (Berrío, Mosquera y Alzate, 2015)

Las siguientes imágenes muestran el despegue del dron Iris+ y el inicio de la ruta de vuelo:



Figura 25. Despegue del dron Iris+. Fuente: autor



Figura 26. Inicio de la ruta de vuelo del dron Iris+ 3DR. Fuente: autor

Los vuelos fueron ejecutados en modo automático por un piloto y un observador que apoyo la misión.

A continuación se describen los pasos que se desarrollaban durante la misión del Iris+:

Antes de salir a campo siempre se cargaban las baterías del dron y las pilas para el control remoto. El IRIS+ es alimentado por una batería de polímero de litio recargable (Li-Po):



Figura 27. Baterías para el dron Iris+ 3DR. Fuente: Autor.

En campo se ajustaban los soportes de altura en el IRIS+ y se instalaban las hélices de borde negro en el motor con un punto negro y de igual manera las grises:



Figura 28. IRIS+ con la cámara instalada. Fuente: Autor.

Luego se encendía la cámara, se ajustaba la fecha y se revisaba que el GPS estuviera activo, también que el script estuviera programado para tomar fotografías cada 3 segundos.

Posteriormente se ensamblaba la cámara canon S100 con el soporte al IRIS+:

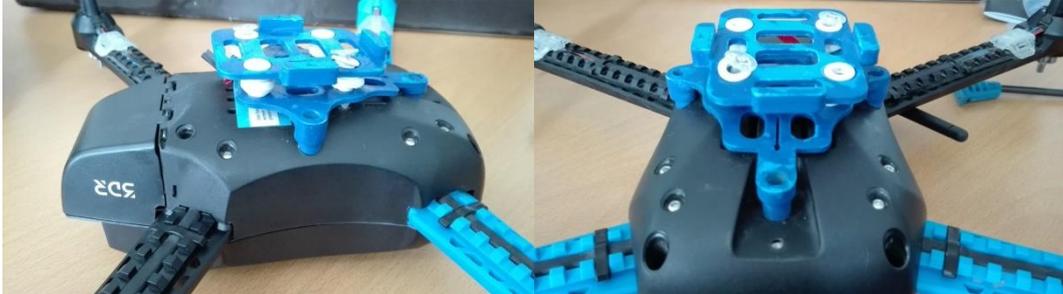


Figura 29. Soporte de la cámara S100. Fuente: Autor.

Se encendía el control remoto y se insertaba la batería al IRIS+, se esperaba 10 segundos antes de cerrar la tapa de la batería, mientras que los sensores internos se calibraban y el LED de estado se mostraba en azul y rojo.

Se conectaba la antena de telemetría con el cable OTG al celular en el cual estaba guardada la misión de vuelo. Posteriormente se iniciaba el software tower y se procedía a dar click en el link de conectar, esta conexión se convertía en la estación en tierra del dron. En tower se podía observar los datos como altura, distancia recorrida, batería del dron, señal de conexión entre el dron y el celular (estación en tierra), y la ruta de vuelo con sus puntos georeferenciados en tiempo real. En ese momento se tenía control absoluto del dron a través de la estación en tierra y el control remoto.

Se colocaban en una zona cercana los foamis blanco y negro de referencia, estos fueron usados para calibrar las bandas NIR, verde y azul de las imágenes NGB:



Figura 30. Foami blanco cerca al cultivo. Fuente: Autor

Se presionaba el botón de toma de fotografías de la cámara para dar inicio con el script y se chequeaba que el LED del dron estuviera en color verde de forma permanente, esto indicaba que el dron ya habia tomado la señal GPS necesaria y estaba listo para volar.

Se colocaba el dron en modo automático y desde el software tower se daba la orden de iniciar con la ruta de vuelo:



Figura 31. Dron en el cultivo de arroz. Fuente: Autor

Una vez terminaba la misión, el dron volvía al sitio de despegue y ya en el suelo se desarmaban los motores, manteniendo el stick izquierdo abajo a la izquierda hasta que los motores dejen de girar. Finalmente se presionaba el botón de seguridad del Iris+ hasta que

este apareciera parpadeando en rojo, se desconectaba la batería y se apagaba el control remoto.



Figura 32. Aterrizaje del dron Iris + 3DR. Fuente. Autor

2.3.3. Fase 3

Esta fase comprende la calibración radiométrica de imágenes NGB a través de un código en el software R y el geoprocesamiento posterior para la generación del ortofotomosaico NGB, las siguientes actividades detallan el proceso:

2.3.3.1. *Calibración radiométrica de imágenes NGB*

La obtención de imágenes NGB en el cultivo de arroz se efectuó usando la cámara canon S100 convertida a NDVI a través de un filtro NGB, este filtro bloquea parcialmente la banda roja (600-675nm) y permite la entrada de una porción de luz roja e infrarroja cercana (676-773 nm). La cámara también captura información de las bandas verde (441-565 nm) y azul (384-537 nm). A partir de estas bandas el NDVI puede ser calculado reemplazando en la formula la banda roja por la azul.

La siguiente figura muestra las longitudes de ondas que pueden ser captadas por la cámara canon S100:

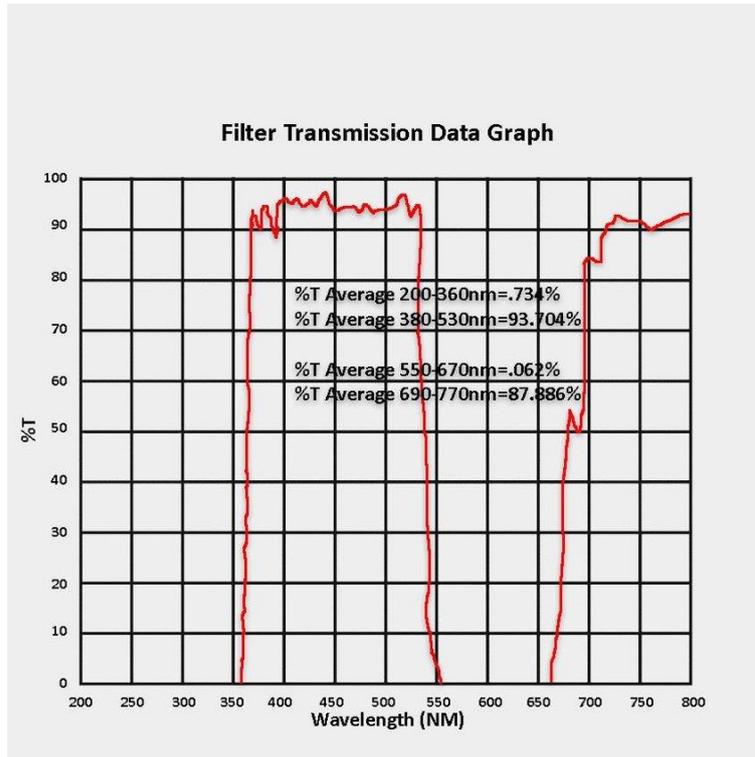


Figura 33. Filtro de transmisión de datos de una cámara canon s100. Fuente: (Alzate, 2017)

Para la calibración radiométrica se usó un foami blanco, el cual fue puesto en el suelo durante cada vuelo, este sirvió de referencia para la corrección de las bandas del infrarrojo cercano, verde y azul de la imágenes obtenidas por la cámara canon s100.

La firma espectral del foami blanco se tomó utilizando un espectroradiómetro Apogee ps-100 que tiene un rango de 400 nm a 1000 nm, así se obtuvieron los valores de reflectancia en los diferentes rangos de longitud de onda.

Para la calibración radiométrica se usó la siguiente fórmula:

$$\frac{Bx}{P} * SBx$$

Dónde,

Bx, es la reflectancia de cada banda en la imagen.

P, es la reflectancia del foami blanco en la banda Bx.

SB_x, es la reflectancia media del foami blanco de la banda x medida con espectroradiómetro.

El valor de SB_x para cada banda del foami blanco se calculó usando los valores de reflectancia medidos por el espectro radiómetro de acuerdo con las longitudes de onda de transmisión en las bandas NIR, verde y azul de la cámara, los valores medios para cada banda se muestran a continuación:

Banda NIR (676-773 nm): 0,8418087

Banda verde (441-565 nm): 0,8908308

Banda azul (384-537 nm): 0,9873687

Para la aplicación de esta fórmula se estableció un script en el software R, en el cual se referenciaban las imágenes NGB, el blanco de referencia por vuelo y la reflectancia media por banda dada por el espectroradiómetro. El script aplica la fórmula a cada banda, posteriormente une las bandas y exporta un nuevo archivo .jpg de cada imagen corregida.

2.3.3.2. *Geoprocesamiento de los ortofotomosaicos NGB*

En esta etapa se crearon los ortofotomosaico NGB del área estudiada. Para el geoprocesamiento de las imágenes se utilizó el software Agisoft Photoscan.

Para la elaboración de los ortofotomosaicos se establecieron los siguientes pasos:

- Se alinearon las imágenes NGB, utilizando sus coordenadas en el software agisoft Photoscan.
- Se asignaron 4 puntos de control sobre las imágenes NGB para disminuir el error en la georreferenciación, esto nos permitió tener mosaicos parejos. Los 4 puntos fueron tomados de una imagen satelital de google earth. En la siguiente imagen se detalla la distribución de los puntos de control en las imágenes alineadas:

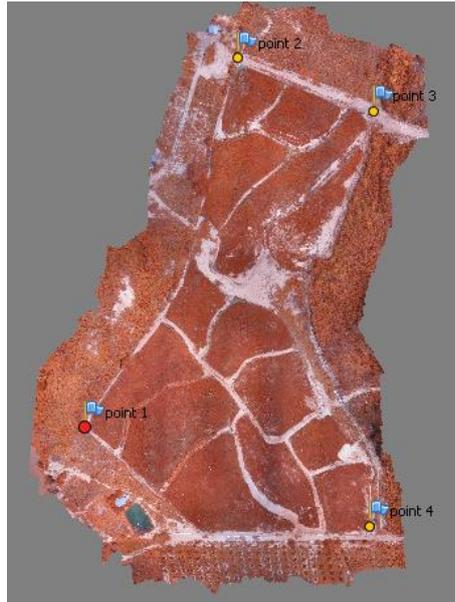


Figura 34. Puntos de control. Fuente: Autor

- Se creó la nube de puntos densa, la malla y textura, pasos necesarios en el flujo de trabajo de agisoft photoscan para la generación del mosaico.
- Se exportó el ortofotomosaico NGB como archivo .tiff

2.3.4. Fase 4

Esta fase comprende el geoprocesamiento de los mosaicos NGB en el software Arcgis 10.3.1. Para la generación de los ortofotomosaicos NDVI, GNDVI y GVI, consta de las actividades relacionadas:

2.3.4.1. Generación de los ortofotomosaicos NDVI, GNDVI y GVI del área del cultivo

Esta fase trata del geoprocesamiento de los mosaicos NGB en el software Arcgis 10.3.1 para la obtención de los ortofotomosaicos NDVI, GNDVI y GVI

2.3.4.1.1. Corte del mosaico NGB

Una vez obtenido el mosaico NGB georeferenciado, se usó el software Arcgis para realizar el corte de la imagen por el perímetro del cultivo, con el fin de no analizar zonas de arbustos, carreteras y cuerpos de agua alrededor.

En la imagen 6 se muestra la línea perimetral (negra) del cultivo de arroz en un mosaico NGB, en la 7 el mosaico cortado por dicho perímetro.



Figura 35. Perímetro del cultivo. Fuente: Autor



Figura 36. Corte del cultivo. Fuente: Autor.

2.3.4.1.2. Zonas representativas

En el software Arcgis se digitalizaron 14 zonas representativas del cultivo de arroz, estas se definieron en función de la geometría del cultivo, las secciones de riego establecidas en campo y las etapas de siembra.

La siguiente imagen denota las zonas representativas:

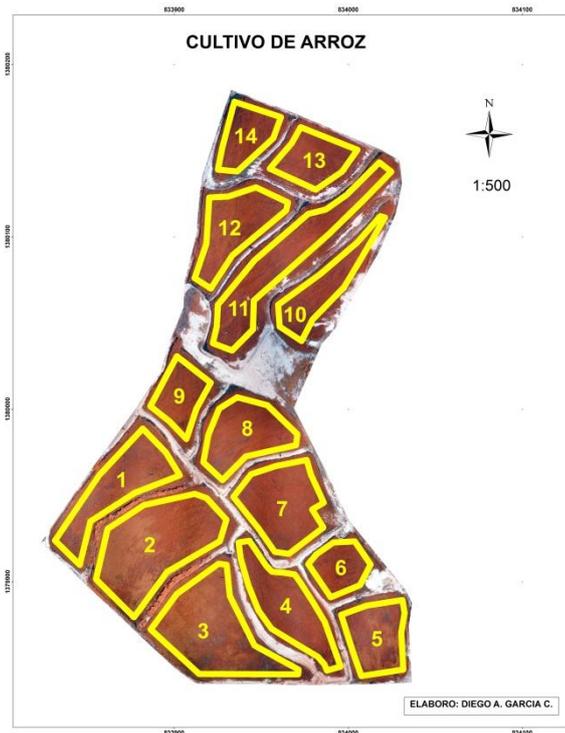


Figura 37. Zonas representativas del cultivo. Fuente: Autor

2.3.4.1.3. *Cálculo del NDVI, GNDVI y GVI*

Se calculó el índice vegetativo diferencial normalizado NDVI a través de la calculadora raster del software Arcgis utilizando las bandas azul y NIR. Posteriormente fueron excluidas las zonas con valores menores a 0,2, ya que estas por lo general representan suelo desnudo, rocas y agua. Usando las zonas representativas digitalizadas y los mosaicos NDVI, se crearon a través de la herramienta zonal statistics as table, las tablas con las estadísticas de las 14 muestras establecidas para el análisis zonal.

El GNDVI se obtuvo de manera similar al NDVI pero esta vez se usó la banda verde y la NIR para calcularlo, se le excluyeron las zonas menores a 0,2 y se generaron las tablas estadísticas.

El GVI se generó realizando una división entre la banda verde y NIR del mosaico NGB, posteriormente se le excluyeron al mosaico las zonas mayores a 0,7 pues se identificaron como zonas diferentes a la vegetación y finalmente se generaron los valores estadísticos.

2.3.4.1.4. *Clasificación NDVI.*

Se hizo una clasificación de los ortofotomosaicos de acuerdo a las diferentes respuestas espectrales. Esta se basó en la comparación de lo observado en campo versus los valores generados por los mosaicos NDVI.

2.3.5. Fase 5

Esta fase comprende las siguientes actividades

2.3.5.1. *Generación de gráficos de series de tiempo NDVI*

A partir de las medias zonales de las 14 zonas representativas se crearon 14 gráficos de líneas de tiempo para cada muestra con el fin de analizar la temporalidad del NDVI en el cultivo de arroz.

2.3.5.2. *Análisis de regresión y correlación*

Con las tablas estadísticas de los índices de vegetación se realizó un análisis de regresión y correlación de Pearson para determinar el grado de relación de las variables GNDVI y GVI con el NDVI.

2.3.5.3. *Protocolo de drones para la agricultura de precisión*

Se estableció a partir del conocimiento y practica personal, un protocolo sobre el análisis de cultivos agrícolas a partir de imágenes aéreas multiespectrales obtenidas desde drones para el aporte de nuevas tecnologías en agricultura de precisión a la comunidad académica, empresas o entidades agrícolas y productores de arroz.

CAPÍTULO III
RESULTADOS OBTENIDOS

3. Resultados obtenidos

3.1. Análisis e interpretación de resultados

Se obtuvieron ortofotomosaicos NDVI de la zona de estudio a una altura de 50 metros, cada uno geoprocesado con más de 300 imágenes y con una resolución de aproximadamente 1,5 cm/pix. Las imágenes arrojaron valores NDVI desde -1 hasta 1.

3.1.1. Clasificación NDVI

Los mosaicos se clasificaron por rangos de valores del NDVI para visualizar diferentes zonas de respuesta espectral, de la siguiente manera:

Tabla 5. Clasificación NDVI de los ortofotomosaicos. Fuente: Autor.

ID	NDVI	COLOR	CARACTERISTICA
1	0,2 a 0,3	Naranja	Vegetación estresada o poco desarrollada
2	0,3 a 0,6	Verde claro	Vegetación saludable
3	0,6 a 1	Verde oscuro	Vegetación densa

Esta clasificación se basó en la comparación de lo observado en campo versus los valores de los mosaicos NDVI, también en lo consignado en (Berrio, Mosquera, & Alzate, 2015) y en <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/data/imagery/ndvi-function.htm>

Las zonas estresadas, saludables y densas definidas anteriormente están asociadas a la respuesta espectral de la planta de arroz, ya que los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro del visible y la banda roja (para el presente estudio se utilizó la banda azul), y el Infrarrojo Cercano (NIR). (Díaz, 2015)

Estas menciones son apoyadas por varios autores, (Araque y Jiménez, 2009) menciona: La región del espectro visible en la vegetación se caracteriza por baja reflectancia y transmitancia, dada la fuerte absorción por los pigmentos foliares. Los pigmentos de clorofila

absorben la luz violeta-azul y roja por la fotosíntesis, mientras que la luz verde es reflejada para el proceso, razón por la cual muchas de las plantas aparecen verdes.

Sanger (como se citó en Araque y Jiménez, 2009) enuncia que cuando la hoja está enferma, la clorofila se degrada más rápido que los carotenos. Este efecto genera un incremento en la reflectancia de la longitud de onda roja, debido a la reducción de la absorción de la clorofila. Carotenos y Xantofilos ahora son los dominantes en las hojas, y las hojas aparecen amarillas debido a que los carotenos y xantofilos absorben luz azul y reflejan la luz verde y roja.

Abdullah y Umer (como se citó en Araque y Jiménez, 2009) propone que los daños de las enfermedades y las plagas se pueden medir por variaciones en el contenido de clorofila de las plantas, las cuales pueden ser analizadas por cambios en los patrones de las imágenes espectrales tomadas por los satélites. Estas técnicas usan imágenes multiespectrales para detectar las áreas bajo estrés.

3.1.2. Análisis espacio temporal

Para el análisis cualitativo se agruparon los mosaicos por fase de crecimiento:

El primer grupo detalla la fase vegetativa:

3.1.2.1. Fase vegetativa

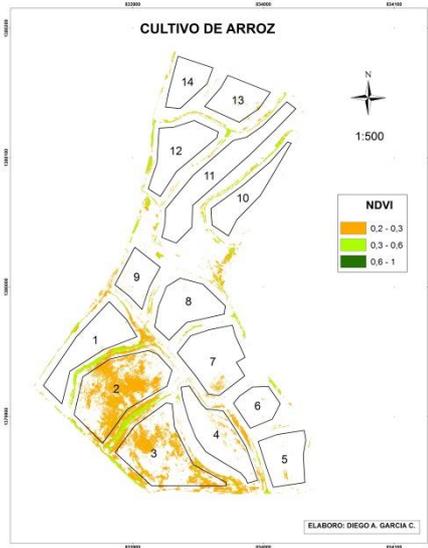


Figura 38. Primer vuelo (17/07/2016)

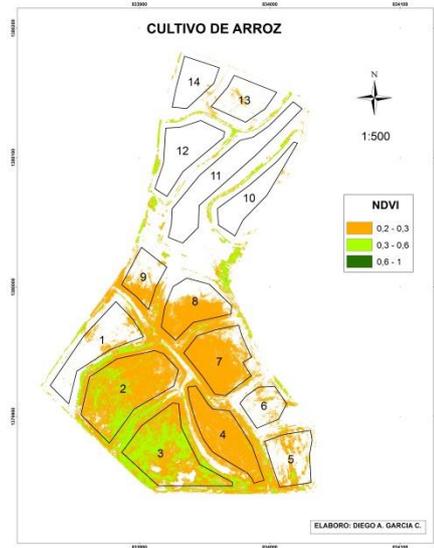


Figura 39. Segundo vuelo (24/07/2016)



Figura 40. Tercer vuelo (14/08/2016)



Figura 41. Cuarto vuelo (21/08/2016)

El mosaico del 17/07/2016 muestra un mínimo desarrollo de la vegetación del arroz en pequeñas áreas de la zona sur, referente a las muestras zonales número 2, 3, 4, 5, 6 y 7; el mosaico de fecha 24/07/2016 también muestra poco desarrollo en su zona sur, pero esta vez la vegetación se dispersó en un área o extensión mayor a la anterior fecha. La zona norte referente a las muestras 10, 11, 12, 13 y 14 no arrojó datos espectrales en ambos mosaicos, es decir que en estas zonas los valores de NDVI se encontraban por debajo de 0,2 representando

al suelo desnudo, rocas y agua; esto se debe a que la zona sur fue sembrada una semana antes, aproximadamente el 26 de junio, mientras que la zona norte fue sembrada el 3 de julio de 2016.

En la fecha del 14 de agosto de 2016 el cultivo continuó con un incremento leve y se dispersó hacia toda la zona sur, mientras tanto en la zona norte iniciaba el crecimiento con valores entre 0,2 y 0,3. El vuelo del 21 de agosto de 2016 mostro un crecimiento exponencial en la zona sur, la zona norte tuvo un comportamiento similar a esta.

En general la fase vegetativa mostro un crecimiento leve en fechas tempranas y un crecimiento exponencial al finalizar la etapa. Este crecimiento está apoyado por algunos autores:

Mendoza (2012) enuncia: el índice toma valores ascendentes a medida que se germina la semilla, posteriormente el macollamiento corresponde a la fase vegetativa del cultivo en la cual se presenta el crecimiento foliar que puede tomar entre 45 y 60 días dependiendo de las condiciones de precipitación, el brillo solar, la variedad empleada y la calidad en la preparación del suelo entre otros factores.

A su vez, Ortega (2015) obtuvo resultados en los que mostró un aumento gradual del índice de clorofila en el cultivo de arroz durante la fase de desarrollo vegetativo, sin embargo cuando el cultivo finaliza la fase reproductiva, en la floración el contenido de clorofila de las plantas tiende a disminuir.

El segundo grupo muestra la fase reproductiva:

3.1.2.2. Fase reproductiva

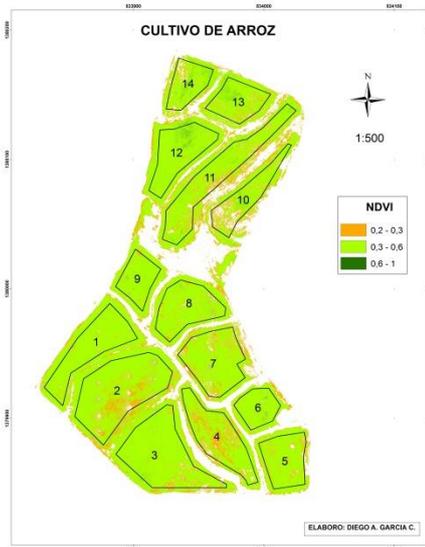


Figura 42. Quinto vuelo (04/09/2016)

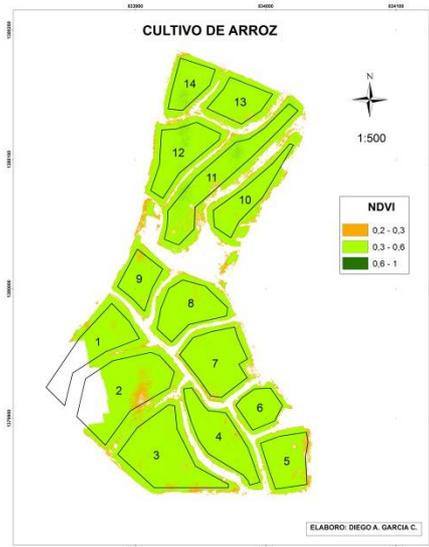


Figura 43. Sexto vuelo (18/09/2016)



Figura 44. Séptimo vuelo (25/09/2016)



Figura 45. Octavo vuelo (08/10/2016)

La fase vegetativa finalizó, e inició la fase reproductiva en la fecha del 04 de septiembre de 2016, aquí el cultivo se observó saludable con valores entre 0,3 y 0,6 en la mayor parte de su extensión, sin embargo pequeñas áreas de las muestras 2, 4, 10 y 11 evidenciaron estrés.

En este momento el cultivo terminaba la fase vegetativa e iniciaba la fase reproductiva de su desarrollo. La fase vegetativa de retraso, máximo macollamiento, la elongación de entrenudos y la iniciación de la panícula ocurren casi simultáneamente, el tamaño de la plántula y el incremento de la materia seca aumentan a menor velocidad y el número de macollas decrece. Su duración depende de la variedad y condiciones climáticas, especialmente la duración del día y la temperatura. CIAT (como se citó en Degiovanni, Gómez y Sierra, 2004)

Para la fecha del 18/09/2016 las zonas que se encontraban poco desarrolladas pasaron a tomar valores más altos. En el vuelo perteneciente a esta fecha el dron Iris+ no soporto los fuertes vientos para la época, la batería se desgasto rápidamente y fue necesario aterrizar antes de finalizar la ruta de vuelo, es por eso que el mosaico generó áreas sin datos en las muestras 1 y 2.

En el mosaico de fecha de 25 de septiembre de 2016 perteneciente a la etapa media de la fase de reproducción, las zonas 1, 2, 3 y 5 arrojaron los máximos valores NDVI en la zona sur, esta área generó valores NDVI mayores a 0,6 por pixel y su media se situó por encima de 0,51.

El mosaico del 08/10/2016 presenta la máxima expresión espectral NDVI en prácticamente toda la extensión del cultivo, las muestras 6, 7, 9, 12 y 14 presentan sus puntos NDVI mas altos, las medias arrojaron valores por encima de 0,54.

La fase de reproducción se caracterizó porque a través de 35 días, hubo un incremento del valor NDVI, las zonas poco desarrolladas o estresadas (que eran mínimas) pasaron a ser zonas saludables y un área importante de zonas saludables llegó a ser densa. Este aumento NDVI es soportado por varios autores:

Sharma et al. (Como se menciona en Degiovanni et al., 2004) menciona: la fase de reproducción comprende el período de la iniciación de la panícula hasta el florecimiento, el primordio de la panícula se desarrolla y el tamaño de la planta y la materia seca se incrementan rápidamente, la altura de la planta muestra un crecimiento progresivo hasta la floración (98 días de desarrollo), mientras que el área foliar se incrementa hasta alcanzar su máximo valor a los 91 días. La fase está representada por la elongación del tallo, emergencia

de las hojas decaídas, embuchamiento y llenado de las espiguillas; dura hasta la maduración y está marcada por un incremento en el peso de la panícula acompañado por un decrecimiento en el peso de la paja.

Mendoza (2012) enuncia: La etapa de floración corresponde con los valores más altos de EVI (que es un índice similar a la NDVI), donde el índice tiene los mayores valores y por lo tanto se asume el mayor contenido de clorofila y la etapa más vigorosa de la planta.

Candolfi y Koblet (1991); Bertamini y Nedunchezian (2003) (como se cita en Ortega, 2015) observaron un aumento gradual del índice de clorofila, alcanzando un máximo nivel hasta formación del fruto, para luego disminuir progresivamente hacia cosecha, siendo probablemente esta disminución un mecanismo de adaptación de las hojas a la luz o bien a una senescencia temprana.

(Zhou et al., 2017) a través de su investigación llegó a la conclusión de que se puede obtener una mayor predicción en el rendimiento del grano de arroz, calculando índices a partir de imágenes multiespectrales en las etapas de inicio y finalización de la panícula.

Finalmente el tercer grupo de imágenes detallan la fase de maduración:

3.1.2.3. Fase de maduración



Figura 46. Noveno vuelo (16/10/2016)



Figura 47. Décimo vuelo (22/10/2016)

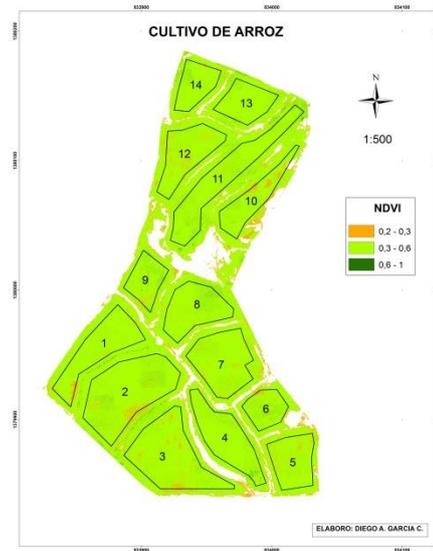


Figura 48. Undécimo vuelo (30/10/2016) Figura 49. Duodécimo vuelo (07/11/2016)

En el mosaico del 16/10/2016 finaliza la fase de reproducción y comienza la fase de maduración. Algunas zonas del cultivo presentaron su máximo potencial en esta fecha, en la zona norte las muestras 10 y 13 generaron sus máximos valores debido a que fueron sembradas una semana después que la zona sur. La muestra 4 presentó problemas de crecimiento debido a que esta zona fue afectada por *Pyricularia grisea*, según informó el profesional encargado del cultivo.

En esta ocasión (16/10/2016) la zona sur pasó de ser densa a saludable, los valores NDVI decrecieron, inició la etapa lechosa del cultivo, que va desde la fecundación de las flores hasta cuando las espiguillas están llenas de un líquido lechoso. (Moquete, 2010)

En el mosaico del 22/10/2016 los valores del NDVI continuaron su descenso, la vegetación saludable disminuyó. Este periodo pertenece a la etapa pastosa cuando el grano cambia de color verde a verdoso amarillento y se endurece. (Degiovanni, et al., 2004)

El mosaico del 30 octubre de 2016 denota el declive general del índice hacia valores promedio entre 0,39 y 0,46; La fecha del 07 de noviembre de 2016 generó unos valores similares entre 0,38 y 0,45; en este periodo los granos llegaron a su estado de madurez, va

desde cuando los granos tienen una consistencia pastosa dura hasta cuando están completamente maduros. (Moquete, 2010, p.29)

Esta etapa fue representada por la disminución gradual del NDVI después de haber alcanzado su máximo valor en la etapa de reproducción. Esta caracterización de la fase es apoyada por varios autores:

Mendoza (2012) denota, una vez el cultivo alcanza la etapa de floración, la planta comienza la etapa de llenado de la panícula y la generación de los granos, la planta se torna de un color amarillo debido al consumo de la clorofila además de un decrecimiento en su tamaño, lo cual conlleva a la disminución de los valores del índice EVI. En esta etapa el cultivo está preparado para ser cosechado, en un periodo de tiempo que oscila entre 20 y 30 días.

Aguilar et al. (como se cita en Ortega, 2015): los valores NDVI tienden a disminuir ligeramente durante la etapa de maduración y senescencia de los diversos cultivos perennes o anuales, debido a una declinación en el nivel de la clorofila de las hojas que genera un cambio en la arquitectura del dosel y continúa hasta el final de la cosecha.

(Zhou et al., 2017) encontró que en las últimas etapas de crecimiento, la aparición de la panícula de arroz y el aumento de las hojas amarillas aumentó la dificultad para la estimación de LAI (índice foliar) y la predicción del rendimiento del arroz. Los índices espectrales $RVI_{[800,550]}$ y $RVI_{[800,720]}$ y los índices de color NDI, ExG y VARI tuvieron un buen desempeño en la estimación de LAI y la predicción del rendimiento en las primeras etapas de crecimiento, pero su correlación fue menor después de la etapa de encabezado o floración.

3.1.2.4. *Identificación de problemas de desarrollo*

Al inicio de la fase de reproducción se detectó que las muestras 3 y 4 presentaba un decrecimiento del NDVI, al observar esta variación se investigó en campo lo ocurrido y se detectó que esta zona estaba siendo afectada por *Pyricularia grisea*, según determino el profesional encargado del manejo del cultivo.

Para fedearroz (2008) “Pyricularia es una enfermedad que ataca el arroz, esta enfermedad se debe al hongo *Pyricularia oryzae*. Se trata de un hongo microscópico que ataca a las hojas e inflorescencias del arroz, produciendo además una sustancia tóxica que desorganiza e inhibe el crecimiento de los tejidos”.

La siguiente imagen muestra una hoja afectada por la enfermedad mencionada:



Figura 50. Hoja de arroz afectada por *Pyricularia grisea*. Fuente: (Fedearroz, 2008)

Uno de los factores que inciden en la obtención de bajos rendimientos en el cultivo de arroz lo constituye la aparición de enfermedades, una de ellas; la piriculariosis o añublo del arroz con una alta frecuencia de aparición en la mayoría de los agroecosistemas. Si las condiciones ambientales, el grado de susceptibilidad de la variedad, así como la tecnología de cultivo empleada son favorables para que se desarrolle su agente causal (*Pyricularia grisea* Sacc.), esta puede provocar hasta el 100% de reducción de los rendimientos agrícolas. (Rives et al., 2009)

En las siguientes imágenes aéreas captadas por el dron phantom 3 advanced, se puede evidenciar la degradación de la zona afectada (muestra 3) por *Pyricularia grisea*. En esta primera imagen se detallan pequeñas zonas de afectación por la enfermedad, la imagen pertenece a la fecha (28/08/2016), fecha de finalización de la fase vegetativa:



Figura 51. Área de la muestra 3 de fecha (28/08/2016). Fuente: autor

Para la fecha media de la fase de reproducción (25/09/2016) la imagen mostró la afectación del cultivo en gran parte de la muestra 3.

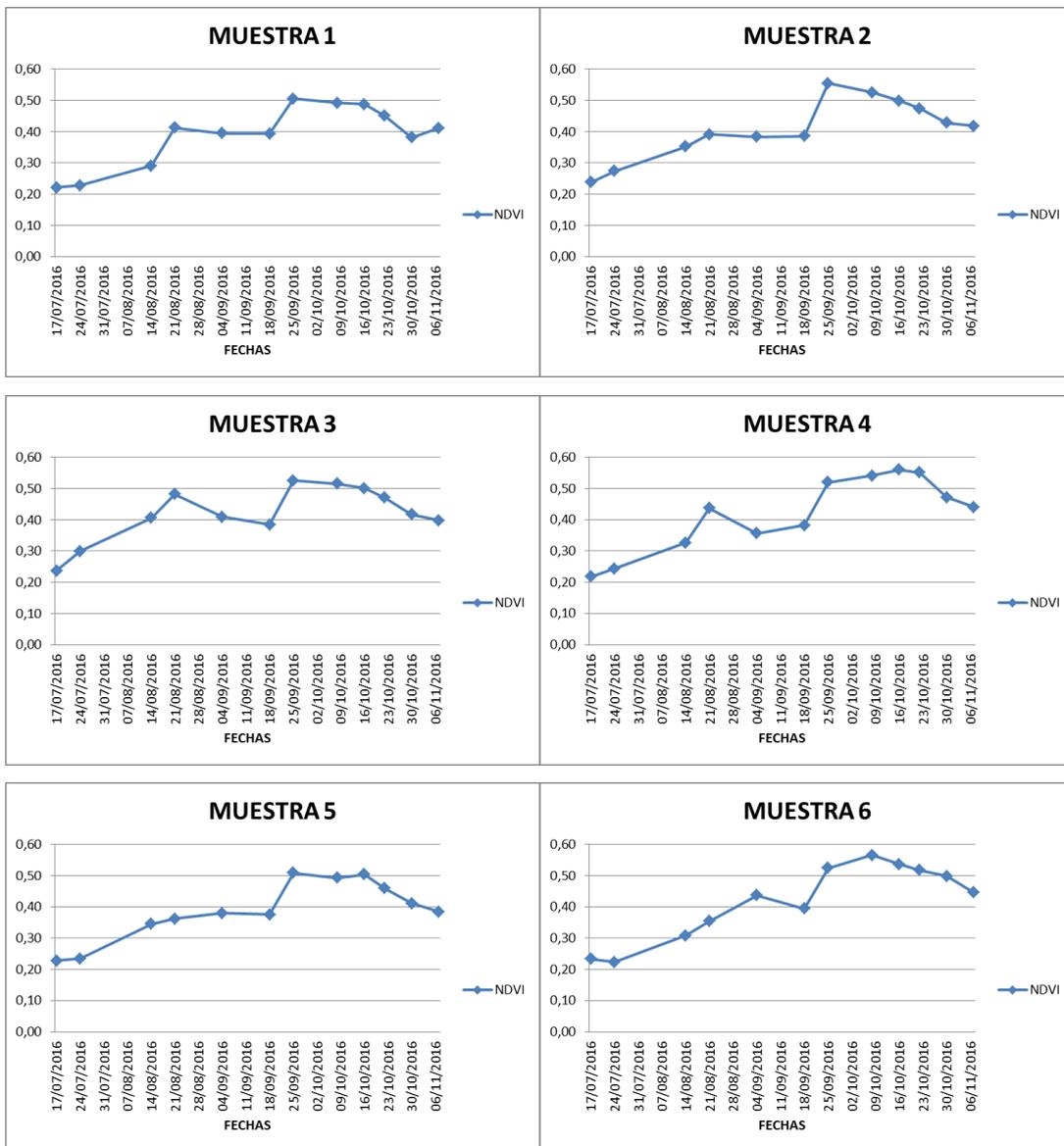


Figura 52. Zonas afectadas por *Pyricularia grisea* fecha 25/09/2016. Fuente: Autor

3.1.3. Series temporales del índice NDVI

Se obtuvieron 14 gráficos NDVI multitemporales, correspondientes a las muestras zonales anteriormente descritas. Las 14 muestras establecidas en el cultivo de arroz, arrojaron un

comportamiento del NDVI similar a través de tiempo. A continuación se evidencian los gráficos generados, uno por cada muestra zonal:



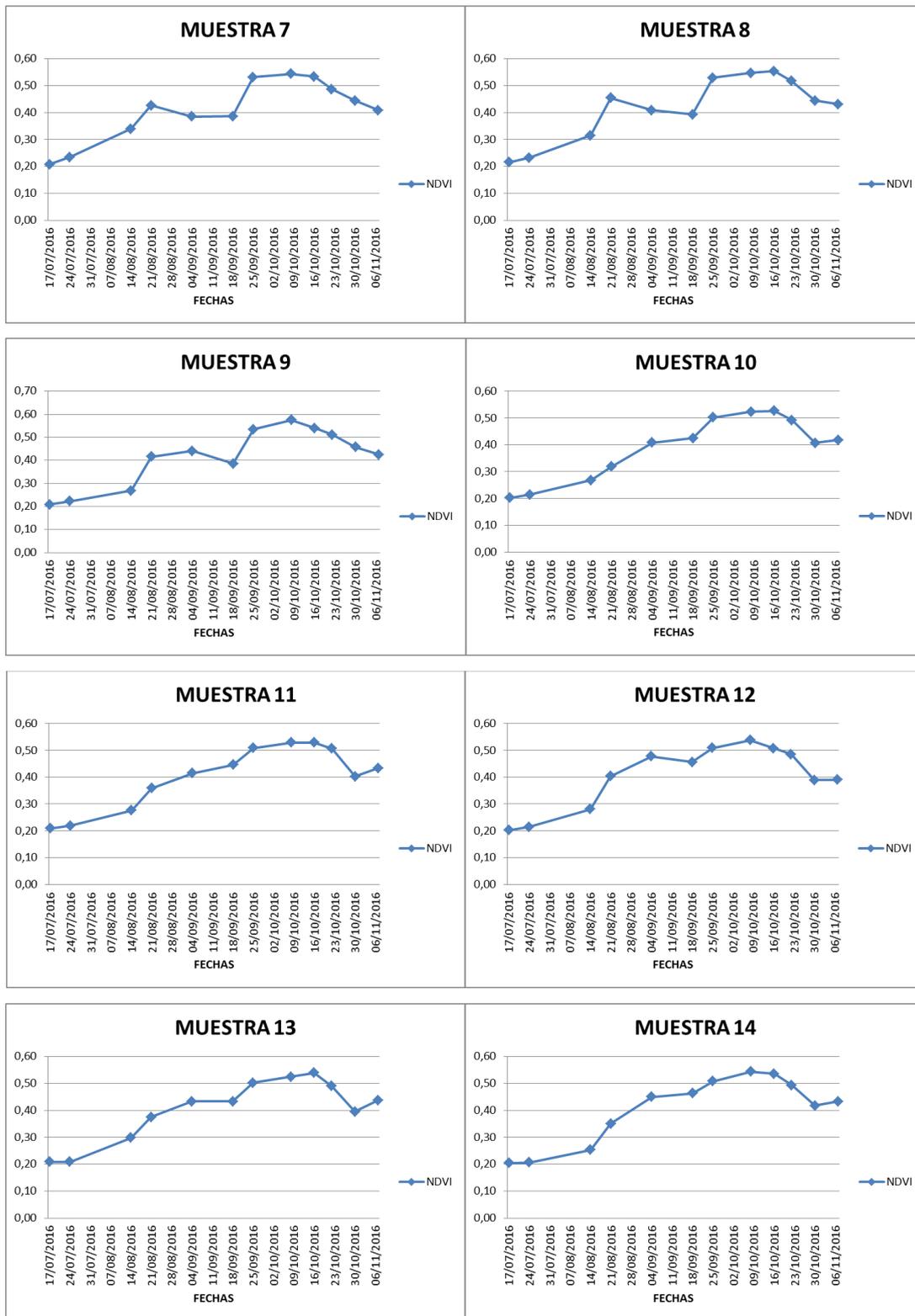


Figura 53. NDVI multitemporal de las 14 muestras zonales. Fuente: Autor.

De manera general el comportamiento de la planta de arroz de variedad fedearroz 2000 fue el siguiente durante las diferentes fases de desarrollo:

Fase vegetativa: al inicio de esta fase, el arroz presentó valores NDVI de entre 0,20 y 0,24, posteriormente hay un leve crecimiento para la fecha del 24/07/16, el cambio más significativo en esta etapa se dio entre la fecha del 24/07/16 y 21/08/16 donde hubo un crecimiento exponencial importante, los valores NDVI aumentaron y llegaron a medias zonales mínimas de 0,32 y máximas de 0,48. La fase finalizó con una etapa de latencia en la fecha del 04/09/2016 arrojando valores similares a los anteriores datos.

El incremento NDVI en esta fase puede estar complementado con la investigación de (Cristo et al., 2009), quienes midieron el número de tallos a través de las fases fenológicas de diferentes variedades de arroz y obtuvieron que la cantidad de tallos e hijos se incrementó hacia el final de la fase vegetativa.

Fase de reproducción: la fase de reproducción inició el 04/09/2016 con valores mínimos de 0,32 y máximos de 0,48; luego continuó con un comportamiento constante hasta la siguiente fecha 18/09/16. Cabe resaltar que en esta fase ocurrió el crecimiento NDVI más relevante, ya que alcanzó su máximo valor espectral (de 0,49 a 0,58) en las fechas del 25/09/16 y 08/10/16.

Este incremento en el valor NDVI y por ende en el crecimiento del cultivo de arroz, coincide con el trabajo realizado por (Zhou et al., 2017) en el cual su correlación entre el rendimiento de arroz y la $\Sigma\text{NDVI}_{[800.720]}$ tuvo un $R^2 = 0,75$; este estudio estableció que el mejor periodo para la estimación del rendimiento del arroz es la etapa arranque o inicio de la panícula, ya que en las últimas etapas de crecimiento el aumento de las hojas amarillas aumenta la dificultad de estimación del LAI (índice de área foliar) y la predicción del rendimiento.

Fase de maduración: está representada por una disminución del NDVI de forma gradual, inició con la fecha del 16/10/16 en los cuales se obtuvieron valores medios mínimos de 0,49 y máximos de 0,56, posteriormente para la fecha del 22/10/16 hubo un decrecimiento leve donde el promedio de las 14 muestras zonales arrojó un valor de 0,49, después en la fecha del 30/10/16 los valores cayeron a 0,42 y finalmente el 07/11/16, los valores espectrales disminuyeron hasta 0,41.

La disminución del NDVI en etapa vegetativa se puede soportar con el siguiente enunciado realizado por (Jarma et al., 2010): en la firma espectral correspondiente al estado de maduración se puede observar cambios en el espectro visible, estas variaciones son causadas por el cambio de color de la panícula de verde a amarillo. La disminución de la reflectancia en el infrarrojo cercano se debe al fin del tiempo de senescencia de las hojas, al estrés por una disminución de la cantidad de nitrógeno o a la degradación de proteínas para el llenado del grano. (Serrano et al., 2018)

De manera cualitativa, el crecimiento del cultivo obtuvo un comportamiento muy parecido a la imagen aportada por (Mendoza, 2012), en la que la fase vegetativa se caracteriza por un crecimiento NDVI leve al inicio, entre la siembra y la formación de la plántula, después hay un crecimiento exponencial NDVI debido a que la planta aumenta en el número de hijos o macollas, así como en su longitud y cantidad de hojas, y finalmente hay una etapa breve de latencia entre el macollamiento y el inicio del primordio floral.

La fase reproductiva comprende desde el inicio de la panícula hasta la floración, a medida que se desarrolla la panícula los valores NDVI aumentaron hasta alcanzar su máximo valor en la etapa de floración. Finalmente la fase de maduración comprende desde el llenado y desarrollo de los granos hasta la maduración total, aquí los valores NDVI decrecieron debido a que los granos generaron un color amarillo en la planta, en este punto los pigmentos fotosintéticos absorben menos energía y la reflejan en el espectro visible, disminuyendo el contraste con la banda del infrarrojo cercano.

La siguiente imagen muestra la fenología del cultivo del arroz:

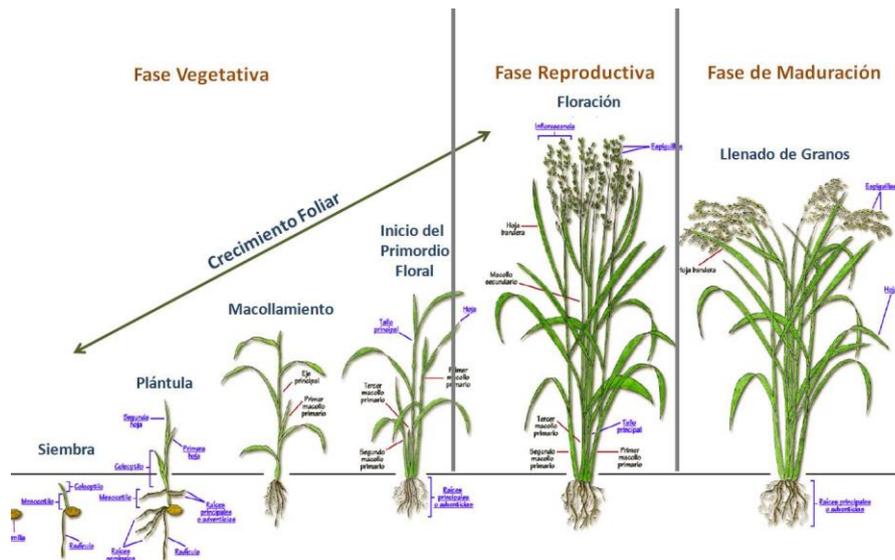


Figura 54. Etapas de crecimiento del cultivo de arroz. Fuente (Mendoza, 2012)

Se realizó un trabajo de fotografía de campo para detallar los cambios físicos que los valores NDVI nos estaban arrojando, las posteriores ilustraciones detallan el crecimiento del cultivo:

Para el día 24/07/16 el cultivo presentaba un mínimo crecimiento de aproximadamente 10 centímetros, lo que coincide con los valores NDVI, aquí el valor medio de las 14 muestras era de 0,23:



Figura 55. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (24/07/2016). Fuente: Autor

Para la siguiente fecha se notaron cambios significativos en el crecimiento de la planta, su altura oscilaba entre 20 y 35 centímetros, el valor medio del NDVI era de 0,30:



Figura 56. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (14/08/2016). Fuente: Autor

La siguiente imagen muestra el inicio del primordio floral, en este momento la planta iniciaba el desarrollo de su panícula periodo perteneciente a la fase reproductiva, el valor promedio NDVI de las muestras era de 0,41, y las plantas presentaban una altura entre 50 y 60 cm:



Figura 57. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (04/09/2016). Fuente: Autor

Para la fecha del 18/09/2016 la panícula de la planta continuaba su desarrollo y se notaba su vigorosidad, aquí la planta de arroz oscilaba su altura entre 80 y 90 centímetros:



Figura 58. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (18/09/2016). Fuente: Autor

La planta llega a su máxima altura por encima de los 90 cm para la fecha del 25/09/2016, aquí la panícula continuaba su desarrollo y la planta se notaba más vigorosa, es por eso que la media de las muestras NDVI se situó en 0,52:



Figura 59. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (25/09/2016). Fuente: Autor

La fecha del 08/10/16 es caracterizada porque la planta de arroz mostro su maxima expresion fisica, se habia dado el desarrollo de la panicula y la maxima altura de la planta, esto coincide con los datos NDVI que generaron una media de 0,53, a continuacion se detallan una imagen aerea y una de campo del cultivo en esta fecha:



Figura 60. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (08/10/2016). Fuente: Autor

En la siguiente imagen se muestra el completo desarrollo de la panícula, notese que en este punto la panícula esta erecta, si revisabamos a nivel de pixel, los valores del NDVI podian estar por encima de 0,6:



Figura 61. Panícula desarrollada de la planta de arroz en la fecha (08/10/2016). Fuente:
Autor

La siguiente fecha (16/10/16) presento condiciones NDVI muy parecidas a la anterior (08/10/16), la única diferencia es que a nivel físico la panícula se empezó a doblar debido al peso de sus granos, tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura 62. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (16/10/2016). Fuente: Autor

Finalmente se presentan unas imágenes de la fecha 07/11/16, aquí los granos presentaban un color amarillo, el cultivo se encontraba maduro y listo para la cosecha, debido a esto los valores NDVI disminuyeron hasta un valor promedio de muestra de 0,41. Las siguientes imágenes muestran el estado de maduración de la planta:



Figura 63. Crecimiento de la planta de arroz en la fecha (07/11/2016). Fuente: Autor

3.1.4. Análisis estadístico NDVI – GNVI – GVI

3.1.4.1. Análisis de regresión NDVI – GNDVI

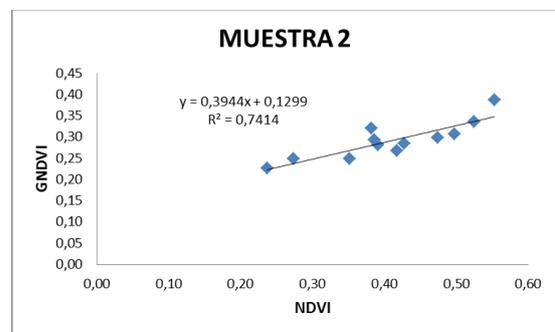
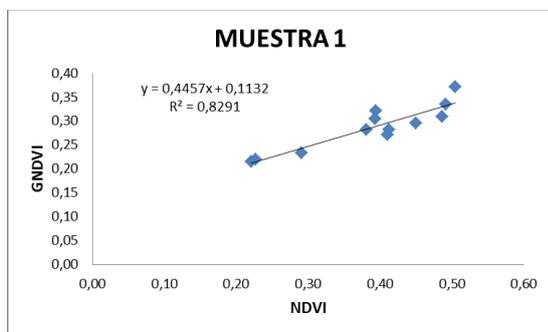
Se realizó un análisis de regresión entre el índice NDVI y el GNDVI temporal de las 14 muestras establecidas en el estudio, para determinar si existe algún tipo de relación o dependencia entre estas dos variables, este análisis nos permite estimar un valor o promedio de la variable denominada dependiente (en este caso el GNDVI), con base en un valor o

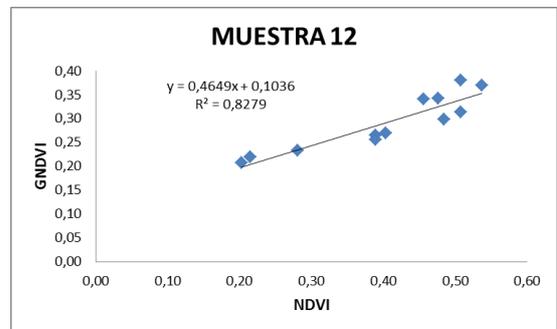
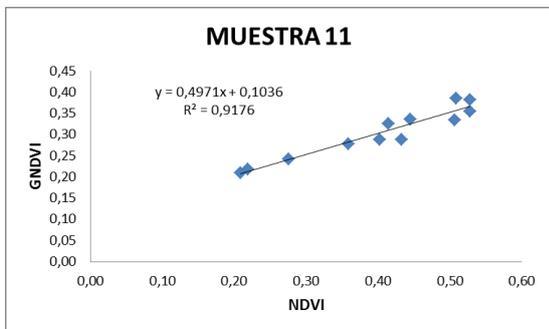
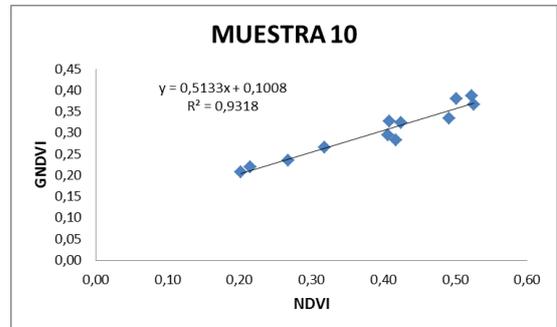
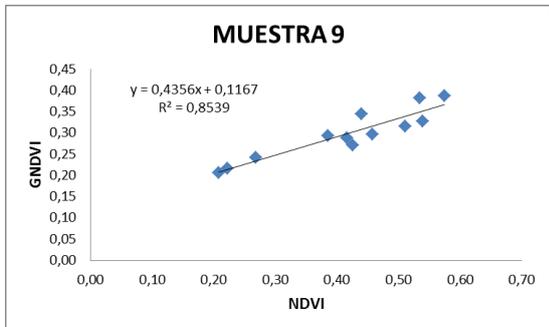
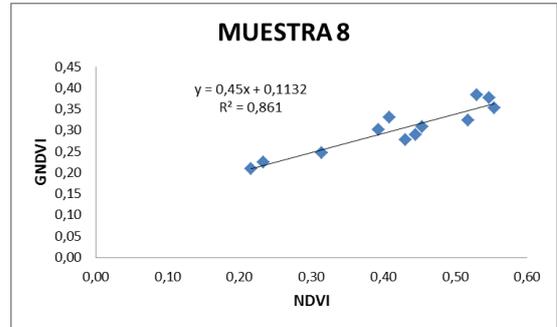
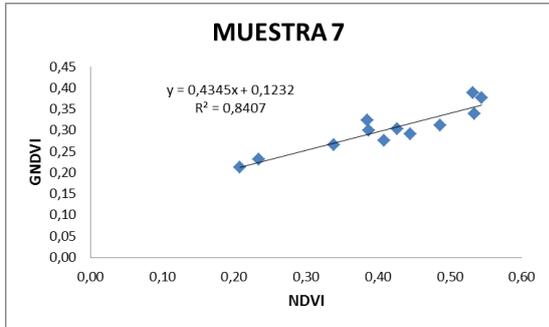
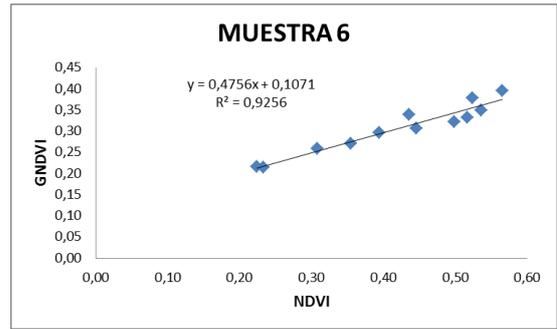
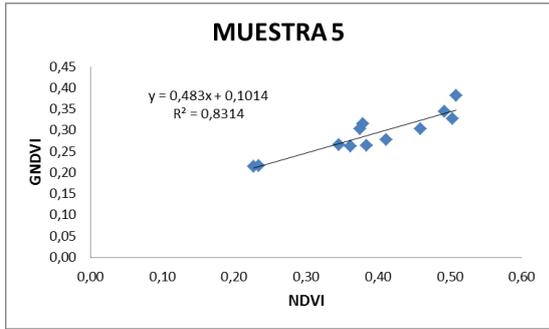
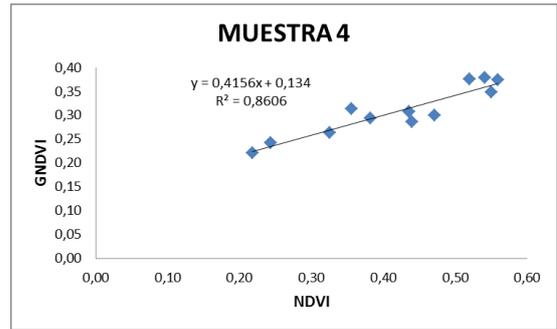
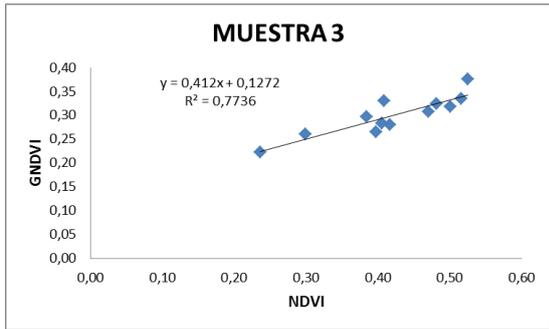
promedio supuestamente conocido para la otra variable, denominada independiente (en este caso el NDVI).

El coeficiente de determinación (R^2) nos indica la bondad que tienen los ajustes de los modelos de regresión calculados para la relación entre los índices NDVI y GNDVI. Se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) con un mínimo de 0,74142 y un máximo de 0,93181, esto indica que hay una bondad del ajuste positiva y directa entre estos dos índices de vegetación.

El coeficiente de correlación múltiple (R), arroja una correlación aceptable en el caso de las muestras 2 y 3, y una correlación excelente en todas las demás muestras, arrojando valores mayores a 0,90; lo que indica que hay una relación positiva y fuerte entre el NDVI y GNDVI. Estos resultados son soportados por (Díaz, 2015) ya que en su investigación encontró una correlación positiva y bastante fuerte entre los índices GNDVI y NDVI.

Los siguientes gráficos detallan las regresiones temporales NDVI-GNDVI de las 14 muestras zonales:





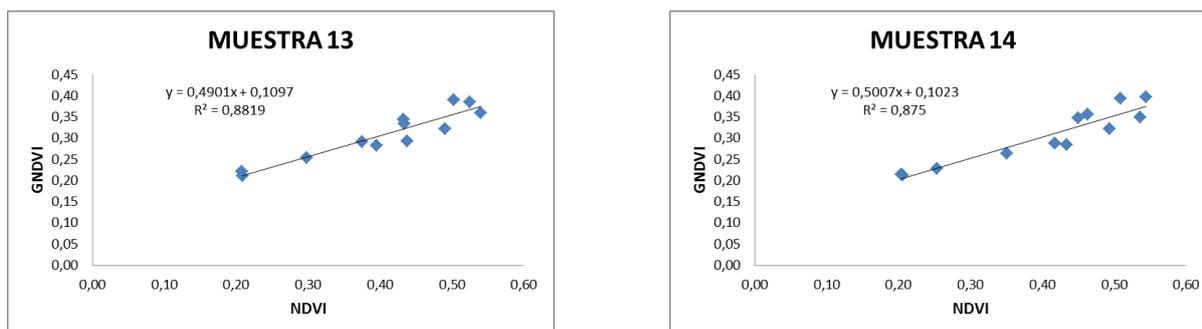


Figura 64. Regresiones temporales NDVI-GNDVI de las muestras zonales. Fuente: Autor.

La siguiente tabla muestra los coeficientes de correlación múltiple y determinación obtenidos en la regresión entre NDVI-GNDVI

Tabla 6. Regresión NDVI-GNDVI. Fuente: Autor

MUESTRA	COEFICIENTE DE CORRELACION MULTIPLE (R)	COEFICIENTE DE DETERMINACION (R ²)
1	0,91055	0,82911
2	0,86106	0,74142
3	0,87956	0,77363
4	0,92767	0,86057
5	0,91180	0,83137
6	0,96208	0,92560
7	0,91691	0,84073
8	0,92788	0,86095
9	0,92408	0,85392
10	0,96530	0,93181
11	0,95790	0,91757
12	0,90986	0,82785
13	0,93907	0,88185
14	0,93541	0,87499

A partir de los mosaicos GNDVI con los cuales se realizó esta correlación se puede hacer prácticamente el mismo análisis cualitativo que se realizó con los mosaicos NDVI, dando consistencia a la relación positiva y fuerte que generó la regresión. Las siguientes imágenes son los mosaicos multitemporales GNDVI que se obtuvieron:

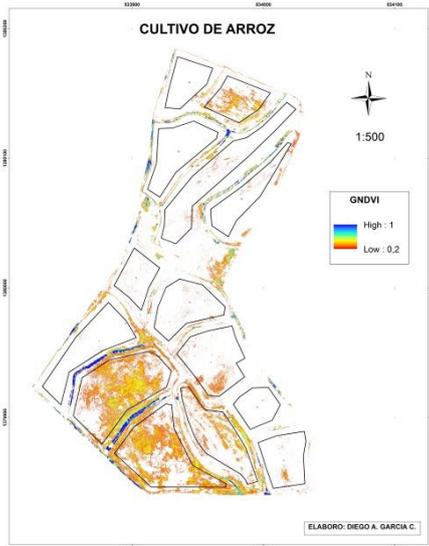


Figura 65. Mosaico GNDVI (17/07/16)

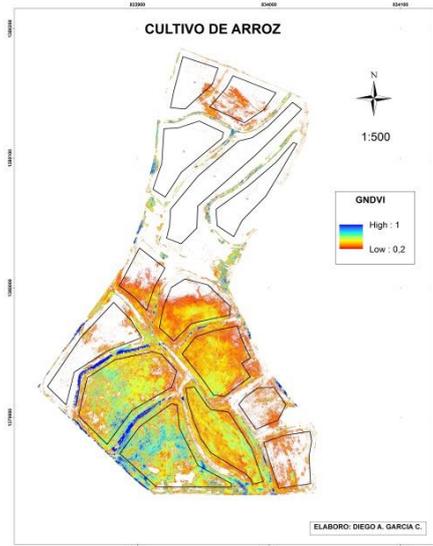


Figura 66. Mosaico GNDVI (24/07/16)

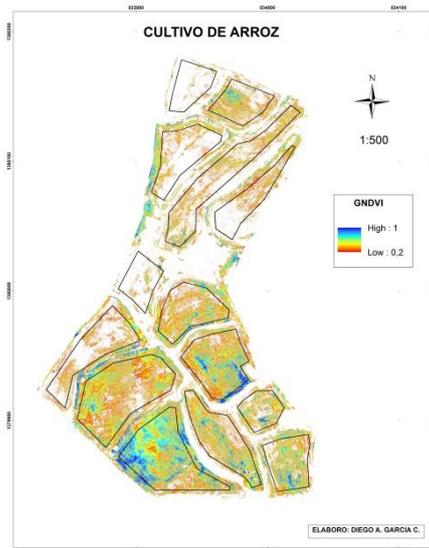


Figura 67. Mosaico GNDVI (14/08/16)



Figura 68. Mosaico GNDVI (21/08/16)

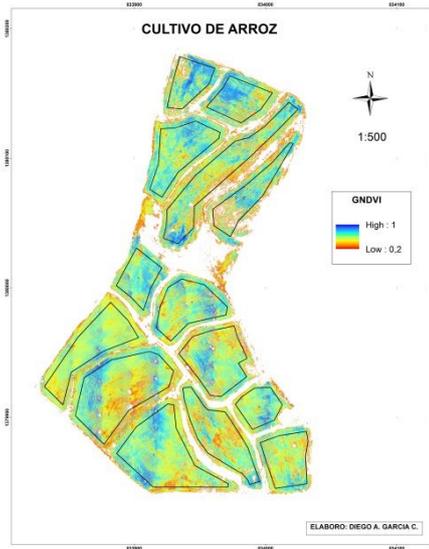


Figura 69. Mosaico GNDVI (04/09/16)

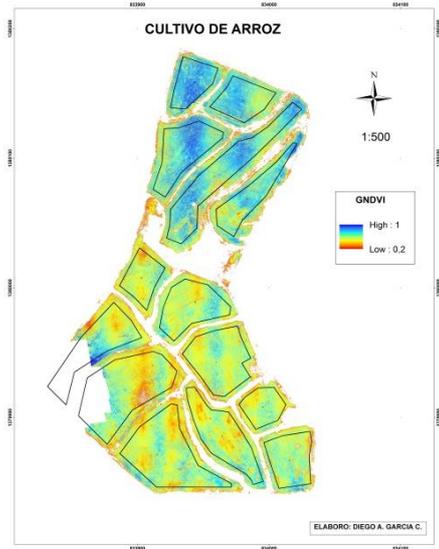


Figura 70. Mosaico GNDVI (18/09/16)



Figura 71. Mosaico GNDVI (25/09/16)

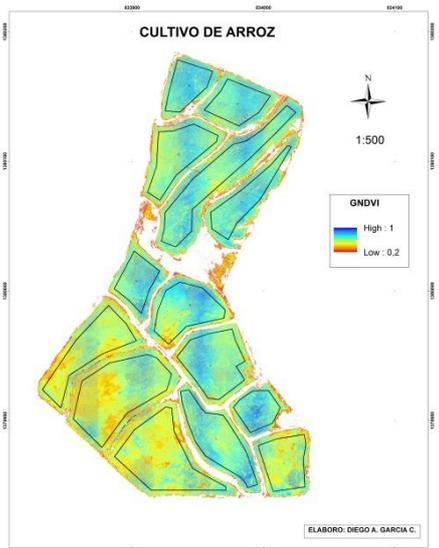


Figura 72. Mosaico GNDVI (08/10/16)



Figura 73. Mosaico GNDVI (16/10/16)



Figura 74. Mosaico GNDVI (22/10/16)

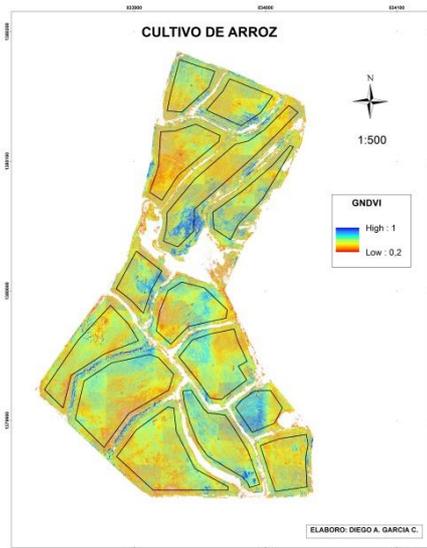


Figura 75. Mosaico GNDVI (30/10/16)

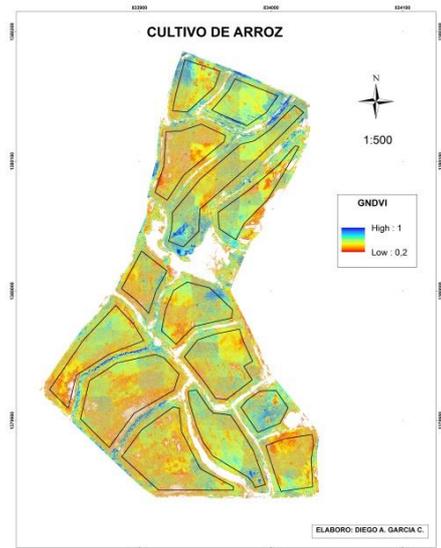


Figura 76. Mosaico GNDVI (07/10/16)

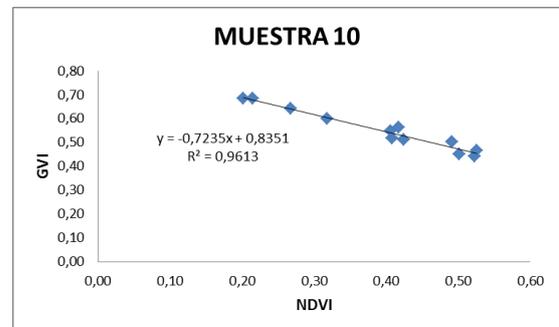
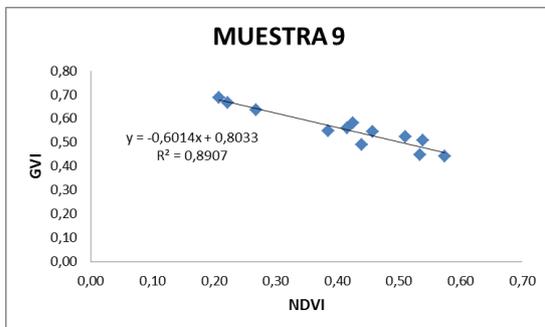
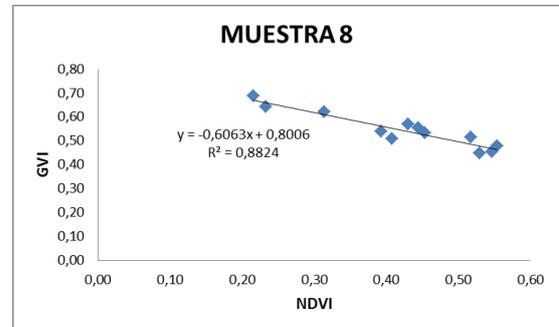
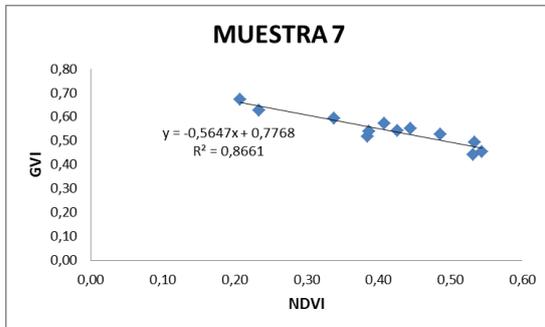
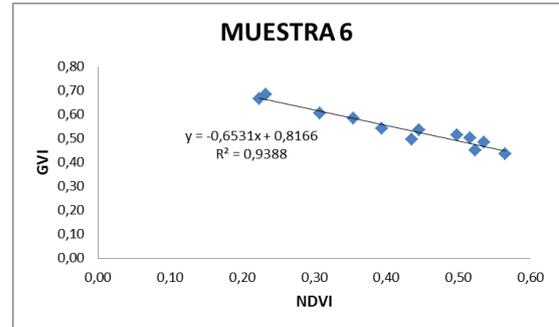
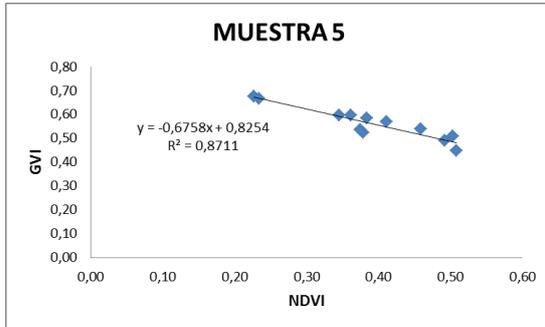
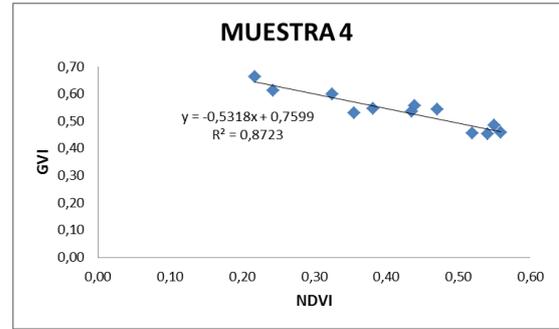
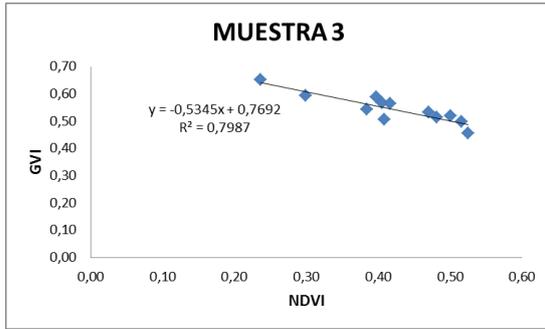
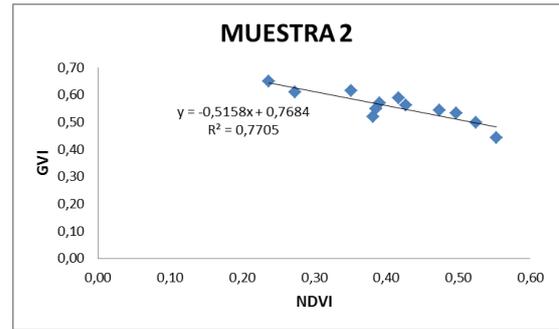
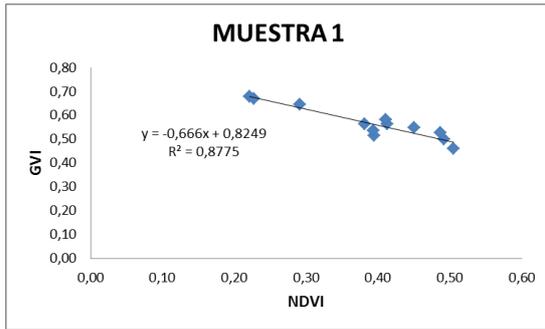
En la comparación entre mosaicos NDVI vs GNDVI se observó una mínima diferencia de valores de las medias zonales, se puede generalizar para ambos casos que en las zonas donde el NDVI aumentaba, el GNDVI también lo hacía y viceversa.

3.1.4.2. *Análisis de regresión entre el NDVI - GVI*

La regresión entre el NDVI y el GVI arroja coeficientes de determinación (R^2) mínimos de 0,7705 y máximos de 0,9613, en la mayoría de los casos existe un ajuste directo perfecto, mientras que en las muestras 2 y 3 la relación es positiva.

El coeficiente de correlación múltiple mostró una correlación negativa e indirecta perfecta entre los índices NDVI y GVI en la mayoría de las muestras. Cuando el NDVI aumentaba su valor, el GVI lo disminuía. Estos datos tienen concordancia con los resultados de (Díaz, 2015) que obtuvo una relación positiva y directa cuando correlaciono estos índices.

Los gráficos de dispersión siguientes muestran las regresiones temporales de los índices NDVI-GVI en el cultivo de arroz:



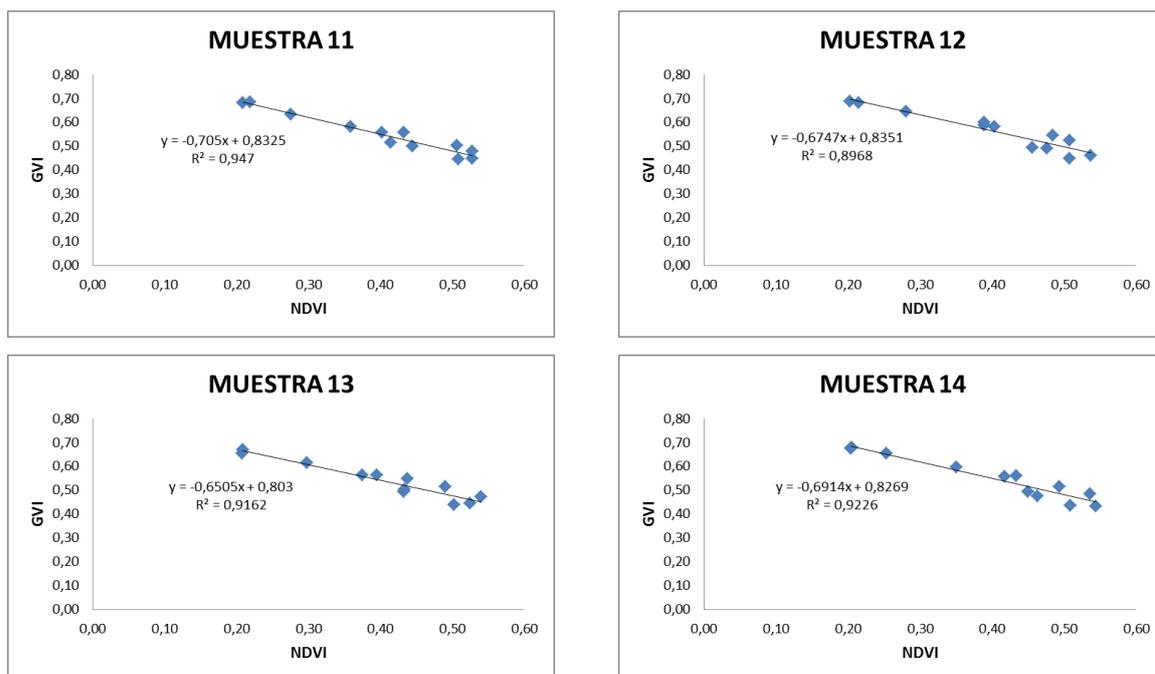


Figura 77. Regresiones temporales NDVI-GVI de las muestras zonales. Fuente: Autor.

La siguiente tabla muestra los coeficientes de correlación múltiple y determinación obtenidos en la regresión entre NDVI-GVI

Tabla 7. Regresión NDVI-GVI. Fuente: Autor

MUESTRA	COEFICIENTE DE CORRELACION MULTIPLE (R)	COEFICIENTE DE DETERMINACION (R ²)
1	-0,9367	0,8775
2	-0,8778	0,7705
3	-0,8937	0,7987
4	-0,9340	0,8723
5	-0,9333	0,8711
6	-0,9689	0,9388
7	-0,9306	0,8661
8	-0,9393	0,8824
9	-0,9437	0,8907
10	-0,9805	0,9613
11	-0,9732	0,9470
12	-0,9470	0,8968
13	-0,9572	0,9162
14	-0,9605	0,9226

Las zonas de los mosaicos GVI que indicaban suelo desnudo registraban valores por encima de 0,7, es por eso que estos valores fueron descartados para el análisis de regresión. La vegetación poco desarrollada mostro valores entre 0,6 y 0,7; la saludable entre 0,6 y 0,3 y finalmente los valores por debajo de 0,3 pertenecían a vegetación densa. Esto demuestra la relación negativa y directa perfecta, que tuvo el GVI con el NDVI.

En las siguientes imágenes se pueden observar los mosaicos GVI multitemporales:

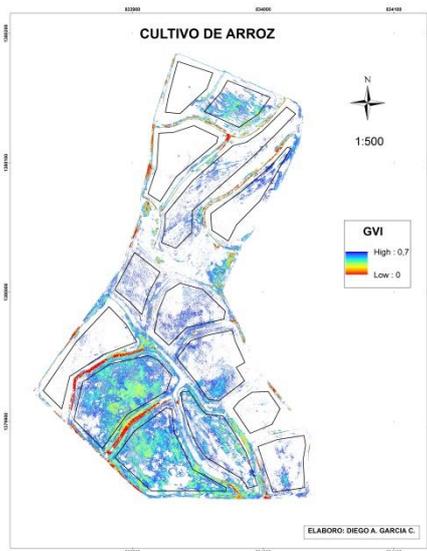


Figura 78. Mosaico GVI (17/07/16)

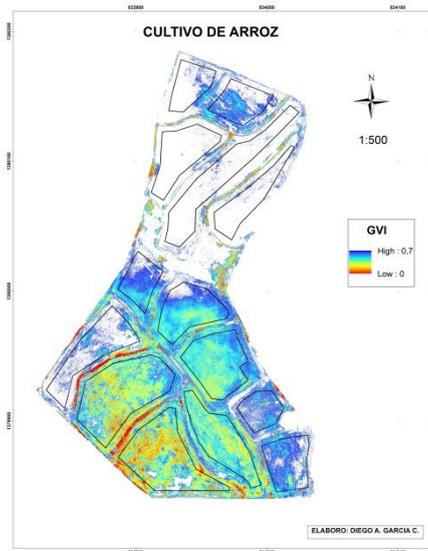


Figura 79. Mosaico GVI (24/07/16)

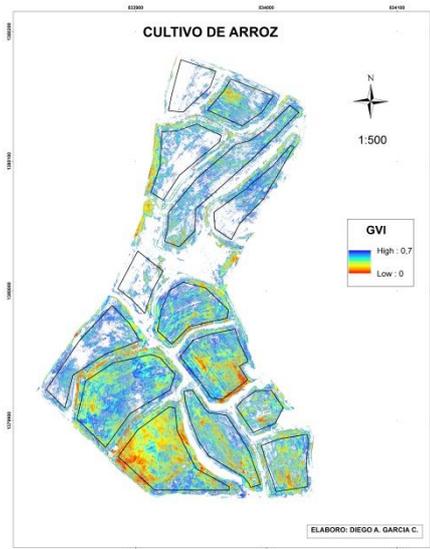


Figura 80. Mosaico GVI (14/08/16)

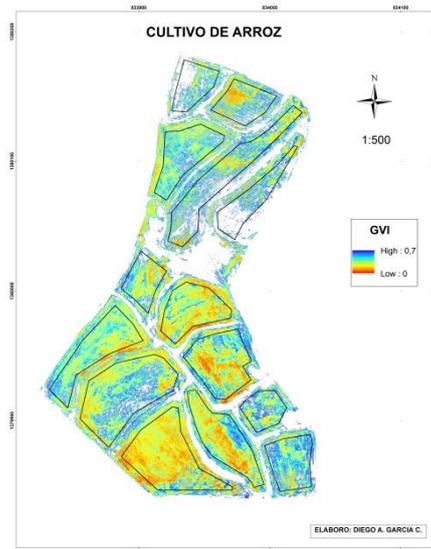


Figura 81. Mosaico GVI (21/08/16)

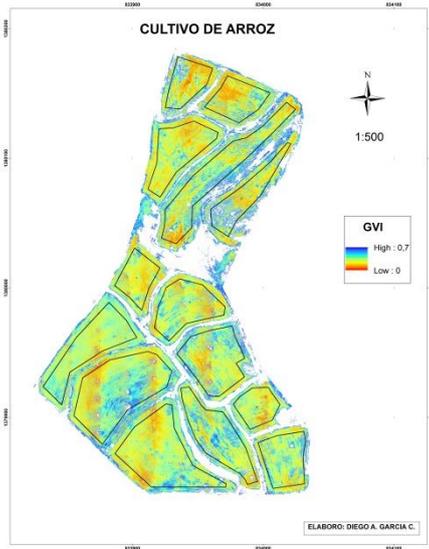


Figura 82. Mosaico GVI (04/09/16)

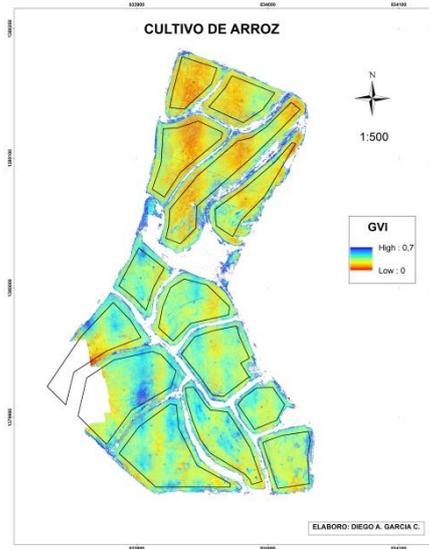


Figura 83. Mosaico GVI (18/09/16)

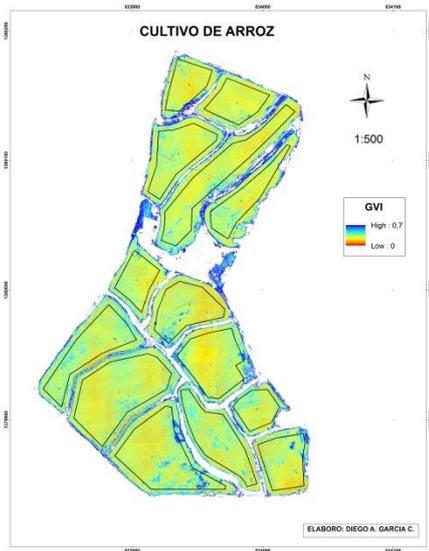


Figura 84. Mosaico GVI (25/09/16)

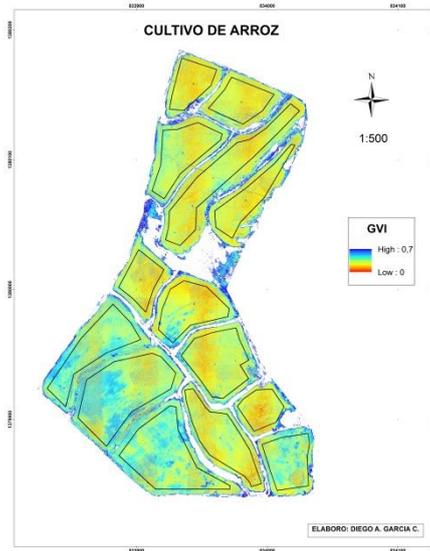


Figura 85. Mosaico GVI (08/10/16)

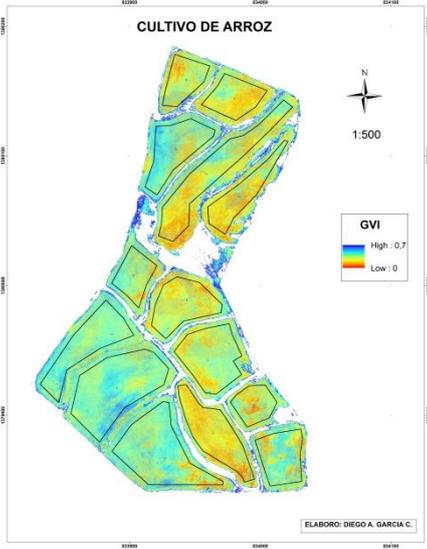


Figura 86. Mosaico GVI (16/10/16)

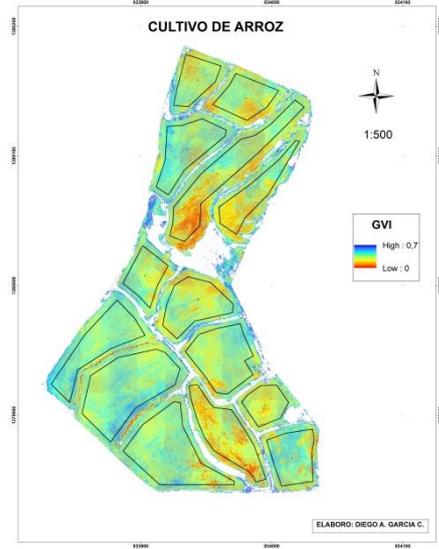


Figura 87. Mosaico GVI (22/10/16)

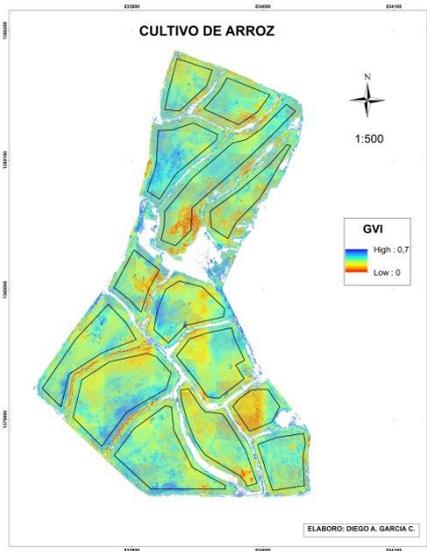


Figura 88. Mosaico GVI (30/10/16)

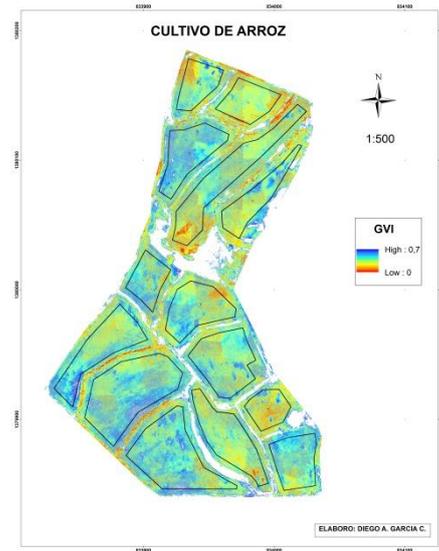


Figura 89. Mosaico GVI (07/11/16)

4. Protocolo para la agricultura de precisión

4.1. Protocolo para el análisis de cultivos agrícolas a partir de imágenes aéreas captadas por drones.

En la actualidad la agricultura de precisión se torna como una alternativa para disminuir los efectos negativos de la agricultura tradicional. Es una técnica que consiste en el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento de la variabilidad existente en una explotación agrícola. Según Fountas et al. (2003), la agricultura de precisión se define como el “manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel de subparcela de campo, para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental”. Para caracterizar esta variabilidad se utilizan herramientas tecnológicas como los sistemas de posicionamiento global, conocidos popularmente como GPS, sensores planta-clima-suelo e imágenes multiespectrales obtenidas a partir de satélites, aviones o UAS/RPAS. (Díaz, 2015)

El presente protocolo pretende dar soportes al agricultor, productor de arroz, entidades o empresas relacionadas con la actividad agrícola y la comunidad científica y académica en general, acerca del uso de drones y sensores multiespectrales de bajo costo como herramienta tecnológica innovadora para el campo de la agricultura de precisión.

Para el empleo de drones de manera eficiente y rentable en la agricultura es necesario que el agricultor o empresario tenga en cuenta los siguientes aspectos:

4.1.1. Definición del cultivo

Se debe conocer todo lo relacionado con el cultivo, el tipo de cultivo, su desarrollo fenológico, las condiciones ambientales favorables.

4.1.2. Establecimiento del área de estudio

Es importante delimitar el área del estudio para definir el tipo de dron a utilizar de ala rotatoria o fija. Además para establecer la ruta de vuelo y no realizar un desgaste volando en áreas que no son necesarias.

Esta delimitación será realizada por un profesional o tecnólogo que aporte las características del terreno a través de equipos topográficos de alta precisión. Es necesario conocer la topografía del lugar, así como las coordenadas X, Y y Z de diferentes puntos. Esta información es fundamental ya que minimiza el error espacial de los mosaicos obtenidos por los drones.

4.1.3. Identificación de los problemas asociados con el cultivo

El productor o agricultor debe manifestar los problemas que requiere que sean corregidos. El profesional encargado en agricultura de precisión debe asistir al terreno junto con el productor e identificar cada uno de los problemas y necesidades asociadas.

4.1.4. Determinación de las variables que influyen en la problemática

Una vez identificados los problemas el profesional realiza una revisión documental del caso a estudiar y determina las variables que deben medirse en el proyecto para establecer el método y los equipos necesarios, además crea el diseño experimental y establece el análisis de la información para crear resultados confiables.

4.1.5. Establecimiento de los equipos y métodos

Con los drones es posible calcular diferentes índices de vegetación y térmicos, pero es necesario en la mayoría de casos correlacionar esta información con datos de campo, para que elevar el nivel de veracidad y consistencia. Por eso es indispensable que una vez identificadas las variables a estudiar, se establezcan los equipos y métodos a desarrollar en el proyecto.

4.1.6. Ejecución de la relación costo beneficio

Una vez se tiene claridad en los métodos y los equipos a usar es útil para el productor que el profesional encargado justifique el uso de drones y los demás equipos realizando un balance de activos y pasivos donde se demuestra la utilidad del desarrollo procedimental.

4.1.7. Diseño de la ruta de vuelo

La ruta de vuelo se debe establecer en función de los datos a analizar, es relevante tener en cuenta las propiedades del sensor multiespectral como la resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal.

Para el diseño de vuelo es fundamental:

- Establecer la altura del vuelo: está en función de la escala que se pretende obtener en las fotografías y la distancia focal de la cámara.
- Dibujar los waypoints o puntos georreferenciados sobre los que se quiere que el dron realice la ruta de vuelo, para esta actividad es bueno usar una imagen satelital como referencia.
- Cuantificar una correcta superposición longitudinal y transversal de las imágenes del vuelo para que el geoprocesamiento o cosido de imágenes tenga consistencias.
- A través del aplicación o software del dron determinar la distancia y el tiempo vuelo acorde con la autonomía del dron.

Cuando finaliza esta etapa las imágenes deben generar:

- Una resolución espacial que nos permita diferenciar y cuantificar las plantas del cultivo.
- Una resolución radiométrica y espectral que ayude a calcular los índices necesarios en el estudio.
- La resolución temporal con los drones no es un inconveniente, ya que estos generan información en tiempo real.

4.1.8. Realización de los vuelos

Antes de realizar el vuelo es necesario hacer una verificación de los equipos a usar (en los siguientes ítems se definen unos protocolos para el alistamiento de material con el dron Iris+ 3DR y el phantom 3 advanced).

En campo es necesario que mínimo estén dos personas realizando el vuelo, el piloto que maneja la aeronave a través del control remoto y la estación en tierra, y un observador que este pendiente de los movimientos del dron en el aire y de su ruta de vuelo de forma correcta.

4.1.9. Recolección de los datos de campo

La información de las variables que se deben medir en campo como: índice de área foliar (LAI), índice de clorofila, índices hídricos, temperatura, humedad, cantidad de agua, rendimiento del cultivo, altura de la planta etc. Deben ser medidos una vez finalice la ejecución del vuelo para obtener datos consistentes y veraces a la hora de correlacionar.

4.1.10. Procesamiento de la información

Cabe destacar que los procedimientos que se describen a continuación, deben ser realizados por personas profesionales o que tengan experiencia en sistemas de información geográfica y programas estadísticos avanzados.

El primer procesamiento de las imágenes que se debe realizar es la calibración radiométrica de las imágenes, es decir acercar los valores de bandas obtenidas por el sensor lo más parecido a la realidad. En esta tesis se estableció una metodología para la calibración de imágenes obtenidas por la cámara canon S100 a través del establecimiento de una ecuación y un código en el software estadístico R, para la generación automática de las nuevas bandas calibradas y su posterior integración en una sola imagen.

Después de la calibración, las imágenes deben ser procesadas en software como el agisoft photoscan y el pix4d, los cuales permiten coser las imágenes y generar orfotomosaicos. Estos programas dan la opción de generar puntos de control (obtenidos en la topografía al inicio del

estudio) que permiten disminuir el error en los ejes X, Y y Z de los mosaicos (es decir aquí se hace la llamada corrección geométrica de las imágenes)

Una vez se obtiene el mosaico es importante usar los sistemas de información geográfica (Arcgis, Qgis, Envi, Erdas etc); y a través de diferentes herramientas obtener información en diferentes formatos como: raster, shapefile y tablas, para observar los datos y generar un análisis cualitativo y cuantitativo.

4.1.11. Análisis e interpretación de resultados

Los datos obtenidos en tabla, raster y shapefile se pueden correlacionar usando software estadísticos avanzados como R o python. También es posible extraer las tablas desde los sistemas de información geográfica y realizar análisis estadísticos en Excel.

En esta etapa a través de la interpretación se debe establecer la solución al problema planteado por el productor, es necesario generar un informe con los pasos a seguir en campo.

4.1.12. Solución

En campo se debe hacer acompañamiento y capacitación al productor de las prácticas establecidas en el informe de interpretación planteado anteriormente.

Las prácticas de solución deben conducir hacia una agricultura de precisión que genere:

- Disminución y aplicación en zonas necesarias del agua de riego en los cultivos
- Disminución y aplicación en zonas necesarias de productos químicos empleados durante su desarrollo (herbicidas, fungicidas, pesticidas e insecticidas)
- Disminución y aplicación en zonas necesarias de fertilizantes.
- Aumento de la producción y rendimiento del cultivo
- Disminución de los costos de producción al emplear poco material para su desarrollo.
- Disminución de los impactos ambientales generados.

Como parte del protocolo se anexan unos pasos a seguir para la planificación y ejecución del vuelo para los drones Iris+ 3DR y phantom 3 advanced, estos insumos son de utilidad y pueden servir de alistamiento en trabajos de campo en agricultura de precisión que usen drones similares.

4.2. Dron Iris +3DR

Si se desea hacer trabajos en agricultura de precisión con la cámara canon S100 ensamblada al dron Iris+, para calcular diferentes índices de vegetación, las siguientes actividades deben ser tenidas en cuenta antes, durante y después del vuelo:

4.2.1. Planificación de una misión de vuelo con el dron Iris + 3DR

Para la planificación de la ruta de vuelo del dron Iris + 3DR, es necesario tener en cuenta los siguientes pasos:

- Detallar las coordenadas del cultivo y establecer el perímetro
- Visualizar la zona de estudio desde un software como google earth o a través de imágenes satelitales en sistemas de información geográfica.
- Planificar la ruta de vuelo del Iris+ 3DR desde el software misión planner para laptop o desde la aplicación tower para android.
- Para la aplicación tower, conecte el extremo azul del adaptador del Android en el dispositivo y el extremo negro en la radio. Seleccione Conectar.
- Para misión planner, conecte la radio al adaptador USB de su computadora portátil. Seleccione AUTO, 57600, y conectar.
- Establecer los waypoints, la altura de vuelo del dron y el tamaño de las curvas
- Guardar la ruta de vuelo para Iris+.
- Cuando esté listo para iniciar la misión, colocar Iris+ en estándar (STD).
- Si se planeó un punto de despegue en su misión, cambiar a AUTO cuando se esté en el suelo, y elevar el acelerador para iniciar la misión. Si no agrego un punto de despegue, cambie al modo automático después del despegue para iniciar la misión en vuelo.

- Para recuperar Iris+ durante una misión, utilizar el controlador para cambiar al estándar (STD) y aterrizar de forma manual o cambiar a RTL, y volver automáticamente al punto de lanzamiento.
- Cuando la misión se ha completado e IRIS ha aterrizado, utilizar el controlador para cambiar a estándar (STD) y luego desarmar.

4.2.2. Lista de chequeo del dron Iris+ 3DR para antes de salir a campo

Para trabajos de campo con la cámara canon S100 ensamblada al dron Iris+, se sugiere tener en cuenta antes, durante y después del vuelo, las siguientes actividades:

- Comprobar lo niveles de batería
- Cargar la batería del dron y las pilas para el control remoto
- Colocar las patas de altura en el Iris+
- Instalar las hélices de borde negro en el motor con un punto negro y de igual manera las grises.
- Colocar las pilas en el control remoto
- Encender el control remoto
- Apuntar la antena del control remoto hacia arriba y la antena del Iris+ hacia abajo para tener una señal más fuerte.
- Ajuste el selector de modo en estándar (STD). Si eres nuevo en el vuelo, trate de iniciar su primer vuelo en loiter (LTR) en lugar de estándar.
- Asegúrese de que el interruptor de RTL se establezca en OFF.
- Revise que el control remoto este encendido mientras se comunica con el Iris+. Si Iris+ pierde la comunicación en vuelo con el controlador, Iris+ iniciará un retorno automático.
- Pulsar y mantener pulsado el botón DN en el controlador para ver los datos de vuelo de Iris+.
- Ensamblar el soporte para la cámara canon S100 NGB
- Encender la cámara, ajustar la fecha y revisar que el GPS de la cámara este activo.
- Revisar que el script de la cámara.
- Ajustar la cámara al soporte.

- Presionar los lados del compartimiento del dron donde va la batería y abrir la puerta hacia abajo.
- Insertar la batería y enchufar los conectores amarillos.
- Esperar 10 segundos antes de cerrar la tapa de la batería, mientras que los sensores internos se calibran y el LED de estado se muestra en azul y rojo.
- Para cerrar, apriete la puerta y gire hacia arriba hasta que encaje en su lugar, asegúrese de que los cables de la batería no interfieran con los cables del LED.
- Si ve el LED en estado amarillo intermitente, lo más probable es que los sensores no se calibraron correctamente durante el inicio. Vuelva a conectar la batería y asegúrese de mantener el Iris+ absolutamente inmóvil y que el LED indique el estado de color azul y rojo.
- Colocar el Iris+ en el punto de lanzamiento con los brazos negros hacia usted y con los brazos azules de espaldas a usted.
- Conectar la radio a su estación de tierra y seleccionar conectar. La estación en tierra le permite ver datos en tiempo real del vuelo y desbloquear funciones autónomas.
- Presionar el botón de toma de fotografías de la cámara para dar inicio con el script.
- Presionar el botón de seguridad, hasta que esté en color rojo permanente. Iris+ está listo para volar.
- Armar motores, para activar los motores, mantenga el mando izquierdo abajo a la derecha hasta que los motores giren. Ahora ya está listo para el despegue.
- Desarmar motores, después de aterrizar, mantener el mando izquierdo abajo a la izquierda hasta que los motores dejen de girar.
- Presionar el botón de seguridad hasta que aparezca parpadeando en rojo, para manejar el Iris+.
- Desconectar la batería
- Apagar el control remoto

Ante de volar es necesario tener las siguientes precauciones:

- Volar en espacios abiertos: verificar que el espacio para realizar el vuelo esté libre de edificios, arboles, cables eléctricos

- Mantener el control remoto en todo momento (incluso cuando se utilicen funciones automáticas)
- Mantener una línea de visión directa
- Revisar condiciones atmosféricas (volar con vientos inferiores a 10 m/s, sin nieve, lluvia y niebla)
- Evitar obstáculos, multitudes, líneas de alta tensión, árboles y masas de agua
- Evitar zonas con altos niveles de electromagnetismo
- Llevar la lista de control de vuelo y baterías completamente cargadas.

4.3. Phantom 3 advanced

Si se desea hacer monitoreos de la vegetación con drones phantom de la marca DJI, es bueno tener en cuenta antes, durante y después del vuelo las siguientes actividades para las labores de campo:

4.3.1. Planificación de una misión de vuelo con el dron phantom 3 advanced

En este estudio cuando se trabajó con el dron phantom 3, las rutas de vuelo fueron planeadas con la aplicación litchi, a continuación se mencionan los pasos a seguir para la planificación del vuelo:

- Detallar las coordenadas del cultivo y establecer el perímetro
- Visualizar la zona de estudio desde un software como google earth
- Planificar la ruta de vuelo del phantom 3 advanced desde el link <https://flylitchi.com/hub>. (Establecer los waypoints, la altura de vuelo del dron y el tamaño de las curvas)
- Guardar la ruta de vuelo
- Importar la ruta de vuelo desde la aplicación litchi del dispositivo móvil

4.3.2. Lista de verificación para el phantom 3 advanced

Se sugiere tener en cuenta las siguientes actividades para trabajos de campo con el phantom 3 advanced:

- Comprobar los niveles de batería
- Cargar la batería del dron y el control remoto
- Retirar el protector del gimbal
- Introducir la batería inteligente en el phantom 3
- Mover el conmutador de modo de vuelo del control remoto hacia la derecha (modo P)
- Encender el control remoto pulsando el botón de encendido una sola vez, soltándolo y después manteniéndolo pulsado durante 2 segundos.
- Encender el dron de la misma forma descrita para el control remoto.
- Conectar el dispositivo móvil con el control remoto a través de un cable USB e iniciar la aplicación DJI GO o litchi.
- En la aplicación, verificar la lista de comprobación en pantalla para asegurarse que el phantom está listo para volar.
- Verificar el número de satélites (mínimo 9 satélites)
- Ajustar en la aplicación la máxima altitud y la altitud del retorno al sitio de despegue
- Instalar las hélices de borde negro en el motor con un punto negro y de igual manera las grises.
- Calibrar la brújula cuando lo solicite la aplicación.
- Verificar que la tarjeta micro SD clase 10, este conectada a la ranura de la cámara del dron.
- Asegurarse de que la barra de estado de la aeronave en la aplicación indique “safe to fly (GPS)”
- Regresar el dron al sitio de despegue cuando la batería se encuentre entre el 10 y 30%, se puede realizar manualmente desde el control remoto oprimiendo dos veces seguidas el botón RTH o desde la aplicación colocar en modo retorno.

5. Conclusiones

Para trabajos de campo con la cámara canon S100 ensamblada en el dron Iris+, es necesario realizar la calibración radiométrica de las imágenes NGB para obtener valores espectrales cercanos a la realidad. En este trabajo se realizó con éxito la calibración radiométrica de las imágenes de 12 vuelos efectuados, en cada vuelo se procesaron más de 300 imágenes con una resolución de 1,5 cm/píxel, a cada píxel se le realizó la calibración de los valores de sus bandas a través del establecimiento de la fórmula descrita en la metodología. Cabe destacar que el empleo del software estadístico R fue fundamental para el cálculo de los valores calibrados, ya que disminuye el tiempo de procesamiento y se podría decir que lo realiza de forma automática una vez se tiene establecido el script o código R.

A través de la cámara canon S100 en el dron Iris+ de 3DR, es posible recolectar información de bandas del espectro visible y NIR con una buena resolución espacial y espectral en tiempo real de cultivos agrícolas (en este caso del arroz) y a partir de ahí generar ortofotomosaicos de índices de vegetación (NDVI, GNDVI y GVI) para análisis cualitativo y cuantitativo de la vegetación. Esto permite analizar diferentes zonas de respuesta espectral y tomar decisiones acertadas para combatir la propagación de enfermedades y plagas, intervenir zonas con deficiencias nutricionales, disminuir la dependencia de productos químicos, los costos y los impactos negativos al ambiente.

El NDVI varió en el rango de -1 a 1, las zonas pertenecientes a suelo desnudo, rocas y agua generaban valores menores a 0,2, la vegetación estresada se situó en el rango de 0,2 a 0,3, las plantas saludables mostraron valores de 0,3 a 0,6 y finalmente la vegetación densa arrojó valores por encima de 0,6. Esto evidencia que las plantas sanas generan un contraste alto entre las bandas del azul y la del infrarrojo cercano, usadas para el cálculo del NDVI, mientras que en las poco desarrolladas o estresadas es mínimo. Se puede deducir entonces que en las plantas sanas los pigmentos como la clorofila y los carotenoides de la región fotosintéticamente activa (espectro visible) presentan gran absorción de energía y reflejan una parte mínima, mientras que en el infrarrojo la energía reflejada es alta.

El estudio de mosaicos NDVI a través del tiempo, permitió realizar análisis cualitativos y cuantitativos de vegetación, en este caso, se determinaron las características cualitativas propias de cada fase de crecimiento del cultivo de arroz, correlacionando con teorías

similares. A su vez, este análisis identificó la afectación de una zona del cultivo (muestra 3 y 4) por parte del hongo *Pyricularia oryzae*, el cual genera la enfermedad llamada Pyricularia, de aquí podemos concluir que la disminución del índice NDVI en etapas de crecimiento puede ayudar en la identificación de enfermedades.

El establecimiento de series de tiempo del índice NDVI en el cultivo de arroz permitió caracterizar y analizar su comportamiento multitemporal en cada una de las fases fenológicas del arroz. La fase vegetativa se caracterizó por tener un crecimiento NDVI leve al inicio, luego exponencial y finalmente latente. La fase de reproducción se identificó como la fase que genera la mayor respuesta espectral del índice NDVI y la fase de maduración por tener un decrecimiento gradual del índice. Estas caracterizaciones permiten realizar seguimiento y monitoreo de cultivos en tiempo real, identificar problemas de desarrollo y realizar una gestión sostenible del cultivo.

La estadísticas espaciotemporales de las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano y los índices de vegetación, constituye una herramienta importante para la agricultura de precisión, debido a que permiten hacer un análisis dinámico y diagnosticar problemas relacionados con enfermedades y plagas o deficiencias nutricionales y realizar un seguimiento de diferentes variables, esto es fundamental a la hora de establecer planes de acción para un manejo socioeconómico y ambientalmente sostenible del cultivo.

Para los productores de arroz, la cámara canon S100 ensamblada en el dron Iris+, se convierten en una herramienta fundamental para practicar la agricultura de precisión, ya que permite adquirir información de calidad y en etapas tempranas de índices vegetativos (NDVI, GNDVI y GVI) y a partir de estos diagnosticar problemas, enfermedades o deficiencias y hacer una gestión adecuada de todos los procesos como: aplicar fertilizantes solo en zonas donde es necesario, disminuir la aplicación de productos químicos (herbicidas, pesticidas, insecticidas y fungicidas) y estimar el rendimiento del grano de arroz para emprender acciones que aumenten la producción, disminuyan los costos e impactos ambientales negativos.

Referencias

Addati, G., y Pérez, G. (2014). Introducción a los UAV's, drones o VANTS de uso civil. Universidad del CEMA. Buenos Aires, Argentina.

Aeronáutica civil (2012). Circular reglamentaria N° 002. Recuperado de: <http://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/certificacion-y-licenciamiento/Documents/PROYECTO%20BORRADOR%20CIRCULAR%20RPAS.pdf>

Araque, L., y Jiménez, A. (2009). Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. *Palmas*.30(3), 63-79.

Almeida, A. (2015). Procesamiento digital de imágenes multiespectrales landsat 8, para aplicaciones agronómicas en la subcuenca del río guayllabamba. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Bendig, Juliane , Andreas Bolten, Simon Bennertz, Janis Broscheit, Silas Eichfuss, y Georg Bareth. «Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging.» *Remote Sensing* 6 (2014): 10395-10412.

Berni, J., Zarco-Tejada, P., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 722-738.

Berrio, V. (2015). *Uso de drones como herramienta de planificación en agricultura de precisión para la detección temprana de problemas en cultivos de papa (solanum tuberosum)*. Pamplona, Colombia.

Berrio, V., Mosquera, J., & Alzate, D. (2015). Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(1), 28-40.

Canal, R., Arnaude, O., Ortiz, A., Valverde, B., & Fuentes, C. (2009). Caracterización morfológica de poblaciones de arroz maleza, en el distrito de riego del río Zulia, Norte de Santander, Colombia. *Agronomía Tropical*, 59(4), 387-400.

Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7, 4026-4047.

Chuvieco, E. (2010). Teledetección Ambiental - La Observación de la Tierra desde el Espacio. (B. P. Digital, Ed.) Barcelona, España: Ariel S.A.

Cristo, E., Díaz, S., Shiraishi, M., & Dhanapala, M. (2009). Comparación entre las características de crecimiento de las variedades de arroz con diferente origen. *Cultivos Tropicales*, 30(3), 23-27.

Cuevas, A. (2012). El clima y el cultivo del arroz en Norte de Santander. (Fedearroz, Ed.) *Revista arroz*, 60(497), 4-8.

Degiovanni, V., Berrío, L., & Charry, R. (2010). Origen, taxonomía, anatomía y morfología de la planta de arroz. En V. Degiovanni, C. Martínez, & F. Motta, *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina* (págs. 35-58). Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Degiovanni, V., Gómez, J., & Sierra, J. (2004). Análisis de crecimiento y etapas de desarrollo de tres variedades de arroz (*Oryza sativa L.*) en Montería, Córdoba. *Temas Agrarios*, 9(1), 21-29.

Díaz, C.A. (2013). Adquisición de imágenes de bajo costo aplicadas a la agricultura de precisión usando vehículos aéreos no tripulados (tesis de maestría). Universidad San Francisco De Quito, Quito, Ecuador.

Díaz, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde uas/rpas y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión (tesis de Máster). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

Dubbini, M., Pezzuolo, A., De Giglio, M., Gattelli, M., Curzio, L., Covi, D., . . . Marinello, F. (2017). Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. *Agricultural Engineering International : The CIGR e-journal*, 87-93.

Echevarría, N. (2010). Evaluación del índice vegetativo normalizado (NDVI) para la definición de unidades de manejo diferenciado del viñedo en la roja alaviesa (tesis de pregrado). Universidad pública de Navarra, España.

Esri (1995-2017). Función NDVI. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/data/imagery/ndvi-function.htm>

Fajardo , J. C. (2014). Apoyo a la agricultura de precisión en colombia a partir de imágenes adquiridas desde vehículos aéreos no tripulados (UAV'S). Bogotá, D.C.

Fajardo , J. C. (2014). Guía de fotografía aérea desde UAV's. en J. C. Fajardo, apoyo a la agricultura de precisión en colombia a partir de imágenes adquiridas desde vehículos aéreos no tripulados (UAV's) (pág. 21). bogotá, d.c.

Fedearroz (2008). "Pyricularia" una enfermedad que ataca el arroz. Recuperado de: <http://www.fedearroz.com.co/noticias/noticiasd2.php?id=155>

Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., y Roux, B. (2007). An airborne imaging system for mapping spatial variability in sugarcane. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 26. 1835-1841.

Puerta R., Trigozo R., Bravo J. (2011). Arcgis Basico 10. Universidad Nacional Agraria de la Selva.Tingo Maria, Perú.

Fonnegra, D. (2014). Identificación de cambios en la respuesta espectral del maíz a partir de variaciones en prácticas agronómicas. Buenos Aires: Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich".

Gomez, S., & Roquet, J. (2012). *Metodología de la investigación*.

Mendoza, G. (2012). Analisis de series de tiempo de indice de vegetacion evi 2006-2011 para caracterizar el cultivo del arroz a partir de imágenes modis. Bogota D.C.

Moquete, C. (2010). Guia tecnica el cultivo de arroz. Santo Domingo, Republica Dominicana.

Oliveros, A. (2015). *Análisis del comportamiento temporal de la cobertura vegetal en el area protegida de recursos manejados peninsula de Zapata*. La Habana.

Ortega, C. (2015). Respuesta espectral del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en dos fases fenológicas durante el periodo invernal 2014. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Posada, H., Ramirez, H., & Espejo, N. (2012). Manual de prácticas de percepcion remota con el programa Erdas Imagine 2011. (C. d. Geográfica, Ed.) Bogota D.C., Colombia: Instituto Geografico Agustín Codazzi (IGAC).

Rives, Narovis, Acebo, Yanelis, Almaguer, M, García, J.C, & Hernández, Annia. (2009). Actividad antagónica frente a *Pyricularia grisea* (Sacc.) y fitoestimulación en el cultivo del arroz de cepas autóctonas de *Pseudomonas putida* (Trev.). *Revista de Protección Vegetal*, 24(2), 106-116. Recuperado en 02 de octubre de 2018, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522009000200006&lng=es&tlng=es.

Satoque, L. P., & Gutierrez, E. F. (2016). Espacialización del estrés biotico en los frailejones debido alcambio climatico en el parque natural chingaza mediante uav's. Bogotá D.C.

Secretaria de agricultura y ganaderia;. (2003). *Manual tecnico del cultivo de arroz (Oryza sativa)* . Obtenido de Manual tecnico del cultivo de arroz (Oryza sativa) : <https://curlacavunah.files.wordpress.com/2010/04/el-cultivo-del-arroz.pdf>

Serrano , J., Fábrega, J., Quirós, E., Sánchez, J., & Jiménez, J. (2018). Análisis prospectivo de la detección hiperspectral de cultivos de arroz (*Oryza sativa* L.). En K. E (Ed.), 6th Engineering, Science and Technology Conferenc. 2018, págs. 69–79. Panamá: Knowledge E.

Teoh, C., Mohd Nadzim, N., Mohd Shahmihaizan, M., Mohd Khairil Izani, I., Faizal, K., & Mohd Shukry, H. (2016). Rice Yield Estimation using Below Cloud Remote Sensing Images Acquired by Unmanned Airborne Vehicle System. *Internationla Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 6(4), 516-519.

Zhou, X., Zheng, H. B., Xu, X. Q., He, J. Y., Ge, X. K., Yao, X., . . . Tian, Y. C. (2017). Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 246–255.