



**Diseño e implementación de un sistema de monitoreo para la detección temprana de MOKO
(*Ralstonia solanacearum*) en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes
aéreas multiespectrales.**

Criollo Erazo, David Andree y Soria Velástegui, Polo Andrés

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico

Ing. Constante Prócel, Patricia Nataly

10 de agosto del 2022

Latacunga



COPYLEAKS

Tesis Soria Criollo.pdf

Scanned on: 14:21 August 11, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	102
Words with Minor Changes	63
Paraphrased Words	1124
Omitted Words	2847

Ing. Consta Prócel, Patricia Nataly

C.C.: 0503354029



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: “Diseño e implementación de un sistema de monitoreo para la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*) en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales”, fue realizado por los señores Criollo Erazo, David Andree y Soria Velástegui, Polo Andrés; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 11 de agosto de 2022

Ing. Constante Prócel, Patricia Nataly

C.C.: 0503354029



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, Criollo Erazo, David Andree, con cédula de ciudadanía n° 1805145834 y Soria Velástegui, Polo Andrés, con cédula de ciudadanía n° 1804798633, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo para la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*) en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales" es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 11 de agosto de 2022

Criollo Erazo, David Andree

C.C.: 1805145834

Soria Velástegui, Polo Andrés

C.C.: 1804798633



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros, Criollo Erazo, David Andree, con cédula de ciudadanía n° 1805145834 y Soria Velástegui, Polo Andrés, con cédula de ciudadanía n° 1804798633, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo para la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*) en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 11 de agosto de 2022

Criollo Erazo, David Andree

C.C.: 1805145834

Soria Velástegui, Polo Andrés

C.C.: 1804798633

Dedicatoria

Primero Dios, por iluminar mi humilde caminar, y por cumplirme siempre que lo necesité. A mi madre Blanca que siempre confió en mí, A mi madre Martha que desde el principio me dio la oportunidad de explotar mi potencial.

A Fernando que desde la sombra siempre busco la forma de ayudarme.

A toda mi familia, para quienes son todos mis logros.

A Leslie que siempre me brindo su energía para no rendirme.

A mí mismo por luchar por mis sueños y aprovechar todas las oportunidades que la vida me ha dado.

Criollo Erazo, David Andree

Dedicatoria

El presente trabajo de titulación lo dedico a Dios que supo darme la fuerza y madurez suficiente para poder afrontar y seguir adelante con mi vida a pesar de la muerte de mi Madre.

A mi Madre Lucy Velástegui(+) que siempre ha sido un ejemplo de lucha y superación, a pesar de todas las dificultades que se le presentaron en su vida siempre estuvo apoyándome como ninguna otra persona lo hizo y siempre confió en mí, a mi hermana Joyce que muchas veces ha hecho el papel de madre dándome el apoyo y el amor suficiente para poder estar culminado esta etapa , finalmente quiero agradecer a mi padre ,a mi familia y a todos mis amigos que me han apoyado en los peores momentos de mi vida.

Soria Velástegui, Polo Andrés

Agradecimiento

Agradezco a mi madre por su inmenso amor, por ayudarme en lo que estuvo a su alcance para lograr este sueño.

A toda mi familia que con un granito de arena contribuyo a la edificación de este proyecto.

A Ing. Patricia Constante por compartir con sus conocimientos para la elaboración del proyecto.

A todo el personal de la empresa "Altium" que contribuyo con las salidas a campo, y todos los equipos necesarios para el desarrollo del proyecto.

A Leslie que siempre fue mi cable de vida.

Criollo Erazo, David Andree

Agradecimiento

Primeramente, agradecer a Dios por brindarme el carácter y la dedicación para poder salir adelante antes todas las dificultades.

A mi familia por siempre ayudarme y apoyarme a cumplir mis objetivos.

A mi querida ESPE Sede Latacunga por brindarme conocimientos, habilidades y actitudes necesarias para poderme desenvolver en el campo laboral y personal, especialmente a mi tutora MSc.

Patricia Constante, por ser una guía y apoyo en la realización del presente proyecto.

A la empresa "Altitum" que colaboró para la ejecución de este proyecto facilitándonos los equipos necesarios para la realización del mismo.

Soria Velástegui, Polo Andrés

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	8
Índice de contenido	10
Índice de tablas.....	15
Índice de figuras.....	16
Resumen	20
Abstrac.....	21
Capítulo I: Generalidades	22
Planteamiento del problema	22
Antecedentes.....	23
Justificación e importancia	25
Objetivos	27
<i>Objetivo general</i>	27
<i>Objetivos específicos</i>	28
Hipótesis.....	28
Variables de la investigación.....	28
<i>Variables independientes</i>	28

<i>Variables dependientes</i>	29
Capítulo II: Fundamentación teórica	30
Agricultura de precisión.....	30
Sistema de monitoreo de cultivos	30
Musaceae	31
Género <i>musa</i>	31
Plátano (<i>Musa balbisiana</i>).....	31
Banano (<i>Musa paradisiaca</i>).....	32
Moko	33
<i>Sintomatología</i>	33
<i>Métodos de dispersión de la enfermedad</i>	34
<i>Control de la enfermedad</i>	35
<i>Importancia y consecuencia económica de la plaga</i>	35
<i>Distribución geográfica en el Ecuador</i>	35
Vehículos aéreos no tripulados (UAV's).....	36
<i>Clasificación de los UAV's</i>	36
<i>UAV'S en la agricultura de precisión</i>	36
Bandas espectrales.....	37
<i>Espectro visible</i>	37
<i>Infrarrojo</i>	37
<i>Infrarrojo cercano</i>	37
<i>Infrarrojo lejano o térmico</i>	38
<i>Microondas</i>	38

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	38
Imagen digital	41
Cámaras digitales y plataformas	42
<i>Cámaras visibles</i>	42
<i>Cámaras multiespectrales</i>	42
<i>Cámaras hiperespectrales</i>	42
<i>Sensores LiDAR</i>	42
Procesamiento de imágenes digitales	43
Fotogrametría	43
<i>Fotogrametría Analógica</i>	44
<i>Fotogrametría Analítica</i>	44
<i>Fotogrametría Digital</i>	44
Ortomosaico	44
<i>Software para procesamiento de ortomosaicos</i>	45
Capítulo III: Diseño e implementación de componentes del sistema	46
Metodología	46
Fase 1	47
<i>Descripción del área de estudio</i>	49
<i>Selección de cultivos sanos</i>	49
<i>Selección de cultivos enfermos</i>	50
Fase 2	52
<i>Vehículo aéreo y el sensor multiespectral</i>	52
<i>Sensor multiespectral Micasense Altum</i>	52

Mapeo de Salud de Cultivos.	53
Identificación de enfermedades mediante post procesamiento.	54
<i>Dron DJI MATRICE 300 RTK</i>	54
<i>Segunda opción de vehículo aéreo</i>	56
<i>Diseño de estabilizador del sensor</i>	57
Diseño conceptual.....	58
Diseño de detalle.	61
<i>Gomas de amortiguamiento</i>	65
Diseño de Geometrías.	66
Análisis estructural del estabilizador.....	70
Manufactura.....	83
Fase 3	84
<i>Captura de imágenes multiespectrales aéreas</i>	84
<i>Procesamiento de la imagen multiespectral</i>	85
Alineación fotogramétrica.....	85
Orto rectificación.	87
Ortomosaico.....	87
Fase 4	88
<i>Cálculo y obtención del índice NDVI</i>	88
<i>Algoritmo de clasificación para detección temprana de MOKO en plantaciones de plátano y</i> <i>banano</i>	92
Presupuesto.....	95
<i>Costos totales del proyecto</i>	96

Capítulo IV: Estudio del diseño	97
Pruebas y resultados	97
<i>Prueba de ensamble sensor Micasense Altum + sistema estabilizador + dron DJI M300 RTK.....</i>	<i>97</i>
<i>Prueba de estabilización</i>	<i>98</i>
<i>Prueba de vuelo y captura de imágenes multiespectrales</i>	<i>98</i>
<i>Pruebas de duración de baterías</i>	<i>100</i>
<i>Prueba de cálculo del índice NDVI</i>	<i>101</i>
<i>Caracterización de MOKO por índice NDVI.....</i>	<i>101</i>
<i>Prueba algoritmo de clasificación para la detección temprana de MOKO en plantaciones</i>	<i>104</i>
<i>Pruebas del sistema de monitoreo</i>	<i>107</i>
Validación de la Hipótesis.....	108
<i>Planteamiento de la hipótesis</i>	<i>109</i>
<i>Cálculo del Chi-cuadrado.....</i>	<i>109</i>
<i>Áreas de aceptación y rechazo de la hipótesis Ho</i>	<i>112</i>
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....	113
Conclusiones	113
Recomendaciones	115
Bibliografía	116
Anexos	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Parámetros de cultivos de plátano y banano sano o sin afectación relevante de MOKO</i>	50
Tabla 2	<i>Parámetros del cultivo sano</i>	51
Tabla 3	<i>Características principales de sensor multiespectral Micasense Altum</i>	53
Tabla 4	<i>Características y descripción del Dron DJI Matrice 300 RKT</i>	55
Tabla 5	<i>Selección de concepto de vehículo aéreo como referencia concepto B</i>	56
Tabla 6	<i>Evaluación de conceptos para selección de vehículo aéreo</i>	57
Tabla 7	<i>Diseño conceptual para estabilizador</i>	58
Tabla 8	<i>Diseño de detalle</i>	61
Tabla 9	<i>Propiedades mecánicas de aluminio 7075-T6</i>	71
Tabla 10	<i>Pesos de piezas del estabilizador</i>	71
Tabla 11	<i>Propiedades Mecánicas de PLA</i>	74
Tabla 12	<i>Propiedades mecánicas del caucho de silicie</i>	78
Tabla 13	<i>Orden de las capas en su almacenamiento</i>	84
Tabla 14	<i>Valoración cualitativa de las imágenes</i>	100
Tabla 15	<i>Gasto energía en las baterías de los elementos del sistema</i>	100
Tabla 16	<i>Datos de plantas con afectación de MOKO</i>	105
Tabla 17	<i>Respuesta del sistema de monitoreo</i>	107
Tabla 18	<i>Cálculo de Chi-cuadrado</i>	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Aspecto físico del plátano</i>	32
Figura 2 <i>Banano (Musa paradisiaca)</i>	32
Figura 3 <i>Moko causado por la bacteria R. solanacearum</i>	33
Figura 4 <i>Síntomas de Moko internos en plantas jóvenes</i>	34
Figura 5 <i>Tipo de aeronaves utilizadas en los UAV's</i>	36
Figura 6 <i>Espectro visible por el ojo humano</i>	38
Figura 7 <i>Espectros reflejados y absorbidos por un árbol</i>	39
Figura 8 <i>Imagen RGB vs NDVI</i>	40
Figura 9 <i>Valores NDVI de una planta</i>	40
Figura 10 <i>Definición de una imagen digital</i>	41
Figura 11 <i>Procesamiento de imágenes digitales</i>	43
Figura 12 <i>Ortomosaico</i>	45
Figura 13 <i>Procesamiento de imágenes para crear un ortomosaico</i>	45
Figura 14 <i>Sistema de monitoreo</i>	47
Figura 15 <i>Diagrama secuencial de la metodología general del proyecto</i>	48
Figura 16 <i>Plantación de cultivo sano</i>	50
Figura 17 <i>Descripción del área de estudio plantaciones con afectación relevante de MOKO</i>	51
Figura 18 <i>Sensor multiespectral</i>	53
Figura 19 <i>Dron DJI MATRICE 300 RTK</i>	55
Figura 20 <i>Diseño de soporte y estabilizador</i>	58
Figura 21 <i>Diagrama general de soporte y estabilizador</i>	59
Figura 22 <i>Diagrama detallado de soporte y estabilizador</i>	60

Figura 23 <i>Motor ARRIS</i>	62
Figura 24 <i>Sensor de posición</i>	63
Figura 25 <i>Tarjeta de control</i>	64
Figura 26 <i>Batería</i>	64
Figura 27 <i>Gomas de amortiguamiento</i>	65
Figura 28 <i>Rodamientos</i>	66
Figura 29 <i>El conector z30</i>	66
Figura 30 <i>Adaptador para conector de gimbal</i>	67
Figura 31 <i>Adaptador conector Z30</i>	67
Figura 32 <i>Sistema de amortiguamiento del estabilizador</i>	68
Figura 33 <i>Soporte gimbal</i>	69
Figura 34 <i>Soporte sensor multiespectral Micasense Altum</i>	69
Figura 35 <i>Ensamble final del soporte y estabilizador</i>	70
Figura 36 <i>Ubicación de las cargas y restricciones en el conector z30</i>	72
Figura 37 <i>Comportamiento del conector Z30</i>	73
Figura 38 <i>Ubicación de las cargas y restricciones en el ensamble</i>	74
Figura 39 <i>Simulación de desplazamiento para placa superior</i>	75
Figura 40 <i>Factor de seguridad de placa superior</i>	75
Figura 41 <i>Interfaz para ingresar magnitudes</i>	77
Figura 42 <i>Diagramas de análisis de flexión</i>	78
Figura 43 <i>Aplicación de puntos fijos en goma de amortiguamiento</i>	79
Figura 44 <i>Aplicación de carga sobre goma de amortiguamiento</i>	80
Figura 45 <i>Simulación de esfuerzo en goma de amortiguamiento</i>	80

Figura 46 <i>Ensamble de estabilizador</i>	81
Figura 47 <i>Aplicación de cargas sobre ensamble de estabilizador</i>	81
Figura 48 <i>Aplicación de apoyos sobre el conector Z30</i>	82
Figura 49 <i>Simulación del desplazamiento máximo del estabilizador</i>	82
Figura 50 <i>Simulación del factor de seguridad del estabilizador</i>	83
Figura 51 <i>Sistema estabilizador construido</i>	84
Figura 52 <i>Imágenes multiespectrales</i>	85
Figura 53 <i>Código de la aplican del algoritmo shift en las capas de la imagen</i>	86
Figura 54 <i>Código para encontrar la matriz homográfica</i>	86
Figura 55 <i>Alineación fotogramétrica</i>	86
Figura 56 <i>Diagrama de flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales</i>	87
Figura 57 <i>Ortomosaico de un cultivo de plátano</i>	88
Figura 58 <i>Código para adquisición de ortomosaico</i>	89
Figura 59 <i>Código para la separación de capas del ortomosaico</i>	89
Figura 60 <i>Código para convertir de uint16 a float32</i>	89
Figura 61 <i>Código unir dos capas</i>	90
Figura 62 <i>Código de normalización de pixeles</i>	90
Figura 63 <i>Cálculo del NDVI</i>	90
Figura 64 <i>NDVI en escala de grises</i>	91
Figura 65 <i>Bloques de programación para algoritmo de clasificación</i>	92
Figura 66 <i>Código de caracterización de MOKO</i>	93
Figura 67 <i>Algoritmo de clasificación para la detección temprana de MOKO en plantaciones</i>	93
Figura 68 <i>Código de operación morfológica</i>	93

Figura 69 <i>Mascara de caracterización -mascara de caracterización filtrada</i>	94
Figura 70 <i>Código para colorizar de MOKO</i>	94
Figura 71 <i>Forma de interpretación visual del sistema de monitoreo de Moko</i>	95
Figura 72 <i>Adaptación de sensor Micasense Altum a dron DJI M300 RTK</i>	97
Figura 73 <i>Vuelo de dron M300 RTK con sensor Lidar</i>	98
Figura 74 <i>Corrección de ángulo con sistema estabilizador</i>	98
Figura 75 <i>Interfaz de DJI Pilot 2</i>	99
Figura 76 <i>Resultado de prueba de vuelo</i>	99
Figura 77 <i>Comparación de dos mapas NDVI realizados en distintos softwares</i>	101
Figura 78 <i>Código para graficar el histograma del NDVI</i>	102
Figura 79 <i>Respuesta espectral de una plantación de plátano sano</i>	102
Figura 80 <i>Respuesta espectral de una plantación con afectación relevante de MOKO</i>	103
Figura 81 <i>Comparación de NDVI en las hojas</i>	104
Figura 82 <i>Segmentación por NDVI</i>	104
Figura 83 <i>Ortomosaico con la ubicación GPS de las plantas con Moko</i>	105
Figura 84 <i>Respuesta del sistema de monitoreo ante presencia de MOKO</i>	106
Figura 85 <i>Distribución Chi cuadrado χ^2</i>	111
Figura 86 <i>Pruebas de hipótesis mediante Chi cuadrado</i>	112

Resumen

Cultivos de plátano y banano en Ecuador se han visto gravemente afectados por una serie de enfermedades que alteran su producción. Una de estas enfermedades es la marchitez por Moko causado por la bacteria *Ralstonia solanacearum* que desde su primera detección se volvió un problema fitosanitario y de gran preocupación entre los productores. El objetivo de este estudio fue diseñar e implementar un sistema de monitoreo para la detección temprana de Moko en plantaciones de plátano y banano a partir de la obtención de imágenes aéreas multiespectrales mediante el uso de sensores aéreos no tripulados. En la primera fase se realizó la selección del aérea de estudio, en la segunda fase se seleccionó los componentes que serán parte de la arquitectura del sistema, en la tercera fase se realizó la obtención y procesamiento de imágenes multiespectrales de plantaciones de plátano y banano sin afectación de Moko, también de plantaciones con afectación. En la fase 4 se logró la caracterización espectral por el índice NDVI de plantaciones de plátano y banano cuando no presentan afectación de Moko siendo esta diferente de las plantaciones de plátano y banano que si presentaban la infección por ello se desarrolló un algoritmo de clasificación basado en el método de segmentación de imágenes a partir del índice de vegetación NDVI para la detección de Moko en plantaciones de plátano y banano. Por último, se realizó una prueba del sistema en una plantación, logrando detectar zonas con afectación.

Palabras clave: sistema de monitoreo, moko, *ralstonia solanacearum*, cultivo de plátano, cultivo de banano

Abstrac

Plantain and banana crops in Ecuador have been seriously affected by a series of diseases that alter their production. One of these diseases is Moko wilt caused by the *Ralstonia solanacearum* bacterium, which since its first detection has become a phytosanitary problem of great concern among producers. The objective of this study is to design and implement a monitoring system for the early detection of Moko in plantain and banana plantations by obtaining multispectral aerial images using unmanned aerial sensors. In the first stage, the selection of the study area was carried out. In the second phase, the components that will be part of the system architecture were selected. In the third phase, it was carried out the collection and processing of multispectral images of plantain and banana without affection of Moko as well as of plantations with affection. In phase 4, the spectral characterization was achieved by the NDVI index of plantain and banana plantations when they did not present Moko affection. This, being different from the plantain and banana plantations that did present the infection. For this reason, a classification algorithm was developed based on the image segmentation method based on the NDVI vegetation index for the detection of Moko in plantain and banana plantations. Finally, a test of the system was carried out in a plantation, managing to detect affected areas.

Key words: monitoring system, moko, *ralstonia solanacearum*, banana crop, plantain crop

Capítulo I

Generalidades

Planteamiento del problema

La decadencia de producción de musáceas (plátano y banano) observada en el país es consecuencia de agentes bióticos (Sigatoka negra, Nematodos, Moko, entre otros), abióticos (falta de lluvia) y control (falta de riego, disminución de densidad, mal nutrición, déficit de control de plagas, entre otros), pues de la superficie total plantada, solo un pequeño porcentaje reciben riego, fertilización y control de plagas, respectivamente. Es decir que, la mayoría de plantaciones no cuentan con buenos métodos para una correcta producción, todos estos problemas ocasionan este efecto en la producción de musáceas (AGROCALIDAD, 2017) .

En el banano como el plátano los problemas fitosanitarios amenazan de manera regular, algunos son considerados destructivos y tienen consecuencias económicas y consecuencias en la productividad (INIAP, s.f.).

El Moko o Marchitamiento bacterial es una terrible enfermedad que afecta a las musáceas, mismo que es desarrollado por la bacteria denominada *Ralstonia solanacearum* raza 2. Es uno de los problemas fitosanitarios de gran impacto en la producción de banano y plátano en las zonas tropicales y subtropicales del mundo (Álvarez, 2015).

Esta afectación se refleja en severas pérdidas económicas de cultivos en ciertas zonas productoras de Filipinas, Sudamérica, América Central y El Caribe (Sotomayor Herrera y otros, 2014).

La lucha contra las enfermedades de las plantas se basa principalmente en la visualización del estado de la planta, el estricto control del movimiento de material genético, la erradicación de plantas enfermas y el uso de material semilla certificado libre de infección y, en menor medida, la lucha contra los insectos. Los síntomas son la clave para el control de enfermedades, el análisis visual de

enfermedades virales en *Musa SPP* es útil y debe fomentarse. Sin embargo, esto a veces se vuelve problemático y la detección temprana generalmente no es concebible (Pocasangre, 2009).

Antecedentes

El banano y el plátano son los principales productos de exportación del Ecuador (FAO, 2019), lo que le ha permitido situarse en el ranking de mejores países de exportación del mundo, esta industria ayuda a generar un desarrollo potencial dentro de la economía del país, debido a que proporciona fuentes de ingreso y empleo directo (250.000 personas) e indirecto (1.600.000 personas) (Camino, 2016).

Torres, L. (2019) afirma que alrededor de 213.564 hectáreas de banano en el Ecuador se encuentran en zonas costeras, especialmente en los departamentos de Los Ríos, Guayas y El Oro. El banano pierde hasta un 50% en la producción debido a plagas y enfermedades foliares. Uno de los temas fitosanitarios más restrictivos en la producción de plátano y banano en la zona productora. La bacteria tiene un amplio espectro de hospederos, 50 familias de plantas y más de 200 especies (Obregón, 2011).

Florencio, J. (2015) indica que la detección oportuna de una enfermedad en campo activará el Plan de Acción para la vigilancia y medidas fitosanitarias, con el objeto de poner en cuarentena, eliminar y evitar el contagio de esta plaga. Es por ello que a lo largo de la historia se han desarrollado varias técnicas de vigilancia y monitoreo de plagas en la producción de musáceas.

El estudio de la tesis desarrollada por Eduardo Vargas, con el título “Monitoreo asistido plantaciones agrícolas: Técnicas de procesamiento digital de imágenes e inteligencia artificial para diagnosticar y controlar la incidencia de la Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis* var *diformis* Morelet) en plantaciones de banano” se comprobó que no se puede crear un protocolo de adquisición de imágenes que no destine más recursos que el método denominado como tradicional, se debe a la recolección de datos desde el suelo en una plantación, ya sea de banano o de plátano, se requiere como mínimo el doble de mano de obra, si se compara con el método de realizar los muestreos de sigatoka

negra usando un PDA y el software de SiMu (Vargas, 2011).

Especialistas pertenecientes al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Instituto Imayam de Agricultura y Tecnología (IIAT); y la Universidad de Texas A&M, de Estados Unidos, suministraron la aplicación móvil llamada Tumaini, que identifica cinco enfermedades y una pandemia del banano, esto se debe a que son miles basadas totalmente en inteligencia artificial. Se han tomado cerca de 20.000 pix de flores de plátano caracterizadas mediante el marchitamiento de: Xanthomonas, hongo Fusarium, sigatoka negra y amarilla, yema racemosa y las consecuencias del ataque de picudos, donde se confirma que el software es capaz de identificar los signos de estas enfermedades no inusuales en la flora bananera del sector. Finalmente, después de un año, se llevó a cabo el logro del 90%. (Selvaraj, 2019).

Bautista R. (2018) , presenta en su tesis basada en el diseño e implementación de un sistema de visión artificial para el análisis de datos NDVI en imágenes espectrales de cultivos agrícolas de brócoli mediante una aeronave pilotada remotamente, la cual es una técnica de detección de características en el desarrollo de cultivos, la cual se fundamenta en el análisis de la imagen espectral del pigmento (clorofila) de las hojas, finalizó con la determinación de la cantidad, calidad y desarrollo de las plantas de los sectores con vegetación deprimida.

En relación al uso de imágenes espectrales en plantaciones de banano y plátano Lincango A. (2020) menciona en su tesis “Detección temprana de sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en el cultivo de banano (*Musa x paradisiaca*) utilizando sensores multiespectrales” un proceso de adquisición y análisis de imágenes multiespectrales para determinar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Mediante el uso de regresión-correlación y de la metodología Bland-Altman de comparación de métodos logra con dos sensores multiespectrales discriminar alteraciones de la respuesta espectral de las hojas de banano causado por la presencia de la sigatoka negra constituyéndose en una herramienta útil para el monitoreo de la enfermedad en el cultivo.

Justificación e importancia

La industria bananera y las plantaciones de plátano son de particular importancia para la mayoría de los países de América Latina y el Caribe (ALC), como fuente de abastecimiento y por su compromiso con la seguridad alimentaria de la población de esta región. Según CIRAD. (2008) en ALC se producen más de 33 millones de toneladas de plátanos y bananos cada año. Asimismo, es la región que exporta el mayor volumen de productos orgánicos, alcanzando un valor de más de 3.000 millones de dólares estadounidenses al año, siendo Ecuador el mayor exportador del mundo. Además, las empresas bananeras y plataneras generan decenas de miles de empleos coordinados e indirectos durante todo el año en las zonas productivas de las regiones tropicales y subtropicales del continente americano (Pocasangre, 2009).

El marchitamiento vascular causado por Moko *Ralstonia solanacearum* es una de las afecciones más importantes de las plantas cultivadas. Este fitopatógeno, habitante natural del suelo, está presente en todos los territorios del planeta (Elphinstone, 2005).

Recientes evaluaciones de patogenicidad y estudios genéticos han demostrado que esta cepa bacteriana ha sobrevivido con éxito durante más de 25 años en el ambiente, ha evolucionado en varios lugares y ha sido capaz de persistir en plantas nativas, materia orgánica del suelo o medios alternativos (Buddenhagen, 1986).

Este flagelo genera pérdidas de hasta el 100 por ciento de la producción, altos costos de erradicación de rebrotes y retrasos intempestivos durante los cuales las áreas afectadas no pueden ser sembradas de plátano y/o banano. En consecuencia, constituye una grave restricción fitosanitaria en América Latina y el Caribe (Álvarez, 2015).

Las principales estrategias de control de Moko prevén utilizar “material semilla” o plantas sanas, realizar censos, erradicar todas las plantas en un radio de 5 a 10 metros desde el inicio del foco inicial de

infección, implementar medidas de bioseguridad y poner en cuarentena el área afectada por al menos seis meses (Álvarez, 2015).

Los síntomas de la enfermedad son leves y pueden tardar semanas en desarrollarse. Se debe requerir personal capacitado para identificarlos en una etapa temprana. Los malos hábitos aumentan el riesgo de desarrollar Moko porque las plantas parecen sanarse sin precauciones seshoje, recolección, cosecha, etc. (Vásquez, 2008).

El método de control de plagas en la producción agrícola basado en plaguicidas químicos de síntesis como único electivo genera problemas de diversa índole tanto para el medio ambiente como para la salud, por lo que en la actualidad es imperativo transitar por opciones tecnológicas que permitan disminuir el uso de estos insumos (Suquilanda, 2017).

La Agencia de Regulación y Control Fitosanitario y Zoonosanitario ha elaborado el informe PLAN DE ACCIÓN PARA EL CONTROL DE *Ralstonia solanacearum* raza 2 donde se menciona que es responsabilidad de los productores realizar visitas constantes de sus plantaciones para chequear plantas con síntomas sospechosos de la enfermedad, plaga, y en áreas donde no se ha encontrado la plaga, se deben realizar diagnósticos de detección durante todo el año con una frecuencia quincenal, si es posible, intensificándose durante los períodos de fuertes lluvias; dar el estándar de alerta el uso de la plaga aconseja a la Agencia, y el manejo y eliminación de las fuentes de infestación por la plaga se establecen mediante la erradicación de las antenas de la plaga (AGROCALIDAD, Ministerio de agricultura y ganadería, 2015).

El efecto de la bacteria Moko en las fincas bananeras es preocupante, especialmente cuando los productores en muchos casos están obstaculizando la lucha de la Agencia de Regulación y Control Agrícola (CAMA, 2019).

María Auxiliadora Rodríguez, presidenta de la Asociación de Exportadores de Banano, confirma la

presencia de este problema en las zonas de El Carmen, Manabí, en un lugar denominado El Porvenir, además menciona que el Moko es un problema muy preocupante que se fortaleció, dañando sociedades que, según su última compatibilidad, representan aproximadamente 300 hectáreas (CAMA E, 2019).

Luis Góngora Zambrano, presidente de la Asociación Nacional de Productores de Banano del Ecuador argumentó que lamentablemente la afectación por Moko se ha extendido, en parte por el desconocimiento de algunos productores, a pesar de los esfuerzos que la asociación realiza con Agrocalidad para coordinar talleres y educar sobre las formas para prevenir y erradicar Moko (Góngora Zambrano, 2019).

Si no se hace un control exhaustivo seguirá propagándose y sería un problema mayor para el sector bananero, no solo en El Carmen, pues también han aparecido algunos brotes en el territorio de Santo Domingo de los Tsachilas (Góngora Zambrano, 2019).

De enero a septiembre de 2019 se realizaron 6,163 censos a nivel nacional en musáceas con el objetivo de detectar *Ralstonia Solanacearum* raza 2 (Gallo, 2019).

Debido a la importancia del cultivo de musáceas en el país, tanto por superficie cultivada, generación de empleo, ingreso de divisas; así como por la seguridad y soberanía alimentaria, es necesario contar con un sistema elaborado para detectar esta enfermedad de manera temprana, por lo que se ofrece una solución mecatrónica formada por un sensor multiespectral acoplada mediante un dispositivo de sujeción y estabilización a una aeronave no tripulada facilitando la toma de imágenes multiespectrales para la creación de un algoritmo que permita la interpretación de la detección temprana de MOKO en cultivos, evitando pérdidas en los cultivos del Ecuador y previniendo que el suelo quede inutilizable durante varios años.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo para la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*). en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales.

Objetivos específicos

- Identificar las plantaciones de plátano y banano sin afectación relevante de MOKO y plantaciones de plátano y banano con sintomatología de MOKO donde se realizará el proyecto.
- Definir la arquitectura del sistema de monitoreo con los parámetros del área de estudio para la captura de imágenes aéreas multiespectrales.
- Realizar el procesamiento de las imágenes aéreas multiespectrales de los cultivos de banano y plátano que presenten MOKO a través de un software para obtener un ortomosaico con las capas espectrales.
- Desarrollar un algoritmo mediante la correlación entre el estado de la enfermedad y el mapa NDVI del cultivo que permita interpretar de forma visual si una plantación empieza con síntomas de afectación de MOKO.
- Evaluar la efectividad del sistema de monitoreo mediante validación de la hipótesis.

Hipótesis

¿El diseño e implementación de un sistema de monitoreo en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales ayudará o permitirá la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*) en cultivos de plátano y banano?

Variables de la investigación

Variables independientes

Sistema de monitoreo mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales en

cultivos de banano y plátano.

Variables dependientes

Detección temprana de Moko (*Ralstonia solanacearum*) en cultivos de banano y plátano.

Capítulo II

Fundamentación teórica

Agricultura de precisión

El fundamento de la agricultura de precisión es designar la cantidad necesaria y correcta de insumos, en el momento apropiado y en el lugar preciso. Es el uso de los avances en la información para conectar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad presente al interior de un lote. La agricultura de precisión aplica ciertos sistemas como de posicionamiento (GPS) y otros sistemas computacionales con la finalidad de obtener información detallada sobre las plantaciones. Los avances en agricultura de precisión permiten satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: la gestión óptima de grandes superficies (García & Flego, s.f.).

La principal ventaja que otorga el análisis de resultados de los ensayos, es que se lo puede realizar por diferentes sectores dentro de un mismo lote, consiguiendo ajustar el manejo diferencial dentro del objeto de estudio (García & Flego, s.f.).

Asimismo, podrás analizar el tipo y dosis de fertilización, densidad de siembra, fecha de siembra, distancia entre hileras y más. Una reducción en la cantidad de insumos, o ambos (García & Flego, s.f.).

Sistema de monitoreo de cultivos

Una herramienta utilizada en la automatización de procesos industriales es el procesamiento de imágenes, ya que presenta confiabilidad, eficiencia y velocidad de procesamiento, razón por la cual, la industria agrícola ha comenzado a utilizar este tipo de tecnología para monitorear puntos de vista relevantes de las plantaciones (Flórez y otros, 2015).

Las capacidades de un sistema estándar de visión por computadora van más allá de la capacidad humana limitada, ya que permiten la evaluación de procesos a largo plazo de manera objetiva en el último momento para estimar una o más características de interés de los productos en un segundo

dato, relacionarlos con la calidad apreciada por el consumidor. Este procesamiento de imágenes permite la observación de plagas y morfología vegetal, por lo que se ha convertido en un nuevo método de detección de plagas como electivo de manejo, reconocimiento y control. La industria agrícola ha comenzado a utilizar este tipo de tecnología para monitorear cultivos de diferentes especies (Noda y otros, 2006).

Musaceae

Familia de plantas monocotiledóneas que incluye unas 40 especies divididas en 3 tipos principales (*Musa*, *Musella* y *Ensete*), es de gran importancia económica, son muy valoradas como productos y alimentos orgánicos (Cabañas, 2005).

Género *musa*

Especie típica de la familia *Musaceae* con taxonomía confusa, donde se encuentra híbridos, producto del cruce entre las guardianas *M. acuminata* y *M. balbisiana*, y de la generación de intercambios, bajo el nombre común de banano. Debido a la existencia de una variedad de las especies que la componen, fue necesario crear segmentos que agruparan aquellas que presentaban muchas similitudes (Martínez y otros, 2012).

Plátano (*Musa balbisiana*)

En apariencia corporal, el plátano macho es mucho más grande que el plátano común o banano como se muestra en la Figura 1. Su color inicial es verde, pero a medida que madura se torna amarillo con varias manchas o rayas negras y café, su piel o piel es mucho más gruesa que el plátano común, el plátano macho no es digerible, el contenido nutricional del plátano macho es una excelente fuente de almidón y fibras, no contiene grasas ni proteínas (¿Cuál es la diferencia entre Plátano y Banano?, 2016).

Figura 1

Aspecto físico del plátano



Nota. Tomado de (¿Cuál es la diferencia entre Plátano y Banano?, 2016).

Banano (*Musa paradisiaca*)

Como se muestra en la Figura 2, el banano es verde antes de madurar, una vez maduro se vuelve amarillo. Generalmente mide en promedio entre 15 y 20 centímetros, su sabor cuando el producto natural ha madurado es dulce. Suele ser astringente, a veces seca e incluso textura gomosa, proporciona una importante fuente de potasio, magnesio y hierro (¿Cuál es la diferencia entre Plátano y Banano?, 2016).

Figura 2

*Banano (*Musa paradisiaca*)*



Nota. Tomado de (Naturalista, s.f.)

Moko

El Moko causado por la bacteria *R. solanacearum* raza 2, considerada como bacteria Gram-negativa que afecta al plátano y al banano, en forma de baston, con rangos de 0.5 a 0.7 μm . x 1.5 a 2.5 μm , posee de uno a cuatro flagelos que permiten su movimiento, varían según el tipo de colonia y edad del cultivo (Agrios, 1997).

Sintomatología

En cuanto a los síntomas, MOKO provoca marchitez, comenzando por el amarillamiento y colapso de las hojas más jóvenes, y la necrosis de las hojas cigarro. Como se muestra en la Figura 3, estos síntomas se desarrollaron hacia las hojas más viejas con necrosis del tejido vascular interno, especialmente en la región central del pseudotallo. Visualmente se puede apreciar que las frutas inmaduras de las plantas infectadas exhiben una coloración amarilla y descomposición seca de la pulpa, produciendo orificios en la fruta (AUGURA, 2009).

Figura 3

Moko causado por la bacteria R. solanacearum



Nota. Tomado de (AUGURA, 2009)

La presentación de infecciones tempranas (antes de la floración) produce un desarrollo anormal del racimo o no totalmente en algunas plantas. Al ser una enfermedad sistémica, es decir, que se transloca en la planta por los haces vasculares, la sintomatología puede surgir en cualquier estado fenológico del cultivo. Según se observa en la Figura 4, las plántulas recién plantadas son generalmente

amarillas y de color amarillo claro en la última etapa. Cuando se corta el pseudotallo, aparecen unas manchas rojizas o líneas marrones, que corresponden a los haces vasculares del tejido degradado por las bacterias patógenas. (Silva *et al.*, 2000)

Figura 4

Síntomas de Moko internos en plantas jóvenes



Nota. Tomado de (AUGURA, 2009)

Métodos de dispersión de la enfermedad

Como menciona AUGURA (2009), los principios y comunes métodos de parar la enfermedad se relacionan con actividades y salidas a campo, como:

- El marcaje de las plantas dentro de las áreas afectadas, favoreciendo la propagación por medio de artefactos de trabajo o herramientas utilizadas los sembríos, esta es una recomendación que por lo general funciona satisfactoriamente.
- El movimiento de material de propagación vegetal infectado, así como la incorporación de material verde enfermo en lotes no contaminados, causados por la circulación de animales dentro de los focos contaminados, generan el transporte de patógenos hacia los lotes sanos.
- EL monitoreo atrasado conduce a la permanencia de microorganismos en el cultivo y las labores de limpieza de plantas tardío, dan lugar a la presencia de insectos que inoculan la enfermedad siendo agentes activos de propagación.

- El agua que fluye hacia los drenajes los cuales arrastran el material infectado hacia el predio.

Control de la enfermedad

Como dice AURORA (2009), la eliminación de la enfermedad es de forma mortífera y no curativa, no obstante, existen medidas de prevención que pueden limitar su dispersión en las plantaciones, éstas son:

- Uso de herramientas de la finca que se consideran exclusivas para la misma.
- Tener la zona restringida a animales y personas que no cuenten con las medidas de seguridad.
- Invertir en la educación referente al reconocimiento de factores que permitan el entendimiento de las enfermedades.

Importancia y consecuencia económica de la plaga

El MOKO del plátano es considerado uno de los problemas fitosanitarios más significativos que afectan a las musáceas en regiones tropicales y subtropicales del planeta; esta condición constituye un sumo inconveniente para aquellos países o zonas en los que está presente esta enfermedad, debido a que perjudica a todos los estados de desarrollo de la planta, se disemina fácilmente y es un factor desencadenante en la restricción comercial de la producción (Belalcázar et al., 2004).

Distribución geográfica en el Ecuador

En la historia del Ecuador, la afectación de MOKO se reportó por primera vez en la región amazónica, en 1978, que en su momento afectó variedades de plátano Barraganete y Dominico. Hasta el momento ha sido reportada en tres zonas del Ecuador Sucumbíos y Manabí y Esmeraldas (AGROCALIDAD, Ministerio de agricultura y ganadería, 2015). Esta bacteria se deduce se propaga desde Colombia donde se detectó hace varios años (Castañeda et al., 2005).

Vehículos aéreos no tripulados (UAV's)

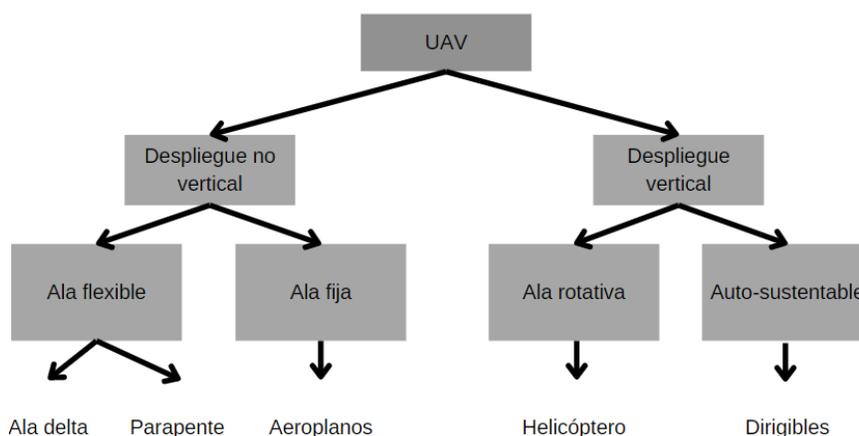
Un vehículo aéreo no tripulado (UAV), por sus siglas en inglés de Unmanned Aerial Vehicle, o Unmanned Aerial System UAS, conocido popularmente como drone. Son artefactos con tecnología de punta y accesorios como GPS, sensores infrarrojos, cámaras de alta resolución y controles de radar. Los drones pueden enviar información detallada a los satélites, que luego la transmiten al control terrestre en milisegundos (Elika, 2013).

Clasificación de los UAV's

Según Barrientos de la Universidad Politécnica de Madrid, la forma más fácil de categorizar los UAV's es por tipo de aeronave, como se muestra en la Figura 5. Aquí, los que despegan verticalmente y los que no despegan, con alas adaptables, autosustentados y ala fija (Barrientos et al., 2009).

Figura 5

Tipo de aeronaves utilizadas en los UAV's



UAV'S en la agricultura de precisión

El uso de UAV's para agricultura ha crecido a un ritmo vertiginoso para la gestión de cultivos al habilitar sistemas de alerta temprana (Sylvester, 2018). La aplicación en plantaciones de banano consiste en montar drones e imágenes multispectrales que permiten operaciones algebraicas entre

bandas espectrales para obtener índices de vegetación (Guzmán, 2018) .

Los drones llevan sensores que captan la luz reflejada de las plantas útiles en horticultura por su precisión espacial y disponibilidad temporal de recolección de datos que brindan información sobre cambios perceptibles en el cultivo y, junto con la información meteorológica, permiten la detección temprana de enfermedades causadas en particular por hongos o bacterias (Montesinos, 2015).

Los UAV's acoplados correctamente a sensores multiespectrales captan el espectro de luz que reflejan las plantas lo cual es útil en la agricultura por su precisión espacial y disponibilidad temporal de recolección de datos, brindando información sobre cambios perceptibles en los cultivos, e información sobre el clima permitiendo la detección temprana de enfermedades, especialmente los causados por hongos (Montesinos, 2015).

Bandas espectrales

Espectro visible

Lleva este nombre porque es el único rango de radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano como se muestra en la Figura 6, coincidiendo con las longitudes de onda donde la radiación solar es mayor. Dentro de esta región, generalmente se distinguen tres bandas elementales, que se denominan azul, verde y rojo, es el único segmento de la apariencia que se puede asociar con el pensamiento del color (Gonzaga, 2014).

Infrarrojo

Esta parte se puede subdividir en dos categorías según las propiedades de la radiación: IR reflejada e IR térmica o emitida. El IR se usa en la detección remota de la misma manera que el IR perceptible, y el IR térmico es diferente del IR aparente y reflejado (Gonzaga, 2014).

Infrarrojo cercano

También se denomina infrarrojo próximo, ya que parte de él puede interpretarse a partir de

frangas especiales (Gonzaga, 2014).

Infrarrojo lejano o térmico

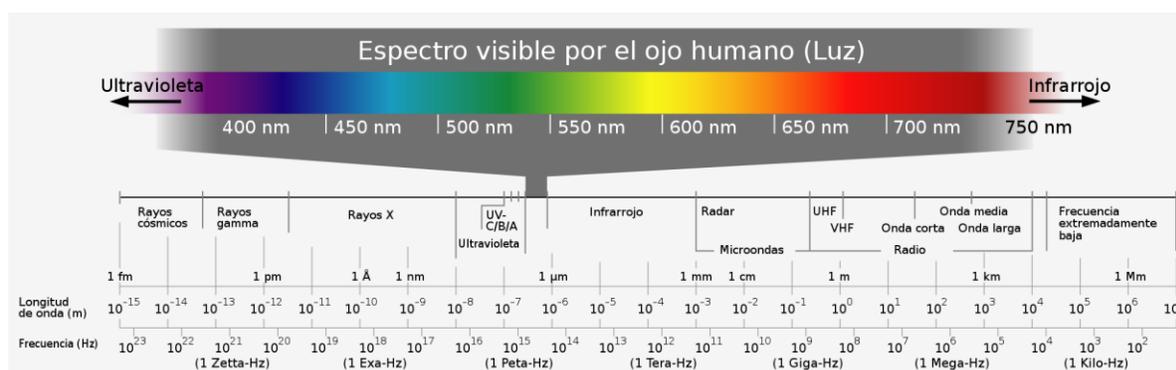
Incluye el sesgo emitido del espectro terrestre, donde se detecta el calor de la mayoría de las cubiertas terrestre (Gonzaga, 2014).

Microondas

Esta energía es una clase de energía transparente a la cubierta nubosa (Gonzaga, 2014).

Figura 6

Espectro visible por el ojo humano



Nota. Tomado de (Thomas & Paris, 2005)

Los índices de vegetación afectan la apariencia electromagnética en la parte perceptible del rojo (RED, 600-700 nm) y un punto fuerte de reflectancia en la parte del infrarrojo cercano (NIR, 750 - 1350 nm). Debido a la parte fotosintética de las plantas, estas bandas son las más utilizadas para obtener índices de vegetación (Wiegand et al., 1991).

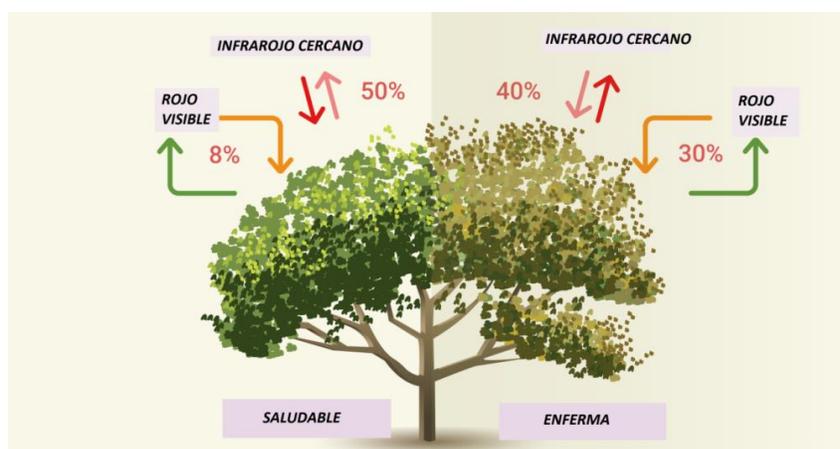
El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia estándar normalizado (NDVI) es un indicador directo de la biomasa fotosintéticamente dinámica o, en términos simples, una evaluación de la salud de la vegetación, como se muestra en la Figura 7 (EOS, 2020).

El tono de clorofila de una planta saludable absorbe la luz roja más perceptible, mientras que la estructura celular de una planta refleja la mayoría de la luz infrarroja cercana. Esto implica que el aumento de actividad fotoquímica, que normalmente se asocia con una vegetación considerada como densa, da como resultado menos reflexión en la banda roja y más reflexión en la banda infrarroja cercana. Al examinar cómo se comparan con estos valores juntos, es posible detectar y analizar con precisión la cobertura del suelo utilizando distinto de otros tipos de cobertura de suelo natural (EOS, 2020).

Figura 7

Espectros reflejados y absorbidos por un árbol

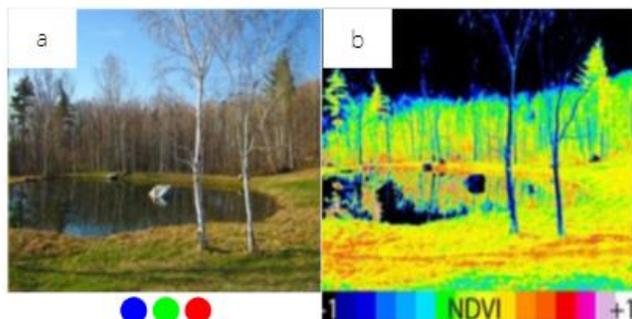


Nota. Tomado de (EOS, 2020)

Las tres bandas de inicio, verde (520-530nm), azul (400-500nm) y roja (630-700nm) muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas. Mientras el infrarrojo cercano (720-2500 nm) es reflejada casi en su total en comparación con las otras bandas observadas en la Figura 8 (Escribano et al., 2015).

Figura 8

Imagen RGB vs NDVI



Nota. La imagen "a" imagen RGB, la imagen "b" aplicación del índice NDVI. Tomado de (NASA, 2000).

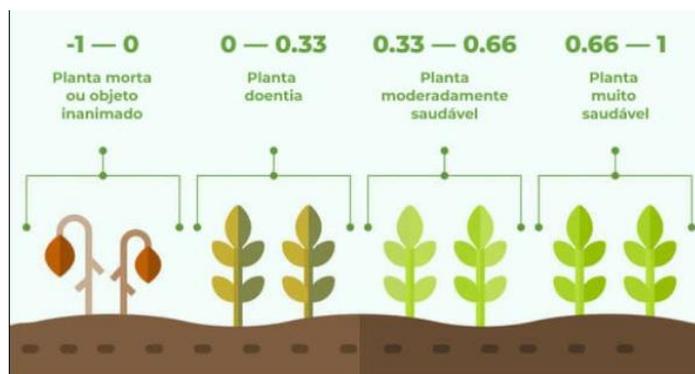
El NDVI es definido como:

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

Donde NIR representa el infrarrojo cercano y rojo la respuesta espectral en la banda roja. Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más colores que les permiten absorber radiación perceptible como se muestra en la Figura 9 (Salazar & Poveda, 20).

Figura 9

Valores NDVI de una planta



Nota. Tomado de (EOS, 2020)

La principal ventaja del NDVI es su facilidad de interpretación, ya que los valores varían entre -1

a 1, permitiendo conocer el estado de vigor de las plantas de grandes superficies, al detectar fenómenos con un enorme rango de variedad (Chuvienco et al., 2010).

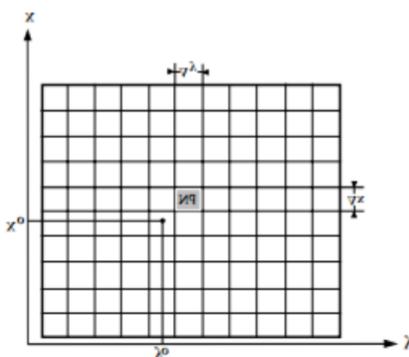
Las cualidades negativas, entre - 1 y 0, se comparan con cursos de agua, roca descubierta y, por regla general, con una región sin ningún rastro de vegetación. Valores entre 0,1 a 0,4 en comparación con pasto o cubiertas comparativas. Las estimaciones cercanas a 1 se comparan con regiones exuberantes (García J. , 2015) .

Imagen digital

El concepto más acertado de imagen digital según Pérez es “Una imagen digital es una función $F(x, y)$, donde “ x ” e “ y ” representan coordenadas y el valor $F(x, y)$, es proporcional a la transmisión o a la reflectividad de la luz, que se reconoce visualmente por su color o su nivel de gris en el punto considerado (x, y) ” como se muestra en la Figura 10 (Pérez, 2001). Es este concepto que permite entender una imagen digital como un arreglo de filas y columnas en el cual cada una de estas celdas se encuentra un pixel, la unidad básica de una imagen digital, la misma que representa una superficie en función de su tamaño y su respectivo número digital como lo muestra la Figura 10 (Pérez, 2001).

Figura 10

Definición de una imagen digital



Nota. Tomado de (Pérez, 2001).

Cámaras digitales y plataformas

En el mercado actual de drones, hay una cantidad asombrosa de plataformas y cámaras digitales, plataformas que van desde multirrotores hasta aviones de ala fija y tipos de helicópteros. Mientras que las cámaras son las visibles que captan el rango perceptible de aparición electromagnética, las que captan el rango infrarrojo cercano, térmicas, LiDAR, entre otras. Dependiendo del rango de inicio que capturen las cámaras, ese es el alcance que puede tener en algunas aplicaciones agrícolas. (Aguirre, 2019).

Cámaras visibles

Son cámaras que no han sido caracterizadas espectral ni radiométricamente, montadas en las plataformas son utilizadas para monitorear factores relacionados con el desarrollo de los cultivos (Aguirre, 2019).

Cámaras multiespectrales

Estas cámaras además de detectar la apariencia perceptible son capaces de detectar el infrarrojo cercano, generalmente son sensores que tienen entre tres y cinco bandas: son sin duda las cámaras más utilizadas en agricultura de precisión (Aguirre, 2019).

Cámaras hiperespectrales

Estas cámaras brindan más de 20 bandas, actualmente no son muy utilizadas en la agricultura debido a que generalmente son más costosas que las cámaras multiespectrales, además de que en la mayoría de los casos brindan resoluciones sobredimensionadas (Aguirre, 2019).

Sensores LiDAR

Los sensores LiDAR permiten la creación de modelos 3D de la superficie, hasta ahora la información derivada de los sensores LiDAR se usa para monitorear el crecimiento de árboles, personas, bosques y cultivos agrícolas (Aguirre, 2019).

Procesamiento de imágenes digitales

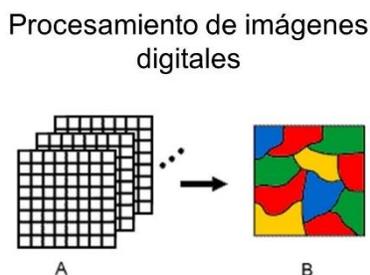
Se denomina procesamiento al conjunto de procedimientos y procesos para descubrir o resaltar la información incluida en una imagen utilizando una computadora como herramienta principal, como se muestra en la Figura 11 (Aguirre, 2019).

En cuanto a la captura de imágenes, hay dos causas principales de pérdida de información al realizar este procedimiento: el rango limitado de valores de intensidad de luz que se pueden medir en cada píxel de la imagen y la naturaleza discreta de los píxeles de la imagen (Aguirre, 2019).

El objetivo principal de las imágenes capturadas es proporcionar información extraída de los datos registrados en la imagen, por números relacionados con el comportamiento de la muestra y por la intensidad con la que reflejan o emiten radiación electromagnética en bandas de longitud de onda específicas (Aguirre, 2019).

Figura 11

Procesamiento de imágenes digitales



Nota. En la imagen “A” se muestra una representación de imágenes de forma matricial, en la imagen “B” se muestra como al procesar la imagen “A” se puede dar una interpretación visual de sus datos. Tomado de (Aguirre, 2019)

Fotogrametría

En los cincuenta años que ha llevado la fotogrametría hasta nuestros días, ha conseguido convertirse en una herramienta muy útil para medir cualquier variable de un objeto a través de

fotografías. La enorme gama de usos de la fotogrametría en cuestiones espaciales la posiciona como una metodología de medición semi-esencial (Pacheco & Pozzobon, 2011).

Existe una clasificación para la fotogrametría por el tipo de captura y procesamiento:

Fotogrametría Analógica

Su principal instrumento son restituidores mecánicos y ópticos. Basado en el proceso de alineación de imágenes y marcas flotantes para crear un modelo estereoscópico, se pueden crear mapas escalados y nivelados (Otero *et al.*, 2008).

Fotogrametría Analítica

Con la combinación de renders analógicos y por computadora, se crea renderizado analítico, optimizando tiempo y recursos. Permite obtener información en programas tipo CAD (Otero *et al.*, 2008).

Fotogrametría Digital

Se trata de un procedimiento esencialmente estructurado con imágenes digitales y tratado con marcos de referencia de estaciones fotogramétricas digitales, a escalas de obtención cartográfica. (Otero *et al.*, 2008).

Ortomosaico

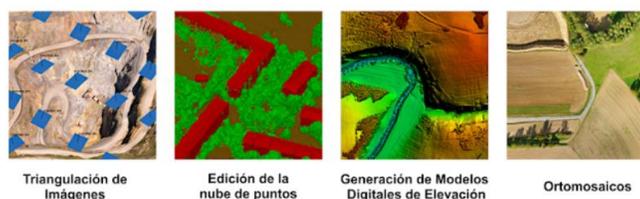
Un ortomosaico es imagen fotogramétricamente corregida a partir de una colección de imágenes, donde se ha corregido la distorsión geométrica y se ha equilibrado el color de las imágenes para producir una colección continua de datos de mosaico, como se muestra en la Figura 12 (ArcGIS, s.f.).

Figura 12*Ortomosaico**Nota.* Tomado de (ArcGIS, s.f.)**Software para procesamiento de ortomosaicos**

Es un sistema de modelado 3D avanzado, el cual se basa en el uso de imágenes fijas, también suele trabajar con imágenes arbitrarias y es controlable en los procesos que tienen como finalidad crear el modelo de superficie digital y el Ortomosaico (Agisoft, 2016).

El procesamiento de imágenes y la reproducción de modelos 3D constan de cuatro pasos principales (Agisoft, 2016).

Alineación de las imágenes, para la construcción de nube densa, luego se realiza un mallado, después de que la representación se puede texturizar y luego crear el modelo digital de elevación y el Ortomosaico (Agisoft, 2016) según se observa en la Figura 13.

Figura 13*Procesamiento de imágenes para crear un ortomosaico**Nota.* Tomado de (Agisoft, 2016)

Capítulo III

Diseño e implementación de componentes del sistema

Metodología

El presente trabajo tiene como objetivo la implementación de un sistema de monitoreo capas de adquirir imágenes en el espectro no visible como el infrarrojo cercano, de cultivos de plátano y banano, mediante un sensor remoto instalado desde un vehículo aéreo, y mediante procesamiento de imágenes y líneas algorítmicas aplicando técnicas de filtrado digital poder diferenciar entre un cultivo de banano o plátano sin afectación de MOKO, de un cultivo con afectación de MOKO, tras lo cual, al realizar monitoreo sobre áreas con sospecha de afectación poder detectar de forma temprana zonas del cultivo que presenten características espectrales de afectación.

En este proyecto se habla de detección temprana en la plantación cuando se ha detectado zonas donde se identifique al menos una planta con síntomas de la enfermedad, antes que este foco de infección por mecanismos de dispersión transmita a las demás plantas de su alrededor.

La importancia de realizar este trabajo con un vehículo aéreo es obtener información según la altura de vuelo que se realice, debido a que con inspecciones visuales solo se puede distinguir pequeñas áreas de cultivo dando como resultado déficit referente a la optimización de recursos, además del uso de un sensor multiespectral permite la visualización de cambios físicos en la vegetación que el ojo humano no puede detectar. Otra cualidad importante del monitoreo aéreo es el no contacto con el suelo ni con la planta lo que reduce el riesgo de actuar como agentes contaminantes de la enfermedad, dado que en varios informes de INIAP, (2020) la bacteria se puede alojar en botas o llantas cuando se haya estado en contacto con áreas que se presume está afectado por MOKO.

Para alcanzar con el objetivo del presente trabajo de investigación, referente diseño e implementación de un sistema de monitoreo para la detección temprana de MOKO en cultivos de

banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales, el proceso de selección de concepto se lo hizo como determinase Karl T. Ulrich en el diseño de un dispositivo de sujeción y estabilización para el sensor, dado que se requiere que la adquisición de las imágenes multiespectrales de cultivos de plátano y banano deben a una altura específica, que con una planificación de vuelo cubra el área cultivada en un tiempo significativamente corto, para lo cual se ha determinado la utilidad de un dron. Para la adquisición de imágenes espectrales, y posteriormente el cálculo del NDVI, es necesario tener una banda visible y una en el espectro infrarrojo, las cuales que pueden ser adquiridas por medio de un sensor espectral, la imagen adquirida tiene que ser procesada en un ortomosaico para obtener el NDVI, por lo que se seleccionó el programación del cual se tenga conocimientos previos y nos permitan el tratamiento de la información, por lo tanto en la Figura 14, se muestran los elementos que intervienen en la implementación del proyecto en forma de un esquema.

Figura 14

Sistema de monitoreo



La metodología del proyecto consta de cuatro fases que engloban los pasos a seguir para alcanzar los objetivos de este trabajo. Según se observa en la Figura 15 se puede apreciar el diagrama secuencial de la metodología detallada del proyecto.

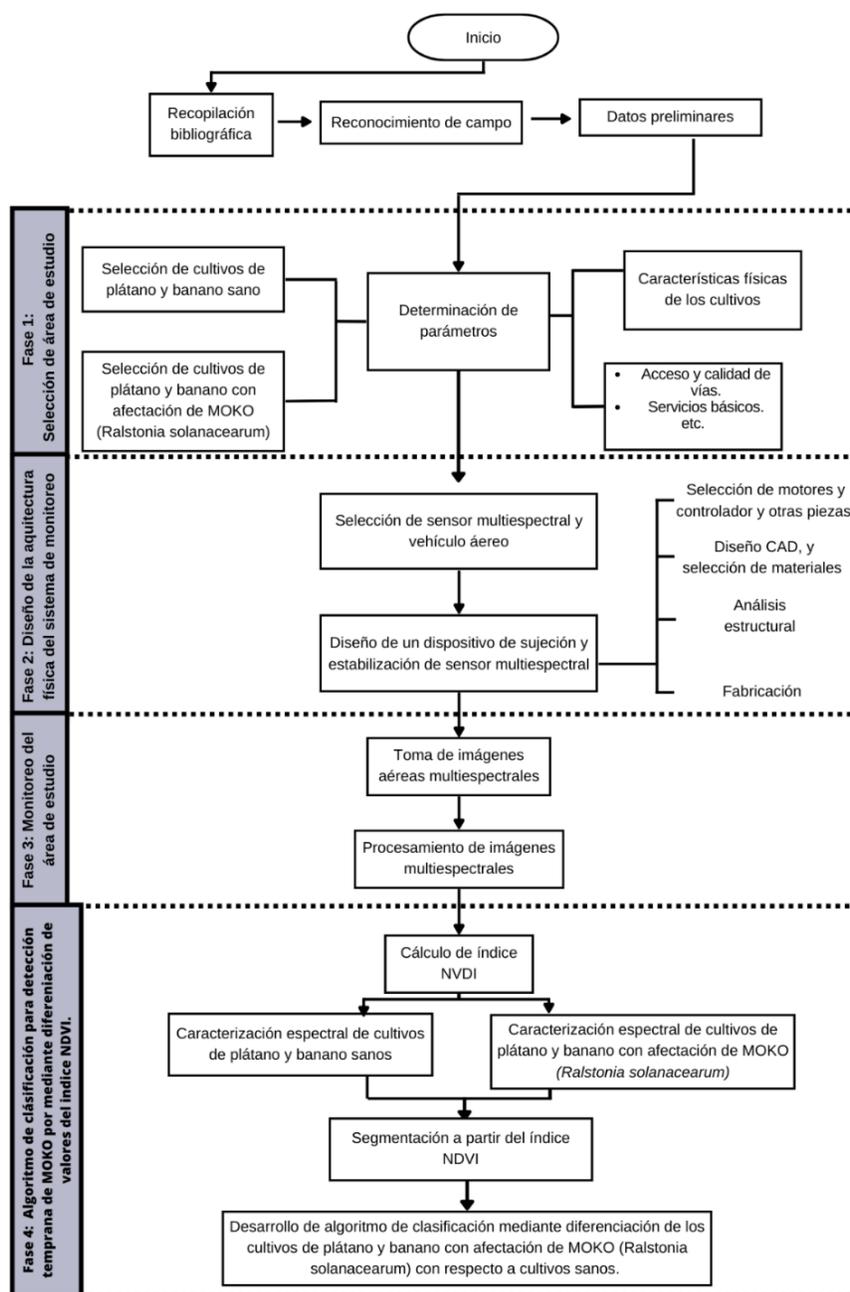
Fase 1

Se seleccionará el área de estudio, para los requerimientos del proyecto debe ser: cultivos de plátano y banano sano o sin afectación relevante de MOKO, cultivos de plátano y banano con afectación

relevante de MOKO. La información respectiva del área de estudio y sus características de extensión, topografía del terreno, acceso por vías, servicios básicos, etc. servirán para definir parámetros para la siguiente fase.

Figura 15

Diagrama secuencial de la metodología general del proyecto



Descripción del área de estudio

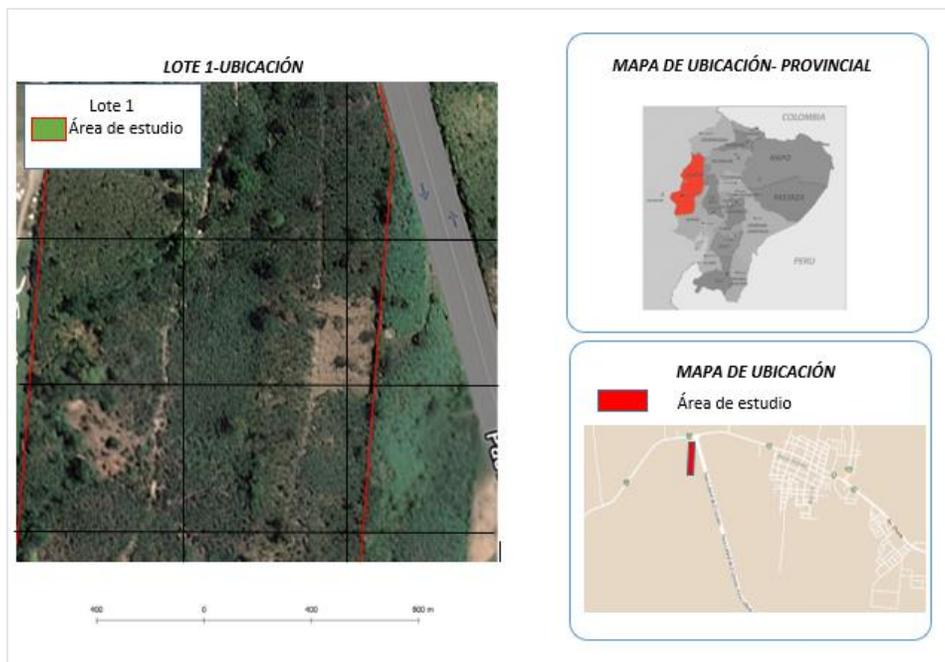
Para el Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas, el cultivo de plátano y banano (*Musa AAB*) es un apoyo importante para la seguridad socioeconómica y alimentaria del país. Desde el punto de vista socioeconómico, además de proporcionar alimentos de alto valor energético a la mayoría de los habitantes rurales de forma continua, también ha creado una fuente de empleo estable y temporal.

La mayor área de producción de esta musácea se conoce como el Triángulo de plátano, que comprende las provincias de Manabí, Santo Domingo y el Rios con 52612, 14249 y 13376 ha, respectivamente. Las principales variedades que se cultivan en estas zonas son el “Dominico”, que se destina principalmente al autoconsumo, y el “Barraganete”, que se destina principalmente a la exportación, con una exportación anual estimada de 90000 TM de este cultivar.. (Cedeño, 2022) .

El área de estudio para el proyecto fue seleccionada en base a la información que posee la entidad gubernamental Agrocalidad sede El Carmen, la cual tiene registros actualizados de la enfermedad en el sector, gracias a su ayuda se logró el acceso a dos cultivos ubicados en el cantón el Carmen provincia de Manabí:

Selección de cultivos sanos

Los cultivos de plátano y banano sano o sin afectación relevante de MOKO (*Ralstonia solanacearum*) comprende lotes ubicados en el paso lateral de El Carmen a un 1 km de llegar a la carretera E38 vía al chone, posee 20 hectáreas de plantaciones sin afectación según se observa en la Figura 16.

Figura 16*Plantación de cultivo sano*

Nota. La plantación se puede localizar en las siguientes coordenadas 0°14'56.2"S 79°30'03.5"W.

Al encontrarse en un sector rural del cantón posee limitaciones que hay que tomar en cuenta para la realización del proyecto, las características se elistan en la Tabla 1.

Tabla 1

Parámetros de cultivos de plátano y banano sano o sin afectación relevante de MOKO

Características	Detalle
Longitud de área	20 ha
Topografía del terreno	Ondulado
Servicios Básicos	No dispone
Calidad de vías	Pavimentado

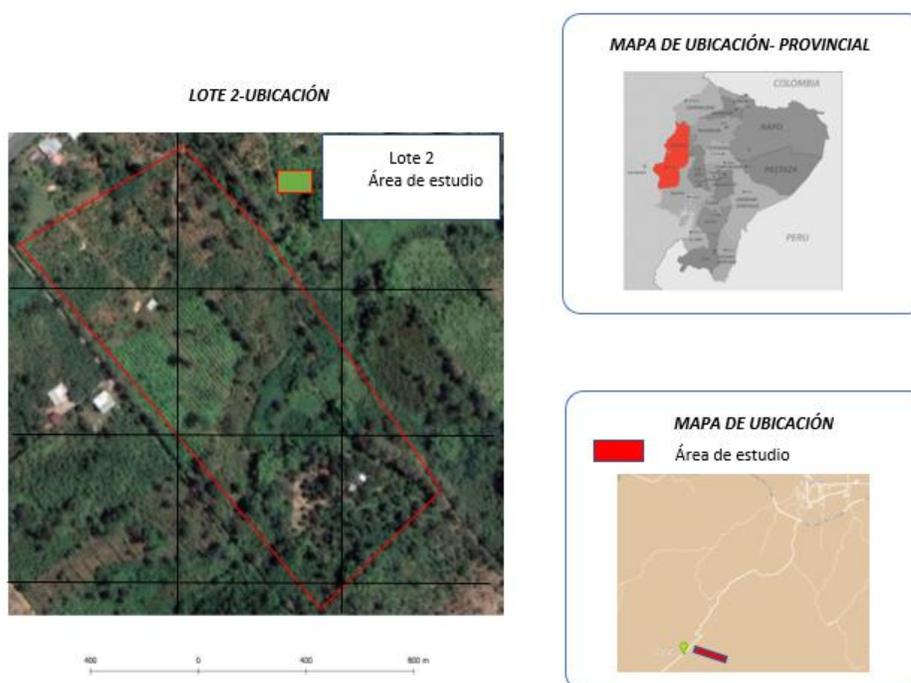
Selección de cultivos enfermos

Los cultivos de plátano y banano con afectación relevante de MOKO (*Ralstonia solanacearum*),

fue ubicado en coordinación con personal de Agrocalidad que en referencia a su base de datos en donde poseen territorios georreferenciado con la infección, se vislumbra lotes ubicados en el sector del porvenir ubicado a 11 km del centro de El Carmen según se observa en la Figura 17.

Figura 17

Descripción del área de estudio plantaciones con afectación relevante de MOKO



Nota. La plantación se puede localizar en las siguientes coordenadas $0^{\circ}20'44.9''S$ $79^{\circ}31'06.1''W$

Esta plantación a diferencia de la otra cuenta con características que facilitan el desarrollo de las actividades para la realización del proyecto, las características se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros del cultivo sano

Características	Detalle
Longitud de área	5 ha
Topografía del terreno	Llano

Características	Detalle
Servicios Básicos	Si dispone (Electricidad, agua, internet)
Calidad de vías	Pavimentado

Fase 2

En esta fase se definirá los equipos de la arquitectura del sistema de monitoreo, como la elección del vehículo aéreo y el sensor multiespectral. Además, se diseñará un dispositivo de sujeción y estabilización que brinde soporte y mejore la calidad de imágenes multiespectrales aéreas con sensor multiespectral y el vehículo aéreo.

Vehículo aéreo y el sensor multiespectral

Para vehículo aéreo y el sensor multiespectral se tiene la colaboración de la empresa ÁLTITUM, empresa dedicada a dar servicios referentes al desarrollo de proyectos de Geomática y las nuevas Tecnologías de Información Geoespacial, gracias a ellos se presenta los equipos que serán utilizados en el proyecto:

Sensor multiespectral Micasense Altum

Captura imágenes multiespectrales, es un sensor que posee seis lentes como se observa en la Figura 18, que captura seis bandas espectrales: rojo, verde, azul, borde rojo, infrarrojo cercano y térmico. La captura se realiza al instante, facilitando la alineación y usarlos para análisis. Es ideal para el proyecto porque se puede obtener desde NDVI hasta modelos de superficie digitales (Micasense, 2020).

Figura 18*Sensor multiespectral*

Nota. Tomado de (Micasense, 2020).

A continuación, se representa en la Tabla 3, las características principales del Sensor multiespectral.

Tabla 3

Características principales de sensor multiespectral Micasense Altum

Características	Descripción
Sensor	12.4 MP sensor pancromático Cinco bandas espectrales de 3.2 MP
Resolución	Multiespectral (pan-sharpened): 1.24cm/pixel a 60m; 2.49cm/pixel a 120m Resolución termal: 320 x 256 GSD: 16.75cm/pixel a 60m; 33.5cm/pixel a 120m
Velocidad capturas	2 capturas por segundo
IP rating	IP4X
Peso	aproximadamente 460g
Almacenamiento	Tarjeta Cfexpress

Mapeo de Salud de Cultivos. Mediante las distintas bandas, se pueden obtener índices para detectar los primeros signos de estrés del cultivo y compararlos a lo largo del tiempo. Las imágenes

térmicas también brindan información valiosa sobre la salud de las plantas, ya que las plantas enfermas reducen la transpiración, lo que se refleja en ligeros cambios de temperatura (Micansense, 2020).

Identificación de enfermedades mediante post procesamiento. Al recopilar imágenes térmicas y multiespectrales, se puede detectar las enfermedades antes de que aparezcan los síntomas, porque los primeros signos de la enfermedad son evidentes con el post procesamiento adecuado y cálculos de índices de vegetación (Micansense, 2020).

Dron DJI MATRICE 300 RTK

El DJI Matrice 300 RTK es miembro de la línea de drones comerciales de DJI. Como se muestra en la Figura 19, es un dron profesional con características industriales avanzadas que lo hacen útil en agricultura, construcción, inspecciones, seguridad y mapeo (HOBBYTUXTLA, 2021).

El Matrice 300 RTK es ideal para quienes buscan un dron profesional para misiones demandando o deseando expandir sus servicios con drones en diversas industrias con resultados positivos.

El Matrice 300 RTK es perfecto para aquellos que quieren un dron profesional para misiones exigentes o que quieran expandir sus servicios de drones en diversas industrias con resultados positivos (HOBBYTUXTLA,2021).

El diseño del sistema de propulsión y de la Aero estructura proporciona un vuelo más eficiente y estable incluso en condiciones difíciles, 50 min Tiempo máx. de vuelo 7 m/s Velocidad máx. de descenso 5 7000m Altitud máx. de vuelo 6 12 m/s Resistencia máx. al viento 23 m/s Velocidad máxima. Varias configuraciones de carga. Monta hasta tres cargas simultáneamente, con una capacidad de carga máxima de 2.7 kg (HOBBYTUXTLA,2021).

Figura 19*Dron DJI MATRICE 300 RTK*

Nota. Tomado de (HOBBYTUXTLA,2021).

A continuación, se representa en la Tabla 4, las características principales del Dron DJI MATRICE 300RKT:

Tabla 4*Características y descripción del Dron DJI Matrice 300 RKT*

Características	Descripción
Carga útil Máxima	930 gr solo en el amortiguador del gimbal simple o 2700gr en todo el dron
Peso (Batt y Hel)	9000gr
Máxima velocidad	Modo S: 82,2 kph Modo P: 61,2 kph
Ángulo de inclinación máximo	30°
Altura máxima de servicio sobre el nivel del mar	7000
Tiempo máximo de vuelo	55min
Tipo de Batería	LiPo 12S
Energía	274 Wh

Segunda opción de vehículo aéreo

Los equipos presentados contribuyen significativamente a la resolución del proyecto, sin embargo, estos tienen un alto costo en el mercado, para estudios similares se presenta una segunda opción de equipos que pueden ser utilizados. Esta selección se realizó bajo evaluación de conceptos. Según Ulrich & Eppinger (2013) la evaluación de conceptos es utilizada cuando una mayor resolución debe tener una mejor diferencia entre los conceptos que se están analizando. Esta etapa es un análisis cuantitativo en donde se pondera en una escala de 1 a 5 la importancia de los criterios de selección y se determina el concepto a utilizar según el resultado obtenido por la suma de las calificaciones.

En la Tabla 5, se especifica el proceso de selección y calificación establecidas por conceptos A, B, C. En este caso los conceptos se seleccionan como concepto A dron DJI Phantom 4 Pro V2, como concepto B dron DJI Inspire 2, como concepto B dron DJI M600 Pro. Se tomó como referencia el concepto A para crear la matriz de evaluación de conceptos.

Tabla 5

Selección de concepto de vehículo aéreo como referencia concepto B

Desempeño relativo	Calificación
Mucho peor que la referencia	1
Peor que la referencia	2
Referencia	3
Mejor que la referencia	4
Mucho mejor que la referencia	5

Basándonos en los requerimientos en cuanto a la selección del vehículo aéreo, se pudo crear la matriz de evaluación de conceptos detallada en la Tabla 6, dando como resultado que el Inspire 2 sería la segunda opción. En conjunto es un dron ideal para realizar vuelos con carga en un tiempo razonable de trabajo, su tamaño lo hace ideal para ser transportado de un lugar a otro; aumenta las posibilidades

de su uso a distintos campos al no incorporar una cámara fija. Por todos los puntos a favor que ofrece su relación beneficio/precio es muy buena para este proyecto.

Tabla 6

Evaluación de conceptos para selección de vehículo aéreo

Criterios de selección	Peso %	Concepto					
		A (Phanton 4 Pro V2)Referencia		B (Inspire 2)		C (Matrice 600 Pro)	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Tiempo de Vuelo	15	3	0,45	3	0,45	4	0,6
Portabilidad	15	3	0,45	3	0,45	1	0,15
Peso	5	3	0,15	2	0,1	1	0,05
Costo	15	3	0,45	2	0,3	1	0,15
Velocidad Max	5	3	0,15	5	0,25	4	0,2
Capacidad de cambio o retiro de camara	10	3	0,3	5	0,5	5	0,5
Compatibilidad Apps	5	3	0,15	2	0,1	1	0,05
Carga Util	30	3	0,9	4	1,2	5	1,5
Evaluación total	100		3		3,35		3,2
Calificación			3		1		2

Diseño de estabilizador del sensor

Para el diseño del estabilizador se seguirá el proceso de Ulrich & Eppinger (2013), con el cual se puede dividir por fases el desarrollo como: el diseño conceptual, diseño de detalle y manufactura según se observa en la Figura 20.

Figura 20

Diseño de soporte y estabilizador

Diseño conceptual. En el diseño conceptual del estabilizador se consideró las condiciones específicas dadas por la carga adicional que llevará el dron, lo cual involucra el peso y volumen del sensor multiespectral micasense Altum, peso del mecanismo, entre otros que se encuentran detallados en la Tabla 7.

Tabla 7

Diseño conceptual para estabilizador

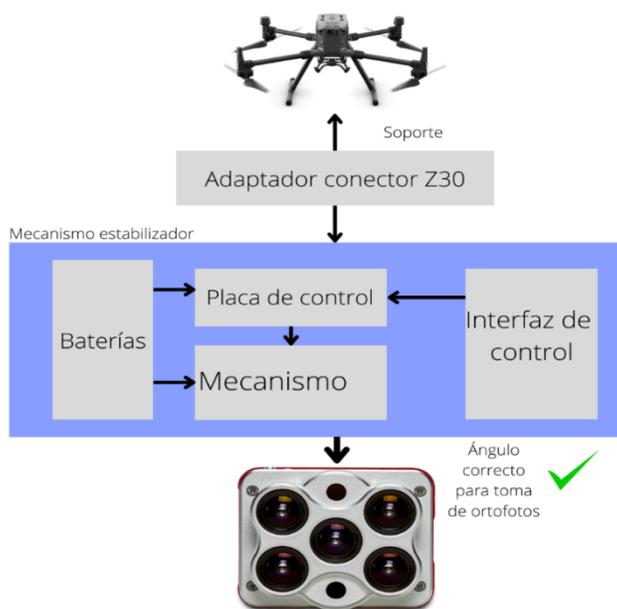
Condiciones	Especificaciones
Volumen del sensor multiespectral Micasense Altum	El ancho del sensor es de 67 mm, mientras que el largo de 82 mm y de altura 65,4 mm. Se considera para la sujeción el diseño del sensor que proporciona roscas en su armazon para un ajuste por tornillos M3.

Condiciones	Especificaciones
Peso del sensor multiespectral	Aproximadamente 417.5 gr
Peso máximo del mecanismo	1 kg
Tipo de instalación al dron	Micasense (empresa fabricante del sensor multiespectral) ofrece un tipo de acople específico para el dron Dji Matrice 300 RTK.
Restricción de movimientos	El cambio de ángulo y su bloqueo dependerá del correcto para la toma de ortofotos.

Inicialmente las necesidades se pueden manejar como una función general en donde interactúan variables para el funcionamiento del estabilizador según se observa en la Figura 21

Figura 21

Diagrama general de soporte y estabilizador



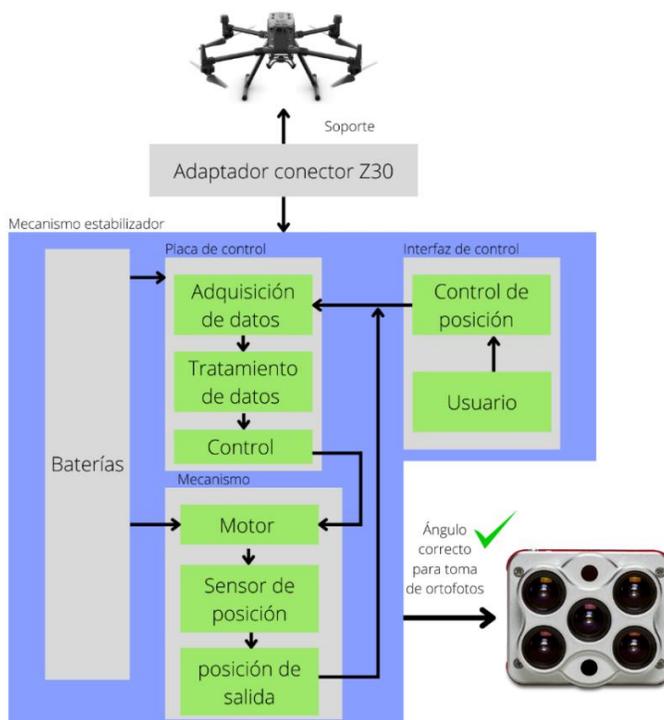
Se define entonces las partes por la cual estará definido el sistema, además es conveniente descomponer cada función en subfunciones, es decir describir y realizar un diagrama funcional del sistema lo cual permite detallarlo:

- Conector Z30 del gimbal: Parte mecánica del sistema diseñado para soporte y acople entre el vehículo aéreo y el estabilizador del sensor multiespectral.
- Mecanismo: Parte mecánica del sistema donde se diseña la estructura y elección de materiales que resista los movimientos y velocidades del vehículo aéreo, se realiza un mecanismo que fije el sensor multiespectral, también forman parte los actuadores.
- Placa de control: Parte electrónica del sistema para accionar a los actuadores y controlar su posición.
- Fuente de alimentación: Se conforma de la batería que dará energía al sistema.
- Interfaz de control: Parte informática del sistema encargada de comunicar a la placa de control la posición deseada.

Las partes mencionadas se interconectan y funcionan según se observa la Figura 22.

Figura 22

Diagrama detallado de soporte y estabilizador



Diseño de detalle. Se definen las geometrías fabricar , los materiales de éstas y el metodo de manufactura. Además, se define los materiales o piezas del diseño a ser adquiridas.

El diseño y manufactura permiten adaptar los componentes eléctricos-electrónicos que se adquieran.

Por lo anterior, primero se encuentran los componetes comerciales autilizar, en funcion de estos componentes se define la forma de la geometria final a diseñarse según se observa en la Tabla 8.

Tabla 8

Diseño de detalle

Componente	Función	Cantidad
Actuadores	Posicionar el estabilizador en el ángulo correcto para la toma de ortofotos.	1
Sensor de posición	Adquirir la posición angular del del estabilizador.	1
Baterías	Fuente de alimentación del sistema.	1
Placa de control	Procesar los datos del sensor y enviar señales para mover el motor.	1
Rodamientos	Facilita el movimiento giratorio del sistema.	1
Gomas de amortiguamiento	Eliminan micro vibraciones producidas por el vuelo del dron.	12

Actuadores. Como actuadores a utilizar para el estabilizador se seleccionan motores de corriente directa sin escobilla, se denominarán BLDCM por sus siglas en inglés (Brushless Direct Current Motor), es el tipo de motor más utilizado en este tipo de aplicaciones, por su excelente resolución en el giro y su rápida respuesta según se observa en la Figura 23. La resolución en el giro y la velocidad en la respuesta son puntos fundamentales en el estabilizador, pues se necesitan evitar las más pequeñas perturbaciones en el menor tiempo posible.

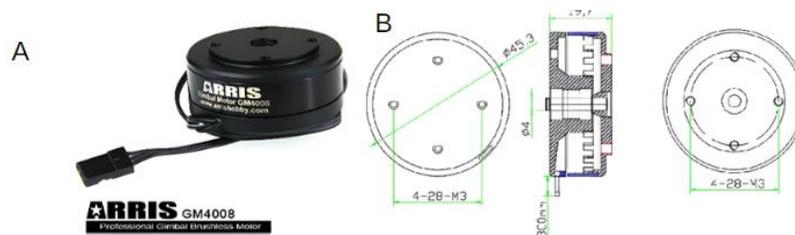
El BLDCM seleccionado para el estabilizador fue ARRIS GM4008. Las especificaciones de este

BLDCM dadas por el fabricante son:

- Configuración : 24N22P
- Resistencia: 12.7 Ohm
- Voltaje: 12V
- Corriente 0.944 A
- Giro: 150T
- Masa: 93g
- Dimensiones del motor [D×L](mm) : 45.4 x 23
- Diámetro del eje (mm): 10mm

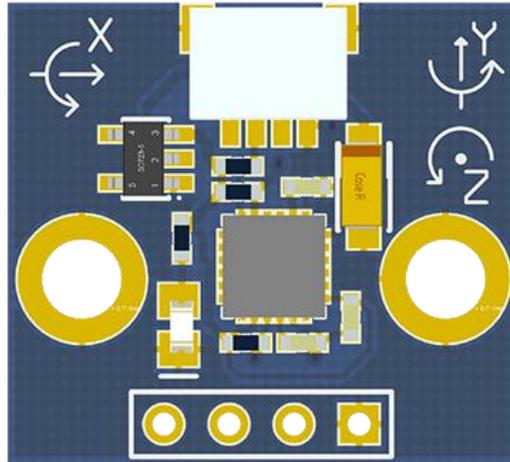
Figura 23

Motor ARRIS



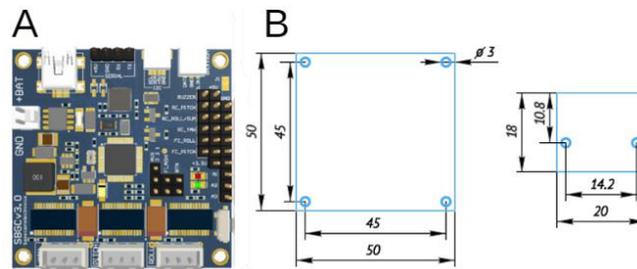
Nota. En la imagen (A) se muestra el aspecto del motor seleccionado en la imagen (B) se muestra sus dimensiones.

Sensor de posición. Nos permite obtener información angular espacial del sistema en el eje del ángulo a controlar, para efectuar la lectura del mecanismo se eligió como sensor al IMU sensor for BaseCam SimpleBGC 32-bit Gimbal Controller según se observa en la Figura 24.

Figura 24*Sensor de posición*

Tarjeta de control. Se usa una tarjeta de control para hacer uso de los datos del sensor de posición y consecuentemente activar el motor según se observa en la Figura 25. La elección de la tarjeta de control va de la mano con las características del motor seleccionado, en este caso la especificación principal es la corriente nominal que soporta la tarjeta, para este caso se selecciona la cual soporte igual o más a 1 A de corriente en la salida. La tarjeta de control que se eligió para este uso por el costo y la disponibilidad en el mercado es Basecam simple BGC 32 bit version controller board, la cual tiene las siguientes características:

- Tamaño: 50x50mm.
- Diámetro de agujeros para sujeción: 3mm.
- Voltaje de funcionamiento: 8-25V (3s-6s LiPo).
- Conexión para tres motores (roll, pitch, yaw).
- Corriente máxima del motor 1,5A.

Figura 25*Tarjeta de control*

Nota. En la imagen (A) se muestra el aspecto de la tarjeta de control, en la imagen (B) se muestra sus dimensiones. Tomado de Basecam, 2022.

Batería. Es la fuente de alimentación del sistema, en este caso su dimensionamiento está sujeto a las características de la tarjeta de control ya que el sensor y el motor van directamente conectados a esta según se observa en la Figura 26. De acuerdo a las especificaciones de la tarjeta de control se debe usar baterías de polímero de litio (LiPo) de 3 celdas a 6 celdas, el uso de diferente número de celdas depende del tiempo que se requiera en funcionamiento, en este caso por el espacio y el peso se ocupará una batería LiPo de 3 celdas 900 mAh que proporciona 11,1 V.

Figura 26*Batería*

Nota. Tomado de Google 2022.

Gomas de amortiguamiento. Se utilizan para reducir la vibración de conexión entre el vehículo aéreo y el sistema de estabilización, Esta goma de conexión de amortiguación de sistemas de carga para fotografía aérea está especialmente diseñada para pruebas a largo plazo.

El material está hecho de gel de sílice súper suave y extremadamente resistente, que es fácil de instalar. En el efecto de absorción de impactos puede ser muy evidente para vehículos aéreos donde se producen vibraciones de alta frecuencia, por lo que los defectos de calidad de la imagen aérea se reducen en gran medida. Por su fácil adquisición y costo se optó por adquirir las gomas de amortiguamiento como se observa en la Figura 27.

Figura 27

Gomas de amortiguamiento



Rodamientos. Su construcción con elementos rodantes facilita el movimiento rotatorio, resistencia de la carga, y el posicionamiento de la carga. Generalmente se usa un rodamiento por cada eje de movimiento, por lo que en el sistema se usara un rodamiento 24x15 y espesor 5 mm según se observa en la Figura 28.

Figura 28

Rodamientos



Diseño de Geometrías. Una vez definido los componentes que se utilizaran en el estabilizador y sus respectivas medidas se construye la geometría de los elementos restantes mediante software 3D.

Adaptador conector Z30. El conector z30 o Gimbal Connector es utilizado para montar cargas en la parte inferior del dron DJI Matrice 300 RTK según se observa en la Figura 29.

Figura 29

El conector z30

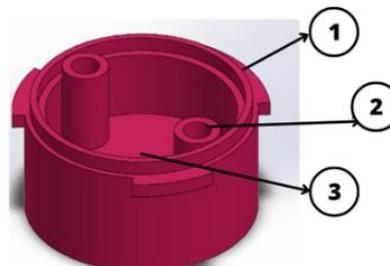


Nota. Tomado de *DJI.COM*

Los dispositivos compatibles para este conector se caracterizan por tener un diseño que se acopla perfectamente, se aseguran y se comunican, Micasense según se observa en la Figura 30, (empresa fabricante del sensor multiespectral) también ofrece este tipo de acople específico para el dron DJI M300.

Figura 30*Adaptador para conector de gimbal*

Para el diseño se replica este tipo de pieza que sirva de acople y de seguridad al sistema mas no comunicación ni energía. Se diseña en software 3D el modelo del adaptador que permitirá el acople entre conector del dron y el mecanismo estabilizador, aportando soporte y seguridad, se basa en el diseño aproximado oficial, el bosquejo de dicha pieza según se observa en la Figura 31.

Figura 31*Adaptador conector Z30*

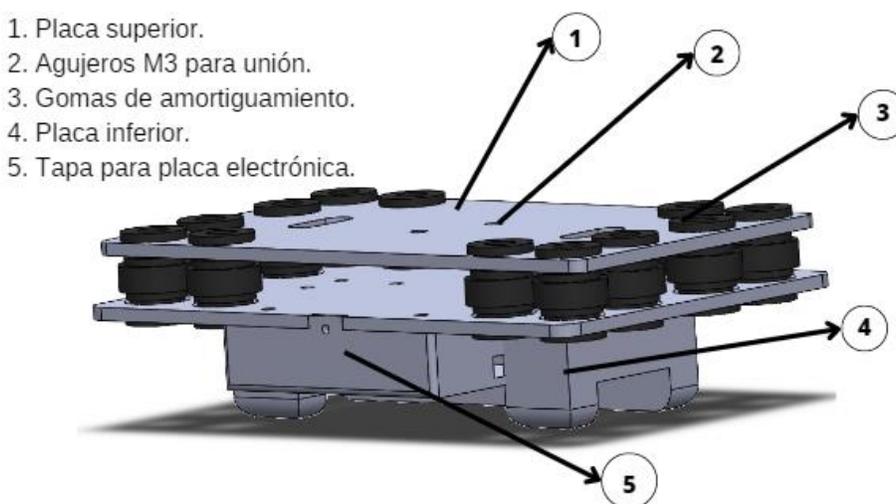
1. Pestañas de acople.
2. Rieles de bloqueo.
3. Agujeros de union para tornillos M3.

Placas de amortiguación. Se diseña una estructura que junto con las gomas de amortiguamiento reducen las vibraciones producidas por el vuelo del dron, el viento y otros factores. Consta de una placa superior que conecta el mecanismo de estabilización con la pieza de acople al dron,

en ésta se diseñaron las aberturas para insertar 12 gomas de amortiguamiento y agujeros M3 para unir el adaptador del conector Z30. Mediante las gomas de amortiguamiento la placa superior se conecta a una placa inferior con la cual se termina el sistema de amortiguamiento, sin embargo, para optimizar el espacio se diseñó el compartimento de la batería LiPo 3s que alimentara el sistema, además, de un compartimento para la placa de control según se observa en la Figura 32.

Figura 32

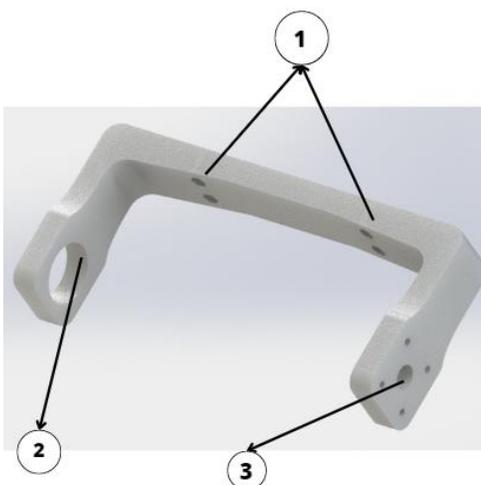
Sistema de amortiguamiento del estabilizador



Soporte gímbal. Es la pieza en la que se asentarán el rodamiento y el motor de modo que el eje de rotación de los dos elementos coincida, se conecta directamente a la placa inferior del sistema de amortiguamiento, y mediante el rodamiento y el motor se conecta al soporte móvil del sensor multispectral según se observa en la Figura 33.

Figura 33*Soporte gimbal*

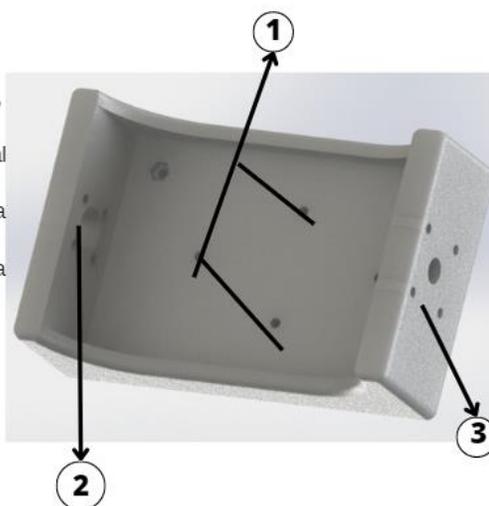
1. Agujeros de tornillos M4 para la sujeción con las placas de amortiguamiento.
2. Abertura para ajustar el rodamiento.
3. Agujeros para el paso del tornillo que conectan al rotor del motor que controla el ángulo del estabilizador.



Soporte sensor multiespectral Micasense Altum. Es la pieza en la que se asentará la parte móvil del rodamiento y el motor de modo que sea la pieza que estará en movimiento y encargada de fijar al sensor multiespectral Micasense Altum en el ángulo correcto para la toma de ortofotos según se observa en la Figura 34.

Figura 34*Soporte sensor multiespectral Micasense Altum*

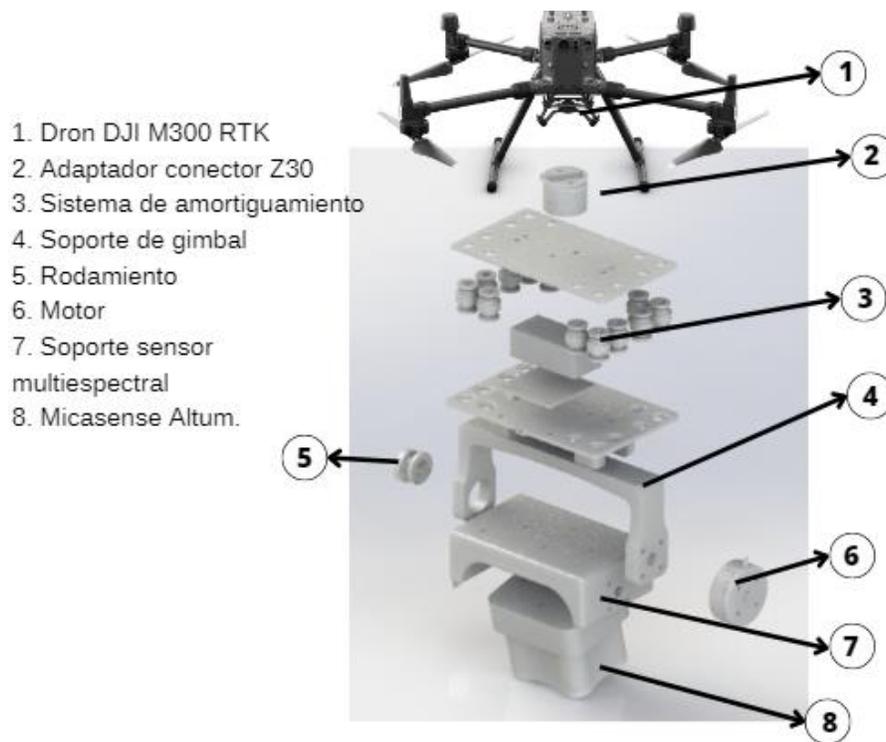
1. Agujeros para tornillos M3, para el ajuste y soporte a la carcasa sensor multiespectral Micasense Altum.
2. Agujeros y abertura para la conexión con el rodamiento.
3. Agujeros y abertura para la conexión con la parte móvil del motor que controlara el ángulo de estabilización.



Ensamble final del soporte y estabilizador. Se muestra el ensamble final del soporte estabilizador para el análisis de configuraciones o posiciones hipotéticas según se observa en la Figura 35. Adicional para verificar sus dimensiones consulte el Anexo A.

Figura 35

Ensamble final del soporte y estabilizador



Análisis estructural del estabilizador. Para poder analizar el rendimiento del diseño CAD se utiliza Inventor con licencia estudiantil con el objetivo de facilitar la simulación mediante elementos finitos analizando los componentes más relevantes.

Se realizó un análisis estructural en los elementos más relevantes del estabilizador.

Como la mayoría de componentes utilizados son realizados en impresión 3D se realiza algunas consideraciones como el que son modelos isotrópicos para poder analizar, teniendo en cuenta que todos los puntos pertenecientes a los modelos tienen las mismas características mecánicas y térmicas.

Para poder proceder con el análisis estructural es primordial obtener la información de las

propiedades mecánicas de los materiales utilizados esto se detalla en el análisis de cada pieza que a continuación se presenta.

Análisis estructural en el conector Z30 del gimbal. El conector Z30 es el elemento del estabilizador que soporta la totalidad de las cargas que se efectúan como de la cámara, sus cables y accesorios por lo que es necesario realizar un análisis por separado.

Para el material se selecciona el aluminio 7075-T6 debido que es el mismo material del conector original que viene incluido en otras cámaras y además de la disponibilidad en el país.

Las características del material del conector z30 se puede visualizar en la Tabla 9.

Tabla 9

Propiedades mecánicas de aluminio 7075-T6

Propiedades	Valor	Unidades
Módulo elástico	72000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	26900	N/mm ²
Densidad de masa	2810	Kg/m ³
Límite de tracción	570	N/mm ²
Límite elástico	505	N/mm ²

Esta pieza soporta la carga de todos los componentes del sistema de estabilización por lo que se detalla el peso de cada pieza y la suma total del estabilizador en la Tabla 10.

Tabla 10

Pesos de piezas del estabilizador

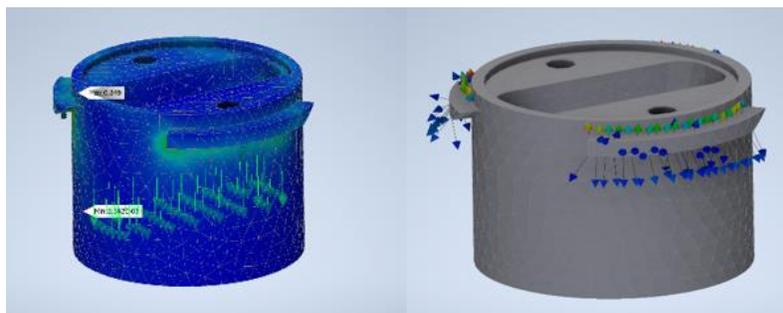
Elemento de carga	Masa del elemento (gr)
Placa superior	50
Placa inferior	75

Elemento de carga	Masa del elemento (gr)
Soporte gimbal	150
Soporte de sensor	172
Sensor Micasense Altum + accesorios	1000
Componentes electrónicos	100
Cables y accesorios del estabilizador	100
Total	1647

Para analizar el elemento de forma correcta se aplica las restricciones necesarias las cuales son las mismas que estarían en el modelo real y se consideró una carga distribuida de 2Kg como se muestra en la Figura 36 para poder tener una tolerancia que admita el diseño.

Figura 36

Ubicación de las cargas y restricciones en el conector z30



En la Figura 37, se muestra el comportamiento del conector Z30 donde se puede visualizar que tiene un desplazamiento mínimo de $4,463E-08$ metros y un factor de seguridad mayor $N=2$ como lo establece el criterio de seguridad de diseño para cargas estáticas publicado en el Libro Resistencia de materiales de Mott como se muestra en la Tabla 11.

Figura 37

Comportamiento del conector Z30

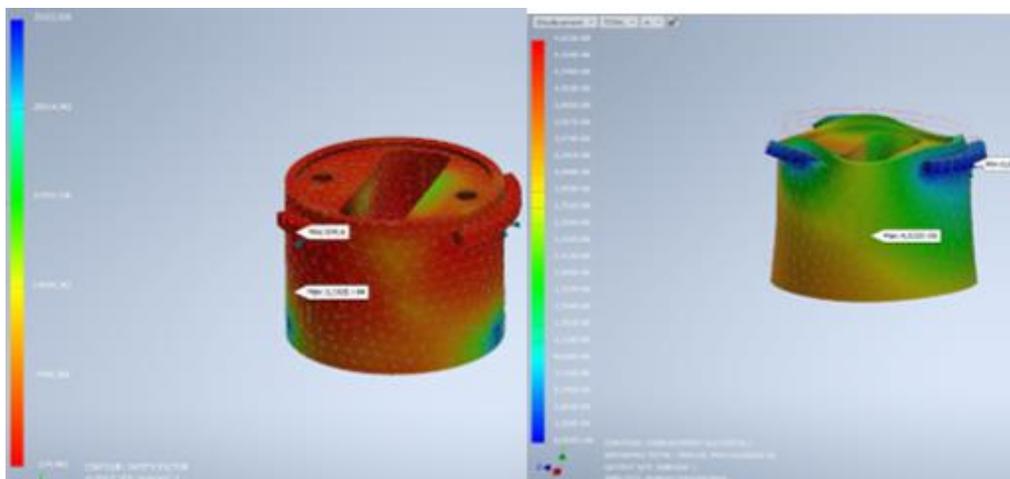


Tabla 11

Tabla de factor de diseño

Forma de carga	Factor de diseño	Esfuerzo cortante de diseño
Cargas estáticas	Use N=2	τ_d
Cargas repetidas	Use N=4	$\tau_d = S_y/8$
Choque o impacto	Use N=6	$\tau_d = S_y/12$

El análisis descrito establece criterios técnicos de elementos finitos cumpliendo con condiciones de integridad estructural y factores de diseño correcto aprobando la manufactura de los mismos.

Análisis estructural en placa superior. La placa superior soportará las cargas generadas por la mayoría de elementos que componen el estabilizador, por lo que es importante realizar un estudio estructural por separado.

El material seleccionado fue ácido poliláctico comúnmente conocido como PLA es un material muy fácil para poder adquirir y procesarlo por impresión 3D.

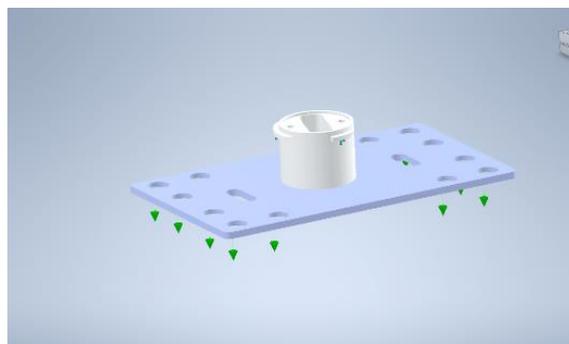
Las características del material del se puede visualizar en la Tabla 12.

Tabla 12*Propiedades Mecánicas de PLA*

Propiedades	Valor	Unidades
Módulo elástico	3750	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3	N/D
Densidad de masa	1290	Kg/m ³
Límite rotura	60	N/mm ²
Límite elástico	45	N/mm ²

Se realizó el análisis mediante el método de los elementos finitos, sobre el ensamble de la placa superior con el conector z30 y las respectivas relaciones entre estos los elementos, considerando la carga de los 2Kg a la cara inferior.

Se agregaron los mismos puntos de apoyo en el conector Z30 y la carga de 2kg se aplicó de forma distribuida en la cara inferior de la placa superior como se muestra en la Figura 38.

Figura 38*Ubicación de las cargas y restricciones en el ensamble*

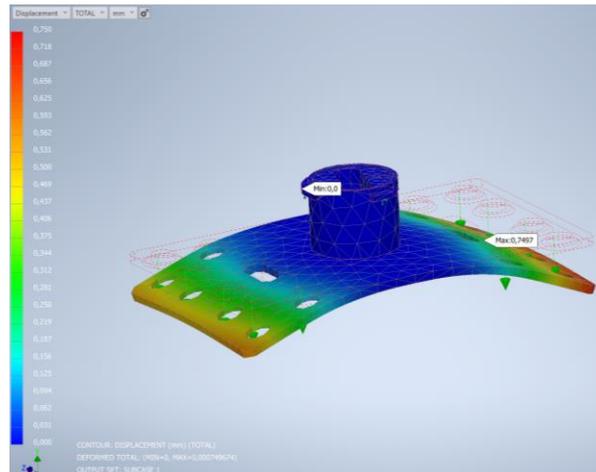
Este elemento es uno de los que sufrirá mayores desplazamientos por lo que es necesario tomar en cuenta la recomendación de seguridad que se dio para el uso del sensor Micasense Altum la cual es que el desplazamiento de la placa superior no sea mayor a 1mm.

Se establece que el desplazamiento máximo es de 0.7497 mm por lo que está dentro de los

parámetros de seguridad que se dio para el uso del sensor Micasense como se muestra en la Figura 39.

Figura 39

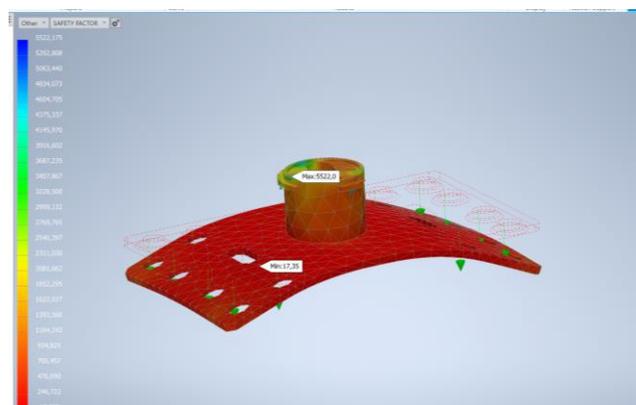
Simulación de desplazamiento para placa superior



Debido a que la variable de desplazamiento era el requerimiento primordial en el diseño de este elemento, Cumpliendo con lo que establece el criterio de seguridad de diseños para cargas estáticas publicado en el Libro Resistencia de materiales de Mott como se muestra en la Figura 40, estableciendo un correcto diseño e integridad estructural.

Figura 40

Factor de seguridad de placa superior



Para comprobar la veracidad de los resultados obtenidos en el análisis CAE, se establece un

estudio de flexión en vigas con ayuda del Software MDSolids para la placa superior del sistema, en primer lugar, se definirán las cargas aplicadas en todas las zonas específicas de la superficie, sus respectivas dimensiones y longitud total.

Donde:

P = Fuerza resultante del conjunto de cargas aplicadas a la misma distancia, al tener un peso final de 2 Kg se multiplica por la gravedad y se divide para el total de cargas (12), dando un valor de 1.63 N para cada punto de aplicación.

a = Distancia desde los extremos hacia el primer conjunto de fuerzas, 10 mm

b = Distancia entre los dos conjuntos de fuerzas, 20 mm

L = longitud total de la pieza, 142 mm

Se determina la inercia con respecto al eje de las "x" para un posterior calculo.

$$I_x = \frac{1}{12} * b * h^3$$

Donde:

I_x = inercia de la sección transversal de la placa superior

b = base

h = altura

$$I_x = \frac{1}{12} * 84 \text{ mm} * (3 \text{ mm})^3$$

$$I_x = 189 \text{ mm}^4$$

El parámetro que se requiere ingresar en el Software MDsolid a fin de obtener el valor de deformación máxima en los extremos es el módulo de flexión, dado por:

$$m_d = EI_x$$

Donde:

m_d = módulo de flexión

I_x = inercia de la sección transversal de la placa superior

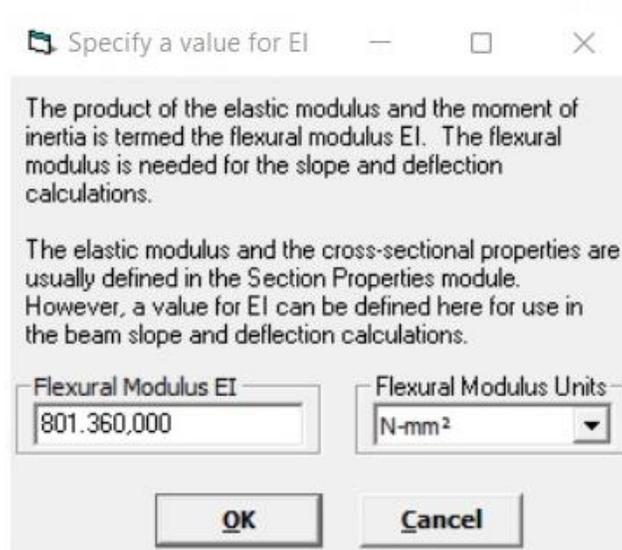
E = módulo de Young o de elasticidad

$$m_d = (4240 \text{ MPa}) * (189 \text{ mm}^4)$$

$$m_d = 801360 \text{ Nmm}^2$$

Figura 41

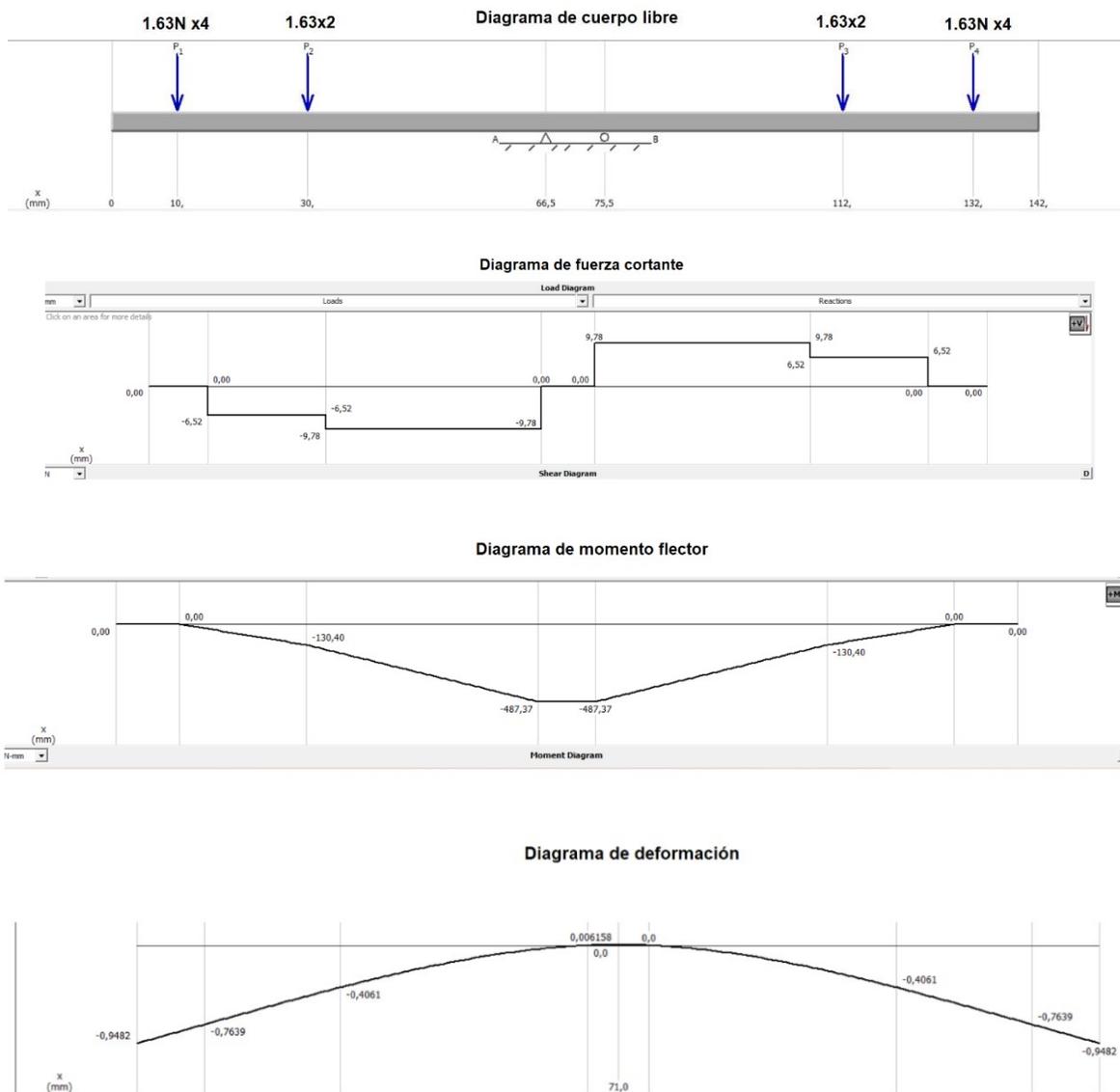
Interfaz para ingresar magnitudes



Tras la configuración de dicho valor, se puede apreciar en la Figura 43. que la deformación máxima que sufrirá la pieza será de 0.94 mm, correspondiente al desplazamiento máximo, con el resultado presentado por los diagramas de fuerzas cortantes, momentos flectores y deformación.

Figura 42

Diagramas de análisis de flexión



Análisis estructural de la goma de amortiguamiento. La simulación que se aplicó a este componente es una simulación no lineal debido a que el material es de caucho el cual muestra las propiedades físicas en la Tabla 13.

Tabla 13

Propiedades mecánicas del caucho de silicie.

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad de masa	1,25	g/cm^3
Límite de elasticidad	10,34	MPa
Resistencia máxima a tracción	6,5	MPa
Módulo de Young	0,003	GPa
Coefficiente de Poisson	0,49	su
Módulo cortante	0,00100671	GPa

Se estableció puntos fijos en este componente para poder realizar la simulación como se muestra en la Figura 43.

Figura 43

Aplicación de puntos fijos en goma de amortiguamiento



La carga total del sistema de amortiguación se divide para las 12 gomas de amortiguamiento, por lo que, se aplicó una carga de 2N como se muestra la Figura 44.

Figura 44

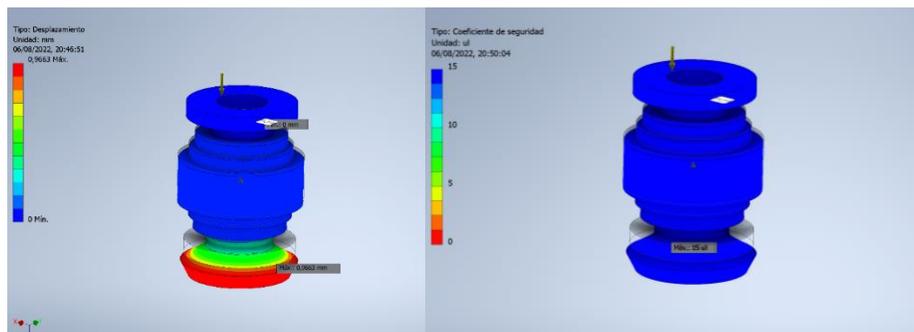
Aplicación de carga sobre goma de amortiguamiento



Se establece que el desplazamiento máximo es de 0.96mm por lo que es mínimo, y además se tiene un factor de seguridad de $N=15$, de esta forma cumple con un correcto diseño e integridad estructural como se muestra en la Figura 45.

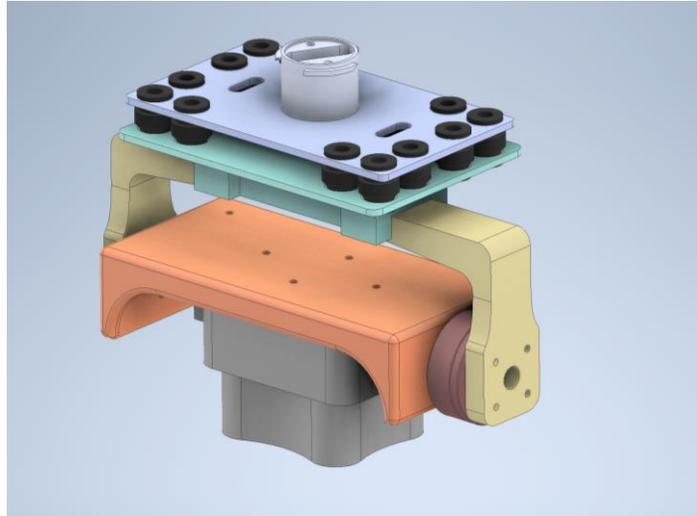
Figura 45

Simulación de esfuerzo en goma de amortiguamiento

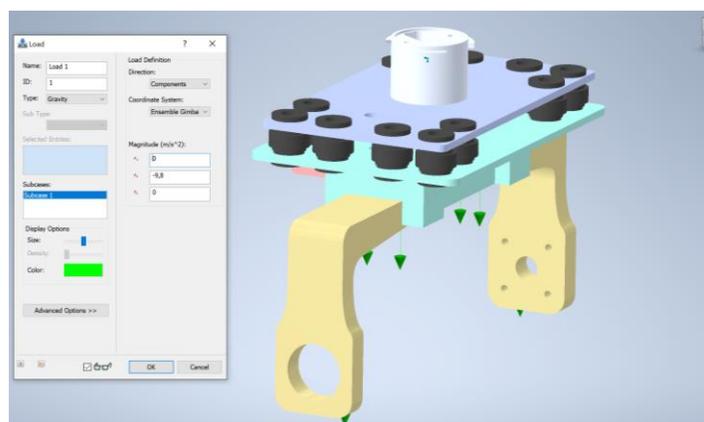


Se establece que, al ser una simulación no lineal, al trabajar en la zona plástica su comportamiento cumple con parámetros aceptables sin llegar a la rotura del material.

Análisis estructural todo el sistema de estabilización. Se analizó la estructura ensamblada para poder tener un análisis de cómo se comportaría todo el sistema, en este caso el análisis consta de varios elementos como se muestra en la Figura 46, por lo que es necesario realizar un análisis lineal y no lineal.

Figura 46*Ensamble de estabilizador*

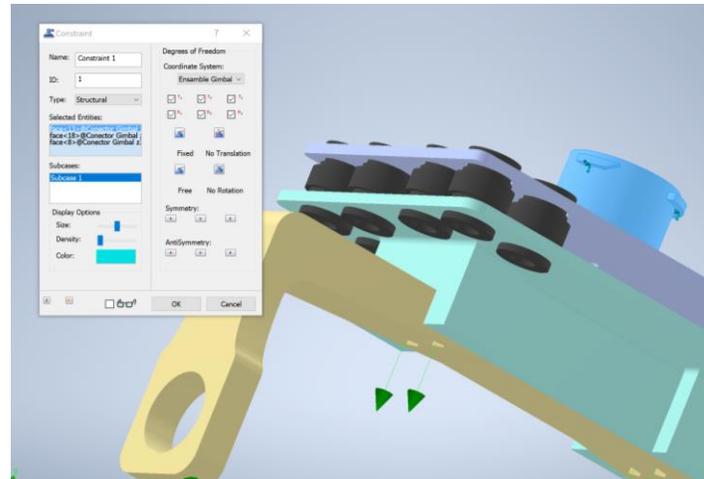
La carga que se aplicará al ensamble es de 6N en la cual el peso principal es el del sensor Micasense Altum y los otros componentes que integran el ensamble, estas cargas se distribuyen como se muestra en la Figura 47.

Figura 47*Aplicación de cargas sobre ensamble de estabilizador*

Se toma en cuenta cuales son las restricciones en el modelo real y se aplica de igual forma en el diseño aplicando los puntos fijos en el conector z30 como se muestra en la Figura 48.

Figura 48

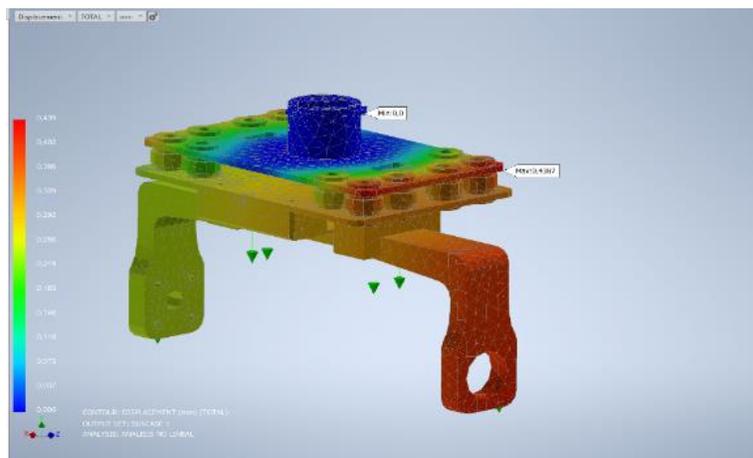
Aplicación de apoyos sobre el conector Z30



Un requerimiento de diseño dados para el uso del sensor Micasense Altum es que el desplazamiento máximo debe ser menor a 1 mm como se muestra en a Figura 49.

Figura 49

Simulación del desplazamiento máximo del estabilizador

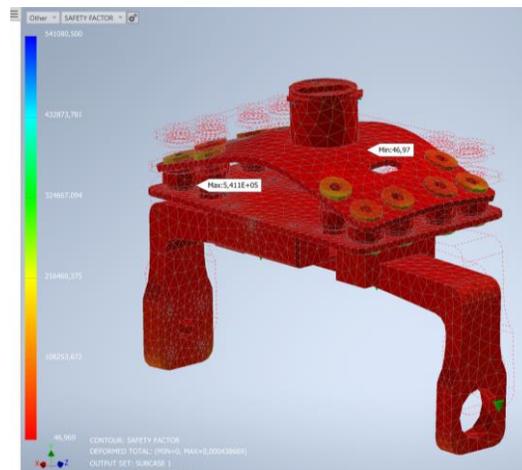


Al existir variables externas en el entorno de aplicación del sistema de monitoreo y además para no comprometer la integridad del sensor Micasense Altum debido a su elevado costo se estimó un factor de seguridad elevado donde cumple el requerimiento de desplazamiento máximo de 1 mm como

se observa en la Figura 50, lo cual permitirá una mayor seguridad ante estas posibles situaciones de riesgo.

Figura 50

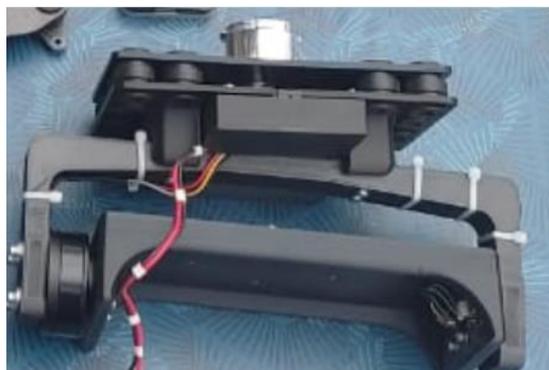
Simulación del factor de seguridad del estabilizador



Se establece que al ser una simulación no lineal el material al trabajar en la zona plástica su comportamiento cumple con parámetros aceptables sin llegar a la rotura del material.

Manufactura. Para la fabricación del sistema estabilizador, se escogió la impresión 3D mediante el proceso de fabricación con filamento fundido, cabe acotar que el adaptador de conector Z30 fue fabricado en duraluminio, ya que, es la pieza que soporta todo el peso del sistema, lo que reduce el riesgo de fallar estáticamente o por desgaste, además la tolerancia de fabricación debe ser mínima por lo que se acopla a una pieza delicada del dron, por ende, el proceso que se eligió es mecanizado con fresadora CNC.

Una vez impresas las piezas diseñadas para el estabilizador, y fabricado el pin de acople, se ensamblan con los elementos comerciales que se adquirieron (ver Tabla 4), el sistema en conjunto luce como se muestra en la Figura 51.

Figura 51*Sistema estabilizador construido***Fase 3**

Se realiza la toma de las imágenes multiespectrales sobre el área de estudio, con el fin de recopilar la información respectiva, se eliminaron las imágenes innecesarias obtenidas para realizar el post proceso en un software especializado y obtener el producto final de la ortofoto, y posteriormente la formación de ortomosaicos.

Captura de imágenes multiespectrales aéreas

Las capturas de imágenes se realizan con la plataforma aérea del sistema de monitoreo formada por el sensor Micasense Altum, el sistema estabilizador y el dron DJI M300 RTK. Se obtiene imágenes 2064 x 1544 px de resolución, es una imagen por cada capa en el orden que se muestra en la Tabla 14, estas imágenes se encuentran en formato .tif y son de 16 bytes, además de eso las imágenes cuentan información geoespacial del lugar donde fueron tomadas para posterior formar un ortomosaico.

Tabla 14*Orden de las capas en su almacenamiento*

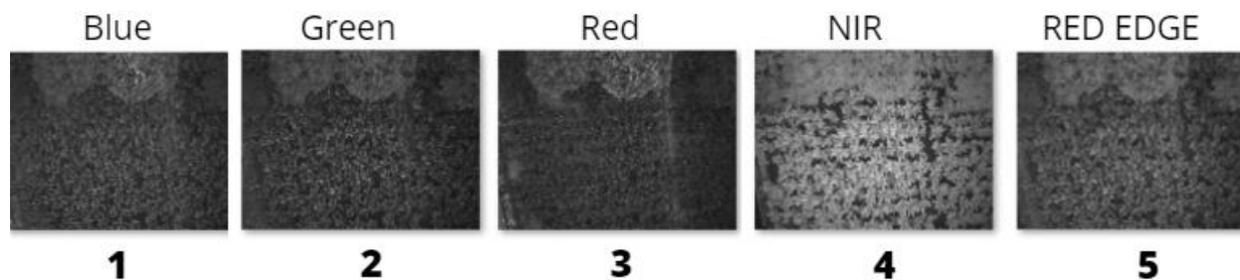
Capa	Espectro
1	Blue

Capa	Espectro
2	Green
3	Red
4	NIR
5	Red Edge

Una característica a tomar en cuenta es el GSD (Ground sample distance), donde se tiene una relación 2.1 cm por pixel tomando en cuenta que estas capturas se realizan a 60 m sobre el nivel del suelo, obteniendo características más detalladas del área de análisis como se observa en la Figura 53.

Figura 52

Imágenes multiespectrales



Procesamiento de la imagen multiespectral

Uno de los fines del sistema de monitoreo es poder obtener información del estado de las plantaciones de plátano y banano por medio de una imagen espectral, por lo se debe aplicar procesamiento de las imágenes luego de su captura.

Alineación fotogramétrica. Con las imágenes obtenidas del sensor Micasense Altum se procede a realizar una alineación fotogramétrica debido que los lentes del sensor se encuentran separados una distancia, por lo que al unir las capas de las imágenes no se obtiene los colores reales como se muestra en la Figura 55, Se encuentra puntos de interés en las capas de las imágenes con el algoritmo SIFT (Scale-invariant feature transform) como se muestra en la Figura 54.

Figura 53

Código de la aplican del algoritmo shift en las capas de la imagen

```
descriptor = cv2.xfeatures2d.SIFT_create()
(kpsBase, featuresBase) = descriptor.detectAndCompute(img_RED, None)
(kpsAdicional, featuresAdicional) = descriptor.detectAndCompute(stb_NIR, None)
```

Con los puntos característicos encontrados se procede a realizar una transformación homográfica como se observa en la Figura 54, para poder encontrar la matriz homográfica, la cual contiene características de posición y orientación lo que permitió tener una relación directa entre las capas de las imágenes.

Figura 54

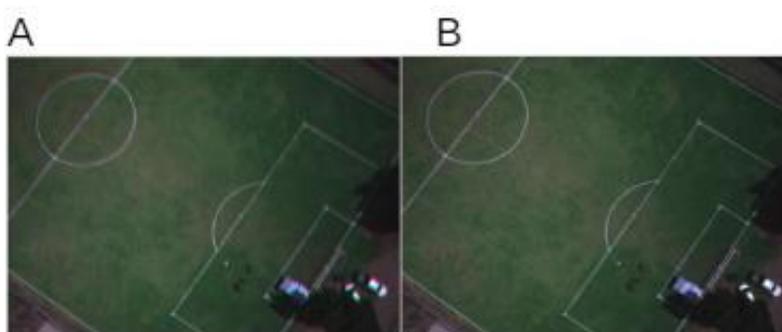
Código para encontrar la matriz homográfica

```
(H, status) = cv2.findHomography(ptsA, ptsB, cv2.RANSAC, error_reproyeccion)
```

Se procedió a unir las capas de las imágenes y se encontró la imagen alineada fotogramétricamente como se muestra en la Figura 55.

Figura 55

Alineación fotogramétrica

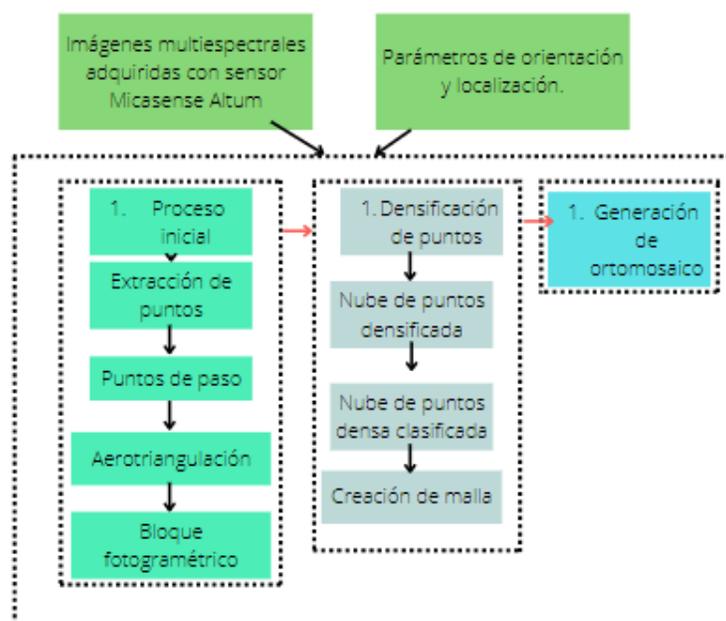


Nota. La imagen (A) muestra un error dado que los datos no estan procesados, La imagen (B) muestra una mejor representación luego de alineación fotogramétrica.

Se utiliza el software Agisoft en su versión de prueba por un mes permite realizar el procesamiento de las imágenes multiespectrales capturadas por medio del dron DJI M300 RTK con el sensor multiespectral Micasense Altum, en donde se añadieron las imágenes tomadas para seguir el procedimiento de la Figura 56.

Figura 56

Diagrama de flujo de procesamiento de imágenes multiespectrales



Orto rectificación. La generación de la ortoimagen exige combar la imagen de origen para que esa distancia y esa área sean uniformes en relación con las mediciones del mundo real. Esto se logra estableciendo una relación entre las coordenadas x,y de la imagen y los GCP del mundo real para determinar el algoritmo para remuestrear la imagen. Del mismo modo, la relación matemática entre las coordenadas del suelo representadas por un DEM y la imagen se calcula y se usa para determinar la posición adecuada de cada píxel de la imagen de origen (ArcGIS, 2019).

Ortomosaico. Es un producto de imagen fotogramétricamente ortorrectificado organizado como mosaico a partir de una colección de imágenes como se observa en la Figura 58, donde la

distorsión geométrica se ha corregido y donde se ha realizado un balance de color de las imágenes para producir un dataset de mosaico continuo (ArcGIS, 2019).

Figura 57

Ortomosaico de un cultivo de plátano



Fase 4

Se desarrolla un algoritmo que además del cálculo del índice de vegetación NDVI, se pueda clasificar mediante la aplicación de operaciones de filtrado por segmentación con el índice de vegetación NDVI, por lo cual, será capaz de la identificación de la enfermedad en cultivos de plátano y banano a partir de la caracterización espectral del cultivo sano y la caracterización espectral del cultivo con afectación de MOKO (*Ralstonia solanacearum*).

Cálculo y obtención del índice NDVI

La obtención del índice NDVI se realizó en el lenguaje de programación PYTHON debido a que se puede manipular datos matriciales que se obtienen de las capas del ortomosaico, además, en este programa se desarrollará el algoritmo de clasificación final para la detección temprana de MOKO en plantaciones de plátano y banano.

Para calcular el NDVI en el algoritmo de la programación, se importa las librerías especializadas

para poder leer el ortomosaico y a copiar la dirección en donde se encuentra el ortomosaico que fue creado a partir de las imágenes obtenidas del sensor multispectral MicaSense Altum como se observa en la Figura 58.

Figura 58

Código para adquisición de ortomosaico

```
import rasterio
import numpy as np
import cv2
from matplotlib import pyplot as plt
import imutils
path='C:\\Users\\polos\\OneDrive\\Escritorio\\GEOTIFF_SANTO\\Input\\VUEL01_E.tif'
src=rasterio.open(path)
```

El ortomosaico obtenido tiene varias capas por lo que se lee cada una por separado para poder operarlas posteriormente como se muestra en la Figura 59.

Figura 59

Código para la separación de capas del ortomosaico

```
BLUE=src.read(1)
GREEN=src.read(2)
RED=src.read(3)
NIR=src.read(4)
nodata=src.read(7)
```

Como el formato del ortomosaico es de 16 bits se procede a transformar a valores flotantes de 32 bits para no perder información en las operaciones de cálculo de NDVI como observa en la Figura 60.

Figura 60

Código para convertir de uint16 a float32

```
RED = RED.astype(np.float32)
NIR = NIR.astype(np.float32)
nodata = nodata.astype(np.float32)
```

La séptima capa del ortomosaico se obtiene para poder aplicar una máscara y eliminar los valores que no sean deseados como se observa en la Figura 61, además de que permite evitar errores en la operación de división que se realiza en el cálculo del NDVI.

Figura 61

Código unir dos capas

```
RED=cv2.bitwise_and(RED_nodata)
NIR=cv2.bitwise_and(NIR_nodata)
```

Una vez obtenidas las capas Red, Nir en los formatos correctos se encuentra los valores máximos y mínimos de cada capa respectivamente y se realiza una normalización entre los valores máximos y mínimos de cada capa como se aprecia en la Figura 62.

Figura 62

Código de normalización de pixeles

```
RED_max=RED.max()
RED_min=RED.min()
NIR_max=NIR.max()
NIR_min=NIR.min()
RED=(RED-RED_min)/(RED_max-RED_min)
NIR=(NIR-NIR_min)/(NIR_max-NIR_min)
```

Una vez ya realizada la normalización se calcula el NDVI como se observa en la Figura 63, en la cual se opera pixel a pixel y se obtiene una matriz de una sola capa con valores de -1 a 1. El resultado de esta operación se puede observar en la Figura 65, en escala de grises debido a que es una imagen de una sola capa.

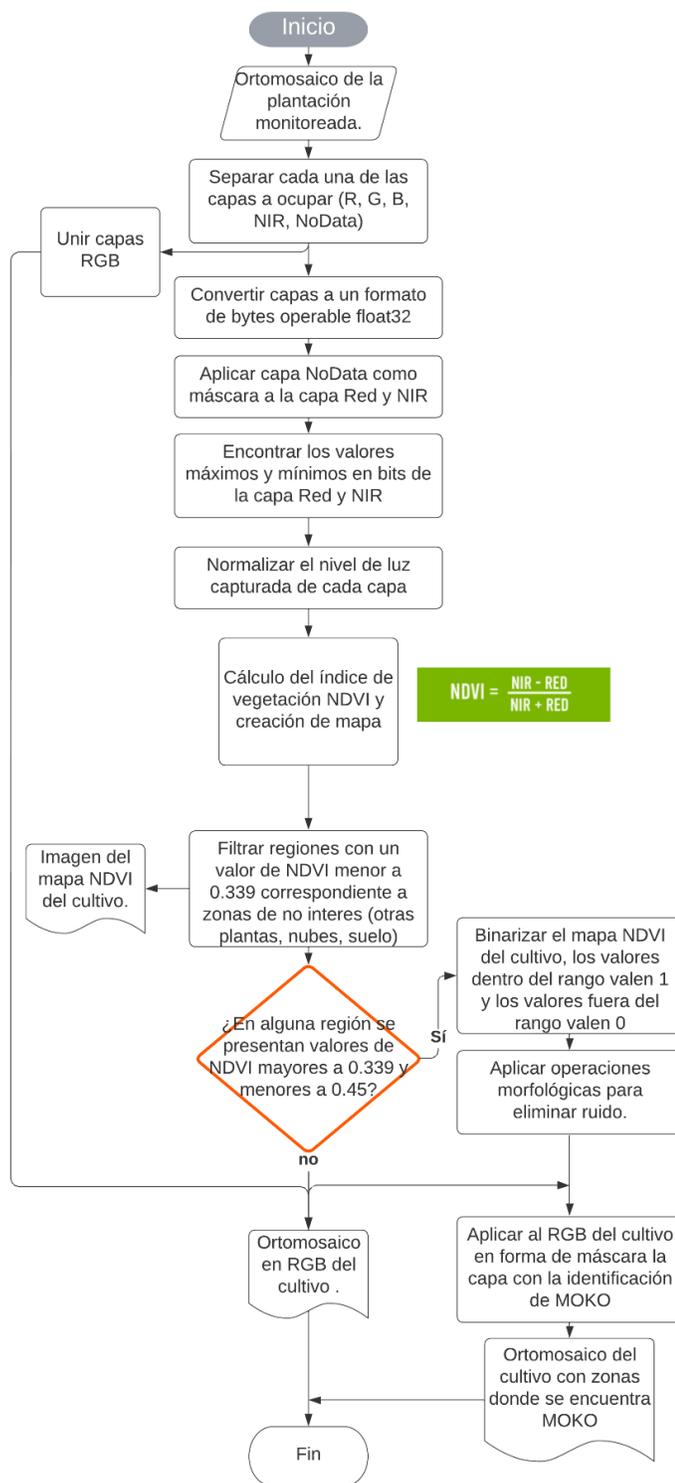
Figura 63

Cálculo del NDVI

```
NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED)
```

Figura 64

Algoritmo de clasificación para la detección temprana de MOKO en plantaciones



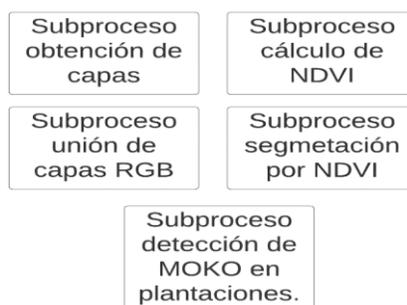
Algoritmo de clasificación para detección temprana de MOKO en plantaciones de plátano y banano.

Para la detección temprana de MOKO se ha elaborado un algoritmo de clasificación de datos en función de los valores de NDVI que se considera en este proyecto cuando una plantación de plátano o banano tiene afectación de MOKO. En la Figura 65, se muestra el bloque de los subprocesos del algoritmo, mientras en una

Figura 67 se muestra un diagrama de flujo detallado del algoritmo de clasificación.

Figura 65

Bloques de programación para algoritmo de clasificación



La implementación del código se compone en principio del cálculo NDVI, para poder distinguir las plantas que se encuentran con MOKO del resto de objetos y/o plantas, se aplica la caracterización en tres grupos como se observa en la Figura 66.

Mediante una clasificación se aplican los valores característicos de MOKO en el NDVI, y realizando una operación morfológica de dilación se elimina el ruido de la ortofoto.

Figura 66

Código de caracterización de MOKO

```
NDVI_MSK[np.where((NDVI_MSK <= 0.339))] = 0
NDVI_MSK[np.where((NDVI_MSK >= 0.34) & (NDVI_MSK <= 0.45))] = 65534
NDVI_MSK[np.where((NDVI_MSK >= 0.451) & (NDVI_MSK <= 0.95))] = 0
```

Figura 67

NDVI en escala de grises



Mediante una operación morfológica de dilatación como se muestra en la Figura 68, se elimina el ruido de la máscara de caracterización como se observa en la Figura 69.

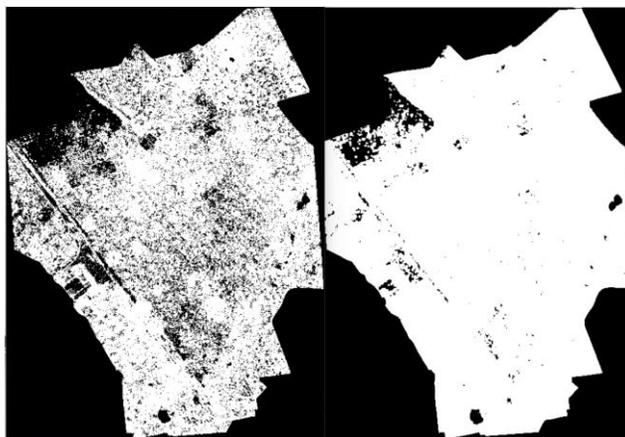
Figura 68

Código de operación morfológica

```
NDVI_MSK= cv2.dilate(NDVI_MSK, kernel, iterations=18)
```

Figura 69

Mascara de caracterización -mascara de caracterización filtrada



Con la máscara de caracterización ya filtrada se procede aplicar condicionantes como se observa en la Figura 70, que permitan colorizar en rojo del ortomosaico en las zonas que tengan Moko como se muestra en la Figura 71.

Figura 70

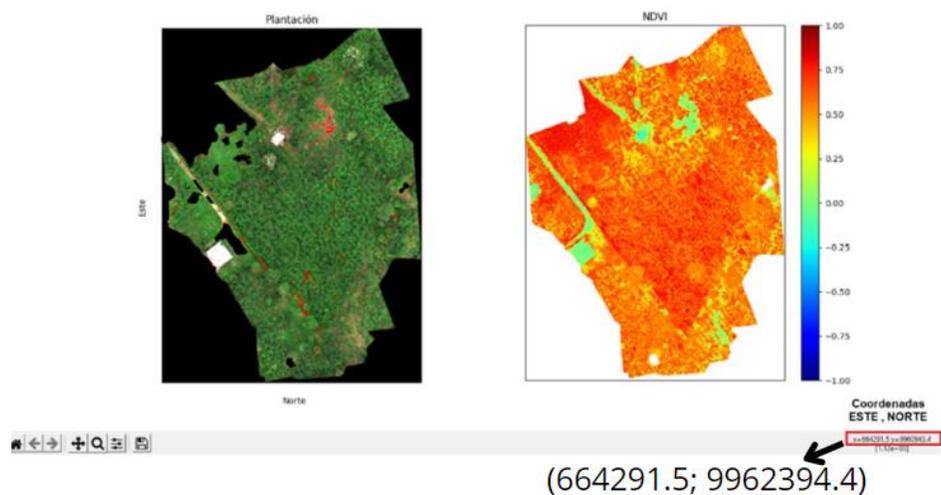
Código para colorizar de MOKO

```
RED_aux=np.where(NDVI_MSK==0, 65535, RED_aux)
BLUE_aux=np.where(NDVI_MSK==0, 0, BLUE_aux)
GREEN_aux=np.where(NDVI_MSK==0, 0, GREEN_aux)
```

Como complemento para una mejor visualización se muestra el NDVI y la plantación coloreada de rojo en las zonas o plantas donde se encuentra el MOKO como se observa en la Figura 71.

Figura 71

Forma de interpretación visual del sistema de monitoreo de Moko



Presupuesto

Por auto gestión se logró la colaboración de la empresa Altium ubicada en la ciudad de Quito se pudo tener acceso a los equipos que se mencionan en la Tabla 15.

Tabla 15

Costo de equipos proporcionados por la empresa Altium

Descripción	Cantidad	Precio unitario \$	Costo total \$
Drone DJI Matrice M300	1	1	15900
Sensor Multiespectral Micasense Altum+DLS2	1	1	6980
Total			22880

Tabla 16*Costos de materiales*

Descripción	Cantidad	Precio unitario \$	Costo total \$
Impresión 3D del mecanismo de estabilización	1	72.5	72.5
Batería Lipo 3s 900	4	19	76
Placa superior del soporte DLS 2	1	30	30
Placa inferior del soporte DLS 2	1	30	30
Motor GM4008	1	67	67
Placa SimpleBGC 32BIT+Acelerometro	1	123	123
Conector Z30	1	68	68
Pernos, tornillos y tuercas	1	5	5
Cables y accesorios de conexión	1	27	27
Gomas de amortiguamiento	15	1.75	16.25
Cargador de lipo	1	50	50
Total			564.75

Costos totales del proyecto

En la Tabla 17, se detallan los costos totales del proyecto.

Tabla 17*Costos Totales*

Descripción	Cantidad	Precio unitario \$	Costo total \$
Costo de equipos proporcionados por la empresa	1	22880	22880
Altium			
Costos de materiales	1	564.75	564.75
Total			23444.75

Capítulo IV

Estudio del diseño

Pruebas y resultados

Se realizaron distintas pruebas preliminares para comprobar el correcto funcionamiento del sensor multiespectral Micasense Altum, el sistema estabilizador, el procesamiento de ortofotos, el algoritmo de programación realizado en Python y el dron DJI M300 RTK.

Prueba de ensamble sensor Micasense Altum + sistema estabilizador + dron DJI M300 RTK

El sistema inicial que facilitó la captura de datos está conformado por el vehículo aéreo, el sensor y estabilizador. El estabilizador está diseñado para mantener el plano de la imagen paralelo al suelo logrando ortogonalidad de la cámara, tener mayor seguridad y de fácil acople entre estos elementos, de modo que a la vez que se obtengan buena calidad en las ortofotos se tenga la seguridad que no se encontrará incidentes durante el vuelo que puedan dañar los equipos. La rapidez con la que se ensamble el sistema determina cuantos vuelos sobre algún cultivo se podrán obtener en un tiempo determinado. En la Figura 72 se puede observar este sistema ensamblado.

Figura 72

Adaptación de sensor Micasense Altum a dron DJI M300 RTK



Nota. 1. Dron DJI M300 RTK, 2. Sistema estabilizador, 3. Sensor multiespectral Micasense Altum

Prueba de estabilización

Como se mencionó anteriormente se necesita obtener ortogonalidad en la captura de imágenes multiespectrales, que faciliten el procesamiento de éstas y poder formar ortomosaicos, esto es útil dado que el dron se inclina hacia adelante dependiendo de la velocidad de vuelo tal como se observa en la Figura 73. Por ende, el sistema estabilizador corregirá automáticamente este ángulo.

Figura 73

Vuelo de dron M300 RTK con sensor Lidar

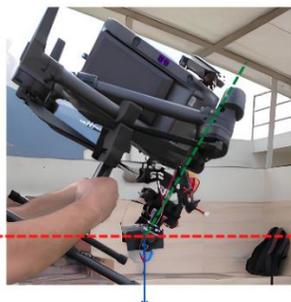


Nota. Tomado de dji.com

En la Figura 74 se simuló la inclinación del dron para comprobar la estabilización por parte del dispositivo.

Figura 74

Corrección de ángulo con sistema estabilizador



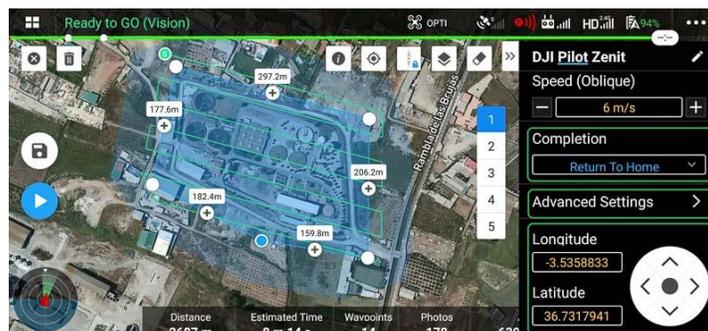
Prueba de vuelo y captura de imágenes multiespectrales

La prueba de vuelo se realizó en la parroquia Yaruquí del cantón Quito provincia de Pichincha, y la captura de imágenes fue sobre el estadio de la parroquia. Para el plan de vuelo se ocupa el mando

predeterminado del dron en el cual viene con el software DJI Pilot 2, como se ve en la Figura 75.

Figura 75

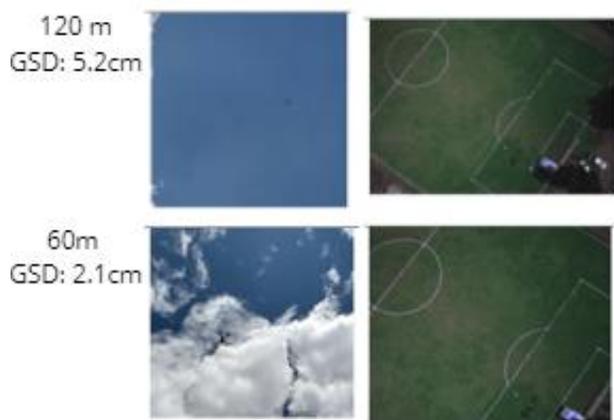
Interfaz de DJI Pilot 2



Una vez energizado el sensor y programado para que realice la captura automática de las imágenes multiespectrales, y energizado el sistema estabilizador, se realizó dos vuelos a diferentes alturas comprobando que la resolución de la imagen sea la mejor y a la vez comprobar la seguridad del sistema. Por ende, se realizó las siguientes pruebas detalladas en la Figura 76.

Figura 76

Resultado de prueba de vuelo



En la Tabla 18, se muestra el resumen de las pruebas, y se realizó una valoración cualitativa de los resultados tomando en cuenta la ortogonalidad de captura, nivel de detalle, resolución de la imagen etc., dado que estas características de la imagen determinan que el sistema está funcionando de forma

óptima. Para la valoración del sistema se usó una escala con los siguientes criterios: Malo, Aceptable, Excelente.

Tabla 18

Valoración cualitativa de las imágenes

Muestra	Altura (m)	Valoración	GSD (ground sample distance)
1	120	Aceptable	5.2 cm
2	60	Excelente	2.1 cm

La relación entre el pixel y el tamaño de la imagen que el sensor capta a 60 m es mejor, respecto a la relación que capta a 120 m, por lo que a 60 m se puede observar mayores detalles.

Pruebas de duración de baterías

De las pruebas realizadas para la toma de imágenes se estimó el tiempo de vuelo del dron que para 1,69 ha fue de 30 minutos aproximadamente. Entonces se realizó la medida porcentual de la cantidad de energía que quedaban en las baterías LiPo del dron, del sensor, y del sistema estabilizador. Los detalles de esta prueba se pueden ver en la Tabla 19.

Tabla 19

Gasto energía en las baterías de los elementos del sistema

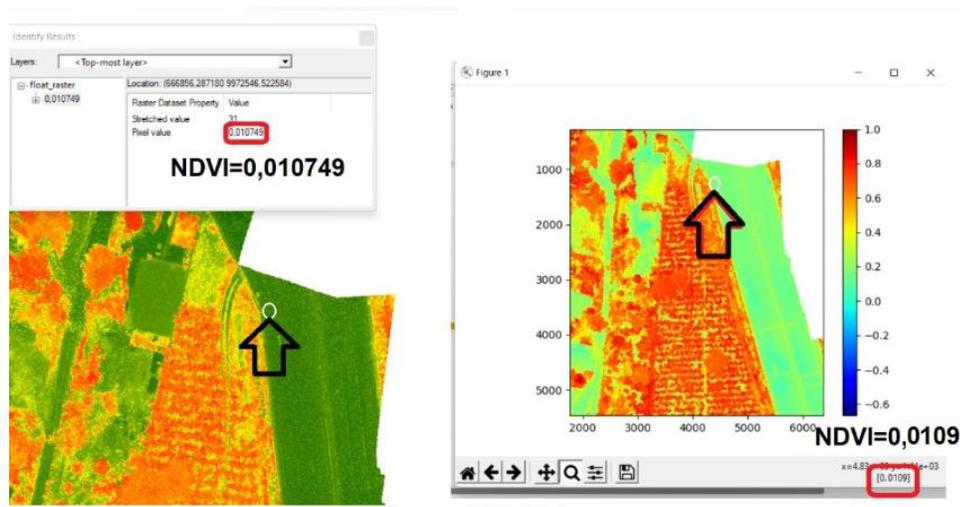
	Baterías de dron	Batería de sensor	Baterías de sistema estabilizador
Tipo de batería	LiPo 12S voltaje 52.8V capacidad 5935 mAh	LiPo 3S Voltaje 11.1V capacidad 950 mAh	LiPo 3S Voltaje 11.1V capacidad 950 mAh
Porcentaje de energía restante después del uso por aprox 30 minutos	48%	35%	35%

Prueba de cálculo del índice NDVI

En la Figura 77 se comprueba el que el cálculo que se realizó por Python es correcto al comprobarlo con el cálculo del NDVI en un software especializado.

Figura 77

Comparación de dos mapas NDVI realizados en distintos softwares



Nota. Software ArcGis, Algoritmo de programación en Python.

Caracterización de MOKO por índice NDVI

Se realizó un total de cuatro vuelos inicialmente con el dron DJI M300 RTK, un vuelo sobre plantación de plátano sin afectación relevante de MOKO, uno vuelo sobre plantación de banano sin afectación relevante de MOKO, un vuelo sobre plantación de plátano con afectación de MOKO, uno vuelo sobre plantación de banano con afectación de MOKO. Luego de las primeras capturas fue necesario sobrevolar luego de un mes las plantaciones de plátano y banano en donde había MOKO con el fin de observar los cambios presentes en estos cultivos con el avance de la enfermedad, en pruebas preliminares se obtuvo buenos resultados a 60 m de altura, por lo que todos los vuelos se realizaron a esta altura. Se realiza un post procesamiento para obtener el ortomosaico de plantación de estudio.

Se realizó el cálculo del NDVI de los cultivos y su representación mediante un histograma del

cultivo, la implementación del histograma se puede ver en la Figura 78. En la Figura 79, se presenta la respuesta espectral por el índice NDVI que se tuvo en la plantación de plátano sano luego de dos vuelos.

En el histograma del NDVI el eje X consiste en los valores NDVI que toman los pixeles que están en un rango de -1 a 1, y el eje Y las frecuencias absolutas que son la cantidad de pixeles que toman un mismo valor de NDVI.

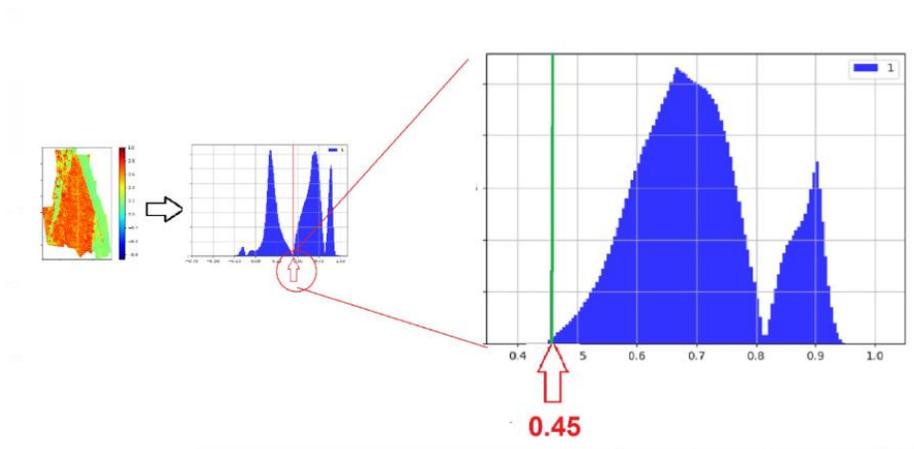
Figura 78

Código para graficar el histograma del NDVI

```
H2=show_hist(NDVI, bins=20, histtype='stepfilled', lw=0.0, stacked=False, alpha=0.8, facecolor='b')
ax2.set_title('Histograma')
```

Figura 79

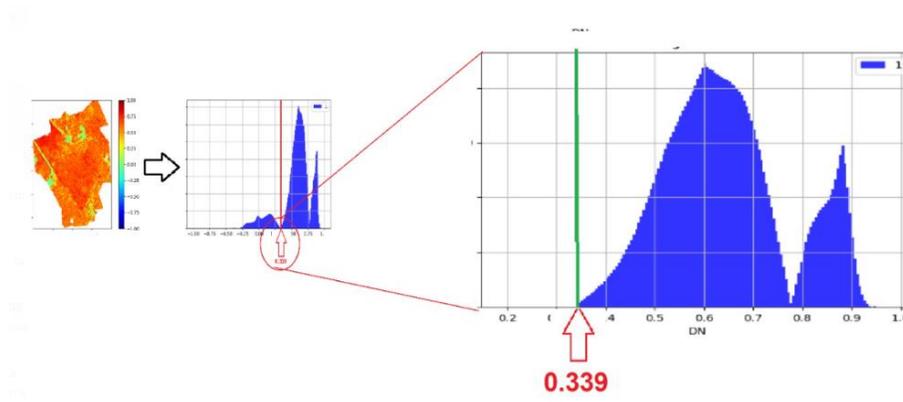
Respuesta espectral de una plantación de plátano sano



En la Figura 80 se presenta la respuesta espectral por el índice NDVI que se tuvo en la plantación de plátano con afectación relevante de MOKO luego de dos vuelos.

Figura 80

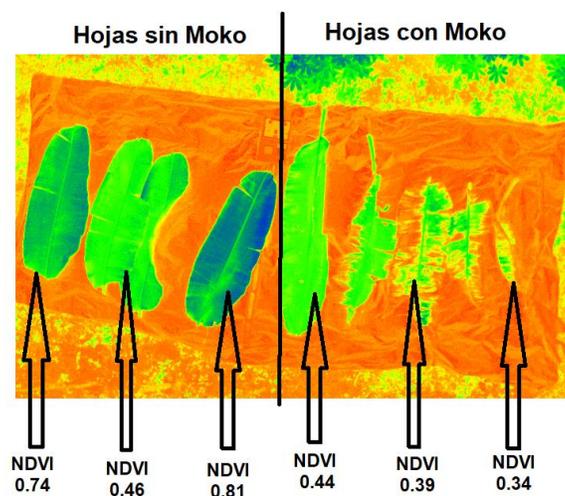
Respuesta espectral de una plantación de plátano con afectación relevante de MOKO



Las muestras indican, como se comportan ambos cultivos en un mapa NDVI, los histogramas muestran la concentración de datos en cierto rango del índice NDVI, los resultados tienen coherencia dado que en plantaciones de plátano sano o sin afectación relevante de MOKO los valores se concentran mayoritariamente en un valor de 0.7, mientras que plantaciones de plátano con afectación relevante de MOKO los valores se concentran mayoritariamente en un valor de 0.6. Otro dato importante y con el cual se realizó el algoritmo de clasificación es el punto en el que inicia la curva característica de una plantación, la plantación sana el valor es 0.45, y en la plantación con afectación el valor es de 0.339, entonces en este intervalo se presume se localiza las regiones con afectación de Moko, este rango se comprueba con otra toma independiente de valores de NDVI, comparando las hojas con y sin Moko como se observa en la Figura 81. Adicional los histogramas muestran concentraciones de datos en 0 de valores de NDVI, los cuales corresponden a suelo, nubes, vegetación sin interés, techos, etc.

Figura 81

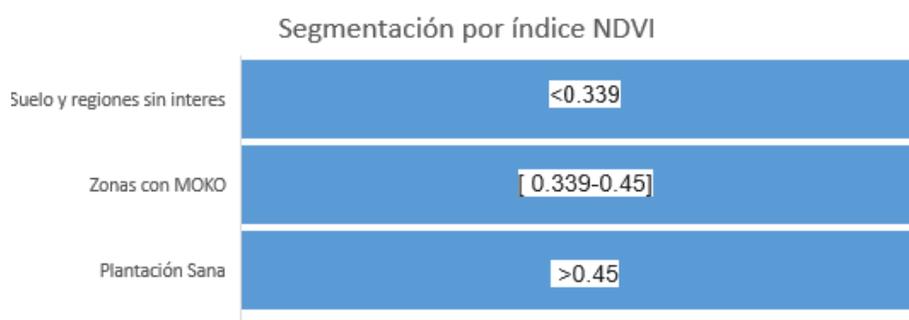
Comparación de NDVI en las hojas



En la Figura 82, se muestra una representación de segmentación por NDVI para la detección temprana de MOKO en plantaciones.

Figura 82

Segmentación por NDVI



Prueba algoritmo de clasificación para la detección temprana de MOKO en plantaciones

Se realizó una prueba del sistema de monitoreo sobre una quinta plantación ubicada en el sector El Porvenir, con la ayuda de un especialista y tomando en cuenta las recomendaciones del Plan de acción para el control de Moko donde menciona que una vez identificada la presencia de Moko, se debe delimitar 10 metros alrededor de la planta afectada y evitar el acceso y movilización de las personas en

la zona por lo que es muy complicado tomar varias muestras en una plantación con Moko.

Se identifica las plantas que presentan síntomas visuales de afectación de MOKO, además para una mejor ubicación de las plantas con afectación se tomó las coordenadas respecto a un punto para luego ser colocadas en el ortomosaico del cultivo como se muestra en la Figura 83, y poder así comparar con el sistema. Se obtuvo la muestra de 13 plantas con afectación de MOKO. Los detalles de las plantas observadas se detallan en la Tabla 20.

Figura 83

Ortomosaico con la ubicación GPS de las plantas con Moko



Tabla 20

Datos de plantas con afectación de MOKO

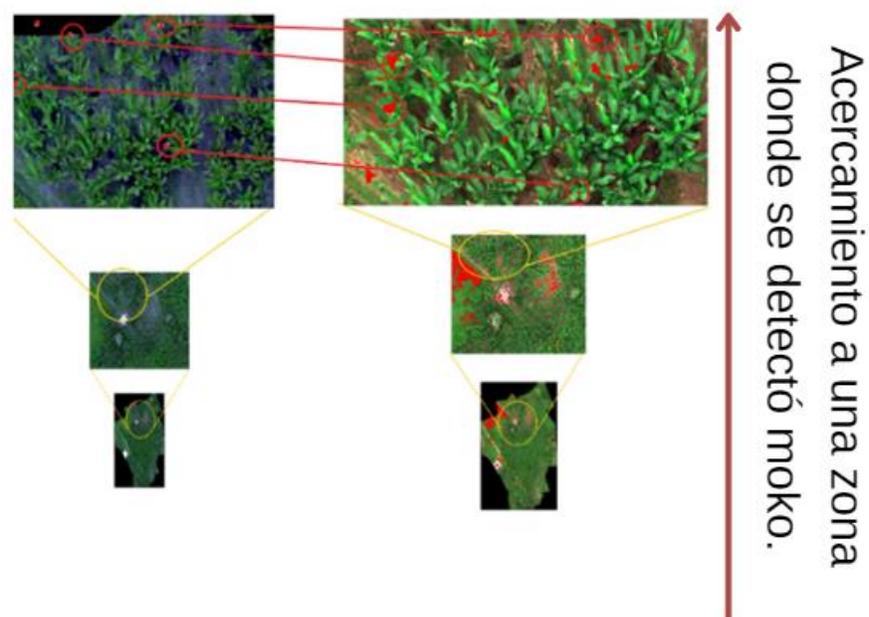
MUESTRA	ESTE	NORTE
1	664311	9961053
2	664306	9961054
3	664329	9961062
4	664340	9961070
5	664321	9961046

MUESTRA	ESTE	NORTE
6	664271	9961052
7	664265	9961050
8	664257	9961085
9	664259	9961094
10	664264	9961093
11	664265	9961100
12	664277	9961096
13	664280	9961079

En la Figura 84, se presenta la respuesta que se obtuvo del sistema de monitoreo.

Figura 84

Respuesta del sistema de monitoreo ante presencia de MOKO

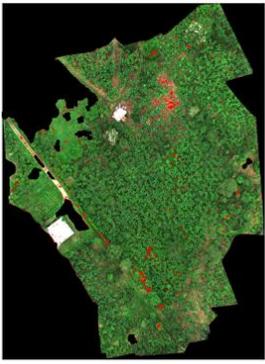
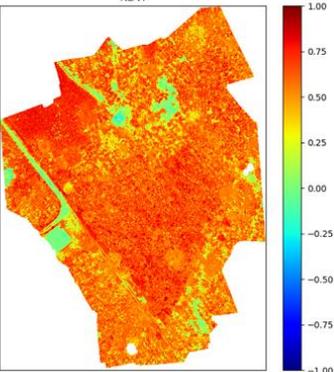
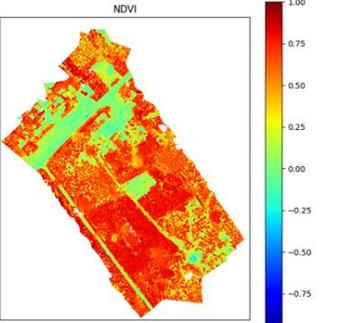
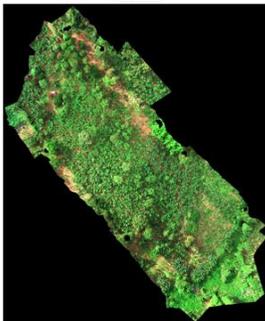
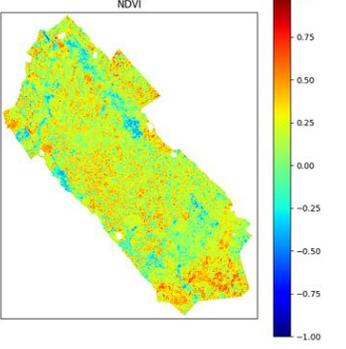


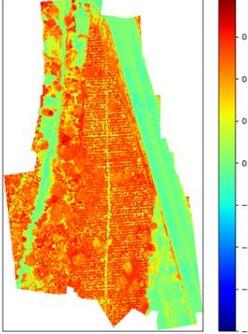
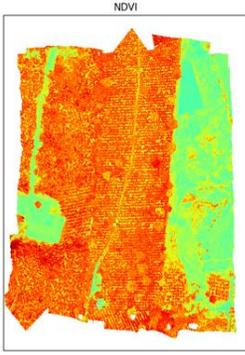
El sistema muestra alta sensibilidad en la detección de zonas que se alejen del valor característico de un cultivo de plátano o banano que se encuentra en buenas condiciones y sin afectación de Moko.

Pruebas del sistema de monitoreo

Tabla 21

Respuesta del sistema de monitoreo

Resultados de monitoreo en mapa RGB del cultivo	Mapa NDVI del cultivo	Descripción
		<p>Se observa en el mapa RGB de la plantación zonas donde el sistema detecta Moko, representado por la colorización de zonas rojas.</p>
		<p>Se observa en el mapa RGB de la plantación zonas donde el sistema detecta Moko, representado por la colorización de zonas rojas.</p>
		<p>Se observa que en esta plantación no hay presencia de Moko. Pues no se muestra zonas rojas en el mapa RGB.</p>

Resultados de monitoreo en mapa RGB del cultivo	Mapa NDVI del cultivo	Descripción
		<p>Se observa que en esta plantación no hay presencia de Moko. Pues no se muestran zonas rojas.</p>
		<p>Se observa que en esta plantación no hay presencia de Moko. Pues no se muestran zonas rojas.</p>

Validación de la Hipótesis

Para la validación de hipótesis se aplicó el método estadístico del chi-cuadrado mediante la aplicación de pruebas de bondad y ajuste para poder determinar si se acepta o se rechaza la hipótesis planteada. Tomando como referencia la hipótesis planteada en el presente proyecto.

¿El diseño e implementación de un sistema de monitoreo en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales ayudará o permitirá la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*)?

Planteamiento de la hipótesis

Ho= El diseño e implementación de un sistema de monitoreo en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales ayudará o permitirá la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*).

Hi= El diseño e implementación de un sistema de monitoreo en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales no ayudará ni permitirá la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*).

Cálculo del Chi-cuadrado

En la Tabla 22, se observa 41 muestras obtenidas de la plantación de prueba en la cual se realizó una caracterización por índice de vegetación normalizado NDVI como se observa en la Figura 80, mediante la aplicación del algoritmo de desarrollado en Python. Estas muestras fueron comparadas con los valores obtenidos en el software especializado para la visualización de ortomosaico, estos valores han permitido calcular el Chi-cuadrado.

Para la obtención de valores de frecuencia observada y frecuencia esperada, se procedió a tomar como muestras los valores de NDVI que se encuentren en el rango de caracterización como se observa en la Figura 82, estos datos se pueden observar en el Anexo del trabajo.

Tabla 22

Cálculo de Chi-cuadrado

# Muestras	Frecuencia observada en algoritmo de detección de Moko en plantaciones (NDVI)	Frecuencia esperada en software ArcGis (NDVI)	$\chi^2 = \sum \frac{(fo - ft)^2}{ft}$
1	0,41	0,34	0,0131690
2	0,43	0,33	0,0294276
3	0,42	0,38	0,0029945
4	0,42	0,34	0,0172782

# Muestras	Frecuencia observada en algoritmo de detección de Moko en plantaciones (NDVI)	Frecuencia esperada en software ArcGis (NDVI)	$\chi^2 = \sum \frac{(f_o - f_t)^2}{f_t}$
5	0,38	0,36	0,0013139
6	0,44	0,34	0,0290291
7	0,34	0,25	0,0324595
8	0,42	0,38	0,0031042
9	0,41	0,37	0,0054268
10	0,36	0,36	0,0000582
11	0,38	0,37	0,0001872
12	0,45	0,34	0,0348881
13	0,37	0,34	0,0019512
14	0,43	0,35	0,0185632
15	0,34	0,24	0,0451134
16	0,42	0,39	0,0018433
17	0,44	0,35	0,0260246
18	0,42	0,40	0,0007373
19	0,38	0,36	0,0007273
20	0,35	0,31	0,0054298
21	0,39	0,37	0,0011997
22	0,44	0,34	0,0246264
23	0,37	0,32	0,0093715
24	0,35	0,20	0,0972544
25	0,34	0,33	0,0002334
26	0,36	0,31	0,0080030
27	0,34	0,22	0,0723426
28	0,39	0,35	0,0040921
29	0,37	0,26	0,0481988
30	0,42	0,35	0,0113446
31	0,43	0,40	0,0022477
32	0,36	0,33	0,0031374

# Muestras	Frecuencia observada en algoritmo de detección de Moko en plantaciones (NDVI)	Frecuencia esperada en software ArcGis (NDVI)	$\chi^2 = \sum \frac{(f_o - f_t)^2}{f_t}$
33	0,38	0,23	0,0957865
34	0,38	0,31	0,0158595
35	0,42	0,35	0,0132468
36	0,37	0,33	0,0051389
37	0,38	0,24	0,0768790
38	0,35	0,22	0,0832876
39	0,34	0,18	0,1338859
40	0,34	0,38	0,0040809
41	0,35	0,29	0,0102423
		Total	0,99

Figura 85

Distribución Chi cuadrado χ^2

	0,001	0,005	0,01	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	χ^2	0,40
g.d.l																g.d.l
1	10,828	7,879	6,635	5,412	5,024	4,709	4,218	3,841	2,706	2,072	1,642	1,323	1,074	0,873	0,708	1
2	13,816	10,597	9,210	7,824	7,378	7,013	6,438	5,991	4,605	3,794	3,219	2,773	2,408	2,100	1,833	2
3	16,266	12,838	11,345	9,837	9,348	8,947	8,311	7,815	6,251	5,317	4,642	4,108	3,665	3,283	2,946	3
4	18,467	14,860	13,277	11,668	11,143	10,712	10,026	9,488	7,779	6,745	5,989	5,385	4,878	4,438	4,045	4
5	20,515	16,750	15,086	13,388	12,833	12,375	11,644	11,070	9,236	8,115	7,289	6,626	6,064	5,573	5,132	5
6	22,458	18,548	16,812	15,033	14,449	13,968	13,198	12,592	10,645	9,446	8,558	7,841	7,231	6,695	6,211	6
7	24,322	20,278	18,475	16,622	16,013	15,509	14,703	14,067	12,017	10,748	9,803	9,037	8,383	7,806	7,283	7
8	26,124	21,955	20,090	18,168	17,535	17,010	16,171	15,507	13,362	12,027	11,030	10,219	9,524	8,909	8,351	8
9	27,877	23,589	21,666	19,679	19,023	18,480	17,608	16,919	14,684	13,288	12,242	11,389	10,656	10,006	9,414	9
10	29,588	25,188	23,209	21,161	20,483	19,922	19,021	18,307	15,987	14,534	13,442	12,549	11,781	11,097	10,473	10
11	31,264	26,757	24,725	22,618	21,920	21,342	20,412	19,675	17,275	15,767	14,631	13,701	12,899	12,184	11,530	11
12	32,909	28,300	26,217	24,054	23,337	22,742	21,785	21,026	18,549	16,989	15,812	14,845	14,011	13,266	12,584	12
13	34,528	29,819	27,688	25,472	24,736	24,125	23,142	22,362	19,812	18,202	16,985	15,984	15,119	14,345	13,636	13
14	36,123	31,319	29,141	26,873	26,119	25,493	24,485	23,685	21,064	19,406	18,151	17,117	16,222	15,421	14,685	14
15	37,697	32,801	30,578	28,259	27,488	26,848	25,816	24,996	22,307	20,603	19,311	18,245	17,322	16,494	15,733	15
16	39,252	34,267	32,000	29,633	28,845	28,191	27,136	26,296	23,542	21,793	20,465	19,369	18,418	17,565	16,780	16
17	40,790	35,718	33,409	30,995	30,191	29,523	28,445	27,587	24,769	22,977	21,615	20,489	19,511	18,633	17,824	17
18	42,312	37,156	34,805	32,346	31,526	30,845	29,745	28,869	25,989	24,155	22,760	21,605	20,601	19,699	18,868	18
19	43,820	38,582	36,191	33,687	32,852	32,158	31,037	30,144	27,204	25,329	23,900	22,718	21,689	20,764	19,910	19
20	45,315	39,997	37,566	35,020	34,170	33,462	32,321	31,410	28,412	26,498	25,038	23,828	22,775	21,826	20,951	20
21	46,797	41,401	38,932	36,343	35,479	34,759	33,597	32,671	29,615	27,662	26,171	24,935	23,858	22,888	21,991	21
22	48,268	42,796	40,289	37,659	36,781	36,049	34,867	33,924	30,813	28,822	27,301	26,039	24,939	23,947	23,031	22
23	49,728	44,181	41,638	38,968	38,076	37,332	36,131	35,172	32,007	29,979	28,429	27,141	26,018	25,006	24,069	23
24	51,179	45,559	42,980	40,270	39,364	38,609	37,389	36,415	33,196	31,132	29,553	28,241	27,096	26,063	25,106	24
25	52,620	46,928	44,314	41,566	40,646	39,880	38,642	37,652	34,382	32,282	30,675	29,339	28,172	27,118	26,143	25
26	54,052	48,290	45,642	42,856	41,923	41,146	39,889	38,885	35,563	33,429	31,795	30,435	29,246	28,173	27,179	26
27	55,476	49,645	46,963	44,140	43,195	42,407	41,132	40,113	36,741	34,574	32,912	31,528	30,319	29,227	28,214	27
28	56,892	50,993	48,278	45,419	44,461	43,662	42,370	41,337	37,916	35,715	34,027	32,620	31,391	30,279	29,249	28
29	58,301	52,336	49,588	46,693	45,722	44,913	43,604	42,557	39,087	36,854	35,139	33,711	32,461	31,331	30,283	29
30	59,703	53,672	50,892	47,962	46,979	46,160	44,834	43,773	40,256	37,990	36,250	34,800	33,530	32,382	31,316	30
31	61,098	55,003	52,191	49,226	48,232	47,402	46,059	44,985	41,422	39,124	37,359	35,887	34,598	33,431	32,349	31
32	62,487	56,328	53,486	50,487	49,480	48,641	47,282	46,194	42,585	40,256	38,466	36,973	35,665	34,480	33,381	32
33	63,870	57,648	54,776	51,743	50,725	49,876	48,500	47,400	43,745	41,386	39,572	38,058	36,731	35,529	34,413	33
34	65,247	58,964	56,061	52,995	51,966	51,107	49,716	48,602	44,903	42,514	40,676	39,141	37,795	36,576	35,444	34
35	66,619	60,275	57,342	54,244	53,203	52,335	50,928	49,802	46,059	43,640	41,778	40,223	38,859	37,623	36,475	35
40	73,402	66,766	63,691	60,436	59,342	58,428	56,946	55,758	51,805	49,244	47,269	45,616	44,165	42,848	41,622	40
60	99,607	91,952	88,579	84,580	83,298	82,225	80,882	79,682	74,997	71,341	68,972	66,981	65,227	63,628	62,155	60

Para el cálculo de los grados de libertad se tiene un nivel de confianza del $\alpha = 0,05$ y sabiendo que la muestra es $n=41$ se obtiene que los grados de libertad $gdl=40$.

Teniendo los grados de libertad y con el nivel de confianza se procede a buscar el valor correspondiente de Chi cuadrado crítico en la Figura 85.

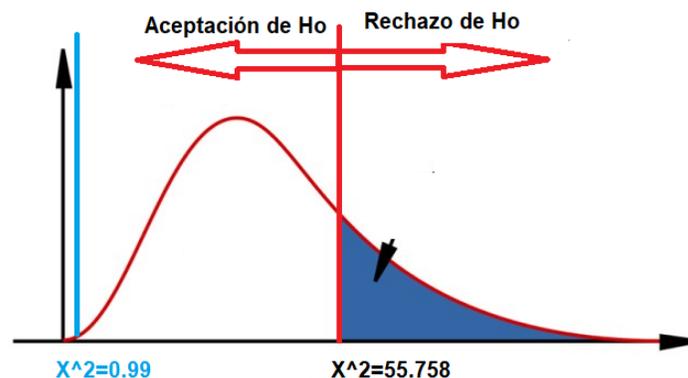
De la Figura 85, se obtiene que para un nivel de confianza de 0.05 y siendo los grados de libertad 40 el valor de chi cuadrado critico es $=55.758$.

Áreas de aceptación y rechazo de la hipótesis H_0

Por la Figura 86 se determina que el valor de $\chi^2=0.99$ está muy próximo a 0 por lo que existe concordancia casi perfecta entre las frecuencias observadas y las esperadas, además que el valor de $\chi^2=0.99$ se encuentra en la zona de aceptación de la hipótesis ,concluyendo que con un nivel de confianza del 95% el diseño e implementación de un sistema de monitoreo en cultivos de banano y plátano mediante el procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales ayudará o permitirá la detección temprana de MOKO (*Ralstonia solanacearum*) en las plantaciones.

Figura 86

Pruebas de hipótesis mediante Chi cuadrado



Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se obtuvieron un conjunto de ortomosaicos de 5 plantaciones de plátano y banano a partir del post procesamiento de imágenes multiespectrales aéreas capturadas a 60 m de altura con un sensor multiespectral Micasense Altum acoplado mediante un estabilizador a un dron DJI M300 RTK. Con el desarrollo de líneas de código en Python se usó estos ortomosaicos para la caracterización espectral de cultivos sanos y cultivos con afectación de MOKO a partir del cálculo del índice NDVI, obteniendo valores que diferencian a los cultivos de plátano y banano sanos de los cultivos de plátano y banano con afectación relevante. Con dicha diferenciación se puso a prueba en una plantación de plátano un algoritmo que clasifica zonas de cultivos que presenten afectaciones de MOKO obteniendo un mapa del cultivo en el que se visualiza un promedio de acierto del 80% con respecto a la detección de 13 muestras de plantas con MOKO.

El uso de un estabilizador para acoplar el sensor multiespectral Micasense Altum al dron DJI M300 RTK resultó ser beneficioso dadas las condiciones en que debían realizarse las capturas de imágenes multiespectrales, logrando la ortogonalidad requerida para un eficiente procesado de los datos, habiendo perdidas de datos por debajo del 5%.

Se desarrolló un algoritmo de clasificación de imágenes por segmentación a partir del índice NDVI, con el cual se filtran regiones de un ortomosaico que alteren nuestros resultados, como suelo, nubes, vegetación sin interés, techos, etc. Además, con la aplicación correcta se pudo filtrar zonas con afectación de MOKO en cultivos de plátano y banano.

Los resultados obtenidos se muestran en un mapa RGB de la plantación de análisis en el cual se

muestran zonas en color rojo que representan las zonas con afectación de MOKO, además se muestra el mapa NDVI con una gama de colores que muestran con exactitud el estado del cultivo en una representación adecuada y práctica para su entendimiento.

En los resultados espectrales la diferencia entre un cultivo de plátano y banano sano de un cultivo de plátano y banano enfermo de MOKO radicó en que los datos de los cultivos que presentan síntomas de MOKO se aglomeran en una región cerca de 0.3 en la escala del NDVI, mientras los datos de cultivos sanos se aglomeran en una región cerca de 0.6 en la escala del NDVI.

El algoritmo de clasificación es útil para la detección temprana de Moko en plantaciones de plátano y banano, logrando identificar plantas con síntomas de Moko en áreas de hasta 3 hectáreas.

Recomendaciones

Para el acceso a las plantaciones que se presumen estar infectadas con Moko es recomendable realizarlo con una persona calificada y tomando en todas las medidas de seguridad pertinentes, como se menciona en el Plan de acción para el control de Moko.

Tomar en cuenta que, en la captura de imágenes, existirán muchas muestras que no proporcionan datos, por lo que se recomienda, el análisis previo de la información para poder discriminar en primera instancia áreas de estudio que no aportan datos, y de esta manera reducir los tiempos de postprocesamiento.

Se recomienda analizar la sintomatología de afectación de MOKO utilizando otras tecnologías, como lo son curvas espectrales obtenidas de un dispositivo que se pueda tomar medidas directamente desde en las hojas. Para mejorar la respuesta de un sistema ante la presencia de la enfermedad

Se recomienda tomar todas las consideraciones posibles antes del diseño de dispositivos que acoplen, salvaguarden y/o estabilicen sensores a vehículos aéreos, dado que por la costosa cantidad de dinero de estos equipos se sobrepone la seguridad de estos, sobre el cumplimiento de ciertos factores de diseño.

Bibliografía

- Sotomayor Herrera, I. A., Bustamante González, A. J., & Delgado Arce, R. (2014). Conozca y evite la enfermedad del Moko de las Musáceas. *INIAP*, 2.
- ¿Cuál es la diferencia entre Plátano y Banano? (16 de Enero de 2016). bananotecnia:
<http://www.bananotecnia.com/articulos/cual-es-la-diferencia-entre-platano-y-banana/#:~:text=En%20M%C3%A9xico%20se%20le%20conoce,y%20E2%80%9Ccambur%20%9D%20en%20Venezuela.>
- Agisoft. (2016). <https://www.agisoft.com/>
- Agrios, G. (1997). *Plant Pathology*. San Diego: USA: Academic Press.
- AGROCALIDAD. (15 de Octubre de 2015). *Ministerio de agricultura y ganaderia*. Plan de acción para el control de *Ralstonia solanacearum* Raza 2:
<https://aportecivico.gobiernoelectronico.gob.ec/system/documents/attachments/000/000/067/original/8ef3c2a34a1e9ce32d61a0d5ab9a948768080335.pdf>
- AGROCALIDAD. (2017). *PROGRAMA DE CERTIFICACIÓN, SEGUIMIENTO Y RECERTIFICACIÓN DE UNIDADES DE PRODUCCIÓN EN BUENAS PRÁCTICAS AGROPECUARIAS A NIVEL NACIONAL*.
- Aguirre. (2019). *PROCESAMIENTO DE IMÁGENES* .
http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12112/fichero/Documento_por_capitulos%252F3_Cap%C3%ADtulo_3.pdf
- Álvarez, J. (2015). Current Status of Moko Disease and the Caribbean, and Options for managing Them. *Centro Internacional de Agricultura Tropical*.
- ArcGIS. (s.f.). *Generar un ortomosaico usando el asistente Ortomosaico*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/generate-an-orthomosaics-using-the-orthomosaic-wizard.htm#:~:text=Un%20ortomosaico%20es%20un%20producto,un%20dataset%20de%20mo>

saico%20continuo.

AUGURA. (2009). *Identificación y manejo integrado de PLAGAS en Banano y Plátano Magdalena y Urabá*

Colombia. Medellín.

Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2009). Vehículos

aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Grupo de Robótica Y Cibernética*

Universidad Politécnica de Madrid, 1-29.

Belalcázar, S., Rosales, F., & Pocasangre, L. (2004). El "Moko" del Plátano y Banano y. *XVI Reunión*

Internacional ACORBAT, 16-35.

Buddenhagen, I. (1986). *Bacterial wilt disease in Asia and the South Pacific*. Los Baños: Persley GJ.

Cabañas, M. (2005). *Tratado de Botánica Morfológica y Sistemática*.

CAMAE. (15 de Octubre de 2019). [http://www.camae.org/platano/el-platano-esta-en-mayor-riesgo-por-](http://www.camae.org/platano/el-platano-esta-en-mayor-riesgo-por-moko-bacteriano/)

[moko-bacteriano/](http://www.camae.org/platano/el-platano-esta-en-mayor-riesgo-por-moko-bacteriano/)

Camino, S. A. (2016). *Posicionamiento y eficiencia del banano*,. Ciencia UNEMI.

Castañeda, D., & Espinosa, J. (2005). Comportamiento e impacto de la enfermedad de Moko en la zona

de Urabá (Colombia), en las últimas tres décadas y media y propuesta de un índice de riesgo de

enfermedad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*.

Cedeño, I. A. (22 de enero de 2022). *Gobierno del encuentro*. Gobierno del encuentro:

[https://www.iniap.gob.ec/banano-platano-y-otras-](https://www.iniap.gob.ec/banano-platano-y-otras-musaceas/#:~:text=La%20mayor%20zona%20de%20producci%C3%B3n,14249%20y%2013376%20ha%2C%20respectivamente)

[musaceas/#:~:text=La%20mayor%20zona%20de%20producci%C3%B3n,14249%20y%2013376%](https://www.iniap.gob.ec/banano-platano-y-otras-musaceas/#:~:text=La%20mayor%20zona%20de%20producci%C3%B3n,14249%20y%2013376%20ha%2C%20respectivamente)

[20ha%2C%20respectivamente](https://www.iniap.gob.ec/banano-platano-y-otras-musaceas/#:~:text=La%20mayor%20zona%20de%20producci%C3%B3n,14249%20y%2013376%20ha%2C%20respectivamente)

Chuvienco, E., Martín, P., & Palacios, A. (2010). Assessment of different spectral indices in the red-near-

infrared spectral domain for burned land discrimination. *Revista internacional de teledetección*,

5103-5110.

- Elika. (2013). Drones y su uso en la agricultura. *Fundación Vasca*, 1-4.
- Elphinstone, J. (2005). Bacterial wilt disease and the *Ralstonia solanacearum* species complex. 510.
- EOS. (2020). *NDVI*. Earth observing system: <https://eos.com/es/blog/ndvi-preguntas-frecuentes/#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20de%20Vegetaci%C3%B3n%20de,la%20salud%20de%20la%20vegetaci%C3%B3n.>
- FAO. (2019). *Production/Yield quantities of Bananas in Ecuador*.
- Flórez, C., Hurtado, D., & Sandoval, O. (2015). Procesamiento de imágenes para reconocimiento de daños causados por plagas en el cultivo de *Begonia semperflorens* (flor de azúcar). 273-279.
- Gallo, M. (18 de Octubre de 2019). (Gongora Zambrano, 2019). (E. Productor, Entrevistador)
- García, E., & Flego, F. (s.f.). *Tecnología Agropecuaria*. Agricultura de Precisión: <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- García, 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*.
- Góngora Zambrano, L. (18 de Octubre de 2019). Ecuador: 21 Focos de Moko en plátano son monitoreados por Agrocalidad. (E. Productor, Entrevistador)
- Gonzaga, C. (2014). *Aplicación de índices de vegetación derivadas de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la Provincia de Loja, Ecuador*. La Plata.
- Guzmán, J. (2018). *Utilización de drones para la evaluación de diferentes variables*. XXII International Banana Congress: https://www.researchgate.net/publication/325828549_Utilizacion_de_drones_para_la_evaluacion_de_diferentes_variables_agronicas_en_el_cultivo_de_banano
- INIAP. (s.f.). *Banano, plátano y otras musáceas*. <http://www.iniap.gob.ec/pruebav3/banano-platano-y->

otras-musaceas/

Jenny, C. (2016). *iNaturalistEc*. <https://ecuador.inaturalist.org/taxa/292142-Musa-balbisiana>

Martínez, G., Pargas, R., & Manzanilla, E. (2012). Orden Zingiberales: las musáceas y su relación con plantas afines. *Scielo*, 1-4.

Montesinos, S. (2015). *Aplicaciones operativas de los SARPs en Agricultura. In Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil.*

NASA. (30 de Agosto de 2000). *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*. NASA Earth Observatory:
https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_4.php

Naturalista. (s.f.). <https://www.naturalista.mx/taxa/276927-Musa-paradisiaca>

Noda, K., Ezaki, N., Takizawa, H., Mizuno, S., & Yamamoto, S. (2006). Detection of plant saplessness with image processing. *International Joint Conference SICE–ICASE*, 4856-4860.

Obregón, M. R. (2011). *Supervivencia de Ralstonia solanacearum en suelo y tejido de plantas de banano en Urabá Colombia*. . La Habana: Fitosanidad.

Otero, I., Ezquerro, A., Rodríguez Solano, R., Martín, L., & Bachiller, I. (2008). *Fotogrametría*.

Pacheco, C., & Pozzobon, E. (2011). *Manual de ejercicios de laboratorio. Fotogrametría y fotointerpretación*. Merida: Codepre.

Pérez, J. (2001). *Apuntes de Fotogrametría II*. Centro Universitario de Mérida. Mérida.

Pocasangre, L. (Julio de 2009). *REUNIÓN DE GRUPOS DE INTERÉS SOBRE LOS RIESGOS DE LA RAZA TROPICAL 4 DE FUSARIUM, BBTV Y OTRAS PLAGAS DE MUSÁCEAS PARA LA REGIÓN DEL OIRSA, AMERICA LATINA Y EL CARIBE*. <https://agritrop.cirad.fr/555460/1/ID555460.pdf>

Salazar, L., & Poveda, G. (20). Variabilidad anual e interanual en el escalamiento espacial del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI) en la Amazonía. *Avances en Recursos Hidráulicos*,

87-96.

Selvaraj, M. V. (2019). *AI-powered banana diseases and pest detection. Plant Methods.*

Silva, S., Mello Véras, Gasparotto, L., Pires de Matos, A., Cordeiro, Z., & Boher, B. (2000). Evaluación de Musa spp. para la resistencia a la enfermedad de Moko (*Ralstonia solanacearum*, raza 2). *MusaLit*, 19-20.

Suquilanda, M. (2017). *Manejo agroecológico de plagas. MAGAP:*

<https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/libro/Manejo%20agroecolo%CC%81gico%20de%20plagas%20MSV.pdf>

Sylvester, G. (2018). *E-Agriculture in action: Drones for Agriculture. FAO, 112.*

<https://www.fao.org/documents/card/en/c/l8494EN/>

Thomas, B., & Paris, S. (2005). *CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts. CRC.*

Vargas, E. (2011). *Monitoreo asistido de plantaciones agrícolas: Técnicas de procesamiento digital de imágenes e inteligencia artificial para diagnosticar y controlar la incidencia de la Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis* var *diformis* Morelet) en plantaciones de banan. Alajuela.*

Vásquez, C. (2008). *Moko bacteriano del plátano (*Ralstonia solanacearum*)). Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Colima. México.*

Wiegand, C., Richardson, A., Escobar, D., & Gerbermann, A. (1991). *Vegetation Indices in Crop Assessments. Remote Sensing of Environment.*

Anexos